

INTEGRATION VON BEDARFSORIENTIERTEM
VERKEHR – INSBESONDERE NMS – IN
KLASSISCHE ÖPNV-UNTERNEHMEN

EINE REFERENZ-ENTERPRISE-ARCHITEKTUR-
EMPFEHLUNG

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Mark-Oliver Würtz

geboren am 18.09.1971

in Bremen aus Stuhr

Rostock, 09.02.2026

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00005788

Gutachter der Arbeit

1. Gutachter Professor Doktor Kurt Sandkuhl, Universität Rostock
2. Gutachter Universitäts-Professor Doktor Jan-Fabian Ehmke, Universität Wien

Jahr der Einreichung 2026

Jahr der Verteidigung 2026

Meiner Mutter gewidmet –
deren Geist sich lange schon dem Vergessen neigte,
aber deren Herz mir stets ein Zuhause blieb.

Deine Wärme begleitet mich

Kurzfassung

Neue Mobilitätsdienste (New Mobility Services, NMS) wie Carsharing, Fahrrad- sowie E-Scooter-Verleihsysteme und On-Demand-Fahrdienste haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Sie verändern bereits jetzt, wie Menschen sich in Städten fortbewegen und werden in absehbarer Zeit auch den ÖPNV ländlicher Räume stärken. Diese bedarfsorientierten Verkehrsangebote beeinflussen zunehmend die Aufgaben, Rollen und IT-Landschaften klassischer ÖPNV-Unternehmen. In ihrer gegenwärtigen Form sind die meisten dieser Unternehmen auf einen angebotsorientierten Linienverkehr ausgelegt, was eine strukturelle wie technische Kluft zwischen traditionellen und neuen Mobilitätslogiken schafft.

Vor diesem Hintergrund untersucht diese Dissertation, wie sich NMS systematisch und nachhaltig in klassisch angebotsorientierte deutsche ÖPNV-Unternehmen integrieren lassen. Der Forschungsbeitrag liegt in der Entwicklung eines domänenspezifischen Enterprise-Architekturmodells, das als Referenzlösung für Verkehrsunternehmen dienen kann. Es baut auf bestehende Branchenstandards wie dem ITVU-Modell und VDV-Architekturelemente auf und ergänzt diese um neue Komponenten für Plattformintegration, Prozesskopplung, Tarifmanagement und digitale Dienste.

Das Forschungsvorhaben folgt dem Ansatz der Design Science Research (DSR). Das Architekturmodell wurde iterativ entwickelt und in einer Evaluation mit neun Episoden mit Experten aus Verkehrsunternehmen, Branchenverbänden und Technologieanbietern validiert. Das Ergebnis ist ein strategisch und technisch integriertes Modell, das klassische und bedarfsorientierte Mobilitätsformen, insbesondere NMS, verbindet.

Das Architekturmodell ist sowohl theoretisch als auch praktisch ein Beitrag zur Weiterentwicklung domänenspezifischer Enterprise-Architekturen (EA) im Mobilitätssektor. Es schafft eine konzeptionelle und methodische Grundlage für die digitale Transformation von Verkehrsunternehmen und zeigt konkrete Wege auf, wie sich NMS in bestehende IT-, Prozess- und Governance-Strukturen integrieren lassen.

Schlagwörter: Enterprise Architecture (EA), New Mobility Services (NMS), Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV), Design Science Research (DSR), Referenzarchitektur (REA), Digitale Mobilitätsintegration, Plattformökosysteme, Intermodale Verkehrsangebote, ITVU-Branchenmodell, Domänenspezifische EA

Abstract

New mobility services (NMS) such as car sharing, bicycle and e-scooter rental systems, and on-demand transport services have become increasingly important in recent years. They are already changing the way people move around cities and will also strengthen public transport in rural areas in the foreseeable future. These demand-oriented transport services are increasingly influencing the tasks, roles, and IT landscapes of traditional public transport companies. In their current form, most of these companies are designed for supply-oriented scheduled services, which creates a structural and technical divide between traditional and new mobility logics.

Against this backdrop, this dissertation examines how NMS can be systematically and sustainably integrated into traditional supply-oriented German public transport companies. The research contribution lies in the development of a domain-specific enterprise architecture model that can serve as a reference solution for transport companies. It builds on existing industry standards such as the ITVU model and VDV architecture elements and supplements them with new components for platform integration, process coupling, fare management, and digital services.

The research project follows the Design Science Research (DSR) approach. The architecture model was developed iteratively and validated in an evaluation with nine episodes involving experts from transport companies, industry associations, and technology providers. The result is a strategically and technically integrated model that combines traditional and demand-oriented forms of mobility, in particular NMS.

The architecture model contributes both theoretically and practically to the further development of domain-specific enterprise architectures in the mobility sector. It creates a conceptual and methodological basis for the digital transformation of transport companies and shows concrete ways in which NMS can be integrated into existing IT, process, and governance structures.

Keywords: Enterprise Architecture (EA), New Mobility Services (NMS), Public Transport (PT), Design Science Research (DSR), Reference Architecture Model, Digital Mobility Integration, Platform Ecosystems, Intermodal Transport Services, ITVU Industry Model, Domain-Specific EA

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Danksagung.....	XVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Forschungskontext	2
1.2 Problemstellung und Forschungsfrage	4
1.3 Beiträge zur Wissensbasis	9
1.4 Veröffentlichungen im Kontext dieser Forschungsarbeit	10
1.5 Aufbau der Dissertation	11
2 Methodische Grundlagen.....	13
2.1 Gestaltungsorientierte Forschung	13
2.2 Forschungsmethodik	18
2.3 Design Science Research	20
2.4 Systematische Literaturanalyse	21
2.4.1 Allgemeiner Rahmen und Zielsetzung	21
2.4.2 Vorgehen nach Kitchenham et al.	22
2.5 Methodenmix und forschungslogische Verortung	23
2.6 Vorgehensmodell und Iterationen	24
2.7 Empirische Methoden.....	24
2.7.1 Experteninterviews	25
2.7.2 Qualitative Inhaltsanalyse.....	25
2.7.3 Fallstudie	26
2.7.4 Argumentativ-deduktives Vorgehen.....	26
2.7.5 Argumentativ-induktives Vorgehen	26
2.8 Evaluationsdesign (FEDS) und Gütekriterien	27
2.8.1 Zielsetzung und Prinzipien	27
2.8.2 FEDS-Rahmen	27
2.8.3 Evaluationsstrategie und Episoden.....	27
2.8.4 Bezugsrahmen zur Ableitung der Gütekriterien	28
2.8.5 Traceability und Dokumentation	28
2.8.6 Operationalisierte Gütekriterien dieser Forschungsarbeit	29

2.9	Szenario-Analyse	29
2.9.1	Grundbegriffe	30
2.9.2	Vorgehensmodell (eingesetzte Ausprägung)	30
2.9.3	Analytischer Bezugsrahmen: Die 6 Dimensionen	32
2.9.4	Datenquellen, Rollen, Qualitätssicherung	36
2.9.5	Einbettung in DSR/FEDS und Nachweisführung	36
2.9.6	Deduktiv oder induktiv?	36
2.10	Darstellungs- und Begriffskonventionen der Modelle	36
3	Thematischer Kontext	38
3.1	Enterprise Architectures und ihr Management	38
3.1.1	The Open Group Architecture Framework (TOGAF)	39
3.1.2	ArchiMate: EA-Modellierungsnotation	41
3.2	Referenzarchitekturen im Rahmen dieser Forschung	47
3.2.1	Referenzarchitektur: Begriff und Bedeutung	48
3.2.2	Merkmale und Bestandteile von Referenzarchitekturen	48
3.2.3	Arten von Referenzarchitekturen	49
3.2.4	Nutzen und Herausforderungen von Referenzarchitekturen	49
3.2.5	Bewertung von Referenzarchitekturen	50
3.2.6	Anwendung von Referenzarchitekturen im ÖPNV-Sektor	51
3.2.7	Bedeutung entsprechender Referenzarchitekturen	52
3.3	Ansätze zur Entwicklung einer REA	52
3.3.1	Deduktive Vorgehensweise	52
3.3.2	Induktive Vorgehensweise	53
3.3.3	Hybride und methodisch integrierte Vorgehensweise	53
3.3.4	Einordnung der Vorgehensweisen	53
3.4	Öffentlicher Personennahverkehr	58
3.5	NMS und MaaS	59
4	Literaturanalyse und Forschungsstand	62
4.1	Angewandte Methode	62
4.2	Strukturierte Literaturanalyse	66
4.3	Diskussion der Ergebnisse	75
4.4	Replikation und Aktualisierung der Literaturanalyse	76
4.5	Ergänzende Einschätzung weiterer Datenbanken	85
4.6	Gesamtfazit	87
5	Relevanz und Problemanalyse	89
5.1	Einleitung zur Relevanz	89
5.2	Herausforderungen des klassischen ÖPNV	89
5.2.1	Kapazitäts- und Infrastrukturengpässe	90
5.2.2	Ökonomische und ökologische Restriktionen	90

5.3	Probleme bei der Integration neuer Mobilitätsdienste	91
5.3.1	Technologische Hürden.....	91
5.3.2	Betriebliche Herausforderungen	92
5.3.3	Organisatorische und prozessuale Barrieren.....	95
5.4	Anwendungsrelevanz: Bedeutung von NMS.....	95
5.4.1	Bedarfsgesteuerter Verkehr und Stadtentwicklung	95
5.4.2	Nutzungsverhalten und Kundenanforderungen.....	96
5.5	Fallbeispiel BVG: On-Demand-Ridepooling „BerlKönig“	96
5.5.1	Betriebliche Ausgangslage und Integrationsproblem	97
5.5.2	Resource-Event-Agent-Modell als Lösungsansatz	97
5.6	Szenarien: Integration von NMS im ÖPNV	99
5.7	Fazit der Problemanalyse	101
6	Anforderungen an das Artefakt	104
6.1	ITVU-Branchenmodell	105
6.2	Beiträge aus nicht-wissenschaftlichem Bereich	107
6.2.1	Beiträge des VDV	107
6.2.2	Nicht-VDV-Beiträge zur Integration von NMS	109
6.3	BerlKönig – Beitrag zur Ausgestaltung der REA	111
6.3.1	Fallstudie BerlKönig	111
6.3.2	Integration des BerlKönig	113
6.4	Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen.....	116
6.5	Szenario-abgeleitete Anforderungen	117
6.6	Schlüsselanforderungen und Szenario-übergreifende Leitplanken	122
7	Design und Umsetzung des Artefakts	124
7.1	Struktur der REA: Variabilitäts- und Traceability-Konzept.....	124
7.1.1	Variabilität und Verantwortungsmodell	126
7.1.2	Traceability über Domänen und Prozesse	133
7.1.3	Integrations- und Sicherheitsleitbild	135
7.1.4	Semantik, Daten- und Ereignismodelle (DP-basiert).....	139
7.1.5	Strategisch-motivatorischer vs. operativer Bereich	141
7.1.6	Strategisch-motivatorischer Architekturbereich.....	143
7.1.7	Operative Architekturbereich	144
7.1.8	Verbindung zwischen strategischen und operativen Ebenen	145
7.1.9	Zusammenfassung.....	145
7.2	Variantenkatalog der REA	146
7.2.1	Metamodell des Variantenkatalogs.....	147
7.2.2	Struktur des Variantenkatalogs (prozessbezogene VPs)	147
7.2.3	Technologische und integrative Variationspunkte (cross cutting).....	149
7.2.4	Organisations- und Governance-Variationspunkte	149
7.2.5	Referenz-Konfigurationen je Szenario (Auszug)	149
7.2.6	Konsistenz und Abhängigkeitsregeln (Cross Tree Constraints)	150
7.2.7	Nachweise, KPIs und Evaluationseinbettung.....	150

7.2.8	Umsetzungshilfen und Artefakt-Bezüge	150
7.2.9	Muster-VP-Steckbrief (Beispiel)	151
7.2.10	Zusammenfassung	151
7.3	Delta-Sichten und Leitplanken	152
7.3.1	Vorgehenskonzept und Darstellungsprinzipien	152
7.3.2	Bestandteile einer Delta-Sicht (Inhaltselemente)	152
7.3.3	Delta-Sicht S3 ↔ S4 – differenzielle Ausprägungen je Prozess	153
7.3.4	Delta-Sicht S3 ↔ S4 – System-, Daten- und Integrationsunterschiede	155
7.3.5	Delta-Sicht S3 ↔ S4 – Finance/Clearing, Recht und Organisation	155
7.3.6	KPIs und Qualitätsnachweis in Delta-Sichten	156
7.3.7	Nutzung in Entwurf, Variantenbildung und Evaluation	156
7.3.8	Zusammenfassung	157
7.4	Erste Architekturversion	157
7.4.1	Strategische Betrachtung der EA	157
7.4.2	Betrachtung der Geschäfts- und Anwendungsebene	159
7.4.3	Unterstützung der strategisch-motivatorischen Ebene	161
7.5	Vorgehensweise zur Erstellung der REA	162
7.5.1	Zielsetzung und methodischer Rahmen	163
7.5.2	Instanzierte methodische Einordnung	163
7.5.3	Ableitung der Entwurfsziele und Anforderungen	167
7.5.4	Architekturprinzipien, Domänenzuschnitt und Sichten	167
7.5.5	Iterativer Entwurf: Build-Schleifen mit formativer Evaluation	168
7.5.6	Modellierungstaktik je Ebene	168
7.5.7	Qualitätssicherung und Traceability	168
7.5.8	Ergebnisintegration und Artefaktversionierung	169
7.5.9	Dokumentation, Kommunikation und Replizierbarkeit	169
8	Evaluation der entwickelten Architektur	170
8.1	Gestaltung der Evaluation	170
8.1.1	Ziele der Evaluation	171
8.1.2	Strategie zur Evaluation des Artefakts	173
8.1.3	Eigenschaften der Evaluation	174
8.1.4	Vorstellung der Evaluationsepisoden	176
8.2	Evaluationsepisoden	178
8.2.1	Episode I: Architektur Check I	178
8.2.2	Episode II: BSAG	183
8.2.3	Episode III: Stadtwerke München	190
8.2.4	Episode IV: Architektur Check II	193
8.2.5	Episode V: VDV-Tagung in Rostock	194
8.2.6	Episode VI: VDV-Experten	196
8.2.7	Episode VII: Enterprise-Architekt, BVG	198
8.2.8	Episode VIII: Szenario-Analyse	201
8.2.9	Episode IX: Gesamtevaluation Architektur	207
8.3	Ergebnisse der Evaluation	212

9	Merkmale der Referenz-Enterprise-Architektur.....	218
9.1	Ergebnisse der Evaluationsepisoden I–VII	219
9.1.1	Strategische Ebene	219
9.1.2	Geschäfts- und Anwendungsebene.....	220
9.1.3	Planung und Einsatz von Ressourcen	222
9.1.4	Tarif- und Produktgestaltung	225
9.1.5	Betriebslenkung.....	226
9.1.6	Vertrieb	227
9.1.7	Strategie am Beispiel der Verkehrsplanung.....	228
9.2	Ergebnisse der Evaluationsepisoden VIII und IX (Phase 2).....	229
9.2.1	Rolle der Szenarien und deren Ziel	230
9.2.2	Szenario-abgeleitete Anforderungen und Traceability	231
9.2.3	Ergebnisse der Szenario-Walkthroughs (Episode VIII)	234
9.2.4	Erweiterungen und Delta-Sichten der REA.....	239
9.2.5	Fähigkeitenlandkarte (Capability Map)	250
9.2.6	Zwischenfazit	252
9.3	Konsolidiertes Gesamtmodell der REA.....	254
9.3.1	Zielsetzung, Modellierungsprinzip und Metamodell	255
9.3.2	Strategisch-motivatorische Ebene	257
9.3.3	Capability-Ebene als zentrale Brücke	259
9.3.4	Variantenfähigkeit auf Capability-Ebene (S1–S4).....	260
9.3.5	Operative Umsetzung: Verortung statt Wiederholung	263
9.3.6	Cross-Layer-Traceability: ID-Führung und Evidenzanker	265
9.3.7	Modelle (kanonisch) als beispielhafte Ableitung aus der REA	269
9.3.8	Zwischenfazit	276
9.4	Methodische Fundierung der REA Merkmale	278
9.5	Bedrohungen der Validität und Gegenmaßnahmen.....	278
9.6	Erkenntnisse	279
10	Einordnung und Implikationen der Ergebnisse	282
10.1	Einordnung in den Forschungskontext	282
10.2	Alternativenvergleich im Referenzraum	284
10.3	Validität und Grenzen der entwickelten REA	287
10.4	Erfüllung der Anforderungen und kritische Reflexion	290
10.5	Implikationen für die Praxis von ÖPNV-Unternehmen	293
10.6	Theoretische Beiträge zur Forschung.....	295
11	Abschließende Betrachtung und Ausblick.....	299
11.1	Zentrale Ergebnisse der Arbeit.....	299
11.1.1	Einsatz des Design-Science-Research-Paradigmas.....	300
11.1.2	Praktische Relevanz und Anwendungsmöglichkeiten	302
11.2	Einordnung der Ergebnisse und theoretische Ableitung	304
11.3	Limitationen und Validität der Ergebnisse.....	305

11.3.1 Validität der Ergebnisse.....	307
11.3.2 Threats und Mitigation anhand von Validitätsdimensionen	309
11.4 Ausblick und weitere Forschung und Anwendung	310
Glossar.....	314
Anhang.....	317
Anhang A: Einordnung VDV-Schriften	318
Anhang B: Einordnung Nicht-VDV-Schriften.....	321
Anhang C: Domänen-Prozess-Steckbriefe (DP).....	326
Anhang D: Applikations-Steckbriefe (AP)	329
Anhang E: Datenobjekt-Steckbriefe (DO)	331
Anhang F: Variationspunkt-Steckbriefe (VP)	335
Anhang G: Capability-Steckbriefe (CS)	337
Anhang H: Applikationsdienst-Steckbrief (AS).....	339
Anhang I: Implementation und Migration Sicht (Komponenten)	341
Anhang J: Event-Steckbriefe (EV)	346
Anhang K: Business-Service-Steckbriefe (BS)	350
Anhang L: Business-Rollen-Steckbriefe (BR)	352
Anhang M: Business-Actor-Steckbriefe (BA)	354
Anhang W: Weitere Elemente (Cx, Dx, Gx, PLx, Rx, WPx)	356
Anhang Z: Digitales Zusatzmaterial	357
Literaturverzeichnis	358
Eidesstattliche Erklärung/Statutory Declaration	381

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Taxonomie für Forschungsmethoden.....	14
Abbildung 2: Rahmenkonzept der gestaltungsorientierten Forschung	15
Abbildung 3: Farbkonzept der Architekturmodelle.	37
Abbildung 4: ArchiMate Haupt- und Unterebenen	43
Abbildung 5: NMS und MaaS – eigene Darstellung.....	60
Abbildung 6: Phasen einer strukturierten Literaturanalyse.....	62
Abbildung 7: Schritte zur Exkludierung	66
Abbildung 8: Systeme des ITVU-Branchenmodell	105
Abbildung 9: Profil einer Anwendung im ITVU-Branchenmodells.....	106
Abbildung 10: Integration BerlKönig: Nutzung von Subdienstleistern	112
Abbildung 11: Funktionsblöcke des Vertriebsbereichs am Beispiel BerlKönig	114
Abbildung 12: Zielarchitektur für die Integration [...] des BerlKönig-Services	115
Abbildung 13: Strategisch-motivatorischer Bereich.....	143
Abbildung 14: Geschäfts- und Anwendungsebene	144
Abbildung 15: Operative Elemente ermöglichen die benötigten Fähigkeiten	146
Abbildung 16: Strategische Betrachtung [...] von bedarfsorientiertem Verkehr [...]	158
Abbildung 17: Prozessstruktur des Architekturartefakts.....	159
Abbildung 18: Erste Version der operativen REA	160
Abbildung 19: Verkehrsplanung im Kontext der strategischen Anforderungen.....	162
Abbildung 20: Überarbeitete Version Geschäfts-/Anwendungsarchitektur	186
Abbildung 21: Erste Fassung Capability-Modell	199
Abbildung 22: Evaluationsmatrix	213
Abbildung 23: Prozessdarstellung des ÖPNV-Prozesse.....	218
Abbildung 24: Strategischer Bereich der REA	219
Abbildung 25: Prozessstruktur der Unternehmensreferenzarchitektur	220
Abbildung 26: Operativer Bereich der REA	221
Abbildung 27: Planung und Nutzung von Ressourcen.....	223
Abbildung 28: Tarif- und Produktgestaltung.....	225
Abbildung 29: Betriebsmanagement.....	226
Abbildung 30: Bereiche und Prozesse des Vertriebs	227
Abbildung 31: Verkehrsplanung im Kontext der strategischen Anforderungen.....	229
Abbildung 32: Szenarienraum S1–S4.....	230
Abbildung 33: Transformationspfade zwischen den Szenarien S1–S4	231
Abbildung 34: Anforderungen und Bewertung (Szenario S3).....	232
Abbildung 35: Trennung von Reservierung und Buchung (Szenario S3)	233
Abbildung 36: Integrations-/Broker-Anforderung (Datendrehscheibe).....	234
Abbildung 37: End-to-End-Sicht für repräsentatives Szenario (S3).....	236
Abbildung 38: OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung	237
Abbildung 39: Governance- und Rollensicht.....	238
Abbildung 40: KRITIS-konforme Zonen- und Integrationsarchitektur	238
Abbildung 41: Cross-Layer-Mapping zentraler Anwendungskomponenten	239
Abbildung 42: Implementation und Migration Sicht.....	245
Abbildung 43: Capability Map gruppiert nach Domänen im Zielzustand S4	248
Abbildung 44: Capability Map für Szenario S2 im Vergleich zum Zielzustand S4	250
Abbildung 45: Capability Map für zeitgemäße ÖPNV-Unternehmen	251

Abbildung 46: Evidenzkarte Phase 2 (Episoden VIII & IX).....	253
Abbildung 47: Metamodell der REA.....	257
Abbildung 48: Strategisch-motivatorische Zielarchitektur – normative Leitplanken	259
Abbildung 49: Capability Map der REA im Zielzustand S4 (domänengruppiert)....	260
Abbildung 50: Capability Overlay Szenario S1 (H/M/L) im Vergleich zu S4	261
Abbildung 51: Capability Differenzsicht Szenario S2 im Vergleich zu S4	262
Abbildung 52: Traceability-Backbone – Deliverable-Kette (S4).....	266
Abbildung 53: Kanonisches Datenmodell	270
Abbildung 54: Applikationsmodell zum Datenmodell	272
Abbildung 55: Bebauungsplan der REA (kanonische Betrachtung)	274
Abbildung 56: Evidenzbasierte Nachweisanker der finalen REA (S4).....	277

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Veröffentlichungen	10
Tabelle 2: Kriterien zur Bewertung einer REA	50
Tabelle 3: Bewertungsmatrix zur methodischen Einordnung einer REA	54
Tabelle 4: Aufbau des Suchbegriffs aus Schlüsselwörtern	63
Tabelle 5: Auswertung der Literatur.....	65
Tabelle 6: Ergebnis der Literaturanalyse	69
Tabelle 7: Auswahl aus der analysierten Literatur	74
Tabelle 8: Neu eingeschlossene Kernbeiträge (Scopus 06/2023–11/2025).....	80
Tabelle 9: Überprüfung der SLR in Scopus	86
Tabelle 10: Kurzmatrix: Szenario und Integrationsdimensionen	101
Tabelle 11: Erhebung der Anforderungen.....	104
Tabelle 12: Relevante VDV-Schriften	108
Tabelle 13: Korrespondierende Normen im Überblick	109
Tabelle 14: Funktionale Anforderungen an eine NMS-berücksichtigende EA (A) ..	116
Tabelle 15: Nicht-funktionale Anforderungen an eine [...] EA (B)	117
Tabelle 16: Domäne Planung und Ressourceneinsatz	120
Tabelle 17: Domäne Tarif- und Produktmanagement	121
Tabelle 18: Domäne Betriebslenkung.....	121
Tabelle 19: Domäne Vertrieb.....	122
Tabelle 20: RACI je Prozess und Szenario (S1–S4) inkl. Organisationsträger.....	126
Tabelle 21: Zusammenfassung RACI-Ergebnisse	130
Tabelle 22: Crosswalk DP (Basissicht S4/alle DPs).....	134
Tabelle 23: Interface-Contracts (DP-1...DP-20)	135
Tabelle 24: Daten- & Ereignismodell je DP (DP-1...DP-20).....	139
Tabelle 25: VP-Definitionen.....	142
Tabelle 26: S3 ↔ S4 Ausprägung von Planung & Ressourceneinsatz	153
Tabelle 27: S3 ↔ S4 Ausprägung von Tarif- & Produktmanagement	154
Tabelle 28: S3 ↔ S4 Ausprägung der Betriebslenkung	154
Tabelle 29: S3 ↔ S4 Ausprägung beim Vertrieb	155
Tabelle 30: Nachweis über die Verwendung des hybriden Ansatzes	164
Tabelle 31: Evaluationsepisoden.....	176
Tabelle 32: Erfüllung funktionaler Anforderungen.....	180
Tabelle 33: Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen	181
Tabelle 34: Erläuterung der Bewertungsergebnisse auf Prozessebene.....	186
Tabelle 35: Szenario-bezogene Walkthroughs/Playthroughs.....	203
Tabelle 36: Bewertung der ausgewählten REA-Kriterien	208
Tabelle 37: Ergebnisse der Evaluationsepisoden	213
Tabelle 38: Zentrale Delta-Implicationen je Szenario (S1–S4).....	241
Tabelle 39: Implementation-und-Migration-Sicht nach Szenarien	246
Tabelle 40: Heatmap der Capabilities in den Szenarien S1–S4.....	248
Tabelle 41: Requirement-Capability-Coverage (S4)	268
Tabelle 42: Attribut-Spezifikation und Traceability	271
Tabelle 43: Schichtung des (kanonischen) Applikationsmodells	273
Tabelle 44: Schichtung und domänenbasierte Verortung	275
Tabelle 45: Erkenntnisse der Phase 2.....	280

Tabelle 46: Kriterienmatrix zum Alternativenvergleich	286
Tabelle 47: Validitätsbedrohungen und Gegenmaßnahmen	289
Tabelle 48: Threats und Mitigation	309

Abkürzungsverzeichnis

A/B(-Tests)	Split-Tests → empirisches Verfahren zur Vergleichsmessung zweier Varianten (A und B)
ABB	Architecture Building Blocks
ACM	Association for Computing Machinery
ADM	Architecture Development Method
AO	angebotsorientierter Verkehr (liniengebundener Fahrplanverkehr)
AP	Applikations-Steckbriefe (Anhang D)
APC	Automatic Passenger Counting → automatische Fahrgastzählung (gem. VDV 457/457.2)
API	Application Programming Interface
AST	Anruf-Sammel-Taxi (aus VDV 459)
AuthN/Z	Authentication (AuthN) und Authorization (AuthZ) → Authentifizierung (AuthN), Autorisierung (AuthZ)
AVMS	Automatic Vehicle Monitoring System (aus VDV 455)
BITA	Business-IT alignment/Business-IT-Ausrichtung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMS	Betriebshof-/Depotmanagementsystem
BO	bedarfsorientierter Verkehr (flexible, nachfragegesteuerte Mobilitätsform)
BPM	Business-Process-Management
BSAG	Bremer Straßenbahn AG (ÖPNV-Unternehmen in Bremen)
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe AöR (ÖPNV-Unternehmen in Berlin)
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CMS	Charging Management System (Lademanagement) (aus VDV 463)
CS	Capability-Steckbrief (Anhang G)
CSV	Comma-Separated Values als technisches Austauschformat
DFI	Dynamische Fahrgastinformation
DFID	Deutschlandweit eindeutige Fahrt-ID (gem. VDV 453)
DHID	Deutschlandweite Haltestellen-ID (gem. VDV 432)
DLID	Deutschlandweit eindeutige Linien-ID (gem. VDV 433 V1.1)
DMZ	Demilitarized Zone, Sicherheitszone
DO	Datenobjekt (Anhang E)
DP	Domän(en)/Prozess(e)-Steckbriefe (Anhang C)
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung (der Europäischen Union)
DSR	Design Science Research
DTID	Deutschlandweit eindeutige Teillinien-ID (gem. VDV 433)
DRT	Demand Responsive Transport → siehe bedarfsorientierter Verkehr
DWH	Data Warehouse (z.B. „... verbleiben im DWH“)
EA	Enterprise Architecture/Unternehmensarchitektur
EAM	Enterprise Architecture Management
EAP	Enterprise Architecture Planning
EDIFACT	Electronic Data Interchange For Administration, Commerce and Transport
EFM	Elektronisches Fahrgeldmanagement
eIDAS	EU-Verordnung zu elektronischer Identität)
EKAP	Echtzeit-Datendrehscheibe und Auskunftsplattform (aus VDV 431-2)
EMVCo	Konsortium für EMV-Zahlungskarten („EMVCo Contactless“)

ESB	Enterprise Service Bus
ETA	Estimated Time of Arrival (Voraussichtliche Ankunftszeit)
FAPI	Financial-grade API (bei „OAuth 2.0/OpenID Connect (FAPI-Profile)“)
FDS	Fahrzeugdispositionssystem
FEDS	Framework for Evaluation in Design
FGZ	Fahrgastzählung (deutsches Kürzel, parallel zu APC verwendet)
FS	Fahrplan-Services
FTS	Flexible Transport Services
GBFS	General Bikeshare Feed Specification
GTFS	General Transit Feed Specification → Allgemeine Schnittstellen spezifikation für Fahrplandaten
GTFS-RT	General Transit Feed Specification – Realtime → GTFS – Echtzeit
GDPR	General Data Protection Regulation → dt. DSGVO
HR	Human Resources (aus VP-Steckbrief)
HY	hybrider Verkehr (Kombination von AO und BO in integrierten Systemen)
IAM	Identity and Access Management → Identitäts- und Zugriffsmanagement
IBIS/IBIS-IP	Integriertes Bord-Informationssystem u. IP als Nachfolger (VDV 300/301)
ICS	im Sinne von „ICS: 35.080“ in ISO-Normziten
IDMVU	InfrastrukturDatenmanagement für Verkehrsunternehmen
IEC	International Electrotechnical Commission; z. B. IEC 62443
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Norm)
IFM	Interoperable Fare Management, bei ISO 24014-1
IRS	International Railway Solution, z. B. IRS 90918-10
IS	Informationssysteme
ISMS	Information Security Management System
ISO	International Organization for Standardization; mehrfach i. Normverweisen
IT	Informationstechnologie
ITCS	Intermodal Transport Control System (betriebsleitendes System/Leitstelle)
ITS	Intelligent Transportation Systems → intelligente Verkehrssysteme
ITVU	IT-Systeme für Verkehrsunternehmen
IVS	Intelligente Verkehrssysteme (z. B. „städtische IVS-Modelle“)
KYC	Know Your Customer → Identitäts-/Berechtigungsprüfung
KPI	Key Performance Indicator → Leistungskennzahl oder Schlüsselkennzahl
KRITIS	kritische Infrastruktur (IT- und Cybersicherheit)
MaaS	Mobility as a Service
mCLOUD	Offene Datenplattform des BMDV
MDS	Mobility Data Specification
MDM	Mobilitäts-Daten-Marktplatz
ML	Machine learning/maschinelles Lernen
MMTS	Multimodal Mobility/Transport Services → Multimodale Mobilitäts-/Transportservices
MMTIS	vergl. MMTS
MNO	Mobile Network Operator (Mobilfunknetzbetreiber) (aus DO-Steckbrief)
MSP	Mobility Service Provider (MaaS-Rolle)
MVV	Münchner Verkehrs- und Tarifverbund

MVG	Münchner Verkehrsgesellschaft
NeTEx	Network Timetable Exchange (CEN-Standard) → ÖPNV-Plandaten
NATS	Messaging-System, Kafka/NATS
NAP	National Access Point (z.B. „NAP/MMTIS-Dienste“)
NIS2	EU-Richtlinie für Cybersicherheit
NIST	National Institute of Standards and Technology
NMS	New Mobility Services, im Deutschen neue Mobilitätsdienste/-lösungen
OAuth	OAuth 2.0
OIDC	OpenID Connect, als „OIDC“ in IAM/OAuth/OIDC
OpenID	Offener Standard für dezentrale Authentifizierung und Single Sign-On (SSO) im Internet.
QoS	Quality of Service (Dienstgüte) (aus Capability-Steckbriefe)
PCI-DSS	Payment Card Industry Data Security Standard
PII	Personally Identifiable Information
PM	Project Management → Projektmanagement
PMBOK	Project Management Body of Knowledge – im Titel des Standardwerks
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PSI	Public Sector Information – in „EU Data Act/PSI (Open-Data)“
PSD2	Payment Services Directive 2
PSO	Public Service Obligation → Gemeinwirtschaftliche Verpflichtung(en)
PSP	Payment Service Provider – „NMS-Plattform, PSP“
PT	Public Transport (UK)/Public transit/Public Transportation (US) → ÖPNV
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OBV	On-Board Unit (Fahrzeug-Bordgerät)
OD	Origin-Destination (Quelle-Ziel-Relationen)
OJP	Open Journey Planner
OSDM	Open Sales and Distribution Model (AO) → Bezahlung im ÖPNV
OSS	Open Source Software („ReferenzStacks & OSS“)
OT	Operational Technology
RACI	RACI-Modell: Verantwortlichkeits- und Zuständigkeitsmodell aus dem PM
RAS	Reiseauskunftssystem (Auskunft/Trip-Planung)
REA	Reference Enterprise Architecture/Referenz-Unternehmensarchitektur
REAM	Reference Enterprise Architecture Management
REST	Representational State Transfer (Schnittstellenstandard)
RIS	Referenz-Exportformat (im Kontext „RIS/CSV“)
SBB	Solution Building Blocks
SDLC	Systems Development Life Cycle → Systementwicklungslebenszyklus
SEPA	Single Euro Payments Area
SIEM	Security Information and Event Management
SIRI	Service Interface for Real-time Information → Austausch von Echtzeit-ÖPNV-Daten (Standard)
SIS	Soll-Ist-Schnittstelle (aus VDV 454)
SLA	Service Level Agreement → Dienstgüte- oder Leistungsvereinbarung
SLR	Systematic Literature Review → Systematische Literaturanalyse
SOA	Service-Oriented Architecture/serviceorientierte Architektur
SoS	System of Systems/System von Systemen
SSO	Single Sign-On → Einmalanmeldung

SWM	Stadtwerke München
TIS	Travel Information Service/Reiseinformationsdienst
TOGAF	The Open Group Architecture Framework
TOMP	Transport Operator to Mobility Provider Interface (BO)
TR./Bu.	Trennprinzip Reservierung vs. Buchung (siehe OJP)
TRIAS	Schnittstellenspezifikation für Reiseauskunfts-/Mobilitätsplattformen
UAF	Unified Architecture Framework
UIC	Union internationale des chemins de fer, z. B. UIC OSDM IRS 90918-10
UITP	Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen
UML	Unified Modeling Language/vereinheitlichte Modellierungssprache
VAS	Value Added Services – im Kontext ISO 15118 VAS
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VDV-KA	VDV-Kernapplikation (schafft eine technische und organisatorische Interoperabilität zwischen Verkehrsunternehmen, Verbänden und Dienstleistern im EFM-Umfeld → Softwarelösung)
VP	Variationspunkt(e)-Steckbriefe (Anhang F)
VU	Verkehrsunternehmen
WFM	Workforce Management (aus VP-Steckbriefe)

Danksagung

Eine Dissertation zu schreiben bedeutet nicht nur, ein wissenschaftliches Werk zu schaffen, sondern auch persönlich zu wachsen. Ohne die Unterstützung vieler Menschen, die mich auf diesem Weg begleitet, beraten und gefördert haben, hätte ich das Ziel nicht erreicht. Besonders herausfordernd war es, die Arbeit neben einer anspruchsvollen Vollzeitbeschäftigung und außerhalb des universitären Alltags zu bewältigen. Das erforderte nicht nur meine Ausdauer, sondern auch die Geduld und das Verständnis meiner Wegbegleiter.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Universitätsprofessor Dr. Kurt Sandkuhl, der mein Vorhaben einer externen Promotion von Anfang an unterstützt hat. Mit Wohlwollen und Rat stand er mir über die Jahre zur Seite – sei es bei der Veröffentlichung von Artikeln, der Vorbereitung von Vorträgen im Rahmen akademischer Konferenzen oder der Weiterentwicklung meiner Dissertation. Herrn Universitätsprofessor Dr. Jan Fabian Ehmke danke ich herzlich für das Interesse an meinem Forschungsvorhaben und die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein Dank gilt ebenso den engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), mit denen ich seit 2014 zahlreiche Projekte begleiten und erfolgreich umsetzen durfte. Hervorheben möchte ich Herrn Rainer Meitzner, der mir 2014 die Gelegenheit gab, als externer Projektmanager bei der BVG einzusteigen. Mit ihm habe ich bis zu seinem Ausscheiden aus der BVG vertrauensvoll zusammengearbeitet.

Weiterer Dank gilt der IVU Traffic Technologies AG für die freundliche Genehmigung zur Nutzung des ITVU-Branchenmodells sowie Herrn Dr. Gero Scholz für seine diesbezügliche Unterstützung.

Mein tiefster Dank gilt meiner Familie: meinem Vater Peter, meiner Schwester Susanna und meinem Bruder Jens-Peter, die mir in schwierigen Momenten beistanden. Besonders danke ich meiner Ehefrau Britta, die die größte Last dieser Promotion getragen hat – mit unermüdlicher Geduld und Unterstützung.

Schließlich danke ich allen, die mich während meiner Forschung unterstützt haben und aktiv zu den Ergebnissen beigetragen haben. Dazu gehören v.a. die Interview-Partner der beteiligten Organisationen sowie die Ansprechpartner, die mir persönlich, telefonisch oder schriftlich wertvolle Informationen zukommen ließen. Ihr Beitrag hat diese Arbeit bereichert.

Mark-Oliver Würtz

Stuhr, den 09.02.2026

1 Einleitung

Anstehende Veränderungen in den Bereichen Verkehr und Mobilität – auch als Verkehrswende oder Mobilitätswende bezeichnet – sind in Deutschland kaum noch umstritten. Die Gründe dafür sind vielfältig: Das Verkehrsaufkommen wächst stetig. Die Energiewende stellt neue Anforderungen, etwa durch die Endlichkeit fossiler Energieträger und die geplante Steigerung der Energieeffizienz. Auch der Klimawandel erfordert ein Umdenken. Hinzu kommt ein gesellschaftlicher Kultur- und Wertewandel; gleichzeitig bleibt die Mobilitätsnachfrage weiterhin hoch. All das verlangt neue Strategien für die Mobilität, in den wachsenden Städten ebenso wie auf dem Land [1].

Um die Mobilitätsnachfrage zukünftig nachhaltiger zu decken, gilt es, den öffentlichen Verkehr zu stärken und zugleich individuelle, flexible Mobilität zu sichern. Das spielt eine zentrale Rolle für die Lebensqualität und damit auch für die Wettbewerbsfähigkeit von Mobilitätsangeboten [2]. Der klassische angebotsorientierte ÖPNV, der ausschließlich im Linienverkehr operiert, steht dabei unter zunehmendem Druck der digitalen Transformation [2]. Die Branche hat die bisherigen Umwälzungen des digitalen Wandels, der teils disruptive Folgen zeitigt, noch längst nicht bewältigt. Diese Herausforderungen erfordern intelligente Gesamtlösungen für nachhaltige Mobilitätsstrategien [1]. Verkehrsunternehmen müssen neue Mobilitätsformen testen, um ihr Angebot zu differenzieren bzw. zu diversifizieren und damit mehr Menschen für den ÖPNV zu gewinnen. Es gilt, attraktive Alternativen zum privaten Pkw zu schaffen [3].

Eine Reihe neuer Angebote sind bereits erfolgreich erprobt und leisten einen Beitrag zu einem veränderten Mobilitätsverhalten und somit auch zu einer nachhaltigeren Mobilität [2]. So werden inzwischen in größeren Städten – neben den bereits lange existierenden Abonnements – vermehrt auch Umlagemodelle angeboten. Zu nennen sind weiterhin die New Mobility Services (NMS), die als Umlage- sowie Abonnementsmodell existieren. Im Vergleich zum traditionellen angebotsorientierten ÖPNV mit festgelegten Fahrplänen und Transportrouten sind NMS bedarfsorientierte Dienste, die auf die Ad-hoc-Bedürfnisse der Nutzer abzielen. Dazu gehören Fahrzeug-Sharing-Dienste wie Car-, Bike- oder E-Scooter-Sharing oder On-Demand-Fahrdienste wie geteilte Taxifahrten. Diese Angebote beeinflussen die Art und Weise, wie sich Menschen in städtischen Gebieten über kurze und mittlere Distanzen fortbewegen [4].

Da sich NMS – v.a. in Städten und Ballungsräumen – zunehmender Beliebtheit erfreuen, sind diese für ÖPNV-Unternehmen interessant. Dabei kann ein klassisches ÖPNV-Unternehmen als rein koordinierender (und nicht betreibender) Mobilitätsdienstleister oder zusätzlich als Betreiber von NMS am Markt auftreten. Es ist schwer vorstellbar, dass die öffentlichen Anbieter, von denen die meisten in Deutschland ÖPNV-Unternehmen sind, in Zukunft nur noch in der Rolle eines klassischen Mobilitätsdienstleisters auftreten werden [5]. Mobilitätsexperte Menge [5] (Anhang Z: Interview_Friedrich Menge-CIO-BVG [Digitale Zusatzmaterialien]) fordert deshalb eine Weiterentwicklung von ÖPNV-Unternehmen zu integrierten Mobilitätsanbietern, um zukünftige Anforderungen zu bewältigen. Betreiber, die beginnen, eigene NMS anzubieten oder mit etablierten

NMS-Betreibern zu kooperieren, müssen ihre Prozesse – etwa für Bezahlung, Leistungsplanung, Logistik und Betriebssteuerung –, ihre Organisationsstruktur und ihre Informationssystemlandschaft anpassen. Dabei gilt es, Angebote des bedarfsorientierten Verkehrs in klassische ÖPNV-Unternehmen, die seit Jahrzehnten angebotsorientiert operieren, einzubinden.

NMS sind Gegenstand der Forschung, z. B. im Hinblick auf neue Unternehmensarchitekturen [6], Geschäftsmodelle [7], Plattformen [8], Endnutzerakzeptanz [4] oder erforderliche Standards. Die Auswirkungen neuer Mobilitätslösungen auf die ÖPNV-Unternehmen und insbesondere auf die Unternehmensarchitektur sind bisher jedoch kaum erforscht. Diese Lücke bildet den Ausgangspunkt dieser Dissertation. Sie befasst sich mit der Frage, wie die Integration von Angeboten des bedarfsorientierten Verkehrs in klassische ÖPNV-Unternehmen bewerkstelligt werden kann. Im Verlauf der Recherche zeigte sich die Arbeit mit einer Reference Enterprise Architecture (Referenz-Unternehmensarchitektur) als vielversprechender Ansatz. Dabei werden etablierte Architekturansätze auf ihre Eignung und notwendige Anpassungen bzw. Erweiterungen für den ÖPNV untersucht. Im deutschen ÖPNV-Sektor gilt das ITVU-Modell als bewährte Grundlage für Softwarearchitekturen. Dieses Referenzmodell für ÖPNV-Unternehmen, entwickelt von Gero Scholz [9], wurde für diese Dissertation erweitert. Dabei wurden Erkenntnisse aus Veröffentlichungen des VDV [10–15] hinzugezogen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnen wurden. Die Erweiterung dient als Unternehmensarchitektur für NMS und ermöglicht die notwendige Anbindung an die bestehende Referenz-Enterprise-Architektur (REA)¹. Sie stellt eine Musterlösung dar, um NMS in Unternehmensarchitekturen des ÖPNV zu integrieren, und ergänzt das ITVU-Kernmodell um einen optionalen „Baustein“. Dabei erfüllt sie auch die Anforderungen an die Merkmale eines Referenzmodells. Die Erweiterung entstand im Rahmen eines designwissenschaftlichen Forschungsprozesses und wurde mit ArchiMate² modelliert.

1.1 Forschungskontext

Dieser Abschnitt skizziert das Forschungsvorhaben und zeigt, wie es sich in die Wirtschaftsinformatik einfügt. Wissenschaftstheorien zielen darauf ab, ein theoretisches Fundament zu schaffen, auf dem Forschungsprozess aufbaut. Sie liefern Methodenwissen und geben dem Forschungsvorhaben einen klaren Rahmen [15, S. 16].

Die Wirtschaftsinformatik ist eine eigenständige interdisziplinäre Wissenschaft an der Schnittstelle zwischen Betriebswirtschaft und Informatik. Sie greift auf Ansätze beider Gebiete zurück, erweitert diese und entwickelt eigene Konzepte. Ihr Fokus liegt auf der Verbindung von Wirtschaft und Verwaltung mit Informations- und Kommunikationssys-

¹ Im Folgenden werden dafür der Begriff Referenzunternehmensarchitektur, das englische Original Reference Enterprise Architecture und das Akronym REA sowie Referenz-EA verwendet.

² Bei ArchiMate handelt es sich um eine offene und unabhängige Sprache zur Modellierung von Unternehmensarchitekturen. Sie dient der Beschreibung, Analyse und Visualisierung von Architekturen innerhalb und zwischen Geschäftsbereichen.

temen. Ziel ist es, Theorien, Konzepte, Modelle, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln oder anzuwenden, um Informationssysteme zu analysieren, zu gestalten und zu nutzen [16, S. 319]. Die Wirtschaftsinformatik zielt darauf ab, Erkenntnisse und Lösungen für reale Problemstellungen zu entwickeln und deren Anwendbarkeit sicherzustellen [17, S. 5]. Die dabei gewonnenen Resultate sollen sowohl in Organisationen wirksam eingesetzt werden als auch die wissenschaftliche Forschung und die Weiterentwicklung anwendungsorientierter Lösungsansätze unterstützen [18, S. 9]. Ihr Anwendungsbereich umfasst nicht nur die IT in privatwirtschaftlichen Unternehmen, sondern auch in der öffentlichen Verwaltung [19, S. 27]; [20, S. 9] und den Einsatz von IT im öffentlichen Sektor [20, S. 10]. Viele heutige ÖPNV-Unternehmen gehören als Anstalten öffentlichen Rechts – da sie kommunale Unternehmen sind – zu diesem Sektor.

Das zentrale Ziel und Kernstück dieser Dissertation ist die Entwicklung einer Enterprise Architecture für klassische ÖPNV-Unternehmen. Diese Architektur soll als Referenzmodell für die Integration neuer Mobilitätsdienste (NMS) dienen. Enterprise Architectures sind ein Forschungsfeld der Wirtschaftsinformatik und gehören speziell zum Bereich des Informationsmanagements [21, S. 26]; [22, S. 226]; [23, S. 13].

Eine Enterprise Architecture (EA) bietet Unternehmen einen Rahmen, um komplexe Geschäfts- und IT-Systeme zu gestalten [24]. Eine Referenz-EA hingegen entwickelt ein konzeptionelles Modell, das Lösungen für Gruppen von Unternehmen oder Branchen bereitstellt, die ein bestimmtes Problemfeld teilen [25, S. 1–21].

Enterprise Architectures finden zudem Anwendung in verschiedenen Bereichen der Wirtschaftsinformatik, so v.a. in IT-Alignment³ und IT-Governance⁴ [28], Organisationsgestaltung und -entwicklung [29] sowie Technologiemanagement und -innovation [30]. Sie verbinden damit unterschiedliche Forschungs- und Anwendungsfelder der Wirtschaftsinformatik und tragen sowohl zur strategischen Planung als auch zum operativen Management von IT-Ressourcen in Unternehmen und Verwaltung bei.

Die hier vorliegende Dissertation mit dem Titel:

Integration von bedarfsorientiertem Verkehr – insbesondere NMS – in klassische ÖPNV-Unternehmen. Eine Referenz-Enterprise-Architektur-Empfehlung.

³ IT-Alignment bezeichnet die strategische Ausrichtung der Informationstechnologie an den Zielen und Anforderungen eines Unternehmens. Dabei geht es darum, sicherzustellen, dass IT-Systeme, IT-Prozesse und IT-Ressourcen optimal auf die Geschäftsstrategie abgestimmt sind, um die Effizienz zu erhöhen, Wettbewerbsvorteile zu schaffen und Geschäftsziele effektiv zu unterstützen. Ein gelungenes IT-Alignment reduziert Reibungsverluste zwischen IT und Fachbereichen und ermöglicht eine agile Anpassung an Veränderungen im Markt oder in der Organisation [26, S. 462-474].

⁴ IT-Governance umfasst die Strukturen, Prozesse und Regeln, die sicherstellen, dass der Einsatz der Informationstechnologie eines Unternehmens wirksam gesteuert und überwacht wird. Ziel ist es, Risiken zu minimieren, Ressourcen effizient einzusetzen und sicherzustellen, dass IT-Aktivitäten im Einklang mit den strategischen Geschäftszielen und regulatorischen Anforderungen stehen. Durch IT-Governance wird Transparenz geschaffen, Verantwortlichkeiten werden klar definiert und gewährleistet, dass IT-Entscheidungen die Wertschöpfung des Unternehmens optimal unterstützen [27, S. 408-420].

fügt sich ideal in die Disziplin der Wirtschaftsinformatik ein. Das Forschungsvorhaben greift praxisrelevante Herausforderungen bei der Integration bedarfsorientierter Verkehrskonzepte, insbesondere NMS, am Beispiel deutscher ÖPNV-Unternehmen auf. Durch die Entwicklung einer Enterprise Architecture, die als Referenz für ÖPNV-Unternehmen dienen kann, bietet sie fundierte IT-Lösungen. Nach dieser Einordnung in die Wirtschaftsinformatik folgt eine weitere Einordnung der methodischen Grundlagen in Kapitel 2 und in den thematischen Kontext in Kapitel 3.

1.2 Problemstellung und Forschungsfrage

Fortschreitende Digitalisierung, Mobilitätswende und die Zunahme bedarfsorientierter Mobilitätsangebote (Kapitel 1) verändern die Rahmenbedingungen klassischer ÖPNV-Unternehmen grundlegend. Während der liniengebundene, angebotsorientierte Nahverkehr weiterhin das strukturelle Rückgrat bleibt, gewinnen flexible, digitale und nutzerzentrierte Dienste – sog. New Mobility Services (NMS) – besonders in Städten an Bedeutung. Diese Entwicklung zwingt Verkehrsunternehmen, ihre betrieblichen, organisatorischen und informationstechnischen Strukturen anzupassen, um hybride Angebotsmodelle zu schaffen, die klassische und bedarfsorientierte Verkehrsformen effizient verbinden [2, S. 194].

PROBLEMSTELLUNG DIESER DISSERTATION

Dem ÖPNV fehlen Mittel, um bedarfsorientierten Verkehr und konkret NMS effizient in den klassischen angebotsorientierten Verkehr zu integrieren (hierzu Kapitel 4 und 5). Neue Referenz-Enterprise-Architekturen werden in der wissenschaftlichen Literatur als ein zentraler Lösungsansatz zur Bewältigung derartiger Integrationsprobleme betrachtet [31, S. 11]; [32]. Nach einer ersten Literaturrecherche wurde der Fokus auf Unternehmensarchitekturen⁵ gelegt, die ÖPNV-Unternehmen bei der Integration bedarfsorientierter Verkehrsdienste unterstützen. Eine entsprechende Architektur würde Unternehmen helfen,

- A. indem sie Geschäfts- und IT-Perspektive im Kontext des digitalen Wandels integriert und
- B. Mittel zur Verfügung stellt, mit denen die Unternehmen dieses Wissen wiederverwenden, anpassen und weiterentwickeln können.

In der Praxis fehlt jedoch eine entsprechende Unternehmensarchitektur, die als Referenz dienen könnte.

Es gibt zwar partielle Ansätze, wie z.B.

⁵ Unternehmensarchitekturen sind Modelle eines Unternehmens oder einer Branche, die sich in zwei Hauptebenen (strategisch und operativ) gliedern. Die strategische Ebene besteht wiederum aus zwei weiteren Ebenen: eine motivatorische und eine strategische. Die operative Ebene gliedert sich in 4 Subebenen: Prozesse, Anwendungen, Technik und Infrastruktur [33, S. 19–29]. Vgl. hierzu ausführlich Kapitel 3.1.

1. das ITVU-Kernmodell von Gero Scholz [9], das den angebotsorientierten Verkehr in Form eines UML-Diagramms abbildet – ein integrativer Ansatz, der ausschließlich angebotsorientierte Verkehre abbildet oder
2. Architekturen des ÖPNV-Verbands VDV [24]; [12]; [13]; [27], die partielle Lösungen wie etwa Mobilitätsplattformen bearbeiten.

Beide Ansätze sind jedoch reine IT-Architekturen und bieten keinen Gesamtansatz für die Integration von NMS in klassisch angebotsorientierte ÖPNV-Unternehmen.

Der Autor untersuchte die Unternehmensstruktur klassischer ÖPNV-Unternehmen sowie den (möglichen) Einfluss von neuen innovativen Mobilitätslösungen auf diese Struktur. Dabei fiel auf, dass klassisch operierende ÖPNV-Unternehmen sich kaum mit NMS beschäftigen. Wenn sie es tun, steht die Integration solcher Dienste (siehe Kapitel 6.3) nicht im Fokus. Zudem ist das Management von Services, die von anderen Unternehmen erbracht werden, unzureichend geregelt.

Der gegenwärtige Zustand in deutschen ÖPNV-Unternehmen wird in Forschung und Praxis v.a. auf 3 strukturelle Ursachen zurückgeführt:

- i. Unzureichende analytische und methodische Unterstützung bei der Erfassung der Auswirkungen tiefgreifender organisationaler, datenbezogener und informationstechnischer Veränderungen. Derartige Transformationsvorhaben sind i.d.R. durch hohe Komplexität sowie erheblichen Ressourceneinsatz gekennzeichnet, was ihre systematische Bearbeitung erheblich erschwert [34, S. 1–12].
- ii. Fehlendes strukturiertes und allgemein zugängliches Wissen über unternehmensinterne Strukturen und Prozesse. Insbesondere jenseits der operativen Geschäftsprozesse mangelt es häufig an formalisierter Dokumentation, was die Planung und Umsetzung architekturbasierter Integrationsprojekte behindert [35, S. 1184–1217].
- iii. Fragmentierte IT-Landschaften, die in der Praxis häufig aus isolierten, nicht integrierten Einzellösungen (sog. „Insellösungen“) bestehen – selbst in großen Verkehrsunternehmen. Dies erschwert die Etablierung standardisierter, interoperabler Systemarchitekturen und behindert so die flexible Integration neuer Mobilitätsdienste [36, S. 3].

Diese Ursachen werden im Kontext der Notwendigkeit einer universellen Referenzarchitektur für den ÖPNV diskutiert.

Eine branchenorientierte Unternehmensarchitektur⁶ könnte hierfür Abhilfe schaffen. Eine solche Referenz-Enterprise-Architektur (REA) dient als Blaupause für einen Good-Practice-Ansatz⁷ und bietet Unternehmen eine Anleitung zur Implementierung oder An-

⁶ Vgl. Fußnote 5.

⁷ Good Practices sind bewährte Methoden, Technologien oder Prozesse, die sich in der Praxis als effektiv, effizient und zuverlässig erwiesen haben. Sie stellen keine universelle Ideallösung dar, sondern sind kontextabhängig und anpassbar an die jeweiligen Anforderungen einer Organisation oder eines Projekts. Good Practices von IT-Systemen und -Prozessen dienen als Orientierung bei der Gestaltung und Optimierung. Es ist notwendig, den Entwicklungsprozess so-

passung eigener Teilarchitekturen. Sie vereinfacht die Kommunikation zwischen den IT-Mitarbeitern und Fachabteilungen bei den neuen Aufgaben und den Veränderungen, die durch die Geschäftsveränderung bzw. -erweiterung auf allen relevanten Ebenen eines Unternehmens entstehen.

Zusammenfassend wurden durch eine Literaturanalyse⁸ folgende Forschungslücken identifiziert:

- Fehlende Ansätze zur Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen,
- Fehlen eines Referenzmodells zur Erleichterung der NMS-Integration,
- Fehlen einer Referenzarchitektur für erfolgreiche Kommunikation mit Stakeholdern (inkl. NMS-Anbietern),
- Fehlen empirischer Belege für die Anwendung einer Referenz-Enterprise-Architektur.

Das Ziel dieser Dissertation ist es, diese Lücken so weit wie möglich zu schließen, um die sich daraus ergebenden Probleme zu überwinden. Hierfür bietet es sich an, eine Referenz-Enterprise-Architektur zu entwickeln, die ÖPNV-Unternehmen bei der Entwicklung ihrer Unternehmensarchitektur und damit bei der NMS-Integration unterstützt.

DEFINITION DER FORSCHUNGSFRAGE

Wie kann eine Referenz-Unternehmensarchitektur aussehen, die ÖPNV-Unternehmen bei der Integration von New Mobility Services (i.e.S. bedarfsorientiertem Verkehr) und klassisch angebotsorientiertem Verkehr unterstützt?

Zur Beantwortung dieser Frage wird im Folgenden untersucht:

- (1) Welche Anforderungen bestehen an eine REA, in der NMS und angebotsorientierte Services eines ÖPNV-Unternehmens integriert sind?
- (2) Welche weiteren Anforderungen stellen sich, wenn in dieser REA alle der in Deutschland vorkommenden Größenklassen von ÖPNV-Unternehmen berücksichtigt werden sollen?

Die Integration von angebots- und bedarfsorientierten Angeboten stellt gleichzeitig eine Chance für die Weiterentwicklung des ÖPNV dar. In der wissenschaftlichen Literatur wird diese Entwicklung aus 4 Perspektiven betrachtet.

wie dessen Evaluation und Optimierung zu dokumentieren, damit andere später von den Erfahrungen profitieren können und so nachhaltige IT-Lösungen gefördert werden [37, S. 843–846].

⁸ Vgl. Kapitel 4.

Technologische Perspektive [6, S. 199ff.]

Die Digitalisierung schafft neue Möglichkeiten, den Verkehr zu planen und zu steuern. Sie erlaubt, NMS in bestehende ÖPNV-Strukturen zu integrieren. Architektur-Frameworks wie das ITVU-Modell gelten dabei als essenziell für die nachhaltige Implementierung von NMS in bestehende ÖPNV-Systeme.

Die technologische Perspektive befasst sich primär mit der systemischen Integration, also mit der Architektur von IT-Landschaften sowie Schnittstellen und Datenflüssen, die notwendig sind, um die Interoperabilität von NMS und klassischen Systemen zu ermöglichen. Die Beiträge von Würtz und Sandkuhl (2023) [38] und Bokolo (2022) [39] zeigen konkret:

- Die Unverzichtbarkeit von Referenzarchitekturen insbesondere für heterogene IT-Landschaften, da sie Standardisierungen und Modularisierungen fördern.
- Auf welche Weise digitale Plattformarchitekturen die Koordination zwischen bestehenden Linienverkehren und dynamischen, bedarfsbasierten Services ermöglichen können.
- Welche Komponenten (z.B. API-Management, Echtzeitdatenintegration, serviceorientierte Architekturen) erforderlich sind, um Systeminteroperabilität zu gewährleisten.

Die technologische Perspektive liefert zentrale architektonische Bausteine und ist damit konstitutiv für das Design der REA.

Ökonomische Perspektive [7, S. 1008ff.]

Traditionelle ÖPNV-Betreiber stehen unter zunehmendem wirtschaftlichen Druck, sich gegenüber neuen Mobilitätsanbietern zu behaupten. Die Integration von NMS kann die Wettbewerbsfähigkeit klassischer ÖPNV-Anbieter steigern und neue Erlösmodelle ermöglichen.

Die ökonomische Perspektive liefert vorrangig indirekte Beiträge zu dieser Forschungsarbeit, indem sie den betriebswirtschaftlichen Nutzen bzw. die Notwendigkeit einer solchen Architektur unterstreicht.

Konkret analysiert die ökonomische Perspektive dabei insbesondere die Potenziale zur Effizienzsteigerung, strategischen Ausrichtung und langfristigen Kostensenkung (z.B. durch Niemi und Pekkola (2020) [40, S. 585–586]. Sie liefert jedoch keine unmittelbaren Beiträge in Form konkreter Architekturbausteine oder Modellierungsprinzipien.

Damit kontextualisiert die ökonomische Perspektive das Architekturprojekt, liefert aber keine direkten Entwurfsbeiträge.

Ökologische Perspektive [6, S. 199]

Nachhaltige Mobilität bedarf einer stärkeren Nutzung flexibler, bedarfsorientierter Transportlösungen, um CO₂-Emissionen zu senken und den Wechsel von individuellen zu öffentlichen Verkehrsmitteln zu fördern.

Auch die ökologische Perspektive liefert somit einen primär indirekten Beitrag, indem sie eine stärkere Nutzung nachhaltiger Mobilitätsformen und die Förderung intermodaler Verkehrsstrukturen fordert.

Erstens erweitert die ökologische Perspektive die Zieldefinition von Enterprise-Architekturprojekten um Aspekte wie CO₂-Metriken und multimodale Planungslogiken – wie im GREAN-Framework von Vandevenne et al. (2023) [41, S. 1–2] dargelegt. Zweitens verbleibt sie jedoch auf einer konzeptionellen Ebene und liefert keine unmittelbar nutzbaren Architekturbausteine für die operative Modellierung.

Somit handelt es sich hier um eine strategische Leitperspektive [42, S. 1], nicht um eine unmittelbar operative.

Organisatorische Perspektive [6, S. 200]

Die größte Herausforderung durch die Einführung von NMS sind die tiefgreifenden Änderungen in den Betriebsstrukturen und IT-Systemen klassischer ÖPNV-Unternehmen.

Einen direkten Beitrag dazu liefert die organisatorische Perspektive. Diese befasst sich mit der Transformation betrieblicher Prozesse, von Rollenmodellen und IT-Strukturen, die notwendig wird, wenn ÖPNV-Unternehmen NMS integrieren. Hierzu leisten insbesondere Würtz & Sandkuhl (2023) [38] und (2020) [43] Beiträge. Deutlich wird Folgendes:

- Durch NMS ergeben sich neue Anforderungen insbesondere an Planungs-, Dispositions-, Ticketing- und Ressourcensteuerungssysteme.
- EA als integrierendes Steuerungsinstrument überführt strukturelle Änderungen (z.B. neue Service-Prozesse oder Partnerbeziehungen) konsistent in die Systemlandschaft.
- Evaluationsergebnisse zeigen die Notwendigkeit angepasster Unternehmensarchitekturen. Nur so kann operationale Machbarkeit und Akzeptanz sichergestellt werden.

Die organisatorische Perspektive beschreibt nicht nur betriebliche Anpassungen, sondern bildet die Gestaltungs- und Steuerungsebene der entwickelten Referenz-Enterprise-Architektur (REA). Sie verknüpft technologische und strategische Ebene, indem sie strukturelle und prozessuale Anforderungen in Governance-Mechanismen, Capability-Entwicklung und Prozessintegration übersetzt. Dabei stellt sie sicher, dass technologische Innovationen mit strategischen und personellen Veränderungen harmonisieren. Als Bindeglied zur strategisch-motivatorischen Ebene der REA (vgl. Kapitel 7.1.7) formalisiert sie Ziele, Prinzipien und Verantwortlichkeiten.

Die vorgestellten Analysen verdeutlichen, dass die organisatorische Perspektive – zusammen mit der technologischen – die maßgebliche Dimension für die Integration von NMS darstellt. Organisatorisch bedeutet dies: (i) neue oder erweiterte Fähigkeiten (Capabilities) aufzubauen, insbesondere für Plattform- und Partnersteuerung, Daten- und Identitätsmanagement sowie Compliance; (ii) Rollen und Verantwortlichkeiten neu zu ordnen, um Pipeline- und Plattformlogiken gleichermaßen zu beherrschen (z.B. entlang RACI); und (iii) die Governance anzupassen, einschließlich KRITIS-konformer Segmentierung und Make-or-buy-Entscheidungen.

Daraus ergibt sich das zentrale Ziel dieser Arbeit: die Entwicklung einer REA, mit der klassische ÖPNV-Unternehmen NMS systematisch, skalierbar und interoperabel integrieren können. Die REA verbindet die strategisch-motivatorische Ebene (Ziele, Prinzipien, Capabilities, Stakeholder; vgl. Kapitel 7.1.7) eng mit den operativen Domänen (Planung & Ressourceneinsatz, Tarif- und Produktmanagement, Betriebslenkung, Vertrieb). So lassen sich strategische Entscheidungen konsistent in Prozess- und IT-Landschaften überführen (vgl. Kapitel 9.1.1 und 9.1.8). Das Artefakt adressiert präzise die aufgezeigten organisationalen Transformationsbedarfe und folgt den Prinzipien gestaltungsorientierter Forschung: Artefakt-Orientierung, Problemrelevanz und rigorose Evaluation.

Der in dieser Arbeit gewählte Design-Science-Research-Ansatz [44, S. 80ff.]; [45, S. 55] ermöglicht es, organisatorische und technologische Gestaltungsaspekte in einem iterativen Build-and-Evaluate-Zyklus zu entwickeln. Die daraus abgeleitete Referenzarchitektur basiert somit auf empirischer Evidenz und theoretischer Fundierung.

Ziel der Dissertation ist es, eine flexible, skalierbare und interoperable REA als DSR-Artefakt zu entwickeln und zu evaluieren. Diese REA integriert klassische und bedarfsorientierte Mobilitätsdienste methodisch fundiert und dient als anpassungsfähige Blaupause, die organisations- und größenklassenübergreifend die organisatorischen und technologischen Transformationen konsistent abbildet.⁹

1.3 Beiträge zur Wissensbasis

Diese Dissertation erweitert die wissenschaftliche Wissensbasis und unterstützt die unternehmerische sowie institutionelle Praxis, indem sie das Referenzmodell – im Folgenden auch als Artefakt bezeichnet – entwickelt und dessen Anwendung beschreibt.

Der wissenschaftliche Beitrag liegt in der schrittweisen Entwicklung eines Referenz-Unternehmensarchitekturmodells, das einen ganzheitlichen Ansatz für einen ÖPNV bietet, der auch den bedarfsorientierten Verkehr berücksichtigt. Jede Phase des Forschungsprozesses, dem die Design-Science-Research-Methodologie (DSR)¹⁰ zugrunde liegt, liefert dabei Erkenntnisse zur Lösung des Problems.

⁹ Kapitel 5 vertieft die Problemanalyse.

¹⁰ Vgl. Kapitel 2.1.

Der Kernbeitrag dieser Dissertation ist das erstellte Artefakt: eine Referenzarchitektur für ÖPNV-Unternehmen, die unter Einbeziehung verschiedener Größenklassen entstanden ist. Der Entwurfsprozess und das Evaluationsdesign konzentrieren sich vollständig auf dieses Artefakt. Die während des gesamten Promotionsprojekts erarbeiteten Beiträge werden im folgenden Kapitel dargestellt.

Diese Arbeit nutzt eine Referenz-Enterprise-Architektur (REA) als Werkzeug, da sie domänenspezifische wiederverwendbare Prinzipien, Modelle und Anleitungen für die NMS-Integration in klassischen ÖPNV-Unternehmen bereitstellt. So schließt sie die in Kapitel 1 identifizierte Lücke zwischen klassischen Branchenmodellen (ITVU, VDV) und bedarfsorientierten Diensten [38, S. 63–65, 69–71]. Andere Ansätze wie z.B. individuelle Unternehmens-EA, generische Frameworks ohne Domänenartefakte oder reine Prozess- und Software-RAs decken den Integrationsbedarf nur unzureichend ab. Sie scheitern an fehlender Ebenenkohärenz, geringer Wiederverwendbarkeit und mangelnder Eignung für Governance-Strukturen und KRITIS [38, S. 69–71]. Im Gegensatz dazu bieten wiederverwendbare domänenorientierte Architekturen klare Vorteile [46, S. 127, 266–267]. Die Wahl der REA wird methodisch im DSR-Rahmen (Kapitel 2) begründet und durch die Evaluationen (Kapitel 8) hinsichtlich Utility¹¹ bestätigt [38, S. 69–71]; ergänzend [46, S. 29–30, 266–267].

1.4 Veröffentlichungen im Kontext dieser Forschungsarbeit

In diesem Kapitel werden alle Beiträge aufgelistet, die im Rahmen des Dissertationsprojekts veröffentlicht wurden und bestimmte Aspekte des Gesamtprojekts im Kontext der Forschungsmethode DSR darstellen. In der rechten Spalte ist vermerkt, mit welchen Phasen des Forschungsprozesses die jeweilige Veröffentlichung in Verbindung steht bzw. zu welcher Phase der DSR-Methodologie sie etwas beiträgt.

Tabelle 1: Veröffentlichungen¹²

Veröffentlichung	Quelle	DSR ¹³
1. Impact of New Mobility Services on Enterprise Architectures: Case Study and Problem Definition	[47]	I./II.
2. Neue Mobilitätsdienste und ihre Auswirkungen auf Unternehmensarchitekturen: Eine Fallstudie	[48]	I./II.
3. Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services	[49]	II.

¹¹ Mit Utility ist in dieser Dissertation schlicht die Nützlichkeit im Domänenkontext gemeint – also der nachweisbare praktische Nutzen des REA-Artefakts für typische Aufgaben und Probleme der ÖPNV-Integration.

¹² Alle nicht weiter gekennzeichneten Tabellen und Abbildungen stammen vom Autor.

¹³ Design-Science-Research-Phase.

Veröffentlichung	Quelle	DSR ¹³
4. A Target Enterprise Architecture Approach for New Mobility Services in Demand-Responsive Public Transport	[43]	III.
5. Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive Public Transport	[50]	III./IV.
6. Enterprise Architecture for Integration of Demand-Responsive Services in Public Transport	[38]	IV./V.
7. Integration neuer Mobilitätsdienste in klassische Verkehrsbetriebe	[51]	V.

Diese Dissertation behandelt die Veröffentlichungen 1. bis 7. als Fremdliteratur, insbesondere in der im vierten Kapitel erörterten Literaturanalyse. Die Beiträge stellen jedoch eigene Vorarbeiten des Autors für diese Dissertation dar.

1.5 Aufbau der Dissertation

Diese Dissertation gliedert sich in 11 Kapitel. Einleitend wurden in Kapitel 1 der Forschungskontext, die Problem- und Fragestellung, der Beitrag zur Wissenschaft inkl. der forschungsbegleitenden Veröffentlichungen gezeigt. Kapitel 2 stellt die methodischen Grundlagen und die in der Dissertation verwendete Forschungsmethodik vor. Der Autor erläutert, wie der Design-Science-Research-Ansatz zur Entwicklung des geplanten Artefakts beitrug und welche Forschungsmethoden in den einzelnen Phasen des DSR-Prozesses angewandt wurden. Zusätzlich stellt der Autor Begriffsdefinitionen vor, um ein theoretisches Fundament für das Forschungsvorhaben zu legen.

Kapitel 3 skizziert den thematischen Rahmen, in dem sich diese Dissertation bewegt, und legt die Grundlage, um Lesern den Forschungskontext verständlich zu machen. Kapitel 4 analysiert den aktuellen Forschungsstand zur zentralen Fragestellung der Dissertation. Kapitel 5 verdeutlicht die Relevanz der Dissertation, indem es die Problemstellung auf Basis der im vierten Kapitel identifizierten Forschungslücken dargestellt. Darauf aufbauend konkretisiert es das im Rahmen dieser Dissertation entworfene Artefakt – eine Referenz-Unternehmensarchitektur für die ÖPNV-Branche in Deutschland. Kapitel 6 formuliert anschließend die Anforderungen an dieses Artefakt.

Kapitel 7 schildert die Entwicklung des Artefakts. Es beschreibt zunächst die Struktur der angestrebten Referenz-Enterprise-Architektur (REA) sowie weiterhin die erste entwickelte initiale REA, die auf den in Kapitel 6 definierten Anforderungen basiert.

Kapitel 8 erörtert das Design, das für die Evaluation des entwickelten Modells verwendet wird. Es erklärt, wie der Rahmen für die Evaluation in DSR von Venable et al. [52] angewendet wurde, stellt die gewählte Evaluationsstrategie vor und beschreibt die untersuchten Eigenschaften. Dabei folgt die Darstellung den Evaluationsepisoden. Diese teilen sich grob in 2 Phasen auf: zunächst Evaluationsepisode I. bis VII. (Kapitel 8.2.1 bis 8.2.7) und im Weiteren Evaluationsepisoden VIII. und IX. (Kapitel 8.2.8 bis 8.2.9). Phase 1

spiegelt dabei den für die Evaluation gewählten Top-Down-Ansatz (Business → Technik) wider. Darüber hinaus konsolidiert und evaluiert die 2. Phase die REA, indem es die domänenübergreifende Integrationslogik (DP/AP/DO/DS/VP/CS) normativ fixiert, ihre Traceability über Registerartefakte absichert und sie abschließend durch kanonische Modelle als exemplarische, navigierbare Index-Sichten verdichtet.

Kapitel 9 präsentiert die Merkmale der – im Rahmen dieser Dissertation – final entwickelten Versionen (nach den 2. Phasen während der Evaluation) der REA für die ÖPNV-Branche. Nach einem systematischen Überblick beschreibt es die einzelnen Ebenen und Abschnitte der Architektur. Eine Fähigkeitenlandkarte (Capability Map, auch Capability-Modell), die aus einer der Evaluationsphasen hervorging, ergänzt die Darstellung. Abschließend wird ein auf der entwickelten Enterprise Architecture basierendes und automatisch generiertes Übersichtsmodell, welches Domänen- sowie Bebauungsplan-Bestandteile enthält, präsentiert.

Kapitel 10 fasst die Ergebnisse der Dissertation zusammen, ordnet sie ein, beantwortet die zur Diskussion gestellten Fragen und zeigt die Implikationen der Ergebnisse auf. Abschließend reflektiert Kapitel 11 die Ergebnisse, beleuchtet sie aus einer übergeordneten Perspektive und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsbedarfe.

2 Methodische Grundlagen

Die Dissertation wurde bereits bei der Betrachtung des Forschungskontextes der Wirtschaftsinformatik zugeordnet (Kapitel 1.1). Darauf baut die Darstellung des forschungsmethodischen Designs in diesem Kapitel auf. Vorschläge für die Methodik des Forschungsvorhabens stammen aus wissenschaftstheoretischen Ansätzen, die darauf zielen, eine theoretische Basis bzw. einen Rahmen für das Forschungsvorgehen zu schaffen und kritisch zu reflektieren [15, S. 4]; [35, S. 8]; [17, S. 161]; [53, S. 22].

2.1 Gestaltungsorientierte Forschung

Die Wirtschaftsinformatik wurzelt in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften sowie in der Informatik, besonders der angewandten Informatik (Kapitel 1.1). Diese Fachgebiete prägen die Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik [54, S. 106]; [55, S. 280]. Zwei Ansätze bestimmen die Forschung: die theoretische und die empirische Forschung [54, S. 106], wobei sich die theoretische Forschung primär mit der Entwicklung von Theorien und die empirische Forschung mit ihrer Überprüfung beschäftigt [54, S. 107]. Laut Heinrich besteht eine Besonderheit der Wirtschaftsinformatik darin, dass sie sowohl erklärende als auch gestaltende Elemente vereint [54, S. 107]. Dabei sind in der Wirtschaftsinformatik 2 Forschungsparadigmen zu unterscheiden: das behavioristische bzw. verhaltenswissenschaftliche Paradigma (der behavioral science) und das gestaltungsorientierte bzw. konstruktionswissenschaftliche Paradigma (der design science) [55, S. 281]; [44, S. 75]. Ziel des verhaltenswissenschaftlichen Ansatzes ist die Entwicklung und Überprüfung von Theorien, wie z.B. die Erklärung oder Vorhersage menschlichen oder organisationalen Verhaltens [34, S. 75]. Das Ziel des Behavioral-Science-Forschungsansatzes ist die Entwicklung und Verifikation von Theorien, wie z.B. die Erklärung bzw. Vorhersage menschlichen oder organisatorischen Verhalten [44, S. 75]. Wilde und Hess sehen dabei die Analyse der Ausgestaltung und Wirkung verfügbarer IT-Lösungen auf Unternehmen und Märkte als zentrales Thema [55, S. 281].

Demgegenüber versucht der Forschungsansatz der Design Science, die Grenzen menschlicher und organisatorischer Faktoren durch die Entwicklung neuer und innovativer Artefakte zu erweitern [44, S. 75]. Damit zielt Design Science auf die Entwicklung nützlicher IT-Lösungen durch die Konstruktion und Evaluation von Artefakten wie Architekturen, Modellen, Methoden oder Systemen [55, S. 281].

Die in Kapitel 1.2 aufgeworfenen forschungsleitenden Fragen und die damit verbundenen Zielsetzungen sind Gegenstand der Entwicklung eines Modells in Form einer Referenz-Enterprise-Architektur zur Integration von NMS in ÖPNV-Unternehmen. Zur Lösung der in der Einleitung skizzierten Problemstellung bedarf es eines methodischen Konzepts, das als Rahmen Ansätze impliziert, die für die Untersuchung der Realität prädestiniert sind und diese somit durch Artefakte beeinflussen. Das DSR-Framework dient in dieser Forschungsarbeit als methodischer Rahmen zur Artefaktentwicklung; ein originärer Beitrag zur Weiterentwicklung der Methode wird nicht angestrebt.

Um das passende Konzept zu identifizieren, zieht der Autor eine Taxonomie heran, die Järvinen [56, S. 252] für Forschungsmethoden entwickelte. In der folgenden Abbildung werden anhand des dargestellten Pfades die für diese Dissertation ausgewählten Ansätze veranschaulicht.

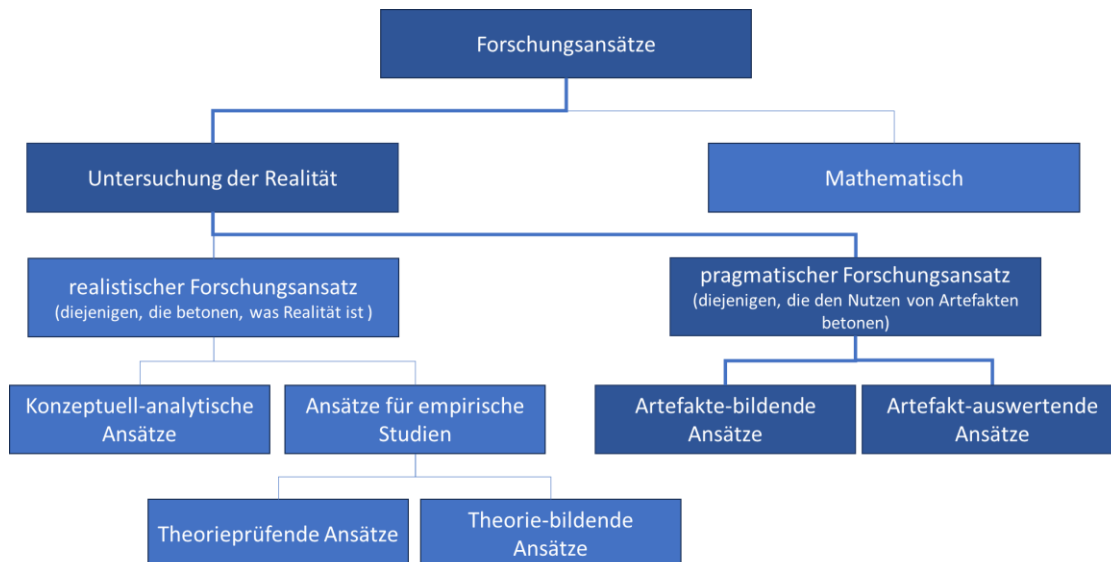


Abbildung 1: Taxonomie für Forschungsmethoden (in Anlehnung an [56, S. 252])

In der gestaltungsorientierten Forschung, also den Design Science, stehen die Konzeption und Evaluation von IT-Artefakten zur Lösung ungelöster oder schwieriger Probleme (sog. „wicked problems“) im Mittelpunkt [44, S. 87]. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf der Entwicklung eines solchen Artefakts, konkret einer Referenz-Unternehmensarchitektur für die Integration von bedarfsorientierten Verkehrsformen, im Besonderen NMS, in klassische ÖPNV-Unternehmen.

Hevner et al. definieren Design Science als „die andere Seite des IS-Forschungszyklus¹⁴, [die] Artefakte schafft und bewertet, die zur Lösung identifizierter organisatorischer Probleme bestimmt sind“ [44, S. 77, Übersetzung durch den Autor]. Artefakte können – wie oben schon erwähnt – Konstrukte, Modelle, Methoden oder Instanziierungen sein, die sich in Software oder in formalen bis hin zu informellen natürlichsprachlichen Beschreibungen manifestieren [44, S. 77]; [57, S. 256].

Das in Abbildung 2 dargestellte DSR-Framework nach Hevner [44] wird in dieser Dissertation im Wesentlichen für die Entwicklung eines Artefakts sowie dessen Evaluation herangezogen. Einflussfaktoren wie Umfeld und Wissensbasis beeinflussen das Artefakt. Deshalb gilt es einerseits, ein Artefakt zu schaffen, das Anwendung im Umfeld findet,

¹⁴ Der IS-Forschungszyklus (Information Systems Research Cycle) beschreibt den iterativen Prozess der systematischen Wissensgenerierung im Fachgebiet der Informationssysteme. Er umfasst typischerweise die Phasen der Problemidentifikation, Theoriebildung, Gestaltung und Evaluation von Artefakten sowie die Kommunikation der Forschungsergebnisse. Ziel ist es, durch wissenschaftlich fundierte Methoden sowohl theoretische als auch praxisrelevante Beiträge zu leisten [44, S. 75–105].

und andererseits die Wissensbasis zu erweitern, um Relevanz und Stringenz der Forschung zu gewährleisten. Abbildung 2 veranschaulicht die damit angesprochenen Zusammenhänge, wie sie von Hevner et al. (2004) in einem Rahmenkonzept (DSR-Framework) für gestaltungsorientierte Forschung dargestellt wurden.

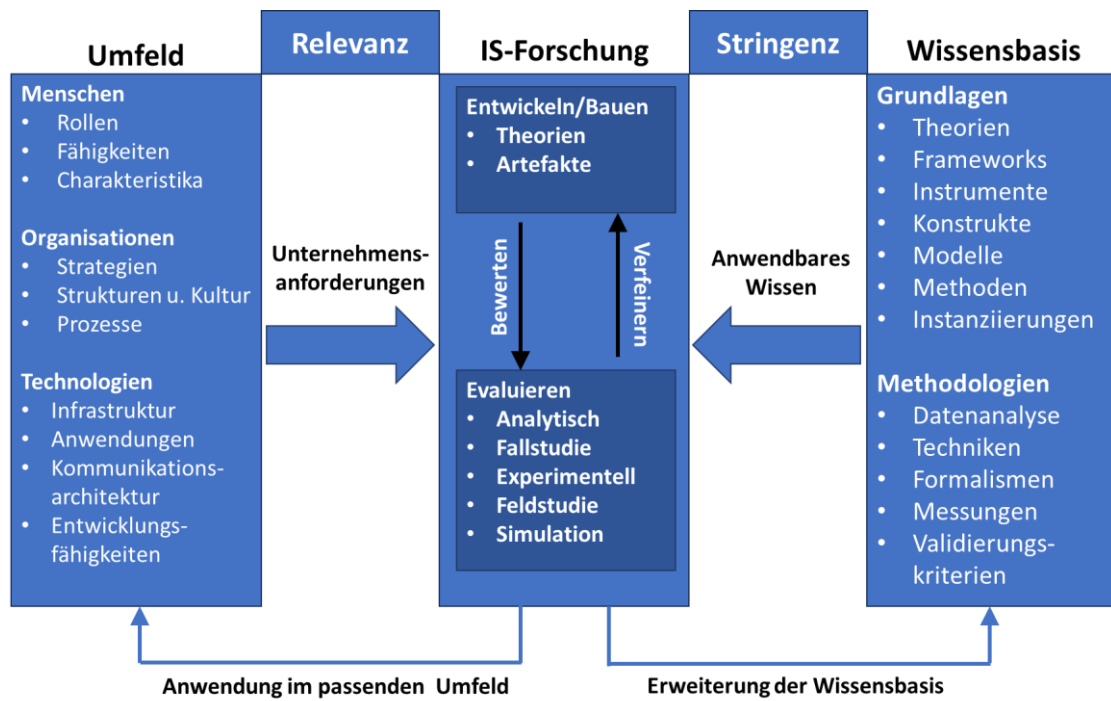


Abbildung 2: Rahmenkonzept der gestaltungsorientierten Forschung nach Hevner et al. [44, S. 80], Übersetzung des Autors nach [58, S. 5]

Den direkten Einfluss von Umfeld und Wissensbasis auf die Informationssystemforschung zeigt Abbildung 2. Dabei bestimmt das Umfeld – bestehend aus den 3 Komponenten Mensch, Organisation und vorhandene bzw. geplante Technologie – den Raum, in dem das zu lösende Problem angesiedelt ist. Darin enthalten sind wiederum Ziele, Aufgaben, Herausforderungen und Möglichkeiten wie z.B. Geschäftsanforderungen, einen Beitrag zur Lösung von identifizierten Gestaltungsproblemen zu erbringen.

Dabei wird die Wahrnehmung durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Rollen, Funktionen und Fähigkeiten von Personen,
- Strategien, Strukturen, Organisationskultur, bestehende Geschäftsprozesse der beteiligten Unternehmen und
- bestehende Infrastrukturen und Anwendungen der eingesetzten Technologien.

Diese Aspekte werden in der Forschungsliteratur als bekannte Unternehmens- bzw. Geschäftsanforderungen definiert. Davon ausgehend gliedert sich die Forschung in 2 komplementäre Phasen:

1. eine erste Phase der verhaltensorientierten Forschung, die sich mit der Entwicklung und Begründung des vorliegenden Problems befasst, und
2. eine zweite Phase der gestaltungsorientierten Forschung, die sich mit der Konstruktion und Evaluation des Artefakts befasst, das zur Erfüllung der Geschäftsanforderungen geschaffen wird.

In Bezug auf die Umwelt umfasst die Wissensbasis einerseits die Grundlagen wie Theorien und Modelle, mit denen die Forschung durchgeführt wird. Andererseits beinhaltet sie Methoden, die der Datenauswertung sowie der Bewertung des konstruierten Artefakts dienen. Dabei wird die wissenschaftliche methodische Strenge, Genauigkeit und Sorgfalt (Rigor) durch die strikte Anwendung der Methoden gewahrt. Die Adressierung betrieblicher Anforderungen stellt die Relevanz der verhaltenswissenschaftlichen und gestaltungsorientierten Forschung sicher. Deren Ergebnisse werden hinsichtlich der Fragen evaluiert, wie die betrieblichen Anforderungen in dem jeweiligen konkreten Umfeld umgesetzt werden (können) und welchen Beitrag diese zur Wissensbasis von Forschung und Praxis leisten [44, S. 79–80]. Gestaltungsorientierte Forschung zielt neben der Entwicklung von Artefakten auch auf die Evaluation dieser Artefakte ab [57, S. 256], da nur dadurch der Grad der Zielerreichung, die Qualität und die Nützlichkeit des Artefakts ermittelt werden können [44, S. 85].

Brooks sowie Hevner et al. [59, S. 62ff.]; [44, S. 81]; vgl. dazu auch [18, S. 11] definieren die Art von Problemen, für die sich dieser Forschungsansatz eignet. Solche „wicked Problems“¹⁵ liegen vor, wenn (1) sich aufgrund des wenig erforschten Anwendungsgebietes die Anforderungen und Rahmenbedingungen häufig ändern, (2) komplexe Beziehungen zwischen den einzelnen Problem- und Lösungskomponenten bestehen, (3) der Prozess zu einer inhärenten Flexibilität führt, die es ermöglicht, Entwurfsprozesse und Artefakte zu verändern, und wenn das Finden einer effizienten Lösung (4) in hohem Maße von den kognitiven Fähigkeiten der beteiligten Personen abhängig ist und (5) eine ebenso hohe Abhängigkeit von den sozialen Fähigkeiten der beteiligten Personen besteht.

Für die gestaltungsorientierte Forschung nach der DSR-Methodik beschreiben Peffers et al. [45] einen sechsstufigen Prozess: (1) Problem identification and motivation, (2) Define the objectives for a solution, (3) Design and development, (4) Demonstration, (5) Evaluation und (6) Communication. Johannesson und Perjons schlagen in ihrer Veröffentlichung von 2014 [60] ein Modell vor, das 5 Kernaktivitäten einschließt [60, Kapitel 4, Summary of Chapter, S. 86]. Sie betonen, dass ihr Framework „nah an Peffers et al.“ liegt und listen die 6 Schritte nach Peffers et al. (inkl. Communication) auf. Die Kommunikation behandeln sie nicht als eigene Phase bzw. Aktivität, da sie diese als begleitende Aktivität ansehen, die alle Phasen durchzieht [60, S. 87].

¹⁵ Wicked Problems im Sinne des DSR-Ansatzes sind schwerwiegende Probleme, die es durch die Vielzahl ihrer voneinander abhängigen Faktoren unmöglich erscheinen lassen, sie zu lösen. Siehe hierzu: <https://www.stonybrook.edu/commcms/wicked-problem/about/What-is-a-wicked-problem>.

Beide Ansätze ermöglichen ein strukturiertes Vorgehen durch die Entwicklung und Evaluation von Artefakten. Besonders nützlich ist diese Vorgehensweise in den Bereichen Informationssysteme und IT-Management, indem sie wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn mit praktischer Anwendung verbindet.

Im Folgenden werden die Phasen nach Peffers et al. [45], wobei die letzte Phase in Johannesson und Perjons [60] iterativen Kernaktivitäten berücksichtigt aber nicht explizit aufgeführt wird. Jede einzelne Phase/Aktivität ist entscheidend für den Erfolg des Forschungsprozess und wird im Folgenden skizziert.

1. Problemidentifikation und Motivation [60, S. 43–45]

Die erste Phase des Vorgehensmodells besteht darin, das zu lösende Problem zu beschreiben und die Motivation für die Forschung darzulegen. In dieser Phase wird eine gründliche Analyse des aktuellen Stands der Technik durchgeführt, um bestehende Lücken und Herausforderungen zu identifizieren. Die Problemstellung muss sowohl praktisch relevant sein, um auf reale Bedürfnisse einzugehen, als auch theoretisch interessant, um zur Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse beizutragen. Ziel dieser Phase ist es, ein klares Verständnis des Problems zu erlangen und die Bedeutung der Forschung zu untermauern.

2. Festlegung der Zielvorgaben für die Lösung [60, S. 45–46]

Nachdem das Problem identifiziert wurde, werden in dieser Phase die Ziele definiert, die die Lösung mittels des Artefakts erfüllen muss. Diese Ziele leiten sich direkt aus der Problemstellung ab und dienen auch als Kriterien, um die entwickelte Lösung zu prüfen. Dabei werden sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen berücksichtigt. Um eine Evaluation des Artefakts zu ermöglichen, müssen die Ziele messbar und überprüfbar sein. Die zweite Phase bildet die Grundlage für den Design- und Entwicklungsprozess. Sie stellt sicher, dass die Lösung den identifizierten Anforderungen entspricht.

3. Entwurf und Entwicklung [60, S. 46–48]

Hier wird das eigentliche Artefakt entworfen und entwickelt. Dieser Prozess ist iterativ und umfasst oft mehrere Prototyping- und Verfeinerungszyklen. Das Artefakt kann verschiedene Formen annehmen, z.B. Modelle, Methoden, Konstruktionen oder Systeme. In dieser Phase werden verschiedene Form- und Gestaltungsoptionen evaluiert und angepasst, um zu einer optimalen Lösung zu gelangen. Kreativität und Innovation spielen hier eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Phase ist es, ein funktionsfähiges Artefakt zu schaffen, das die in der zweiten Phase festgelegten Ziele erfüllt.

4. Demonstration [60, S. 48–49]

In dieser Phase wird das Artefakt in einer realen oder simulierten Umgebung präsentiert, um seinen Nutzen und seine Anwendbarkeit zu demonstrieren. Dies kann durch Fallstudien, Experimente, Pilotprojekte oder andere geeignete Methoden erfolgen. Ziel der vierten Phase ist es, die Funktionsweise und den Nutzen des Arte-

fakts zu veranschaulichen und erste Erkenntnisse über seine Wirksamkeit zu gewinnen. Die Demonstration dient auch dazu, praktische Erfahrungen zu sammeln und eventuell notwendige Anpassungen am Artefakt vorzunehmen.

5. Evaluation [60, S. 49–52]

Die Evaluation ist eine zentrale Phase des DSR-Prozesses: Das Artefakt wird systematisch bewertet, um zu überprüfen, ob es die festgelegten Ziele erreicht. Dabei kommen i.d.R. verschiedene Methoden wie etwa quantitative und qualitative Analysen, Experimente, Umfragen oder Expertenbewertungen zum Einsatz. Die Evaluation soll zeigen, inwieweit das Artefakt das identifizierte Problem löst und welchen Mehrwert es bietet. Diese fünfte Phase liefert wertvolle Erkenntnisse für die weitere Forschung und Entwicklung; sie kann auch theoretische Beiträge liefern.

6. Kommunikation [60, S. 52–54]

In dieser Phase werden die zuvor dokumentierten Forschungsergebnisse umfassend kommuniziert. Dazu gehört die Darstellung der Problemstellung, der entwickelten Lösung, deren Evaluation und aller in dem Gesamtprozess gewonnenen Erkenntnisse. Die Kommunikation erfolgt typischerweise durch Präsentationen auf Konferenzen, durch wissenschaftliche Publikationen oder Veröffentlichungen in anderen Medien. Ziel dieser Phase ist es, die Forschungsergebnisse sowohl in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch in der Praxis zu verbreiten. Damit wird ein Beitrag zur Wissensentwicklung und zur praktischen Anwendung geleistet.

Der verbreitete sechshebige DSR-Prozess stammt von Peffers, Tuunanen, Rothenberger & Chatterjee [45]. Johannesson und Perjons [60] stellen zwar ein sehr ähnliches, aber 5 Aktivitäten umfassendes Methoden-Framework vor und verweisen explizit auf Peffers' 6 Schritte (die dort zudem „Kommunikation“ als eigene Phase einschließen).

Diese strukturierte Vorgehensweise stellt sicher, dass der DSR-Prozess methodisch fundiert und nachvollziehbar ist, was zu robusten Forschungsergebnissen führt. Für diese Forschungsarbeit wurde das DSR-Framework als geeigneter methodischer Rahmen zur gestaltungsorientierten Forschung identifiziert; die konkrete Operationalisierung des Vorgehens (Prozessmodell, Methodenmix, Evaluation) wird in Kapitel 2, 6, 7 (insb. 7.5) und 8 behandelt. Ein methodologischer Beitrag zur Weiterentwicklung des DSR-Ansatzes ist nicht intendiert. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Phasen ermöglicht es, den Forschungsprozess zielgerichtet und effizient zu gestalten.

2.2 Forschungsmethodik

Diese Dissertation nutzt das DSR-Forschungsparadigma, um ein Referenz-Enterprise-Architekturmodell (REA-Modell) zu entwickeln, das bedarfsorientierten Verkehr in die Architektur klassischer ÖPNV-Unternehmen integriert. Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, stellt DSR als gestaltungsorientierte Forschung einen zentralen Ansatz der Wirtschaftsinformatik dar, um innovative Artefakte zu entwickeln und zu evaluieren. Dabei werden Modelle, Methoden und Systeme konzipiert, die konkrete betriebliche Herausforderungen

adressieren und einen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn ermöglichen. Das methodische Vorgehen stützt sich auf das bewährte DSR-Framework von Johannesson und Perjons [60]. Im Folgenden werden die Inhalte der 6 iterativen Phasen (vgl. Kapitel 2.1) vorgestellt:

1. Problemidentifikation und Motivation: Untersuchung wissenschaftlicher Lücken und praxisrelevanter Herausforderungen bei der Integration von NMS in den ÖPNV
2. Definition der Zielvorgaben für die Lösung: Ableitung spezifischer Anforderungen an ein REA-Modell durch eine systematische Literaturanalyse und eine Fallstudie mit einem NMS-Prototyp
3. Entwurf und Entwicklung: Iterative Konzeption und Verfeinerung des Modells mithilfe argumentativ-deduktiver Methoden
4. Demonstration: Prüfung der Praxistauglichkeit des Modells anhand realistischer Anwendungsfälle
5. Evaluation: Systematische Überprüfung der Effektivität und Anwendbarkeit des Modells durch qualitative und quantitative Methoden
6. Kommunikation: Veröffentlichung der Forschungsergebnisse zur wissenschaftlichen Validierung und praktischen Umsetzung

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, erfordert die gestaltungsorientierte Forschung eine methodisch fundierte Evaluation der entwickelten Modelle bzw. Artefakte. Hierfür wird in der fünften Phase das Framework for Evaluation in Design Science (FEDS¹⁶) von Venable et al. [52] herangezogen. Es unterscheidet zwischen der funktionalen Zielsetzung (formativ oder summativ) und dem Evaluationsparadigma (artifiziell oder naturalistisch). Formative Evaluationen verbessern das Artefakt iterativ und prozessbegleitend, während summative Evaluationen dessen Wirkung prüfen und diese abschließend bewerten. Diese Dissertation kombiniert artifizielle und naturalistische Evaluationsparadigmen, um sowohl die wissenschaftliche Strenge als auch die praktische Relevanz der entwickelten Referenzarchitektur sicherzustellen.

Zur Erhebung und Validierung der Anforderungen wird eine systematische Literaturanalyse mit einer Fallstudie, die einen NMS-Prototypen in einem realen Anwendungsumfeld untersucht, kombiniert. Die Forschungsstrategie folgt einer Methodentriangulation, die qualitative und quantitative Ansätze vereint. Experteninterviews, argumentativ-deduktive Analysen sowie qualitative Inhaltsanalysen nach Mayring [61] sind die zentralen zum Einsatz kommenden Methoden. Diese methodische Vielfalt gewährleistet zum einen eine umfassende Betrachtung des Forschungsgegenstands. Sie ermöglicht zum anderen eine fundierte Modellbewertung, die theoretische wie praktische Erkenntnisse generiert (Kapitel 2.7.2).

¹⁶ Im weiteren Verlauf der Arbeit wird einheitlich die Abkürzung FEDS für ‚Framework for Evaluation in Design Science‘ genutzt.

Gegenstand der Evaluation ist das zu entwickelnde Enterprise-Architecture-Artefakt mit seinen Bestandteilen auf strategischer, taktischer und operativer Ebene. Diese werden gemäß dem gestaltungsorientierten Paradigma überprüft und reflektiert. Im Mittelpunkt steht die strukturierte Anwendung des DSR-Frameworks zur Entwicklung und iterativen Verbesserung eines domänenspezifischen Artefakts. Ein theoretischer oder methodologischer Beitrag zur Weiterentwicklung des DSR selbst ist nicht intendiert.

Neben DSR und der systematischen Literaturanalyse kommen in dieser Arbeit Experteninterviews (qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring), eine Fallstudie (BerlKönig), eine Szenario-Analyse sowie argumentativ-deduktive und argumentativ-induktive Verfahren zum Einsatz. Die methodische Verortung erfolgt in Kapitel 2.

2.3 Design Science Research

Aufbauend auf den in Kapitel 2.1 dargestellten Grundlagen wird die Design Science Research (DSR) in dieser Forschungsarbeit als methodischer Rahmen zur Entwicklung und Evaluation eines Referenz-Enterprise-Architekturmodells eingesetzt. DSR adressiert praxisrelevante, häufig „verzwickte“ Problemstellungen (wicked Problem), indem sie Artefakte (z.B. Modelle, Methoden, Instanziierungen) konstruiert und iterativ bewertet, wobei Nützlichkeit (Utility) und wissenschaftliche Strenge (Rigor) gleichrangig gesichert werden. DSR verbindet in der IS-Forschung Praxisprobleme (Umwelt/Problemraum) mit der wissenschaftlichen Wissensbasis: Sie entwirft Artefakte, evaluiert deren Nützlichkeit (Utility) und speist die Ergebnisse in Theorie zurück; die verhaltenswissenschaftliche Forschung liefert Wahrheitsbefunde (Truth), die das Design anleiten [44, S. 80–81], vgl. Kapitel 2.1.

Vorgehensmodell (im Rahmen des DSR): Für die prozedurale Steuerung wird das verbreitete DSR-Prozessmodell nach Peffers et al. [45] herangezogen (6 Schritte von Problemidentifikation bis Kommunikation mit expliziten Feedback-Schleifen) mit anleihen aus den Kernaktivitäten von Johannesson & Perjons [60]. Die iterative Natur des Designs wird zusätzlich über Hevners Three-Cycle View (Relevanz-, Rigor- und Design-Zyklus) [44, S. 87–92] gerahmt. Die Auswahl folgt dem Kriterium der breiten Akzeptanz im IS-Kontext und der Abdeckung der Hevner-Leitlinien [44, S. 83ff.]; zugleich werden Rücksprünge zu früheren Schritten als integraler Bestandteil verstanden (zu Zusammenstellung und Begründung vgl. Timm [46]; dort auch die schrittweise Beschreibung des Peffers-Modells [45]).

Methodische Feinausgestaltung: Für die Operationalisierung der einzelnen Prozessschritte (Sub-Aktivitäten, Inputs/Outputs, Controls/Resources) orientiert sich die Forschungsarbeit am Methoden-Framework von Johannesson und Perjons [60]. Diese Sicht schärft die Arbeitsteilung zwischen „Build and Evaluate“ und konkretisiert die Artefakt-Erzeugung entlang definierter Zwischenergebnisse [46].

Evaluation nach FEDS: Die Evaluation des Artefakts folgt dem FEDS-Rahmen (Framework for Evaluation in Design Science) mit der zweidimensionalen Charakterisierung von Zweck (formativ, summativ) und Paradigma (künstlich, naturalistisch) sowie einem Vier-

Schritte-Designprozess (Ziele, Strategie(n), zu evaluierende Eigenschaften, Episoden-Design). In dieser Arbeit wird FEDS [52] zur Planung formativer, naturalistischer Episoden genutzt (Experten-Reviews, Szenario-basierte Demonstrationen, Dokumenten-/Modell-Sichtung).

Artefakt-Typen und Beitrag: DSR differenziert zwischen Konstrukten, Modellen, Methoden, Instanziierungen sowie (in Teilen der Literatur) Design-Theorien. Im Zentrum dieser Dissertation steht ein Modell-Artefakt (Referenz-Enterprise-Architektur) mit begleitenden Instanziierungs- und Dokumentationsartefakten. Die Arbeit zielt auf einen domänenspezifischen Anwendungsbeitrag (demonstrierte Anwendbarkeit und Nützlichkeit im ÖPNV-Kontext) und nicht auf einen methodologischen Beitrag zur Fortentwicklung der DSR-Methodik (vgl. Klarstellung in Kapitel 2.1).

Abgrenzung und Querverweise: Die theoretische Fundierung von DSR (Paradigmenbezug, Wicked-Problems, DSR-Rahmen) ist in Kapitel 2.1 ausführlich dargestellt. Dieses Kapitel legt die konkrete Anwendung und Prozesssteuerung fest. Die Evaluationsepisoden und Gütekriterien werden in Kapitel 2.8 (FEDS) und Kapitel 8 (Evaluation der entwickelten Architektur) weiter ausdifferenziert; die methodische Verortung im Methodenmix (Induktion/Deduktion mit hybriden Elementen) ist in Kapitel 2.3 beschrieben.

Zusammenfassend dient DSR in dieser Forschungsarbeit als operationalisierter Rahmen zur Artefaktentwicklung und -evaluation (zum Prozess nach Peffers et al. [45]; Hevners Three-Cycle View siehe [62]). Die Verknüpfung aus deduktiver Modellbildung (ITVU [63]; ArchiMate [64]) und formativer, naturalistischer Evaluation (FEDS [52]) folgt dem Prinzip der Rigor-Relevance-Balance. Die methodische Verortung (Kapitel 2.5) der Iterationsprozesse (Kapitel 2.6) sowie das Evaluationsdesign (Kapitel 2.8) konkretisieren die Anwendung auf den ÖPNV-Kontext.

2.4 Systematische Literaturanalyse

2.4.1 Allgemeiner Rahmen und Zielsetzung

Systematische Literaturanalyse (Systematic Literature Review, SLR) bezeichnet ein protokollgestütztes, replizierbares Verfahren zur identifikations-, selektions- und bewertungsbasierten Verdichtung des Forschungsstandes zu klar formulierten Fragestellungen. Wesentliche Prinzipien sind Transparenz, Nachvollziehbarkeit (Audit Trail), Vollständigkeitsbestreben (umfassende Suche über mehrere Quellen) und Bias-Reduktion (vordefinierte Kriterien und Verfahren). Typischerweise umfasst eine SLR

- (i) die Planung (Protokoll, Fragen, Kriterien),
- (ii) die Durchführung (Recherche, Screening, Qualitätsbewertung, Datenextraktion) und
- (iii) die Berichterstattung (Synthese, Limitationen, Replikationsinformationen). Für die Berichtslogik wird ergänzend die PRISMA-Systematik (Flow-Diagramm,

Checkliste) herangezogen, um Auswahlpfade und Ausschlussgründe standardisiert offenzulegen [65]; [66].

Suchräume und Quellen: Die Recherche stützt sich auf einschlägige bibliografische Datenbanken (z.B. Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink, Science Direct) [67, S. 24–25]). Suchmaschinen (u.a. Google Scholar) dienen ausschließlich der Quellenkomplementierung. Vorwärts-/Rückwärts-Snowballing ergänzt die Datenbanksuche [68, S. 1, 6]. Die Dokumentation umfasst Suchstrings, Zeitfenster, Datenbank- und Versionsstände [66, S. 5–7].

Bewertung und Synthese: Studien werden anhand a priori definierter Ein-/Ausschlusskriterien sowie Qualitätskriterien, wie z.B. Klarheit der Fragestellung, methodische Angemessenheit, interne/externe Validität, beurteilt [65]; [69, S. 1]. Die Datenextraktion erfolgt regelgeleitet (Extraktionsschema); die Synthese kann deskriptiv (z.B. Häufigkeiten, Kartierungen) und/oder thematisch (qualitative Bündelung von Befunden) erfolgen [70, S. 36–41]. Aktualisierungen (Update-SLR) sind als ergänzende Suchläufe dokumentiert [67, S. 1–2].

2.4.2 Vorgehen nach Kitchenham et al.

Für die konkrete Ausgestaltung folgt die Arbeit dem Kitchenham-Vorgehensmodell für SLR in der Software- und Informationssystemforschung. Das Modell strukturiert die SLR in die 3 Phasen Planung, Durchführung und Berichterstattung mit jeweils definierten Aktivitäten, Artefakten und Qualitätsprüfpunkten [79, S. 5–20]:

(A) Planung der Review

- 1) *Begründung und Fragestellungen:* Nachweis der Notwendigkeit der Review [70, S. 14]; Ableitung präziser Forschungsfragen (z.B. „Welche Architekturmuster ...?“, „Welche Integrationsmechanismen ...?“) [70, S. 16].
- 2) *Protokollierung:* Erstellung eines Review-Protokolls mit Zweck, Suchräumen, Suchstrings (logische Operatoren, Synonyme, Phrasen), Ein-/Ausschlusskriterien, Qualitätskriterien, Extraktionsschema und Syntheselogik [70, S. 14–15]; Versionierung von Änderungen („protocol deviations“) [70, S. 48–50].

(B) Durchführung der Review

- 3) *Recherche und Identifikation:* Systematische Suche in den festgelegten Datenbanken [70, S. 21–22]; Dokumentation von Zeitfenstern [70, S. 23], Dokumentation von Treffermengen und Exportformaten [70, S. 23–24].
- 4) *Studienauswahl (Screening):* Doppelt oder sequentiell durchgeführtes Titel-/Abstract-Screening, anschließend Volltext-Screening auf Basis der vordefinierten Kriterien [70, S. 20]; Konfliktlösung via Drittreview [70, S. 27].
- 5) *Qualitätsbewertung:* Anwendung eines Quality Assessment-Rasters (z.B. Skalen/Checklisten) zur Evidenzeinstufung [70, S. 27].

- 6) *Datenextraktion*: Nutzung eines standardisierten Extraktionsformulars (Bibliografie, Kontext, Methode, Metriken, Artefaktbezug, Hauptergebnisse); Pilotierung an Stichproben; Konsistenzkontrolle [70, S. 36–41].
- 7) *Datensynthese*: Deskriptive Aggregation (z.B. nach Jahr, Venue, Methode) und thematische Synthese (Cluster, Muster, Evidenzstärken); ggf. Sensitivitätsanalysen (Qualitäts-/Design-Heterogenität) [70, S. 41–42].

(C) Berichterstattung und Offenlegung

- 8) *Reporting und PRISMA*: Strukturierte Darstellung der Ergebnisse inkl. PRISMA-Flow (Identification, Screening, Eligibility, Included), Checkliste und Supplement (Suchstrings, Protokoll, Extraktionsschema) [70, S. 49–50]; [66, S. 18–19].
- 9) *Threats to Validity*: Reflexion potenzieller Verzerrungen (Publikations-Bias, Selektions-Bias, Datenbank-Bias, Sprach-/Zeitfenster-Bias) und getroffener Mitigationsmaßnahmen (mehrere Datenbanken, Snowballing, Double-Screening) [70, S. 50]; [66, S. 27].
- 10) *Update-Strategie*: Festlegung eines Update-Suchplans (Trigger, Intervalle, Suchstrategie-Optimierung) [66, S. 1–2]; [67].

Anzumerken ist, dass die im Rahmen der SLR unter Punkt 9 identifizierten Threats to Validity (u.a. Publikations-, Selektions-, Sprach-/Zeitfenster- und Datenbank-Bias) sowie die getroffenen Mitigationsmaßnahmen werden in Kapitel 10.2 zur Prüfung der Gesamtvalidität der Dissertation zusammengeführt.

Abschließend soll auf die Bedeutung hingewiesen werden, die Kitchenham der Domänenadaptation der SLR-Guidelines (z.B. Unterschiede zur Medizin), der strikten Protokollführung und der klaren Artefaktorientierung (Fragen → Kriterien → Extraktion → Synthese) beimisst. Dies ist für Architekturforschung im ÖPNV-Kontext besonders relevant, um Relevanz (Praxisnähe) und Rigor (methodische Strenge) ausbalanciert sicherzustellen [70, S. 1, 12–14, 16, 48–50].

2.5 Methodenmix und forschungslogische Verortung

Die vorliegende Arbeit folgt primär einem deduktiv-argumentativen Vorgehen: Theoretisch fundierte Rahmen werden systematisch auf die Integrationsproblematik von NMS im ÖPNV angewandt – namentlich das ITVU-Branchenmodell [63] zur domänenspezifischen Strukturierung und die VDV-Schriftenreihe¹⁷ zur Integration von bedarfsorientierten Teilaspekten, wie z.B. des Vertriebs. Dazu liefert das ArchiMate-Metamodell formale Notation zur konsistenten Architekturbeschreibungen. Die Wahl einer standardisierten EA-Notation für Referenzarchitekturen ist in der Literatur etabliert (u.a. ArchiMate in do-

¹⁷ Die Schriftenreihe des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) veröffentlicht praxisorientierte Richtlinien und Empfehlungen zu Planung, Betrieb und Technik des ÖPNV; die Hefte erscheinen fortlaufend als „VDV-Schrift Nr. ...“ (Köln: VDV).

mänenspezifischen REA-Projekten), womit Begriffsstrenge und Nachvollziehbarkeit der Modellbausteine gesichert werden (zu methodischen Grundlagen vgl. Kapitel 2.1).

Hybride Elemente entstehen durch formative Rückkopplung im Sinne der DSR: Mehrere Evaluationsepisoden (u.a. Experten-Reviews, Szenario-basierte Walkthroughs) spiegeln die deduktiv abgeleiteten Artefakte naturalistisch zurück und adressieren Eigenschaften wie Vollständigkeit, Konsistenz, Verständlichkeit und Nützlichkeit. Methodisch wird dies über den FEDS-Rahmen gefasst, der Evaluationsepisoden entlang der Dimensionen Zweck (formativ, summativ) und Paradigma (naturalistisch, künstlich) charakterisiert und einen Vier-Schritte-Prozess (Ziele, Strategie, zu prüfende Eigenschaften, Episoden-Design) vorgibt [52, S. 77ff., 87]; [46].

Das DSR-Framework dient in dieser Arbeit als methodischer Bezugs- und Steuerungsrahmen (Positionierung zwischen Problemraum/Umwelt und Wissensbasis, Balance von Relevance/Utility und Rigor/Truth). Die Arbeit strebt keinen originären methodologischen Beitrag zur Weiterentwicklung von DSR an, sondern nutzt DSR zur Artefaktentwicklung und -evaluation (vgl. DSR-Grundlagen und ISR-Verortung nach Hevner, die im Kontext der REA-Forschung ausführlich rezipiert werden [46, S. 14–15]).

2.6 Vorgehensmodell und Iterationen

Der Entwurf folgt einer Top-down-Ableitung von der Strategie-/Capability-Ebene über Wertströme/Prozesse hin zu Anwendungen und ausgewählten Technologieaspekten, flankiert von einer Bottom-up-Validierung durch reale Prozess- und Systemartefakte (vgl. zu ArchiMate-Strategy Layer mit Capability und Value Stream sowie die Schichtenlogik und Viewpoints [71, S. 60ff., 96, 99–100]).

Iterativ werden die Artefakte im Design-Cycle (Build ↔ Evaluate) verfeinert; dabei dienen Anforderungen aus dem Relevanzzyklus und Wissen aus dem Rigorzyklus als Input (Hevner-DSR-Zyklen), sodass jede Schleife gezielt Verbesserungen am Modell anstößt [46, S. 18–19].

Jede Iteration dokumentiert die vorgenommenen Änderungen als Change-Requests und hält die Design-Rationale/Modeling Actions nachvollziehbar fest (z.B. Document Modeling Actions, Maintain the Model; [46], Tabelle 10).

Feedback aus Interviews/Workshops wird systematisch erhoben und unmittelbar ins Artefakt überführt (werkstattartige Expertensitzungen mit geführtem Fragebogen; direkte Modellanpassungen, konsolidierte CR-Listen; [46, S. 260]; Anhang C: 66 Change-Requests), was die nächste Artefaktversion speist; vgl. auch Kapitel 8).

2.7 Empirische Methoden

Die empirischen Methoden dieser Arbeit dienen der formativen, naturalistischen Rückkopplung im Sinne des Design-Science-Research-Vorgehens und sichern die Balance aus wissenschaftlicher Strenge (Rigor) und praktischer Nützlichkeit (Relevance) [44, S. 80–81]; [52, S. 77ff., 87–88]. Methodisch wird ein Triangulationsansatz verfolgt: Qualita-

tive Erhebungen und strukturierte Auswertungen werden so kombiniert, dass sowohl domänenspezifisches Erfahrungswissen als auch theoriegeleitete Modellannahmen systematisch zusammengeführt werden [46, S. 42–43]. Die Ergebnisse werden geprüft und iterativ verfeinert – gesteuert durch den Design-Cycle (Build ↔ Evaluate) und den Vier-Schritte-Prozess nach FEDS (Ziele, Strategie wählen, zu prüfende Eigenschaften, Episoden-Design) [46, S. 18–19]; [52, S. 77ff.]. Die Auswahl, Abfolge und Kopplung der Verfahren orientieren sich an ihrer jeweiligen Begründungslogik (Erhebung vs. Ableitung vs. Auswertung) und an ihrem Beitrag zur Artefaktvalidierung (Anforderungspassung, Verständlichkeit, Integrationsfähigkeit) – formalisiert über FEDS-Eigenschaften und Episoden-Designs [52, S. 77ff., 87–88].

2.7.1 Experteninterviews

Die Experteninterviews dienen der gezieltes herausarbeiten von Wissen (Wissenselitation) zu domänenspezifischen Anforderungen und Integrationsbedingungen und werden als naturalistische, formative Episoden im DSR-Kontext eingesetzt (zur Einbettung ins Evaluationsdesign vgl. FEDS; [52, S. 77–81, 87–88].

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden leitfadengestützte Interviews mit Führungskräften aus ÖPNV-Unternehmen durchgeführt; die Auswahl erfolgte nach Rollensadäquatheit (z.B. Leiter EAM) und Zugänglichkeit, die Durchführung anhand vorab definierter Hypothesen/Fragen, das Protokoll als Grundlage für die Auswertung (siehe hierzu die Interview-Protokolle - Anhang Z: Digitale Zusatzmaterialien).

Im REA-Kontext belegt zudem Timm (2020) die Verbreitung von Expert:inneninterviews in REA-Vorhaben und deren Kopplung mit Dokument-/Beobachtungsdaten im Sinne der Triangulation [46, S. 131].

Zur Transparenz und Auswertbarkeit wurden die Interviews regelgeleitet transkribiert und anschließend qualitativ-inhaltsanalytisch aufbereitet (Kapitel 2.7.2).

2.7.2 Qualitative Inhaltsanalyse

Die Qualitative Inhaltsanalyse dient der regelgeleiteten, nachvollziehbaren Reduktion und Kategorisierung des Interviewmaterials (Kapitel 2.7.1) und sichert damit Rigor in der Auswertung. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde die inhaltlich strukturierende Zusammenfassung nach Mayring angewandt; dokumentiert sind Materialbasis, Kategorienbildung (aus Forschungs-/Unterfragen) und – wo nötig – Kodierregel und Verdichtungsschritte [61, S. 13–15, S. 53ff., 60, 68–69, 96ff.].

Die methodische Referenzierung (Mayring) wird in den projektbezogenen Publikationen explizit genannt („... qualitative content analysis according to Mayring ...“), inkl. Zweck (systematic and verifiable text analysis) und Einbettung in den DSR-Evaluationszyklus (Kapitel 8).

2.7.3 Fallstudie

Fallstudien werden naturalistisch eingesetzt, um Kontext, Prozesse und Beziehungen einer Instanz (Organisation/Projekt/System) in der Realwelt tiefenanalytisch zu erfassen; sie kombinieren mehrere Evidenzquellen (u.a. Interviews, Dokumente, Beobachtung) und stützen damit die Triangulation [66, S. 153]; [46, S. 42–43]; [72, S. 26–27, 175ff., 195].

Für Design-Science-Evaluationen ermöglichen Fallstudien die Utility-Prüfung des Artefakts im Realsetting (zu FEDS: naturalistic/formative bzw. -summative Episoden [52, S. 77–81, 87–88] und sind insbesondere für „Wie/Warum“-Fragestellungen geeignet [72, S. 91–92].

Die eigene Forschung referenziert Fallstudienbefunde zur Problemdefinition und Anforderungsschärfung (vgl. Kapitel 5 und 6) sowie zur Anwendung und Evaluation der Referenzarchitektur in ÖPNV-Kontexten (Kapitel 8).

Als Lehrbuch-Referenz wird der Fallstudiendesign-Ansatz nach Yin herangezogen [72, S. 26–27, 62, 175–178, 195]; [46, S. 42–43].

2.7.4 Argumentativ-deduktives Vorgehen

Das argumentativ-deduktive Vorgehen leitet Modellbausteine aus Theorie und/oder Standards ab und überprüft sie an der Domäne: Ausgehend von Rahmenwerken (z.B. ArchiMate, ITVU, VDV) werden Anforderungen und Architekturelemente logisch begründet und top-down konstruiert. Timm [46, S. 209] unterscheidet dafür explizit eine „deductive [...] construction“ im REA-Bauplan.

In der vorliegenden Forschung wird Deduktion u.a. für die Anforderungsableitung und das Design der Referenz-EA verwendet („argumentative-deductive work to derive requirements/design“). Dadurch werden Begriffsstrenge und Nachvollziehbarkeit entlang des Metamodells gesichert.

Empirische Rückkopplungen (Interviews/Fallstudien) schließen den DSR-Design-Cycle (Build ↔ Evaluate) und tragen zur formativen, naturalistischen Validierung bei (zum FEDS-Prozess siehe [52, S. 77–79].

2.7.5 Argumentativ-induktives Vorgehen

Das argumentativ-induktive Vorgehen hebt Muster aus empirischem Material (Einzelmodelle, Prozesse, Artefakte) und verallgemeinert sie schrittweise zu wiederverwendbaren Referenzbausteinen. Timm [46, S. 210] beschreibt hierfür eine „inductive [...] construction“ mit Bottom-up-Zusammenführung und Modellvervollständigung.

Im REA-Feld ist die Kombination von Deduktion und Induktion verbreitet. Timm zeigt, dass mehrere Studien hybride Strategien nutzen (Übersicht „Reasoning approaches“, [46, S. 131], um Theorie-Leitplanken und praktische Evidenz systematisch zu verbinden.

In dieser Forschungsarbeit werden induktive Elemente u.a. durch Auswertung realer Prozess-/Systemartefakte und von Expertenfeedback integriert; ihre Einordnung in FEDS-Episoden erlaubt eine ziel- und eigenschaftsbezogene Planung der Validierung [52, S. 77–79, 80–81].

2.8 Evaluationsdesign (FEDS) und Gütekriterien

Dieses Kapitel spezifiziert das Evaluationsdesign nach FEDS als sequenzierten Vier-Schritt-Prozess, bestehend aus (1) Zielableitung, (2) Strategiewahl, (3) Bestimmung der zu prüfenden Artefakteigenschaften und (4) Design der Evaluationsepisoden. Die Episoden werden entlang der Dimensionen Zweck (formativ, summativ) und Paradigma (naturalistisch, künstlich) verankert. Die konkrete Ausgestaltung und die Ergebnisse der in dieser Arbeit umgesetzten Episoden sind in Kapitel 8 dokumentiert [52, S. 77–81]; vgl. Kapitel 8.

2.8.1 Zielsetzung und Prinzipien

Die Evaluation folgt dem Design-Science-Paradigma als formativem, naturalistischem Prozess, der Nützlichkeit (Utility) und methodische Strenge (Rigor) balanciert. Sie ist entlang Zielkriterien und Artefakteigenschaften geplant und episodisch umgesetzt [52, S. 77–81, 87–88]. Die konkrete Umsetzung des Evaluationsdesigns sowie die Ergebnisse sind in Kapitel 8 dokumentiert.

2.8.2 FEDS-Rahmen

FEDS unterscheidet 2 Dimensionen: den Zweck der Evaluation (formativ oder summativ) und das Paradigma (naturalistisch oder künstlich). Darauf aufbauend leitet FEDS einen Vier-Schritte-Prozess an: (1) Ziele der Evaluation klären, (2) Strategie(n) wählen, (3) zu evaluierende Eigenschaften des Artefakts bestimmen, (4) Episoden designen. Damit werden Evaluationsabfolgen für DSR-Projekte systematisch geplant [52, S. 77–79, 80–81].

Der Autor entschied sich für den Einsatz des FEEDS-Frameworks als Evaluationsansatz, da dieses die iterative und evolutive Natur von Architekturartefakten explizit adressiert und insbesondere die schrittweise Analyse und Weiterentwicklung über definierte Szenarien unterstützt. Im Gegensatz dazu zielen statische Evaluationsmethoden der Design Science Research – etwa comparative oder modellbasierte Evaluationen – primär auf die ex-post-Beurteilung abgeschlossener Artefakte ab und eignen sich daher nur eingeschränkt für die geplante szenariobasierte Untersuchung der architektonischen Variabilität und Entwicklungslogik.

2.8.3 Evaluationsstrategie und Episoden

Aufbauend auf FEDS wird eine Strategie gewählt, die von einem Zustand ohne Evaluation zu formativen und – sofern möglich – summativen, naturalistischen Episoden über-

geht. In dieser Forschungsarbeit kommen insbesondere Experten-Reviews (naturalistisch, formativ) zum Einsatz; die strategische Festlegung und die Ausprägungen der Episoden sind in Kapitel 8.1.2–8.2 niedergelegt [52, S. 80–81]; vgl. Kapitel 8.1.2).

Evaluationsbezogene Bias-Risiken (z.B. Expertenauswahl, Bestätigungsneigung) sind im FEDS-Design berücksichtigt und werden in Kapitel 10.2 gemeinsam mit SLR-bezogenen Risiken bilanziert.

2.8.4 Bezugsrahmen zur Ableitung der Gütekriterien

Die Beurteilung richtet sich an Eigenschaften aus: (a) dem Architekturbeschreibungs-Standard (Stakeholder-Concerns, Views/Viewpoints) als Nachvollziehbarkeitsrahmen, (b) Modellqualitäts-/Referenzmodell-Literatur sowie (c) FEDS-Evaluation-Properties. Im Folgenden werden diese kurz erläutert.

- *Architekturbeschreibung*: ISO/IEC/IEEE 42010 betont die Adressierung von Concerns mittels Viewpoints/Views als Qualitätsprinzipien architektonischer Beschreibungen [46, S. 49–50].
- *Referenzmodell-Evaluation*: dafür empfiehlt Frank (2007) eine multiperspektivische Bewertung (u.a. ökonomisch, deployment-, engineering-, epistemologisch) und verweist auf Kriterien aus der konzeptuellen Modellierung (z. B. syntaktisch/semantisch/pragmatisch) [72, S. 118–140]; [46, S. 68–70].
- *FEDS-Eigenschaften*: FEDS fordert, explizit die zu prüfenden Eigenschaften (z. B. Nützlichkeit/Utility, Verständlichkeit, Wirksamkeit) festzulegen und per Episoden zu prüfen [52, S. 77–79].

2.8.5 Traceability und Dokumentation

Entsprechend dem FEDS-Rahmen wird die Nachvollziehbarkeit der Evaluation des Artefakts über eine End-to-End-Kette von Zielen → zu prüfenden Eigenschaften → Evaluationsepisoden → Befunden sichergestellt; Strategiewahl und Episoden-Design werden begründet, die Abfolge der Episoden sowie die Befunde explizit dokumentiert [52, S. 77–89]; vgl. Kapitel 8). Die Evaluationsmatrix verknüpft:

Anforderung → Architekturelement(e) → Eigenschaft/Episode → Befund

und bildet die zentrale Sicht zur Evidenzsicherung (Kapitel 8.1–8.3). Die Traceability im Artefakt selbst wird modellnah über DP-Referenzen (Domänen-/Prozess-Katalog – siehe hierzu Anhang C) realisiert; jedem Business-/Application-Baustein sind in der finalen Version der Architektur eindeutige DP-IDs zugeordnet (Crosswalk DP → ArchiMate; vgl. Kapitel 7.1.2). Zur Reliabilität/Replizierbarkeit wird eine Case-Database/Chain-of-Evidence geführt (Dokumentation, View-Katalog, strukturierte Anhänge), wie von Yin [72, S. 154, 178–179] gefordert, und in Kapitel 7.3.1 sowie im Anhang ausgewiesen. Die DSR-Leitlinien zur Kommunikation und Replizierbarkeit [44, S. 75–105] werden eingehalten.

2.8.6 Operationalisierte Gütekriterien dieser Forschungsarbeit

In Anlehnung an den FEDS-Rahmen für Design-Science-Evaluation (Ziel/Timing/Strategie/Properties/Episoden), an die Architekturbeschreibung nach ISO/IEC/IEEE 42010 und an ArchiMate als EA-Modellierungssprache werden für das Referenzartefakt die folgenden Gütekriterien explizit operationalisiert und evaluiert:

- (1) Vollständigkeit (Abdeckung der im Domänenrahmen geforderten Objekt-, Schnittstellen- und Prozessklassen; Nachweis über systematische Mapping-Tabellen und Sichten),
- (2) Kohärenz/Konsistenz (widerspruchsfreie Begriffs- und Schnittstellenverwendung über Viewpoints; Konsistenzregeln zwischen Daten-, Anwendungs- und Prozesssicht),
- (3) Verständlichkeit/Kommunizierbarkeit (viewpoint-/stakeholder-bezogen; Adressierung definierter Stakeholder-Concern-Sätze über geeignete Viewpoints/Modelkinds; Verwendung ArchiMate-konformer Notation),
- (4) Nützlichkeit/Utility im Domänenkontext (Artefakt liefert nachweisbaren Nutzen in typischen ÖPNV-Integrationsszenarien, u.a. Reservierung und Buchung, ITCS/RBL¹⁸, Payment),
- (5) Erweiterbarkeit (evolvierbare Artefaktstruktur, klare Erweiterungspunkte, Versionierbarkeit),
- (6) Integrationsfähigkeit (Kompatibilität zu branchenüblichen Standards/Schnittstellen und Referenzmodellen).

Die Zielableitung, Eigenschaftsauswahl und das Design der Evaluationsepisoden sind in Kapitel 8.1 spezifiziert; die Ergebnisse (inkl. Evidenz je Kriterium) folgen in Kapitel 8.2. Zur internen Verankerung wurden die Kriterien bereits in den Artefakt-Bausteinen „Reservierungs-/Buchungssysteme“, „Leitstellen-Systeme (ITCS/RBL)“ und „Zahlungssysteme“ exemplarisch angewandt (u.a. Trennung von Reservierung und Buchung; Transmodel/VDV-Bezüge; Nachweis domänenspezifischer Daten- und Schnittstellenobjekte).

2.9 Szenario-Analyse

Die Szenario-Analyse erfüllt in dieser Dissertation 2 komplementäre Funktionen:

- (1) Ex-ante-Exploration möglicher Zukünfte zur Ableitung von Anforderungen an das Artefakt (REA) sowie

¹⁸ ITCS (Intermodal Transport Control System, dt. rechnergestütztes Betriebsleitsystem/RBL) ist das leitstellenzentrierte Betriebsführungssystem von ÖPNV-Unternehmen für Echtzeit-Disposition, Fahrzeugortung, Anschlusssicherung, Störungsmanagement und Fahrgastinformation. Es integriert Bordcomputer und Leitstelle und verteilt Prognosen/Informationen an Auskunft- und Anzeigesysteme.

(2) Ex-ante-Validierung von Architekturvarianten, Delta-Sichten und Referenz-Konfigurationen.

Die Szenario-Analyse unterstützt damit die DSR-Phasen Define Objectives/Requirements und Design & Development sowie die formative Evaluation mit FEDS in künstlichen und naturalistischen Episoden (u.a. Expertenworkshops). Operativ wird sie dort aufgegriffen, wo Szenario-abgeleitete Anforderungen (Kapitel 6.5) und Referenz-Konfigurationen je Szenario (Kapitel 7.2.5) hergeleitet werden. Die Ergebnisse fließen in Variantenkatalog, Delta-Sichten und die Ausgestaltung der REA-Merkmale (Kapitel 7–9) ein [44, S. 80, 83, 86]; [52, S. 77–80].

2.9.1 Grundbegriffe

Dieser Abschnitt ordnet im Kontext dieses Abschnitts zentrale Begriffe ein:

- *Szenario*: konsistente, widerspruchsfreie und anschauliche (also stimmige) Beschreibung einer möglichen zukünftigen Ausprägung des Untersuchungsgegenstands (hier: Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen), resultierend aus Kombinationen von Treibern, Trends und kritischen Unsicherheiten [74, S. 33–36].
- *Szenariorahmen*: systematischer Ordnungsrahmen (Domäne, Zeithorizont, Bezugsraum, Stakeholder), in dem Treiber identifiziert, strukturiert und verdichtet werden [74, S. 38–44].
- *Kritische Unsicherheiten*: hochwirksame, zugleich schwer prognostizierbare Einflussgrößen [74, S. 44–46] – wie z. B. in dieser Dissertation: Regulatorik/Clearing, Datenzugang zu NMS-Partnern, KRITIS-Auflagen.

Die 4 Integrationsszenarien S1–S4 (von Nicht-Integration/Anbindung bis Vollintegration) bilden den in Kapitel 5.5 beschriebenen Szenarienraum und dienen als verbindlicher Referenzrahmen für Variantenbildung und Evaluation.

2.9.2 Vorgehensmodell (eingesetzte Ausprägung)

Die Arbeit nutzt eine pragmatisch-evidenzbasierte Szenario-Analyse, die in das DSR-Vorgehen integriert ist. Das Vorgehen umfasst 7 Schritte und ist auf Replizierbarkeit und Traceability ausgelegt.

1. Scope & Fokus setzen

Festlegung von Betrachtungsbereich, Zeithorizont und Bewertungskriterien; Bezug auf REA-Sichten (Strategie/Motivation, Geschäfts-/Anwendungsebene, Betrieb).

2. Treiber identifizieren & strukturieren

Sammlung domänenrelevanter Treiber über Literatur/SLR (Kapitel 4), Verbandswissen (VDV), Unternehmensinput (BVG, SWM/MVG, BSAG) und Evaluations-/Interviewepisoden (Kapitel 8). Typische Cluster: Regulatorik/Clearing, Daten-/Schnittstel-

len-Ökosysteme (OJP¹⁹/Plattform), KRITIS/Security, Tarif- und Produktlogik (inkl. Miet-/Reisepreis), Ressourcen-/Einsatzplanung, Vertriebs-/Buchungsprozesse (Reservierung vs. Buchung).

3. Schlüsselunsicherheiten und Annahmen festlegen

Bewertung der Treiber nach Wirkung und Unsicherheit; Ableitung eines Annahmenkatalogs (z. B. Datenzugang zu NMS-Partnern beschränkt/geöffnet; zentrales vs. dezentrales Clearing; Segmentierung von IT und OT in KRITIS-Kontexten).

4. Szenariologik konstruieren

Konstruktion einer Szenariomatrix aus 2 kritischen Unsicherheiten oder morphologischer Kombination mehrerer Ausprägungen; Konsistenzcheck (Cross-Impact) zur Reduktion auf 2–4 robuste Szenarien. Ergebnis sind klar benannte Szenarien (z.B. Offene Plattformkopplung bei hoher KRITIS-Segmentierung, Proprietäre Inseln mit strengem Clearing), die als Referenz-Konfigurationen in den Variantenkatalog einfließen.

5. Szenarionarrative & Architekturauswirkungen ableiten

Ausarbeitung von Storylines (Strategie → Prozesse → Anwendungen → Daten/Schnittstellen → Security/Resilienz) mit Delta-Sichten (Unterschiede S3 ↔ S4; Abweichungen in Vertrieb/Clearing, Tarif, Betriebslenkung) sowie Capabilities und KPIs (z.B. Integrationsaufwand, Datenlatenz, Clearing-Fehlerraten).

6. Implikationen & Anforderungen rückkoppeln

Ableitung Szenario-abgeleiteter Anforderungen (Kapitel 6.5): funktional (Planung, Tarif/Produkt, Vertrieb, Betriebslenkung) und nicht-funktional (Interoperabilität, Security, Auditierbarkeit); Verankerung im Variantenkatalog inkl. Cross-Tree-Constraints (Kompatibilitäten/Konflikte).

7. Indikatoren & Monitoring definieren

Definition früher Signale/Indikatoren zur Szenariofortschreibung (z.B. VDV/OJP-Regelwerke, KRITIS-Leitlinien, Marktintegration NMS, Regulierungsakte) und Rückkopplung in DSR-Zyklen sowie FEDS-Episoden (formativ, künstlich, naturalistisch).

Artefakt-Outputs: Szenariorahmen, Treiber-/Annahmenkatalog, Konsistenz-/Cross-Impact-Matrix, Szenariomatrix und -narrative, Delta-Sichten, Varianten-/Konfigurationsbeschreibungen, Indikatoren-Set; die Zuordnung zu REA-Sichten ermöglicht End-to-End-Traceability zu Kapitel 6–9.

¹⁹ Open Journey Planner (OJP) ist ein offener europäischer Standard für Reiseinformations- und Planungssysteme im ÖPNV. Die Norm: CEN/TS 17118 beinhaltet eine Beschreibung für: „Intelligent transport systems – Public transport – Open API for distributed journey planning“.

2.9.3 Analytischer Bezugsrahmen: Die 6 Dimensionen

Im Sinne des DSR-Ansatzes ist ein Analyserahmen nur dann tragfähig, wenn er sowohl theoretisch fundiert als auch artefaktbezogen begründet ist. Die 6 in dieser Arbeit verwendeten Dimensionen – Strategie, Prozesse, Systeme/IT, Organisation, Daten, Recht/Regulatorik – erfüllen diese Anforderungen. Sie decken (i) die etablierten Sichten der Enterprise und Business Architektur systematisch ab und berücksichtigen (ii) domänenspezifische Bedingungen des ÖPNV/NMS, v.a. Regulierung und Datennutzung. Ihre methodische Leitfunktion zeigen die 6 Dimensionen in den Szenario-Kapiteln (Kapitel 5.5, 6.5, 7.1–7.3), u.a. anhand der Kurzmatrix (Kapitel 5.5), den anwendungsfallbezogenen Anforderungen (Kapitel 6.5) und der Delta-Sichten (Kapitel 7.2, 7.3, Tabelle 10; Kapitel 5.5: Anforderungszuordnung über Dimensionen in Kapitel 6.5 Delta-Sichten inkl. Recht/Compliance in Kapitel 7.2–7.3).

Im Folgenden wird die fachliche Begründung jeder Dimension anhand zentraler Quellen erläutert:

Strategie

Strategische Kohärenz zwischen Geschäfts- und IT-Ausrichtung ist Grundvoraussetzung für wirkungsvolle Digital- und Mobilitätsarchitekturen. Das Strategic Alignment Model unterscheidet 4 Domänen – Business Strategy, IT Strategy, Organizational Infrastructure & Processes, IT Infrastructure & Processes – und zeigt, warum strategische Ziele mit Struktur, Prozessen und IT verknüpft werden müssen. Diese Logik spiegelt sich in der Querschnittsrolle der Strategie-Dimension.

Belege

Henderson & Venkatraman, IBM Systems Journal (Definition und Vier Domänen Modell). ACM Digital Library [75, S. 4–16].

TOGAF: Ableitung von Capability-Bedarfen aus der Geschäftsstrategie innerhalb der Business Architektur (Phase B) [76, S. 115].

ArchiMate 3: Einführung einer Strategie-Schicht (Elemente: Capability, Value Stream, Resource) zur Verbindung von Strategie und operativer Ausgestaltung [71, S. 6 Refcard].

Prozesse

Prozesse setzen strategische Ziele in Wertschöpfung um und sind zugleich Träger regulatorischer Pflichten. In der Business Process Management (BPM) Literatur gelten sie als primärer Gestaltungshebel für Anpassungs- und Compliance-Fähigkeit.

Belege

Dumas, La Rosa, Mendling & Reijers: „Fundamentals of BPM“ [77, S. 4]: Prozesse bestimmen die Anpassungsgeschwindigkeit einer Organisation und gesetzliche Konformi-

tät, konkret „...adapt to new circumstances and to comply with a fast growing number of legislative requirements.“.

BPM Handbook [78, S. 9]: BPM als Ansatz zur Verbesserung von Performance und Compliance.

TOGAF: Verankerung der Prozess- und Organisationsmodellierung in der Business-Architektur (Phase B) (u.a. Value Streams, Organisationsstruktur), [76, S. 107, 115].

Systeme/IT

Die technische Realisierung und die Integrationsfähigkeit hängen von Anwendungs- und Technologiearchitekturen ab. Diese konkretisieren die Anforderungen aus Prozess- und Strategiesicht.

Belege

TOGAF: Definition der 4 Architekturdomänen Business, Data, Application, Technology [76, S. 49]. Behandlung von Data, Application, Technology in eigenen Phasen und Outputs (Data [76, S. 124–131]; Application [76, S. 144]; Technology [76, S. 149–154]).

ArchiMate 3: Präzisierung der Application- und Technology-Layer (Services, Components, Nodes etc.), [71, S. 9–10 Refcard].

→ Ihre Dimension „Systeme/IT“ bündelt damit die anerkannten EA Sichten Application/Technology zur Bewertung von Integrations-, Betriebs- und Qualitätsaspekten.

Organisation

Strukturen, Rollen und Entscheidungsrechte sind eigenständige Gestaltungsvariablen, die die Prozessausführung und den IT-Nutzen beeinflussen. Klassische Organisationslehre (Mintzberg²⁰) und IT-Governance-Forschung unterstreichen die Notwendigkeit einer separaten Organisations-Dimension.

Belege

Mintzberg synthetisiert 5 Organisationsteile (operating core, strategic apex, middle line, technostructure, support staff) sowie Koordinationsmechanismen und Designparameter als eigenständige Architekturgrößen [79, S. 322ff.].

Weill & Ross: „IT Governance on One Page“ [80], SSRN Paper, 2004): Entscheidungsrechte, u.a. für Architektur- und Infrastrukturentscheidungen, sind gezielt zuzuordnen, was die organisatorische Verankerung von IT-/Architekturentscheidungen begründet.

²⁰ Henry Mintzberg ist einer der einflussreichsten Organisations- und Managementtheoretiker des 20. Jahrhunderts. Er gilt als Vertreter der klassischen Organisationslehre der zweiten Generation, also jener Denkrichtung, die nach Taylor, Fayol und Weber entstand und Organisationen nicht mehr nur mechanistisch, sondern strukturell-situativ betrachtet.

Daten

Daten sind strategische Ressourcen – gerade in NMS- und ÖPNV-Ökosystemen – und erfordern eigenständige Governance-Mechanismen (Qualität, Zugriff, Lebenszyklus, Metadaten). Eine eigene Daten-Dimension entspricht dem Stand der IS-Forschung.

Belege

Abraham, Schneider & vom Brocke (2019): Definition von Data Governance als „exercise of authority and control over the management of data“, Ableitung eines Konzeptualisierungs-Framework (u.a. Entscheidungsrechte, Policies, Compliance Monitoring) [81, S. 1–3].

Khatri & Brown (2010): Identifikation von Kernentscheidungsdomänen wie z.B. Datenprinzipien, Datenqualität, Metadaten, Zugriff, Lebenszyklus; Kopplung dieser Domänen an Architekturentscheidungen – ein zentrales Argument für eine eigene Datensicht [82, 148–152].

TOGAF: Phase C (Data Architecture) adressiert die Ableitung von Wechselwirkungen der Datensicht mit Business- und Application-Architektur [76, S. 130–131].

Recht/Regulatorik

In regulierten Mobilitätsmärkten (z.B. ÖPNV-Gesetze, Gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen (PSO) Regeln, Datenschutz/DSGVO (GDPR), Vergabe- und Kommunalrecht) setzen rechtliche Anforderungen klare Grenzen für Architekturen. Eine eigenständige Recht/Regulatorik-Dimension zwingt dazu, diese Vorgaben in Zielbilder und Umsetzungen zu integrieren.

Belege

- BPM-Forschung: Regulatory Compliance als eigenständiges Gestaltungs- und Prüfproblem; Compliance ist proaktiv in Geschäftsprozesse und darunterliegende IT zu überführen [83, Kapitel „Managing Regulatory Compliance in Business Processes“].
- Dumas, La Rosa, Mendling & Reijers heben den gesetzlichen Anpassungsdruck hervor [77, S. 4].
- OECD/ITF-Studie (2021): Governance- und regulierungsbezogene Herausforderungen für NMS und MaaS; Regulierung von Diensten und digitalen Plattformen, datenbezogene Regeln als Voraussetzung für funktionsfähige Ökosysteme [84, S. 8–9].

Fazit

Die 6 Dimensionen bilden ein schlankes, aber vollständiges Raster. Sie verbinden die klassischen EA-Schichten (Business/Process, Application, Data, Technology) aus TOGAF und ArchiMate mit den Dimensionen Strategy (Alignment, Capability/Value Stream Herleitung) und der im Mobilitätssektor unverzichtbaren Dimension Recht/Regulatorik. Damit adressieren sie sowohl Ziel-Mittel-Ketten (Strategie → Prozesse → Sys-

teme) wie auch Governance- und Compliance-Anforderungen (Organisation, Daten, Recht). Diese Logik prägt die Szenario- und Delta-Sichten dieser Dissertation (siehe Kapitel 5.5, 6.5, 7.2 und 7.3).

2.9.4 Datenquellen, Rollen, Qualitätssicherung

Im Folgenden werden Datenquellen, Rollen und die Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Dissertation erläutert.

- Datenquellen: systematische Literaturanalyse (SLR) und Replikation (Kapitel 4), Branchenstandards (ITVU-Modell, VDV-Beiträge), Fallstudie (BerlKönig), Experteninterviews und Workshops (BVG, SWM/MVG, BSAG, VDV) und Evaluationsrunden (Kapitel 8).
- Rollen: Domänenexperten (ÖPNV-Fach), Experten für IT-, EA, Security und KRITIS, Tarif, Clearing, Plattformökosysteme.
- Qualitätssicherung: Konsistenzprüfung der Treiber und Annahmen, Plausibilisierung der Szenarionarrative durch Multi-Stakeholder-Reviews (FEDS-Episoden), Traceability zu Anforderungen (Kapitel 6) und Modellelementen (Kapitel 7–9); Triangulation sowie Sensitivitäts- und Robustheitsprüfungen.

2.9.5 Einbettung in DSR/FEDS und Nachweisführung

Die Szenario-Analyse liefert Ex-ante-Evidenz für Zielvorgaben (Requirements), begründet Varianten und Delta-Sichten und bereitet formative Evaluationen wie bspw. Szenario-bezogene Walkthroughs vor. In FEDS-Terminologie wird sie als formative, künstliche Evaluationsaktivität eingesetzt; Ergebnisse werden in naturalistischen Episoden gespiegelt (Verbands- und Unternehmensfeedback). Die Ausgestaltung des Evaluationsdesigns und seine Umsetzung sind in Kapitel 8 dokumentiert.

2.9.6 Deduktiv oder induktiv?

Die Szenario-Analyse folgt einem hybriden Ansatz:

- Deduktiv: Sie setzt Rahmen (z.B. Szenariorahmen, Unsicherheitsachsen, 2×2-Matrix/Konsistenzlogik) und leitet Zielbilder und Leitplanken ab,
- Induktiv: Sie füllt den Rahmen mit Inhalten (z.B. Treiber sowie Annahmen aus Literatur und Praxis, Narrative, Varianten, KPIs) und verdichtet Evidenzen in den FEDS-Episoden.

Diese Hybridität spiegelt die in dieser Dissertation gewählte Kombination aus deduktiver Strukturierung und induktiver Evidenzintegration im DSR-Prozess wider (vgl. Kapitel 2, argumentativ-induktiv, und Kapitel 8, FEDS-Planung und -Episoden).

2.10 Darstellungs- und Begriffskonventionen der Modelle

Für die finalen Architekturmodelle der Dissertation, die aus der Szenario-Analyse (2. Phase) hervorgehen, hat der Autor ein einheitliches Darstellungs- und Farbkonzept entwickelt. Es sorgt für die visuelle und semantische Kohärenz der verschiedenen Abbil-

dungen, erhöht die Verständlichkeit der REA und macht methodische Entscheidungen im Rahmen des DSR-Prozesses nachvollziehbar.

Das Farbkonzept folgt dem methodischen Prinzip der Design Rigor nach Hevner et al. [44, S. 79–80], was Konsistenz und Wiederverwendbarkeit beinhaltet:

Konsistenz: Identische architektonische Elemente (z.B. Verkehrsarten, Prozesse, Systeme) werden in allen Abbildungen gleichfarbig dargestellt.

Wiederverwendbarkeit: Das Modell bleibt in unterschiedlichen Evaluations- und Anwendungskontexten unverändert interpretierbar.

Das Farbkonzept orientiert sich an den Standards der Enterprise-Architecture-Modellierung (u.a. ArchiMate 3.1 [64]) und wurde konsequent in der Szenario-Analyse angewandt.

Farbkonzept der Architekturmodelle

Zur klaren Unterscheidung der betrachteten Verkehrsarten – angebotsorientiert, bedarfsorientiert und hybrid – sowie der übergreifenden Systemschichten wurden die in Abbildung 3: Farbkonzept der Architekturmodelle. dargestellten Farben verwendet. Diese Farben sind in allen Abbildungen und Diagrammen der Dissertation einheitlich eingesetzt.

Farbe	Verkehrsart/Bedeutung	Anwendungsebene
● Blau	Angebotsorientierter Verkehr (AO) (klassischer Linienverkehr)	Prozesse, Anwendungen und Systeme des planbasierten Linienbetriebs (AO)
● Orange	bedarfsorientierter Verkehr (BO)/ New Mobility Services (NMS)	On-Demand-Dienste, Ride-Pooling, Car-/Bike-Sharing, flexible Plattformdienste (BO)
● Grün	hybrider bzw. integrierter Verkehr (HY)	Kombination von AO und BO in einem integrierten System
● Grau	übergreifende Systeme und Infrastruktur (unabhängig)	Systeme, die nicht direkt den obigen Verkehrsarten zugeordnet werden können.

Abbildung 3: Farbkonzept der Architekturmodelle.

Das Farbkonzept ermöglicht eine eindeutige Zuordnung der Elemente über sämtliche Architekturebenen hinweg (strategisch-motivatorisch, geschäftlich, anwendungsbezogen und technisch). Zur barrierearmen Darstellung wurden Farben mit hohem Kontrast gewählt; in Graustufen-Darstellungen werden ergänzende Schraffuren verwendet.

3 Thematischer Kontext

Dieses Kapitel legt die begrifflichen und theoretischen Grundlagen dieser Forschungsarbeit dar und richtet damit den Fokus auf Enterprise- und Referenzarchitekturen zur Integration von bedarfsorientiertem Verkehr. Zunächst beleuchtet es die Enterprise Architecture (EA) mit ihren Zielen und Aufgaben. Darauf aufbauend wird EA im Kontext eines Referenzansatzes näher untersucht. Anschließend stehen der klassische angebotsorientierte ÖPNV sowie NMS – als Beispiele für bedarfsorientierte Verkehrslösungen – im Zentrum. Den Abschluss bildet der aktuelle Forschungsstand zu EA im ÖPNV.

3.1 Enterprise Architectures und ihr Management

Das Gebiet der Unternehmensarchitektur bzw. Enterprise Architecture (EA) [29] und deren Management (EAM) wird seit mehr als einem Jahrzehnt als Forschungsdisziplin entwickelt. Mit entscheidungsunterstützenden Funktionen und Modellen dient es dem Management von Unternehmen und Organisationen [85]. Zentrales Ziel der Unternehmensarchitektur ist es, Interaktionen zwischen Fachabteilung und IT zu modellieren, auszurichten und zu verstehen. Auf diese Weise wird die Voraussetzung für einen dem Kontext angepassten und strategisch ausgerichteten Entscheidungsrahmen sowohl für das Business als auch für die IT geschaffen [86].

EAM, wie es heute durch verschiedene Standards wie ArchiMate²¹ [71] und TOGAF²² [87] definiert ist, nutzt zahlreiche Perspektiven, um die Abstimmung über die Business-IT-Ausrichtung (BITA) zu steuern und zu dokumentieren [85]. EAM verfolgt einen Managementansatz, der klare Richtlinien, IT-Architekturprinzipien²³ und IT-Governance-Regeln²⁴ formuliert, pflegt und anwendet. Diese bieten Orientierung und Unterstützung, um Architekturen zu gestalten und die Transformationsziele des Unternehmens zu verwirklichen. Ein effektiver EAM-Ansatz für digitale Unternehmen sollte zusätzlich die Digitalisierung von Produkten und Dienstleistungen fördern [90] und sowohl umfassend als auch flexibel bleiben.

Für die Analyse und das Design von EA existieren zahlreiche Rahmenwerke bzw. Frameworks, die die verschiedenen Ebenen der EA systematisieren. Diese Frameworks liefern „Grundsätze, Modelle und Anleitungen, die bei der Entwicklung eines EA-Programms helfen“ [91, S. 121–149, 124]. Sie definieren, welche architektonischen Dokumente erforderlich sind, und geben Anleitungen, wie sich EA in die Praxis umsetzen

²¹ Zu ArchiMate vgl. Fußnote 2 sowie Kapitel 3.1.2.

²² Das 2011 entwickelte The Open Group Architecture Framework (TOGAF) ist eines der am häufigsten verwendeten EA-Frameworks. Siehe dazu Kapitel 3.1.1.

²³ Architekturprinzipien beschreiben zentrale, organisationsweit gültige Gestaltungsleitlinien für die Entwicklung und den Betrieb einer Unternehmensarchitektur in Anlehnung an Stelzer [88, S. 55–60].

²⁴ IT-Governance umfasst die „Gesamtheit der grundlegenden Führungs-, Organisations- und Kontrollmechanismen, die sicherstellen, dass die IT die Geschäftsstrategie unterstützt und unter Beachtung von Risiken, Ressourcen und Wertbeitrag gesteuert wird.“ [89, S. 611]

lässt [92, S. 103–113]; [91, S. 121–149]. Damit dienen EA-Frameworks als Orientierungshilfe für die Produkt- und Prozessdimension von EA-Initiativen in Organisationen.

Zwei grundlegende Frameworks, ISO/IEC 42010 und das Zachman-Framework, sollen hier vorab beleuchtet werden, da sie die Basis zeitgemäßer Architekturansätze bilden.

Die Norm ISO/IEC 42010 legt Anforderungen an Architekturbeschreibungen fest, insbesondere die Nutzung von Viewpoints, Views, Stakeholders, Concerns und Models. Ziel ist eine konsistente und nachvollziehbare Darstellung von Architekturen, v.a. in komplexen Systemlandschaften. Das Framework betont die Mehrschichtigkeit von Architekturen und berücksichtigt gezielt die unterschiedlichen Informationsbedarfe der Stakeholder. Zudem dient ISO/IEC 42010 als Metamodell für Architekturbeschreibungen und bildet häufig die methodische Grundlage für umfassendere Rahmenwerke wie etwa TOGAF [93].

Das Zachman-Framework hingegen ist ein klassifikatorisches Modell, das Architekturelemente in einer 6×6-Matrix strukturiert. Es kombiniert 6 grundlegende Fragen (Was, Wie, Wo, Wer, Wann, Warum) mit 6 Stakeholder-Sichten (u.a. Planer, Designer, Nutzer), um alle Architekturperspektiven abzudecken. Anders als ISO/IEC 42010 versteht sich das Zachman-Framework nicht als methodisches Vorgehensmodell, sondern als Taxonomie zur Ordnung und Systematisierung von Architekturelementen. Beide Frameworks leisten einen wichtigen Beitrag zur konzeptuellen Fundierung von Enterprise Architecture Management [94, S. 276–292].

Während ISO/IEC 42010 den Fokus auf formale Konsistenz und Stakeholder-Orientierung legt, liefert Zachman ein universelles Raster zur Beschreibung von Architekturen. Gemeinsam bilden sie eine zentrale Grundlage zeitgemäßer Architekturansätze [95, S. 7–18]. Felix Timm betont zudem, dass diese Modelle wichtige Prinzipien liefern, in der Praxis jedoch durch methodische Ergänzungen wie TOGAF oder REAM²⁵ erweitert werden müssen [46, S. 51].

Da der Umfang dieser Dissertation keine umfassende Darstellung aller EA-Frameworks erlaubt, konzentrieren sich die folgenden Kapitel auf die in diesem Promotionsprojekt hauptsächlich verwendeten EA-Techniken: das EA-Framework TOGAF und die EA-Modellierungsnotation ArchiMate von The Open Group – jeweils in ihrer aktuellen Version.

3.1.1 The Open Group Architecture Framework (TOGAF)

Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht über das 2011 von The Open Group vorgestellte „The Open Group Architecture Framework“ (TOGAF). Es zählt zu den meistgenutzten Frameworks für EA [96, S. 58–59]; [91, S. 4299]. TOGAF entstand ursprünglich als generisches Framework und Methodik zur Entwicklung technischer Architekturen. In spä-

²⁵ REAM ist eine Methode zur Entwicklung von REAs. Sie wurde im Kontext des DSR konzipiert und zielt darauf ab, den Entwicklungsprozess von REAs systematisch, wiederholbar und methodisch fundiert zu unterstützen [46, S. 153 ff.]; vgl. Kapitel 3.2).

teren Versionen erweiterte es seinen Fokus auf EA. Die aktuelle Version 10 umfasst folgende Hauptkomponenten [87]:

1. Architecture Development Method (ADM)

ADM ist das Kernstück von TOGAF. Sie beschreibt einen iterativen Prozess zur Entwicklung und Wartung von Unternehmensarchitekturen. Der Zyklus umfasst 8 Phasen, von der Vorbereitungsphase (Preliminary Phase) über die Architekturvision, die Domänenarchitekturen (Geschäfts-, Informationssystem- und Technologiearchitektur), die Migrationsplanung und Umsetzung bis hin zum Architekturmanagement. Jede Phase stützt sich auf definierte Aktivitäten sowie spezifische Input- und Output-Artefakte [87, S. 2–13].

2. Architecture Content Framework

Dieser Bestandteil legt fest, welche Artefakte (Deliverables, Artefakttypen und Building Blocks) im ADM entwickelt und genutzt werden. Das Framework strukturiert und standardisiert Architekturbeschreibungen, um eine konsistente Dokumentation zu gewährleisten. Es gliedert Inhalte in Architecture Building Blocks (ABB), Solution Building Blocks (SBB), Architekturbeschreibungen und Kataloge, Matrizen sowie Diagramme [97].

3. Enterprise Continuum und Tools

Das Enterprise Continuum bietet eine konzeptionelle Struktur zur Klassifizierung und Organisation von Architekturbeschreibungen und -ressourcen. Es unterteilt sich in das Architecture Continuum (von strategischen bis spezifischen Architekturen) und das Solutions Continuum (von generischen bis spezifischen Lösungen). Verschiedene Werkzeuge und Aufbewahrungsorte (Tools und Repositories) unterstützen dabei, wiederverwendbare Elemente bereitzustellen [98, Abschnitt „Enterprise Continuum“].

4. Resource Base

Die Resource Base enthält Richtlinien, Vorlagen, Checklisten, Methoden und Referenzmaterialien, die die ADM-Phasen unterstützen. Dazu zählen etwa Techniken für Stakeholder-Management, Risiko- oder Gap-Analysen [99].

5. Capability Framework

Neuere TOGAF-Versionen betonen die Bedeutung des Aufbaus organisatorischer Fähigkeiten für das Architekturmanagement. Das Capability Framework definiert Kompetenzen, Rollen, Verantwortlichkeiten und Prozesse, die notwendig sind, um ein effektives EA-Management in einer Organisation zu etablieren [100].

TOGAF bietet ein umfassendes Framework, das methodische Anleitungen und strukturelle Werkzeuge kombiniert, um die Entwicklung, Umsetzung und Pflege einer Enterprise Architecture systematisch und nachhaltig zu gestalten. Dank seiner Modularität und Anpassungsfähigkeit eignet es sich besonders für komplexe Transformationsvorhaben wie etwa die Integration bedarfsorientierter Verkehrskonzepte in klassische ÖPNV-Unternehmen [101, S. 119ff.].

3.1.2 ArchiMate: EA-Modellierungsnotation

ArchiMate ist eine standardisierte Modellierungssprache, die die Open Group entwickelt hat. Sie baut direkt auf den Konzepten des TOGAF-Frameworks auf und liefert eine formale Semantik zur Beschreibung von Architekturelementen und deren Beziehungen über alle relevanten Sichten/Views, v.a. Stakeholder View, Organization View, Application Structure View [71, S. 97ff.]. In der aktuellen Version 3.2 unterstützt sie besonders die Architekturschichten, die TOGAF definiert. ArchiMate umfasst verschiedene Elemente, die im Folgenden beschrieben werden.

- **ArchiMate Core Framework**

Das Framework basiert auf einem standardisierten Metamodell [71], das die zentralen Layer (Business, Application, Technology) sowie deren Beziehungen beschreibt. Es bildet den strukturellen Ordnungsrahmen von ArchiMate und hilft, Architekturelemente konzeptionell zu verorten. Es definiert die grundlegenden Konzepte, Schichten und Beziehungen, die notwendig sind, um Unternehmensarchitekturen systematisch zu modellieren. Dieses Framework stellt das strukturelle Rückgrat von ArchiMate dar. Es umfasst v.a. die 3 klassischen Architekturschichten sowie zentrale Struktur- und Verhaltenskonzepte, die sich wie folgt gliedern:

- 3 Kernschichten (Core Layers): Business Layer, Application Layer und Technology Layer (Abbildung 4),
- Strukturkonzepte (Structure Elements): Active Structure, Behavior, Passive Structure (Abbildung 4),
- Beziehungen (Relationships): Composition/Aggregation, Assignment/Realization, Triggering/Flow und Access/Used-By.

Dabei dient das ArchiMate Core Framework dazu,

- ein konsistentes, schichtübergreifendes Modell der Unternehmensarchitektur zu ermöglichen,
- die Integration von Geschäfts-, IT- und Infrastrukturperspektiven zu gewährleisten und
- eine gemeinsame Sprache für Stakeholder aus verschiedenen Fach- und Technikbereichen zu schaffen.

Das Core Framework lässt sich um weitere Layers erweitern. Dazu zählt etwa:

- Motivation Layer,
- Strategy Layer,
- Implementation and Migration Layer,
- Physical Layer.

Das ArchiMate Core Framework ist das Fundament der ArchiMate-Spezifikation. Es bietet ein flexibles Modellierungsgerüst, um komplexe Unternehmensarchitekturen strukturiert in 3 Schichten mit klar definierten Elementen und Beziehungen abzubilden.

den. Erweiterungsoptionen basieren auf dem Core Framework, das die minimal notwendige Struktur für ArchiMate-basierte Modellierung definiert.

- **ArchiMate-Metamodell**

Das Metamodell stellt die konzeptionelle Grundlage der ArchiMate-Modellierungssprache dar und ist damit die formale Grammatik von ArchiMate. Es legt exakt fest, welche Elemente existieren und wie sie miteinander in Beziehung stehen dürfen. Dabei definiert es die grundlegenden Strukturelemente, Beziehungstypen und deren Regeln zur Verknüpfung über verschiedene Architekturschichten hinweg. Ziel ist es, eine einheitliche und formal fundierte Sprache zur Beschreibung von Geschäfts-, Anwendungs- und Technologiearchitekturen bereitzustellen. ArchiMate unterscheidet zwischen aktiven, passiven und verhaltensbezogenen Elementen, die in jeder Architekturschicht auftreten können [64, S. 33ff.].

Das Metamodell von ArchiMate bildet eine formale und expressive Grundlage, die für die Konstruktion, Konsistenzprüfung und semantische Validierung von EA-Modellen unerlässlich ist (im Unterschied zum Core-Framework, das als primär strukturierender Navigationsrahmen zur Klassifikation und Einordnung von Architekturelementen dient) [71, S. 6, 8].

Das Metamodell gliedert sich in 3 zentrale Schichten: Business, Application und Technology. Diese Kernschichten bilden den ArchiMate Core, der durch optionale Schichten wie Strategy, Physical sowie Implementation und Migration erweitert werden kann. Jede Schicht enthält spezifische Metamodell-Elemente, etwa „Business Function“ oder „Application Component“, deren Verwendung das Metamodell strikt regelt [64, S. 45ff.].

Zusätzlich bietet das ArchiMate-Metamodell zahlreiche vordefinierte Beziehungstypen wie u.a. Realization, Assignment, Serving, Flow, Aggregation und Triggering. Diese definieren die strukturelle Logik und semantische Verbindung zwischen Modellelementen. Flow-Relationship etwa zeigt den Austausch von Informationen oder Gütern zwischen Verhaltenselementen, ohne Kausalität zu implizieren [64, S. 39ff.].

Ein wesentliches Merkmal des Metamodells ist seine Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit an den jeweiligen Modellierungskontext. So können projekt- oder domänen-spezifische Metamodelle durch gezielte Reduktion oder Erweiterung der Elemente konstruiert werden. ArchiMate zwingt nicht zur Nutzung aller definierten Modellierungselemente, sondern erlaubt eine kontextsensitive Anwendung, was es für branchenspezifische Referenzarchitekturen geeignet macht [64, S. 39, 94–95].

Zur Unterstützung der Lesbarkeit und Zielgruppenorientierung bietet das ArchiMate-Metamodell sog. Viewpoints. Diese standardisierten Sichten strukturieren und präsentieren Modellelemente aus der Perspektive spezifischer Stakeholder, etwa Domänenarchitekten oder Prozessverantwortliche. Beispiele sind der „Information Structure Viewpoint“ oder der „Business Process Cooperation Viewpoint“, die auf häufige Fragestellungen in der Architekturpraxis zugeschnitten sind [64, S. 96ff.].

Das Metamodell ist eng mit dem TOGAF-Architecture Content Framework verzahnt. Es bildet die visuellen, strukturellen und semantischen Konzepte von TOGAF in Modellform ab und ermöglicht so eine konsistente, werkzeuggestützte Umsetzung von EA-Initiativen [64, S. 366–367].

Abschließend lässt sich feststellen, dass das ArchiMate-Metamodell eine umfassende, formal definierte Basis für die Entwicklung, Analyse und Kommunikation von Unternehmensarchitekturen bildet. Seine klare Schichtentrennung, die systematische Typisierung von Elementen und Beziehungen sowie seine Anpassbarkeit an verschiedene Domänen machen es zu einem leistungsfähigen Instrument im Enterprise Architecture Management [64, S. 33–34].

• Spezifikationen der ArchiMate-Ebenen

Die 3 Hauptschichten bzw. -ebenen (Business Layer, Application Layer und Technology Layer, vgl. Abbildung 4) werden durch weitere Schichten wie die Strategy Layer und die Implementation and Migration Layer ergänzt. Jede dieser Ebenen besitzt spezifische Elemente und Konzepte, die im Folgenden erläutert werden [64, S. 33–34].

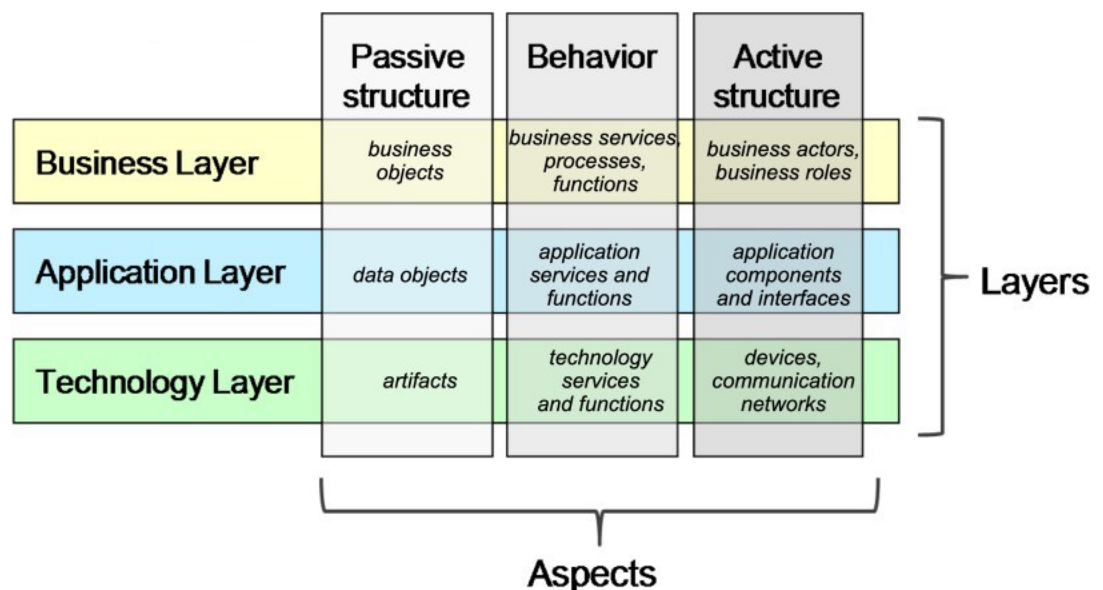


Abbildung 4: ArchiMate Haupt- und Unterebenen [64]

1. Business Layer [64, S. 65ff.]

Diese Schicht zeigt die geschäftlichen Aspekte einer Organisation. Business Layer bildet Geschäftsprozesse, Funktionen, Organisationseinheiten und deren Interaktionen ab. Die zentralen Elemente dieser Schicht sind:

- Business Actor: steht für eine Organisationseinheit oder Person, die Geschäftsprozesse ausführt.

- Business Role: definiert die Verantwortung einer Einheit innerhalb eines Geschäftsprozesses.
- Business Process: zeigt eine Abfolge von Aktivitäten, die dazu dienen, ein Geschäftsziel zu erreichen.
- Business Service: stellt eine Dienstleistung dar, die die Organisation für externe oder interne Kunden erbringt.

2. Application Layer [64, S. 79ff.]

Die Application Layer beschreibt Softwareanwendungen und deren Zusammenwirken zur Unterstützung der Geschäftsprozesse. Wichtige Elemente dieser Schicht sind:

- Application Component: ein modularer Teil einer Anwendung mit klar definierten Schnittstellen,
- Application Interface: der Zugangspunkt, über den eine Anwendung ihre Dienste bereitstellt,
- Ein Application Event: repräsentiert eine zustandsverändernde Begebenheit auf Anwendungsebene, die Anwendungsfunktionen auslöst oder aus ihnen hervorgeht.
- Application Service: die Funktionen, die eine Anwendung anderen Anwendungen oder Geschäftsprozessen bietet.

Services stellen adressierbare funktionale Leistungen bereit und können synchron oder ereignisgetrieben umgesetzt sein, während Events diskrete Zustandsänderungen repräsentieren, die über Event-Typen klassifiziert sind. Services besitzen keinen eigenen Event-Typ, können jedoch Ereignisse konsumieren oder erzeugen; dieses Begriffsverständnis wird in Dissertation insb. Kapitel 7 konsistent angewandt.

3. Technology Layer [64, S. 91ff.]

Diese Schicht bildet die technologische Infrastruktur ab, darunter Hardware, Netzwerke und Systemsoftware, die die Anwendungen unterstützen. Zentrale Elemente sind nach dem ArchiMate Standard:

- Node: physischer Rechner oder Server, der Ressourcen bereitstellt,
- Device: spezifische Hardwareeinheit wie ein Computer oder Router,
- System Software: Betriebssysteme oder Middleware, die auf diesen Geräten(Devices) laufen,
- Technology Service: technologische Dienste der Infrastruktur, z.B. Netzwerkkonnektivität.

4. Physical Layer (nicht abgebildet in Abbildung 4) [64, S. 101ff.]

Die Physical Layer ergänzt die klassischen Architekturschichten (Business, Application, Technology) um physische Objekte und Infrastrukturen, die besonders in konvergenten IT- und Operational-Technology-Architekturen eine Rolle spielen. Sie bildet physische Elemente wie Geräte, Materialien, Verteilnetze oder Transportmittel sowie deren Beziehungen und Interaktionen ab. Typische Elemente der Physical Layer sind Equipment, Facility, Distribution Network und Material. Diese Schicht spielt eine zentrale Rolle in Bereichen wie Industrie 4.0, Smart Grids oder intelligente Mobilität. Sie ermöglicht eine integrierte Sicht auf IT-Systeme und physische Ressourcen und unterstützt so eine ganzheitliche Architekturbetrachtung.

5. Strategy Layer [64, S. 60ff.]

Die Schicht bildet strategische Aspekte einer Organisation ab, etwa Fähigkeiten, Ressourcen und Wertströme. Schlüsselemente sind:

- Capability: Fähigkeit einer Organisation, bestimmte Aktivitäten auszuführen,
- Resource: Vermögenswerte, die Fähigkeiten unterstützen,
- Value Stream: Sequenz von Aktivitäten, die Kunden oder Stakeholdern einen Mehrwert bieten.

6. Implementation and Migration Layer [64, S. 113ff.]

Diese Schicht unterstützt die Planung und Umsetzung von Veränderungen in der Architektur. Wichtige Elemente sind:

- Work Package: ein Paket von Aufgaben, die zur Erreichung bestimmter Ergebnisse definiert wurden,
- Deliverable: ein konkretes Ergebnis eines Work Packages, etwa ein Bericht oder ein System,
- Plateau: ein stabiler Zustand der Architektur zu einem bestimmten Zeitpunkt,
- Gap: die Differenz zwischen 2 Plateaus (oder auch Deltas), etwa zwischen der aktuellen und der Zielarchitektur.

Diese klar strukturierten Schichten bzw. Ebenen helfen Unternehmen, ihre Architekturen präzise zu modellieren. Sie fördern eine effektive Analyse und erleichtern die Kommunikation zwischen verschiedenen Stakeholdern.

• Domänen und Fachdomänen in ArchiMate

Der Begriff Domäne bzw. Fachdomäne bezeichnet hier einen klar abgegrenzten Verantwortungs- und Fähigkeitsbereich, der Prozesse, Services, Daten und Systeme zusammenführt. In ArchiMate wird dies schichttreu modelliert: als Grouping mit zugehörigen Business-Funktionen und -Prozessen im Business-Layer sowie den korrespondierenden Application Services und -Komponenten im Application-Layer. Technologiebezogene Aspekte bleiben im Technology- oder Physical-Layer. Für eine adressatengerechten Darstellung kommen passende Viewpoints zum Einsatz,

etwa Business Process Cooperation, Application Structure oder Information Structure. Deren Auswahl und Darstellung folgen den Vorgaben der ArchiMate-Spezifikation.

Diese Arbeit wendet diese Domänenlogik erstmals operativ in Kapitel 6.5 an, anhand der vier Domänen-Matrizen (Tabelle 16–Tabelle 19) fasst sie die operativen Ebenen REA zusammen. Die methodische Verankerung erfolgt in den Kapiteln 7.1 und 7.2 über RACI-Zuordnungen und Variationspunkte mit durchgängiger Traceability:

Domäne → Prozess (DP) → Service/Komponente → Schnittstelle → Applikation → Datenobjekt

- **ArchiMate-Viewpoints**

Ein zentrales Konzept von ArchiMate sind die Viewpoints. Sie bieten verschiedene Sichten auf die Architektur, um die unterschiedlichen Informationsbedürfnisse der Stakeholder zu erfüllen. Dabei ist der Viewpoint eine Schablone bzw. Regel, wie eine View erstellt wird (enthält Zweck, Stakeholder, Elemente, Darstellungsregeln). Ein Viewpoint wählt relevante ArchiMate-Elemente und deren Beziehungen aus, um eine bestimmte Perspektive auf die Architektur abzubilden. Dies erleichtert es, Architekturen aus verschiedenen Blickwinkeln zu analysieren und darüber zu kommunizieren [64, S. 96].

Die ArchiMate-Spezifikation unterscheidet mehrere Kategorien von Viewpoints, die jeweils spezifische Aspekte der Unternehmensarchitektur beleuchten:

1. Basic Viewpoints: Sie greifen auf Konzepte der 3 Hauptschichten von ArchiMate – Business, Application und Technology – zurück. Diese Viewpoints zeigen grundlegende Strukturen, bspw. die Organisation oder Anwendungslandschaft [64, S. 99–100].
2. Motivation Viewpoints: Sie konzentrieren sich auf die Beweggründe und Ziele der Organisation. Sie modellieren Elemente wie Stakeholder, Treiber, Ziele und Anforderungen, um die Motivation hinter bestimmten Architekturentscheidungen zu verdeutlichen [64, S. 101].
3. Strategy Viewpoints: Sie geben einen Überblick über strategische Aspekte der Organisation, einschließlich Fähigkeiten (Capabilities), Wertströmen (Value Streams) und Ressourcen. Damit unterstützen sie die strategische Planung und Ausrichtung [64, S. 102].
4. Implementation and Migration Viewpoints: Diese Viewpoints helfen, Veränderungen in der Architektur zu planen und zu steuern. Sie modellieren Projekte, Übergänge und Implementierungsstrategien [64, S. 103].

Jeder Viewpoint adressiert spezifische Anliegen und Informationsbedürfnisse von Stakeholdern. Die ArchiMate-Spezifikation stellt eine Reihe von Beispiel-Viewpoints bereit, die als Grundlage für die Modellierung dienen. Diese Beispiele sollten jedoch

an die Anforderungen der jeweiligen Organisation angepasst werden, um ihre Relevanz und ihren Nutzen zu maximieren [64, S. 96, 104].

Durch den Einsatz von Viewpoints ermöglicht die EA-Modellierungsnotation ArchiMate, komplexe Architekturen gezielt aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten und zu analysieren. Dies schafft ein gemeinsames Verständnis unter den Stakeholdern und unterstützt fundierte Entscheidungen im EAM [64, S. 105].

Abschließend sei angemerkt, dass um die spezifischen Anforderungen einer hybriden, sich wandelnden Systemlandschaft abzubilden, der ArchiMate-Standard in dieser Arbeit um Elemente des Variabilitätsmanagements (Variationspunkte, Constraints) erweitert wurde. Diese folgt dem in Kapitel 9.3.1 dargelegten Inhaltsmetamodell und ermöglicht die integrierte Darstellung von statischer Struktur und dynamischer Konfiguration.

3.2 Referenzarchitekturen im Rahmen dieser Forschung

Referenzarchitekturen sind zentrale Bausteine von Enterprise Architectures (EA). Sie standardisieren die IT-Landschaft und erleichtern die Integration von Systemen [101, S. 45–58]; [76, S. 101–115]. Im Unternehmenskontext bieten sie ein strukturiertes Modell, das bewährte Methoden und Normen für die Gestaltung und Implementierung von Unternehmensarchitekturen bereitstellt. Sie dienen als Leitfaden, um Geschäftsprozesse, Daten, Anwendungen und Technologien in Übereinstimmung mit strategischen Zielen zu integrieren und zu organisieren. Ziel der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten REA ist es, die Komplexität der Unternehmensarchitektur zu reduzieren, die Interoperabilität zu verbessern und eine effiziente IT-Governance zu ermöglichen. Diese Vorgehensweise fördert die Standardisierung und Rationalisierung von IT-Ressourcen, was wiederum die Skalierbarkeit und Agilität der Organisation stärkt [47].

Im ÖPNV unterstützen REAs die Einbindung neuer Mobilitätskonzepte wie bedarfsorientierten Verkehr [103, S. 90–110]; [104, S. 210–230]. Dieses Kapitel behandelt ihre Grundlagen, Merkmale und Herausforderungen sowie ihre Anwendung zur Integration flexibler Verkehrslösungen [95, S. 10–12]. Während Referenz-Enterprise-Architekturen den strategischen Rahmen liefern, bieten Software-/IT-Referenzarchitekturen die technischen Details zur Umsetzung dieser Strategien. Beide ergänzen sich und sichern ein effektives Business-IT-Alignment [105, S. 1344–1345]. Daher werden sowohl Quellen über REA als auch über IT- bzw. Software-Referenzarchitekturen herangezogen [106, S. 45–47].

Für die vorliegende REA wird ein hybrider Konstruktionsmodus gewählt: Ein deduktives Vorgehen (Domänenrahmen ITVU, Notation ArchiMate) wird kombiniert mit induktiven und formativen Evidenzen aus Fallstudie und Experteninterviews (vgl. dazu die methodische Instanziierung in Kapitel 7.5.2). Der Ansatz orientiert sich an etablierten Referenzmodell-Strategien, u.a. deduktiv und induktiv nach Timm [46].

3.2.1 Referenzarchitektur: Begriff und Bedeutung

Referenzarchitekturen sind im Bereich der EA von zentraler Bedeutung [107, S. 21–25]. Sie bieten ein generisches, abstraktes Modell als Grundlage für die Entwicklung spezifischer Architekturen [102, S. 45–58].

Ein strukturierter Rahmen hilft Organisationen, ihre IT-Landschaft zu standardisieren. Er unterstützt weiterhin dabei, verschiedene IT-Systeme, Anwendungen und Prozesse in einem Unternehmen so aufeinander abzustimmen, dass sie effizient, kompatibel und möglichst einheitlich zusammenarbeiten, also diese zu harmonisieren [87, S. 101–110]; [108, S. 45–68]. Dies fördert die Wiederverwendbarkeit von Architekturelementen und eine konsistente Herangehensweise an die Entwicklung und Integration von IT-Systemen [107, S. 30–35]; [109, S. 5–15].

Die Bedeutung von Referenzarchitekturen im Kontext der EA liegt in ihrer Rolle als Leitfaden für die Planung und Implementierung von Unternehmensarchitekturen [110, S. 418–420]; [111, S. 15–18]. Sie ermöglichen die Anwendung bewährter Verfahren und Standardlösungen in verschiedenen Kontexten, was die Effizienz und Effektivität der Architekturentwicklung steigert [112, S. 154–156]; [113, S. 289–293]. Eine Referenzarchitektur stellt sicher, dass grundlegende Architekturprinzipien eingehalten werden, während sie gleichzeitig genügend Flexibilität bietet, um spezifische Unternehmensanforderungen zu berücksichtigen [114, S. 2067–2078]; [87, S. 37–45, 110–115, 150–155]; [94, S. 276–292].

3.2.2 Merkmale und Bestandteile von Referenzarchitekturen

Eine Referenzarchitektur besteht aus mehreren zentralen Komponenten, die eine umfassende Struktur für die Architekturentwicklung bilden [76, S. 37–45]; [115, S. 5–7]. Zu den wichtigsten Merkmalen gehören:

- **Strukturelle Komponenten:** Sie umfassen zahlreiche Domänen und Layer, die verschiedene Aspekte der IT-Architektur abdecken [76, S. 50–55], wie unter anderem das Datenmodell, das Anwendungsarchitekturmodell und das Technologiemo­dell [76, S. 58–60]; [115, S. 10–12]. Diese Schichten sind unabhängig voneinander entwickelbar und verwaltbar, was eine modulare und flexible Architektur ermöglicht [76, S. 65–70].
- **Abstraktionsniveau:** Referenzarchitekturen operieren auf einem hohen Abstraktionsniveau, um breite Anwendbarkeit sicherzustellen [76, S. 75–80]; [115, S. 15–18]. Sie bieten allgemeine Muster und Prinzipien, die in verschiedenen Szenarien anwendbar sind, ohne spezifische Implementierungsdetails vorwegzunehmen [115, S. 20–23]. Dies erlaubt Unternehmen, die Architektur an ihre Bedürfnisse anzupassen und dennoch von bewährten Standards zu profitieren [115].
- **Anpassungsfähigkeit und Flexibilität:** Referenzarchitekturen müssen flexibel genug sein, um in verschiedenen Kontexten und unter unterschiedlichen Bedingungen einsetzbar zu sein [76, S. 85–90]. Dies erfordert eine Balance zwischen spezifischen

Anleitungen und ausreichender Flexibilität, um auf sich ändernde Anforderungen reagieren zu können [76, S. 89–90].

3.2.3 Arten von Referenzarchitekturen

Referenzarchitekturen gliedern sich in 2 Hauptkategorien: domänenspezifische und domänenübergreifende Architekturen [116].

- **Domänenspezifische Referenzarchitekturen:** Diese Architekturen richten sich an den Besonderheiten einer Branche oder Anwendung aus [102, S. 24]. Sie berücksichtigen die spezifischen Herausforderungen und Bedürfnisse eines bestimmten Sektors wie etwa E-Government, Gesundheitswesen oder Logistik [95, S. 10]. Solche Architekturen bieten präzise Leitlinien, die auf die jeweiligen Branche zugeschnitten sind, und erleichtern die Implementierung branchenspezifischer IT-Lösungen [102, S. 30].
- **Domänenübergreifende Referenzarchitekturen:** Diese Architekturen bieten universelle Prinzipien und Muster, die in vielen Branchen und Kontexten anwendbar sind [76, S. 5–7]. Ein bekanntes Beispiel ist die TOGAF-Architektur, die als allgemeiner Rahmen für die Entwicklung von Unternehmensarchitekturen dient [76, S. 15–18]. Diese Architekturen sind besonders nützlich für Unternehmen, die in verschiedenen Branchen tätig sind und eine einheitliche Architekturstrategie verfolgen möchten [76, S. 22–24].

3.2.4 Nutzen und Herausforderungen von Referenzarchitekturen

Der Einsatz von Referenzarchitekturen bietet viele Vorteile, bringt aber auch Herausforderungen mit sich.

- **Vorteile:** Referenzarchitekturen senken die Entwicklungskosten erheblich, da sie auf wiederverwendbaren Komponenten und bewährten Verfahren basieren [117, S. 47–50]; [76, S. 85–88]. Sie fördern die Kommunikation zwischen Stakeholdern, indem sie eine gemeinsame Sprache und ein gemeinsames Verständnis der Architektur schaffen [107, S. 32–35]; [95, S. 12–14]. Zudem beschleunigen sie die Implementierung, indem sie klare Anleitungen für die Entwicklung spezifischer Architekturen bieten [117, S. 50–52]; [76, S. 95–98].
- **Herausforderungen:** Unter den Herausforderungen bei der Anwendung von Referenzarchitekturen ist vor allem die Gefahr der Überanpassung zu benennen; dabei wird die Architektur so stark auf ein Unternehmen zugeschnitten, dass sie ihre universelle Anwendbarkeit verliert [107, S. 126–128]. Weiterhin kann es schwierig sein, eine Referenzarchitektur zu implementieren, die den spezifischen Anforderungen eines Unternehmens entspricht, ohne dabei Kompromisse bei der Passgenauigkeit oder Flexibilität einzugehen [107, S. 129–131].

3.2.5 Bewertung von Referenzarchitekturen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden teilweise die von Felix Timm ermittelten Bewertungskriterien herangezogen, die er auf Basis einer Literaturrecherche entwickelt hat [46]. In seiner Dissertation systematisiert Timm zentrale Kriterien zur Bewertung von Referenzarchitekturen und leitet daraus einen methodisch fundierten Bewertungsansatz ab.

Die Beurteilung von Referenzarchitekturen stützt sich auf klar definierte Kriterien, die sowohl wissenschaftliche als auch praxisrelevante Anforderungen berücksichtigen. Zu den zentralen Bewertungsdimensionen gehören methodische Fundierung, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, Skalierbarkeit, Interoperabilität sowie Praxisrelevanz und Übertragbarkeit. Eine systematische Evaluation – etwa durch empirische Fallstudien, Experteninterviews oder Simulationen – sichert die Validität und Anwendbarkeit der Architektur in verschiedenen organisatorischen Kontexten und Unternehmensgrößen. Ein weiteres zentrales Kriterium ist die Wiederverwendbarkeit von Architekturkomponenten, die Effizienz und Standardisierung innerhalb der Domäne fördert. Der Einsatz eines etablierten Evaluations-Frameworks wie dem FEDS von Venable et al. [52] unterstützt eine methodisch fundierte und nachvollziehbare Bewertung.

Timm unterscheidet bei der Bewertung von Referenzarchitekturen 2 Perspektiven:

1. Modellzentrierte Evaluation (STEP 9B)
2. Nutzerzentrierte Evaluation (STEP 9C)

Die ausgewählten Kriterien zur Bewertung des Referenzcharakters der REA sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie enthalten die jeweilige Perspektive, eine kurze Beschreibung und die zugehörige Quelle.

Tabelle 2: Kriterien zur Bewertung einer REA

Begriff	Perspektive	Erläuterung	Quelle
Vollständigkeit	STEP 9B	Grad, zu dem das Modell alle relevanten Aspekte vollständig abbildet	[118, S. 18–19]
Korrektheit	STEP 9B	Übereinstimmung mit methodischen und domänenspezifischen Regeln	[93, S. 7]
Aktualität	STEP 9B	Aktualität des Modells in Bezug auf dessen realen Zustand	[118, S. 20]
Kohärenz	STEP 9B	logische Ordnung und stimmige Verknüpfung der Modellbestandteile	[118, S. 22]
Konsistenz	STEP 9B	Widerspruchsfreiheit innerhalb des Modells und seiner Elemente	[118, S. 22]

Begriff	Perspektive	Erläuterung	Quelle
Anpassungs-fähigkeit	STEP 9C	Fähigkeit des Modells, sich an verschiedene Organisationen oder Kontexte anpassen zu lassen	[119, S. 35ff.]
Verständlich-keit	STEP 9C	Eigenschaft des Modells, für Stakeholder verständlich und nachvollziehbar zu sein	[120, S. 25]
Verfügbarkeit	STEP 9C	Zugänglichkeit der Modellartefakte anhand von Dokumentation	[64, S. 33]
Wartbarkeit	STEP 9C	Möglichkeit zur Pflege und kontinuierlichen Weiterentwicklung des Modells	[121, S. 1034–1047]
Instanziier-barkeit	STEP 9C	Potenzial zur Ableitung konkreter Systeme aus dem Modell	[122, S. 12]

Bei der Auswahl der Kriterien wurde der Entwicklungsstand der REA berücksichtigt. Es flossen nur Kriterien ein, die durch Experteninterviews ermittelt werden konnten. Kriterien, die eine umfassende Einführung des Modells erfordern, wie etwa „tatsächliche Effizienz“, blieben unberücksichtigt.

3.2.6 Anwendung von Referenzarchitekturen im ÖPNV-Sektor

Die Anwendung von Referenzarchitekturen in Unternehmen des ÖPNV-Sektors birgt besondere Herausforderungen und Chancen.

- **Spezifika des ÖPNV:** Der Sektor ist durch eine hohe Komplexität und eine Vielzahl von Stakeholdern gekennzeichnet, darunter Verkehrsunternehmen, staatliche Behörden und Fahrgäste. Referenzarchitekturen helfen, diese Komplexität zu bewältigen, indem sie eine standardisierte und harmonisierte IT-Landschaft fördern. Besonders bei der Integration bedarfsorientierter Verkehrslösungen, die eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit erfordern, sind REAs für Datenerfassung und Betriebssteuerung entscheidend [123, S. 21].
- **Fallstudien und Good Practices:** Erfolgreiche Beispiele zeigen, wie Referenzarchitekturen Effizienz und Flexibilität steigern. Verschiedene Fallstudien bieten wertvolle Erkenntnisse und Good-Practice-Beispiele für die Entwicklung und Implementierung neuer Architekturen im ÖPNV [124, S. 36].

Es sei angemerkt, dass bis auf die Veröffentlichungen im Zuge dieser Forschung keine der verfügbaren Publikationen eine auf ArchiMate basierende und NMS integrierende REA für den ÖPNV berücksichtigt (siehe Kapitel 4). Es handelt sich dabei vielmehr um IT-Teilarchitekturen für das öffentliche Verkehrsmanagement.

3.2.7 Bedeutung entsprechender Referenzarchitekturen

Zusammengefasst spielen die vorgestellten IT-Referenzarchitekturen (insbesondere VDV-Architekturen und ITVU-Kernmodell) eine zentrale Rolle bei der Integration bedarfsorientierter Verkehrslösungen in traditionelle ÖPNV-Unternehmen. Dies könnte auch für die hier entwickelte REA gelten. IT-Referenzarchitekturen schaffen einen strukturierten Rahmen, um bewährte Verfahren und Standards effizient anzuwenden, während sie gleichermaßen die notwendige Flexibilität für die spezifischen Anforderungen des ÖPNV-Sektors bieten.

Die Implikationen für die weitere Forschung und Entwicklung sind vielfältig. Besonders die Entwicklung domänenspezifischer Referenzarchitekturen, die auf die Bedürfnisse des ÖPNV-Sektors zugeschnitten sind, könnte Enterprise Architectures im Verkehrssektor entscheidend voranbringen.

3.3 Ansätze zur Entwicklung einer REA

In diesem Abschnitt werden mit Blick auf das erstellte Artefakt die grundlegenden Ansätze zur Entwicklung einer REA diskutiert. Die Konstruktion von Referenzarchitekturen ist in der Disziplin der Referenzmodellierung methodisch verankert. Dabei lassen sich grundsätzlich 2 klassische Ansätze unterscheiden: der induktive und der deduktive Entwicklungsansatz. Ergänzend existieren methodenorientierte Ansätze, wie sie z.B. mit REAM von Timm [46] vorgeschlagen werden. Da diese Dissertation ein Referenz-Enterprise-Architekturmodell für die Integration von bedarfsorientiertem Verkehr (NMS) in klassische ÖPNV-Unternehmen entwirft, ist die Wahl eines geeigneten Entwicklungsansatzes von zentraler Bedeutung. Die methodische Entscheidung wird in Kapitel 7 („Design und Umsetzung des Artefakts“) begründet.

Bereits hier sei darauf hingewiesen, dass ein methodisch integrierter Ansatz nach REAM zur Anwendung kommt, um sowohl theoretisch fundierte Rahmenwerke (v.a. TOGAF, ArchiMate, ITVU, VDV) als auch empirische Erkenntnisse aus Fallstudien (z.B. BerlKönig, BSAG, Stadtwerke München) zu berücksichtigen.

In den weiteren Unterkapiteln werden die grundlegenden Ansätze im Rahmen dieser Vorgehensweise vorgestellt. Im letzten Unterkapitel (3.3.4) wird eine entsprechende systematische und kriterienbasierte Einordnung der Ansätze und Vorgehensweisen inkl. Erläuterung vorgenommen.

3.3.1 Deduktive Vorgehensweise

Der deduktive Ansatz (Kapitel 2.7.4) basiert auf der Ableitung von Referenzarchitekturen aus bestehenden Theorien, Normen oder generischen Rahmenwerken (z.B. TOGAF, ArchiMate, ITVU-Kernmodell, VDV-Architekturen). Hierbei wird das Modell top-down entwickelt, gestützt auf normative Konzepte und Idealvorstellungen.

- Vorteil: theoretische Fundierung, hohe Standardkonformität
- Nachteil: geringere Kontextsensitivität, mögliche Abweichung von realen Anforderungen

3.3.2 Induktive Vorgehensweise

Der induktive Ansatz (vgl. Kapitel 2.7.5) verfolgt einen Bottom-up-Pfad. Die Architektur wird aus der Analyse von konkreten Fallbeispielen, bestehenden Architekturen oder impliziten Mustern mehrerer realer Unternehmen abgeleitet.

- Vorteil: Praxisnähe, empirische Fundierung
- Nachteil: begrenzte Generalisierbarkeit, aufwendige Datenanalyse

3.3.3 Hybride und methodisch integrierte Vorgehensweise

Felix Timm [46] entwickelte mit REAM einen methodischen Rahmen zur systematischen Konstruktion von REAs auf Basis des DSR-Paradigmas. REAM integriert sowohl induktive als auch deduktive Komponenten in einem iterativen Vorgehensmodell und basiert auf folgenden methodischen Bausteinen:

- Vorbereitung der REA-Entwicklung (Zieldefinition, Abgrenzung, Strategie)
- Konstruktion (Framework, Struktur, Deduktion/Induktion, Modellkomplettierung)
- Anwendung und Evaluation (Design-Entwicklung, Evaluation, Wartung)

REAM ermöglicht dadurch eine wissenschaftlich fundierte, zugleich aber praxisnahe und evaluierbare Entwicklung von REAs – insbesondere für komplexe, dynamische Domänen wie die Mobilitätsbranche.

3.3.4 Einordnung der Vorgehensweisen

Die Entwicklung von Referenzarchitekturen bewegt sich typischerweise in einem Spannungsfeld aus normativen Leitplanken (Standards, Rahmenwerke, Normen) und empirischer Fundierung (Fallstudien, Domänenwissen, Evaluationsrunden). Dieses Spannungsfeld spiegelt sich methodisch in der Kombination aus deduktiven bzw. induktiven Konstruktionsschritten und einer geplanten naturalistischen Evaluation wider (z.B. FEDS-Logik: formativ, summativ, künstlich, naturalistisch; REAM: Kombination aus Rahmenwerk-Setup und empirischen Episoden) [52, S. 77–89]; [46, S. 182–193, 235–247].

Um diese Spannbreite transparent und nachvollziehbar zu machen, wird die in Tabelle 3 dargestellte Bewertungsmatrix zur methodischen Einordnung von Referenzarchitekturen eingeführt. Sie dient 3 Zwecken:

1. Begriffliche Präzisierung: Die Matrix differenziert die 3 in der Literatur gängigen Vorgehensweisen der REA-Entwicklung – deduktiv, induktiv und hybrid (REAM-kompatibel) – und stellt sie einander entlang einheitlicher Beurteilungskriterien gegenüber (u.a. Rahmenwerkeinsatz, Empiriegrad, Zielkonzepte, Entwicklungslogik, Eva-

uation). Für REAM ist die methodische Koexistenz von Deduktion (Komponente 5) und Induktion (Komponente 6) explizit vorgesehen und dokumentiert [46, S. 189ff.].

2. Methodische Orientierung: Die Matrix operationalisiert die Einordnung, indem sie nicht nur Oberbegriffe benennt, sondern konkrete Bewertungsdimensionen auswählt:
 - Verwendung theoretischer Modelle/Rahmenwerke: In REAM erfolgt ein explizites Framework-Setup (z.B. Auswahl TOGAF/ArchiMate und Ableitung eines Metamodells) als methodische Leitplanke [46, S. 182ff., 206–207].
 - Nutzung empirischer Daten und Iterativität: Die Evaluations- und Rückkopplungslogik folgt FEDS (Vier-Schritt-Prozess; Trajektorienwahl; naturalistische, formative Episoden), wodurch Build-Evaluate-Schleifen methodisch begründet werden [52, S. 80–81, 86–87]; [46, S. 238ff.].

Die Matrix wird damit zu einem Instrument, mit dem sich methodische Entscheidungen in REA-Projekten systematisch begründen und dokumentieren lassen.

3. Brücke zur Artefaktkonstruktion: Die generische Einordnung in diesem Kapitel wird in Kapitel 7 instanziiert, d.h. auf die vorliegende REA angewendet – mit expliziten Belegstellen für Konstruktions- und Evaluationsschritte (u.a. Komponenten 3–7; Evaluationsepisoden). Dadurch wird die Rigor zugunsten der Nachvollziehbarkeit der RA-Entwicklung gestärkt, weil die methodische Theorie (Kapitel 3) direkt mit der praktizierten Vorgehensweise (Kapitel 7) verknüpft wird [46, S. 182–201, 235–247, 242–266]; [52, S. 77–89].

Die in Tabelle 3 dargestellte Matrix operationalisiert diese Einordnung entlang zentraler Kriterien (Rahmenwerke, Empirie, Zielsetzung, Entwicklungslogik, Evaluation) und bildet die Brücke zur in Kapitel 7 beschriebenen Artefaktkonstruktion und -evaluation.

Tabelle 3: Bewertungsmatrix zur methodischen Einordnung einer REA

Kriterium	Deduktiver Ansatz (Top-down)	Induktiver Ansatz (Bottom-up)	Hybrider Ansatz ^{26/} (Methodenintegrat.)
1. Verwendung theoretischer Modelle/Rahmenwerke	Ableitung aus Standards (z.B. TOGAF, ArchiMate, ITVU/VDV)	Theorie referenziert, aber nicht leitend	Leitplanken aus Standards; empirische Rückkopplung
2. Nutzung empirischer Daten	sekundär (Validierung)	primär (Case-Studies, Interviews)	gezielte Verzahnung (Build–Evaluate)
3. Ziel: generalisierbares Soll-Modell	primär	sekundär	konsolidiertes, prüfbares Soll-Artefakt

²⁶ Wie z.B. REAM (Methodenintegration).

Kriterium	Deduktiver Ansatz (Top-down)	Induktiver Ansatz (Bottom-up)	Hybrider Ansatz ^{26/} (Methodenintegrat.)
4. Ziel: empirisch fundiertes Modell	sekundär	primär	primär (DSR-Evaluation)
5. Iterativer Entwicklungsprozess	optional	möglich	konstitutiv (Zyklen)
6. Kombination Theorie ↔ Praxis	mittel	hoch	hoch (balanciert)
7. Methodische Anleitung (Phasen/Schritte)	rahmenwerksgetrieben	fallstudiengetrieben	REAM, DSR, FEDS
8. Systematische Evaluation	nicht zwingend	häufig naturalistisch	FEDS-geleitet (formativ, summativ)

Die Tabelle ordnet die 3 Vorgehensweisen systematisch und kriterienbasiert ein. Die Kriterien werden im Folgenden hinsichtlich Deduktivität, Induktivität und Hybridität (REAM) erläutert:

1. Verwendung theoretischer Modelle und Rahmenwerke

Deduktiv: Deduktive Vorgehensweisen leiten Referenzarchitekturen top-down aus etablierten Architektur- und Modellierungsstandards ab (z.B. TOGAF als Framework und ArchiMate als Notation), sodass die Struktur des Soll-Artefakts normativ durch Metamodelle und Phasenmodelle vorgegeben ist. Die Orientierung an TOGAF/ArchiMate wird in REA-Anwendungen als tragfähiges Muster dokumentiert (z.B. Auswahl TOGAF 9.1/ArchiMate 3.1 für eine Referenz-Compliance-Organisation) [46, S. 206–207].

Induktiv: Induktive Vorgehensweisen referenzieren Theorien und Frameworks, machen sie aber nicht zum leitenden Konstruktionsprinzip; der Schwerpunkt liegt auf der Abstraktion aus domänenspezifischen Einzelfällen und existierenden Architekturen, die als empirische Grundlage dienen (z.B. Sammlung und Synthese individueller Modelle) [46, S. 193, 64].

Hybrid/REAM: REAM koppelt Leitplanken aus Standards gezielt mit empirischer Evidenz: Framework-Entscheide (z.B. TOGAF/ArchiMate) werden mit Felddaten rückgekoppelt; Deduktion (Komponente 5) und Induktion (Komponente 6) fungieren als Ko-Treiber innerhalb eines integrierten Methodenrahmens [46, S. 18–193, 238–241].

2. Nutzung empirischer Daten

Deduktiv: In deduktiven Ansätzen sind empirische Daten in dem Sinne primär, dass sie zur Validierung eines aus der Wissensbasis abgeleiteten Soll-Artefakts dienen (z.B. kriterienbasierte oder naturalistische Ex-post-Prüfungen des Modells), nicht aber zur initialen Ableitung der Struktur [52, S. 80–81].

Induktiv: Induktive Verfahren stützen sich primär auf empirische Daten (Fallstudien, Workshops, Interviews, vorhandene Architekturen), um Muster zu identifizieren und zu abstrahieren; REAM verweist hierfür auf Fallstudien-, Fokusgruppen-, Interview- und Action-Research-Episoden [46, S. 241].

Hybrid/REAM: In REAM ist Empirie verzahnt mit normativen Leitplanken: Empirische Evidenz steuert die Iterationen, ohne die Kohärenz des gewählten Frameworks aufzugeben; die Evaluationsstrategie (human-risk & effectiveness) priorisiert naturalistische, formative Episoden mit realen Stakeholdern [46, S. 238–239]; [52, S. 86–87].

3. Ziel: generalisierbares Soll-Modell

Deduktiv: Das primäre Ziel deduktiver Ansätze ist ein ideales, generalisierbares Soll-Bild, das entlang eines normativen Metamodells (z.B. ArchiMate-Kern, TOGAF-Content Framework) konsistent aufgebaut wird und Wiederverwendung ermöglicht [46, S. 154–160, 206–207].

Induktiv: Hier ist Generalisierbarkeit sekundär gegenüber der Realitätsnähe: Zunächst wird ein empirisch reichhaltiges Bild der Praxis erzeugt, das anschließend abstrahiert und harmonisiert wird (z.B. Ableitung gemeinsamer Strukturen aus individuellen Modellen) [46, S. 193, 64].

Hybrid/REAM: REAM zielt auf ein konsolidiertes, prüfbares Soll-Artefakt, das sowohl normativ tragfähig (Rahmenwerk-Kohärenz) als auch empirisch belastbar (nachgewiesene Effektivität) ist; das erfolgt über eine methodisch geplante Abfolge von Build-Evaluate-Episoden [46, S. 238–241]; [52, S. 80–81].

4. Ziel: empirisch fundiertes Modell

Deduktiv: Die empirische Fundierung ist nachgeordnet und dient vorrangig der Bestätigung (z.B. summative Episoden zur Nützlichkeit/Usefulness nach dem Entwurf) [52, S. 80–81].

Induktiv: Empirische Fundierung ist primär, da Modellhypothesen aus Feldbeobachtungen und Artefaktgebrauch entstehen und iterativ verfeinert werden [46, S. 193, 241].

Hybrid/REAM: Empirie ist primär und wird über iterative Evaluation (formativ, naturalistisch; Stakeholder-Episoden) systematisch verankert [46, S. 238–241]; [52, S. 86–87].

5. Iterativer Entwicklungsprozess (Build-Evaluate-Loop)

Deduktiv: Iterationen sind optional; der Schwerpunkt liegt auf einer zielgerichteten Umsetzung des normativen Sollbildes mit nachgelagerter Prüfung [52, S. 80].

Induktiv: Iterationen sind möglich und entstehen typischerweise aus sukzessiver Musterbildung und durch die Validierung gegen neue Fälle/Modelle [46, S. 64].

Hybrid/REAM: Iteration ist konstitutiv: REAM organisiert Wechselwirkungen von Entwurf und Evaluation in geplanten Episoden; die DSR-Zyklen werden explizit durch FEDS geleitet [46, S. 29–30, 238–241]; [52, S. 86–87].

6. Kombination aus Theorie und Praxis

Deduktiv: Die Kombination ist mittel ausgeprägt: Theorie/Standards dominieren, Praxisdaten treten zur Absicherung hinzu [52, S. 80–81.].

Induktiv: Die Kombination ist hoch, allerdings mit Praxisfokus: Theorie liefert begriffliche Orientierung, die Konstruktionslogik folgt jedoch primär der Empirie [46, S. 193–194].

Hybrid/REAM: Die Kombination ist hoch und balanciert: REAM realisiert Ko-Evidenz²⁷ aus Literatur/Standards und Felddaten (z.B. Setup von Rahmenwerk/Notation und gleichzeitige naturalistische Episoden) [46, S. 182–193, 206–207, 238–241].

7. Methodische Anleitung (Phasen/Schritte)

Deduktiv: Deduktive Ansätze sind rahmenwerksgetrieben: Phasenmodelle und Metamodelle leiten die Vorgehensschritte (z.B. TOGAF-ADM, ArchiMate-Metamodell) [46, S. 154–160, 182–189].

Induktiv: Induktive Ansätze sind fallstudiengetrieben (Exploration, Musterbildung, Konsolidierung) und stützen sich auf Sammlungen individueller Modelle und deren Abstraktion [46, S. 193–194].

Hybrid/REAM: REAM kombiniert klar definierte Phasen/Komponenten mit empirischen Schleifen (z.B. Komp. 5 Deduktion, Komp. 6 Induktion; FEDS-gestützte Evaluationsplanung) [46, S. 189–201, 238–241].

8. Systematische Evaluation

Deduktiv: Eine streng systematische Evaluation ist nicht zwingend integraler Bestandteil der Konstruktion; sie kann ex ante (kriterienbasiert) oder ex post (summativ) erfolgen, um die Nützlichkeit des normativ entwickelten Modells zu bestätigen [52, S. 80–81].

²⁷ Ko-Evidenz bezeichnet die innerhalb eines DSR-Build ↔ Evaluate-Zyklus systematisch hergestellte Kopplung deduktiver (Rahmenwerk-/Standard-) und induktiver (Feld-/Episoden-) Evidenzlinien, die über Traceability explizit nachgewiesen und durch FEDS-Episoden formativ verdichtet wird. Ziel ist die ko-getriebene Erhöhung von Konstrukt-, interner und externer Validität des Artefakts (vgl. Kapitel 2.8, 7-9).

Induktiv: Evaluation erfolgt häufig naturalistisch (Feld-/Fallstudien), um die Wirksamkeit in realen Nutzungskontexten zu demonstrieren [52, S. 86–87].

Hybrid/REAM: REAM macht eine strukturierte Evaluation verpflichtend (formativ, summativ; explizite Evaluationsobjekte und -kriterien) und nutzt dafür das FEDS-Vorgehen mit 4 Schritten (Ziele explizieren, Strategie wählen, Evaluanden bestimmen, Episoden designen) [52, S. 80–87]; [46, S. 33–34, 238–241].

Mit dieser Darstellung etabliert Tabelle 3 einen einheitlichen Bewertungsrahmen, der in Kapitel 7 wiederaufgenommen wird, um die tatsächliche Vorgehensweise der vorliegenden Forschungsarbeit transparent zu dokumentieren. Die Kriteriensystematik (Zeilen) entspricht dem internen methodischen Raster aus dem Arbeitsentwurf. Sie ist wissenschaftlich konturiert und anschlussfähig an die weiteren Kapitel.

3.4 Öffentlicher Personennahverkehr

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) nimmt eine zentrale Funktion im alltäglichen Mobilitätsverhalten der Bevölkerung in Deutschland ein. Die Erfassung von quantitativen Daten zu Umfang und Nutzung des Personennahverkehrs erfolgt auf Basis von amtlichen Statistiken sowie von Verbands- und Erhebungsberichten [125]; [126]; [127]. In einer ausgefeilten Struktur vereint er u.a. Busse, U-Bahnen, Straßenbahnen und Regionalzüge zu einem dichten und abgestimmten Netz. Ziel ist es, Städte und ländliche Regionen nahtlos zu verbinden. Die Organisation des ÖPNV erfolgt auf mehreren Ebenen, mit lokalen Verkehrsunternehmen und regionalen Verkehrsverbünden, die gemeinsam ein abgestimmtes und leicht zugängliches Verkehrssystem schaffen. Der klassische ÖPNV folgt dem Prinzip des Linienverkehrs: Anbieter stellen planmäßige Verbindungen bereit, die sich an den Bedürfnissen der Allgemeinheit orientieren (vgl. [9]; zur begrifflichen Einordnung vgl. [128]).

Im Gegensatz dazu bieten neue Mobilitätsdienste (NMS) wie z.B. Car-, Bike- und E-Roller-Sharing oder Ridepooling, flexible, IT-gestützte Lösungen an, die sich an der Nachfrage ausrichten [4]. Diese Dienste werden meist nicht von ÖPNV-Unternehmen erbracht, sondern von spezialisierten Dienstleistern wie etwa ViaVan [129, S. 3]. In der Regel bestehen zwischen den Dienstleistern und den Verkehrsunternehmen Kooperationsverträge. Die Integration erfolgt zu Beginn – insbesondere in Pilot- und Testphasen – häufig organisatorisch; eine vertiefte technische Integration wird in der Literatur als nachgelagerter und koordinationsintensiver Schritt diskutiert, vgl. [130]; exemplarisch [131]). Langfristig gesehen wird die Bereitstellung der digitalen Dienste bei einer Vielzahl von MaaS- und NMS-Konstellationen durch eigenständige Akteure erfolgen. Die Integration in bestehende ÖPNV-Systeme wird durch definierte Integrationsformen und Kooperationsmodelle sichergestellt [132]; [133].

In größeren Städten stellen Verkehrsunternehmen Mobilitätshubs bereit (z.B. Jelbi in Berlin oder hvv switch in Hamburg). In Planung und Praxis werden Mobilitätshubs als intermodale Zugangspunkte verstanden, die Mobilitätsangebote räumlich bündeln und den Wechsel zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln erleichtern (vgl. [134]; [135]). Da-

mit unterstützen sie insbesondere die Einbindung stationsbasierter Angebote neuer Mobilitätsdienstleister an nachfragerrelevanten Knotenpunkten. Ergänzend existieren Free-Floating-Angebote wie Car-Sharing, bei denen Fahrzeuge innerhalb eines definierten Geschäftsgebiets flexibel entliehen und abgestellt werden können [133]; [135].

3.5 NMS und MaaS

Dieses Kapitel beleuchtet die neuen Mobilitätsdienste, im Englischen als New Mobility Services (NMS) bezeichnet. Mit der Digitalisierung haben sich neben dem klassischen Personennahverkehr neue Dienste etabliert, oft im Rahmen von Mobility-as-a-Service-Ökonomien (MaaS) [136, S. 29–30]. Diese erweitern den Nahverkehr um Konzepte wie Car-Sharing, Ridesharing, Bike- und Scooter-Sharing [136, S. 15–16]. Zukünftig könnten autonome Fahr- und Flugdienste [137] hinzukommen. NMS-Dienste erlebten in den letzten 5 Jahren in Deutschland und weltweit einen rasanten Aufstieg [130]. Innovationen wie intelligente Schlösser und Fortschritte in der Geolokalisierung ermöglichten es, Fahrräder und E-Roller nicht mehr nur stationär anzubieten. Stattdessen entstanden frei verfügbare Flotten, die ohne zusätzliche Infrastruktur in den Städten betrieben werden können [136, S. 38ff.]; [138].

Der Markt unterscheidet zunehmend zwischen stationsgebundenen und nicht stationsgebundene NMS-Angeboten bzw. Transportkonzepten [139, S. 7]. Diese Kategorien lassen sich auch auf alle oben vorgestellten Konzepte anwenden. Die neuen Dienste basieren auf bestehenden Transportmitteln, die durch die Digitalisierung entweder (a) zeitlich entkoppelt von vielen Personen genutzt werden oder (b) kurzfristig einer großen Zielgruppe zugänglich gemacht werden, sodass mehrere Personen ein Fahrzeug teilen [140, S. 38]. Die Herausforderung besteht darin, diese Dienste möglichst einfach zu gestalten und in bestehende Mobilitätsinformationsinfrastrukturen zu integrieren, um viele potenzielle Nutzer zu erreichen [141, S. 2]. Besonders die ÖPNV-Unternehmen müssen sich dieser Anforderung stellen [139, S. 7]. Erst eine weitreichende Integration ermöglicht, multimodale Mobilität für alle Anbieter und Kunden komfortabel und zugänglich zu gestalten [142, S. 5].

Ein umfassender Blick auf das Thema erfordert auch die Berücksichtigung von Mobility-as-a-Service (siehe Abbildung 5), die beiden Bereiche in der Forschungsarbeit klar abzugrenzen sind – weisen aber auch Schnittmengen auf.

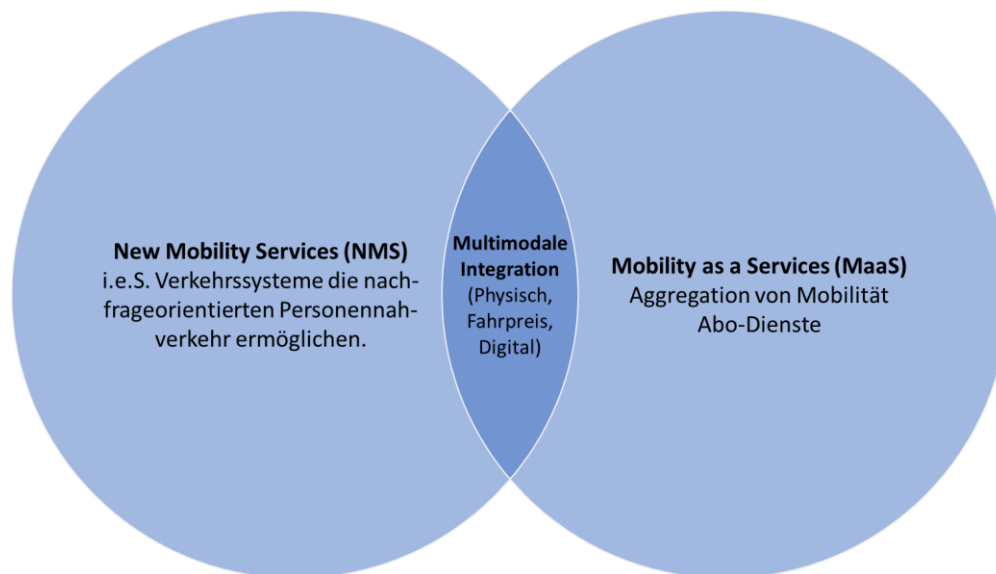


Abbildung 5: NMS und MaaS – eigene Darstellung, angelehnt an Shaheen et al. [143]

Bei MaaS handelt es sich um einen integrierten Mobilitätsdienst, der verschiedene Verkehrsmittel in einer einzigen Anwendung (App) bündelt [144, S. 13]. Statt mehrerer Ticketing- und Bezahlungssysteme bietet MaaS eine zentrale Lösung [145]. Der MaaS-Betreiber integriert dabei unterschiedliche Transportoptionen – wie z.B. ÖPNV, Mitfahrdienste, Taxis oder Mietwagen – auf einer Plattform (z.B. als Mobility Plattform) [146, S. 1]. Erfolgsfaktoren sind die Einbindung vielfältiger Mobilitätskonzepte, die entweder autark oder in Kombination nutzbar sind [147]; [148, S. 1], sowie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die den Betrieb und die Organisation der Transportoptionen optimieren [149]. Wesentlich dafür ist der Zugang zu aktuellen Informationen wie ÖPNV-Daten, Verkehrslage oder Wetterdaten [150].

Ziel von MaaS ist, einen möglichst hohen Wertbeitrag für seine Nutzer zu leisten, indem es eine Alternative zum privaten Pkw schafft [151, S. 95], die effizienter, nachhaltiger und in vielen Fällen auch günstiger sein kann. Damit der Übergang zu Mobilität als Dienstleistung (MaaS) sich erfolgreich gestaltet, müssen möglichst viele Anbieter eines Stadtgebiets integriert werden, um multimodale Stadtfahrten zu ermöglichen [151, S. 19–23].

Eine zentrale Herausforderung, der sich kooperierende MaaS-Anbieter stellen müssen, ist die fragmentierte Regulierung im kommunalen Sektor, die neue Geschäftsmodelle erschwert – sowohl diese zu entwickeln als auch erfolgreich zu betreiben. Es wäre daher sinnvoll, MaaS-Ansätze auf lokaler Ebene als Good-Practice-Beispiele zu fördern [152, S. 2]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ÖPNV-Unternehmen in Deutschland meist Anstalten öffentlichen Rechts sind – mit guten Verbindungen in die regionale Politik und einem umfassenden Überblick über den Nahverkehr. Diese Voraussetzungen sprechen dafür, dass sie als Betreiber von MaaS-Plattformen in ihrer Region prädestiniert sind [153, S. 2–3].

Während NMS einzelne innovative Mobilitätsdienste bereitstellt, die durch Digitalisierung und technologischen Fortschritt möglich werden, zielt MaaS auf die Integration dieser

Dienste in eine benutzerfreundliche Plattform. NMS bietet flexible, oft nicht stationsgebundene Lösungen, wohingegen MaaS verschiedene Transportoptionen in einer zentralen Anwendung bündelt und so eine effiziente, multimodale Mobilitätserfahrung schafft [154, S. 30ff.].

Der Autor untersucht in dieser Forschung beide Ansätze und fasst sie größtenteils unter dem Begriff NMS zusammen. Im Rahmen der strukturierten Literaturanalyse (siehe Kapitel 4.2) berücksichtigt er jedoch auch MaaS. Das zielt auf eine umfassende Darstellung des Themas, auch an der Schnittstelle beider Bereiche.

4 Literaturanalyse und Forschungsstand

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der aktuelle Forschungsstand durch eine strukturierte Literaturanalyse ermittelt. Die Ergebnisse sind in diesem Kapitel dargestellt. Das Kapitel gliedert sich wie folgt: Nach der Einleitung folgt die Beschreibung der Methode (Kapitel 4.1), einschließlich der Entwicklung des Suchbegriffs mit Blick auf die Forschungsfragen. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt (Kapitel 4.2), zusammengefasst und diskutiert (Kapitel 4.3).

4.1 Angewandte Methode

Für die Literaturrecherche entschied sich der Autor für den strukturierten Ansatz nach Kitchenham [70], der die 3 in Abbildung 6 dargestellten Kernphasen Planung, Durchführung und Dokumentation vorsieht. In der Planungsphase wurde der konkrete Bedarf der Literaturrecherche ermittelt. Darauf folgte die Entwicklung der in Tabelle 4 aufgeführten Forschungsfragen, die die Recherche beantworten sollte. Ein Protokoll erfasste relevante Aspekte jedes gefundenen thematisch passenden Textes. Dabei wurde nach Schlagwörtern gesucht, die zur relevanten Literatur führten. Daraus wurde ein Suchbegriff konstruiert, die Suche durchgeführt und schließlich die dabei gefundenen Publikationen ausgewertet. Abschließend dokumentierte der Autor die Ergebnisse.

Der Suchprozess begann mit der Auflistung möglicher kontextrelevanter Stichworte und Synonyme. Für die anschließende Eingabe der gefundenen Wörter wurde die Literaturdatenbank Scopus genutzt, da sie einen großen Index mit breitem Quellenspektrum bietet. Um alle relevanten Forschungsergebnisse zu erfassen, wurde auf eine zeitliche Begrenzung verzichtet.

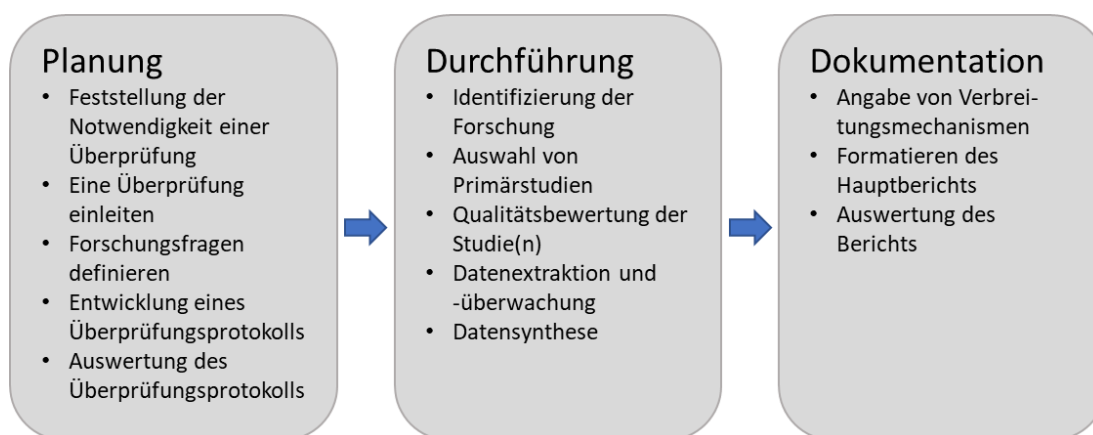


Abbildung 6: Phasen einer strukturierten Literaturanalyse nach Kitchenham [70]

Die zentrale Frage dieses Forschungsabschnitts, die durch die Literaturanalyse beantwortet werden soll, lautet:

Gibt es Unternehmensarchitekturmodelle für ÖPNV-Betriebe, die New Mobility Services (NMS) berücksichtigen?

Die gefundenen Suchergebnisse wurden protokolliert und der Autor führte ein erstes grobes Screening durch Lesen einer exemplarischen Auswahl der gefundenen Literatur durch. Das verdeutlichte: Begriffe wie Enterprise Architecture (siehe Tabelle 4, linke Spalte [EA]) und New Mobility Services (siehe Tabelle 4, rechte Spalte [NMS]) finden einzeln in sehr vielen unterschiedlichen Kontexten und Bereichen Verwendung, wodurch sie einzeln nicht sinnvoll als Schlagworte nutzbar sind. Zur Verfeinerung der Ergebnismenge wurden Suchbegriffe kombiniert, die Ergebnisse konnten anhand des Titels auf Relevanz geprüft werden. In einem iterativen Prozess entwickelte der Autor 2 Suchbegriffe, die relevante Ergebnisse lieferten. Bei der Bildung nutzte er die Phrasensuche nach zusammengesetzten Wörtern (Anführungszeichen), die Rechtstrunkierung (Sternchen *) und logische Operatoren. Um den Anteil relevanter Artikel in der Ergebnismenge zu erhöhen, wurde anhand der Titel und Summarien geprüft, welche Suchbegriffe zu entsprechenden Treffern führen. Nur diese Suchbegriffe wurden dann beibehalten. Die Anzahl der verwendeten Begriffe aus einem Bereich innerhalb der einzelnen Suchbegriffe kann daher variieren. Es stellte sich weiterhin heraus, dass sich diese Suchbegriffe nicht eindeutig und nachvollziehbar zu einem einzigen Suchbegriff zusammenfassen lassen, weshalb sie schließlich mit⁹ einer logischen ODER-Verknüpfung verbunden wurden. Tabelle 4 zeigt die Schlüsselwörter mitsamt des daraus gebildeten Suchbegriffs.

Tabelle 4: Aufbau des Suchbegriffs aus Schlüsselwörtern

Suchwort 1 (EA)	Suchwort 2 (NMS)
„Enterprise Architecture“	„New Mobility Service“
„Enterprise Model“	„New Mobility Solution“
„Business Architecture“	„Mobility as a Service“
„Software Architecture“	„Demand-oriented personal transport“
„Information Architecture“	„Demand-responsive transport service“
„IT Architecture“	„Demand-responsive public transport“
Enterprise AND Architecture	„Demand-oriented public transport“
	Public AND Transport*
ODER	ODER
UND	
= Suchbegriff: <i>TITLE-ABS-KEY((“enterprise architecture”) OR (“enterprise model”) OR (“business architecture”) OR (“software architecture”) OR (“information architecture”) OR (“IT architecture”)) OR (enterprise AND architecture) AND ((“new mobility service”) OR (“new mobility solution”) OR (“mobility as a service”) OR (“demand oriented personal transport”) OR (“demand responsive public transport”) OR (“demand responsive transport service”) OR (“demand oriented public transport”) OR (public AND transport*)))))⁹</i>	

Da die Suche mit Scopus auch Reviews und Konferenzberichte einschließt, was zu doppelten Ergebnissen führt, war eine weitere Anpassung des Suchbegriffs nötig. Daraus ergab sich der folgende Suchstring:

(TITLE-ABS-KEY (("enterprise architecture") OR ("enterprise model") OR ("business architecture") OR ("software architecture") OR ("information architecture") OR ("IT architecture") OR (enterprise AND architecture) AND (("new mobility service") OR ("new mobility solution") OR ("mobility as a service") OR ("demand oriented personal transport") OR ("demand responsive public transport") OR ("demand responsive transport service") OR ("demand oriented public transport") OR (public AND transport))) AND NOT (DOCTYPE(re) OR DOCTYPE(cr)))*

Die Suche mit dem entwickelten Suchbegriff war breit und ohne zeitliche Einschränkung angelegt. Dabei wurde die Verwendung des Titels, des Abstracts und der gespeicherten Schlagworte herangezogen, da eine Suche nur alleine über den Titel nicht allzu viele relevante Arbeiten erfassen würde. Die Datenbankwahl wurde anhand der operativen Suchmöglichkeiten (Feldcodes, boolesche Operatoren, Verschachtelung, Filter) begründet; entsprechende Funktionen sind in Scopus dokumentiert und in vergleichbarer Form auch in Web of Science (WoS) verfügbar. Durch die Komplexität des Suchbegriffs, der schließlich durch Verknüpfung der 3 Themenbereiche gebildet wurde, wurde die Suche (vorerst) ausschließlich mit der Literaturlatenbank Scopus durchgeführt, weshalb die Einschränkung als pragmatische Entscheidung und Limitation transparent auszuweisen ist. Die Datenbank ermöglicht, Recherchen mit den notwendigen, sehr verschachtelten Suchbefehlen durchzuführen.

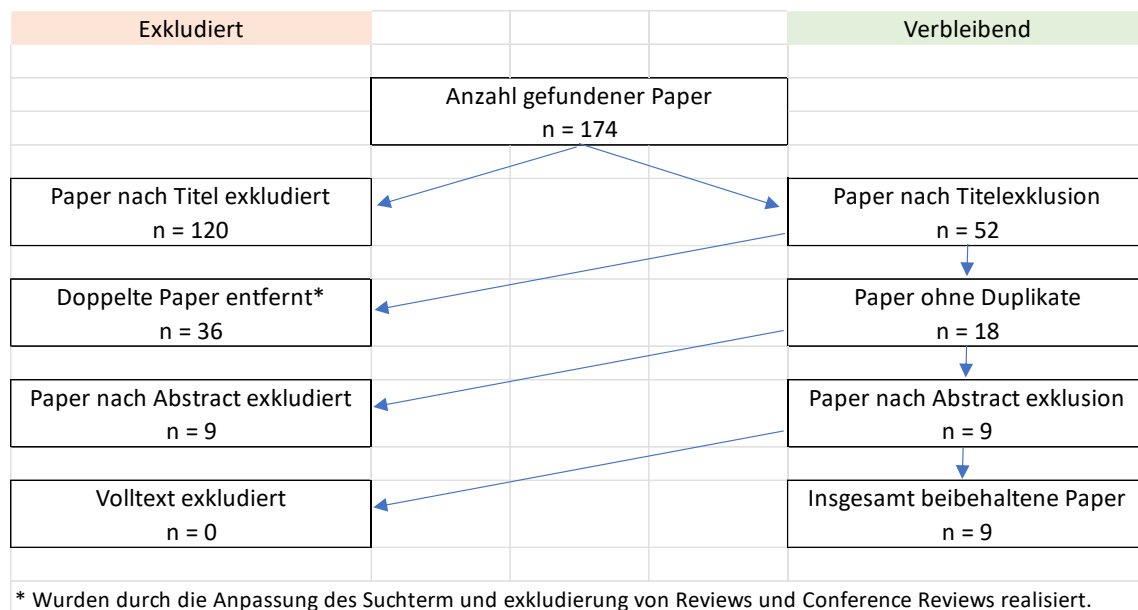
Die Suche mit dem entwickelten Suchbegriff zum Zeitpunkt der Recherche (Juni 2023) in Scopus ergab 174 Dokumente. Nach Durchsicht der Titel erwiesen sich 120 als nicht relevant für das Forschungsvorhaben. Unter den Titeln waren 72 doppelte Ergebnisse, von denen jeweils eins durch den erweiterten Suchbegriff herausgefiltert wurde (siehe oben: keine Reviews). Eine nähere inhaltliche Prüfung der Abstracts führte zu dem Ausschluss weiterer 9 Publikationen aus der verwertbaren Ergebnismenge. Die anschließende erneute Überprüfung der Papiere bestätigte, dass die verbliebenen Papiere sich mit dem gewählten Thema beschäftigen. Diese 9 Titel waren also Volltreffer.

Bevor in Abbildung 7 die Ausschlussschritte zusammenfassend dargestellt werden, zeigt Tabelle 5 die Auswahl der erhaltenden Literatur vor der näheren inhaltlichen Prüfung. Die verwendeten Suchbegriffe sind horizontal aufgeführt, die Literatur ist vertikal nach ihrem Vorkommen markiert – zusätzlich wird das Hauptthema neben den gruppierten Suchbegriffen aufgelistet und auch bei der entsprechenden Literatur vermerkt.

Tabelle 5: Auswertung der Literatur

		Architektur [EA]				Verkehr [NMS]				Hauptthemen der Arbeit													
Nr.	Literatur	Enterprise Business	Software	Information	IT	New Mobility Service	New Mobility Solution	Mobility as a Service	Demand public transport	Public Transport	Data Integration	Plattform	SOA	Enterprise Service Bus	Information systems	EA Planning	UAF	AI-based Software	Algorithm for demand transport services	Sustainable Architecture	Transport	Resilience analysis	EA Modeling
1.	Improving urban mobility by defining a smart data integration platform			X						X	X	X											
2.	Passenger train service integration innovation analysis based on SOA			X	X	X				X			X	X									
3.	Architecture of an integral information system for public road transport of passengers			X	X	X				X					X								
4.	Enterprise architecture planning for public transit	X	X							X						X							
5.	Upgrading Approach for MaaS Level 4 Using UAF					X		X									X						
6.	On the Track to Application Architectures in Public Transport Service Companies			X						X								X					
7.	PowerDriverDTSS: the advanced demand responsive transport service system			X		X				X									X				
8.	Building a flexible on-demand public transport system using its techniques			X		X				X									X				
9.	Travel Information Service System for public travel based on SOA			X						X			X		X								
10.	A Hyper-Integrated Mobility as a Service (MaaS) to Gamification and Carbon Market Enterprise Architecture Framework for Sustainable	X						X		X										X			
11.	Modeling transportation systems: A case study with the open method praxeme	X			X	X				X											X		
12.	Resilience analysis and design for mobility-as-a-service based on enterprise architecture modeling	X	X					X		X												X	X
13.	Impact of New Mobility Services on Enterprise Architectures: Case Study and Problem Definition	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x
14.	New mobility services and their impact on enterprise architectures: A case study	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x
15.	Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x
16.	A Target Enterprise Architecture Approach for New Mobility Services in Demand-Responsive Public Transport	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x
17.	Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x
18.	Enterprise Architecture for Integration of Demand-Responsive Services in Public Transport	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X					x		x

Die Suchbegriffe, denen bei der inhaltlichen Prüfung der Literatur eine größere Bedeutung beigemessen wurde, sind zusätzlich grau/dunkelgrün hervorgehoben. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Ausschlusschritte. Die 9 nach der Prüfung des Abstracts ausgeschlossenen Texte sowie die 9 verbliebenen werden im nächsten Kapitel vorgestellt und diskutiert.

Abbildung 7: Schritte zur Exkludierung²⁸

4.2 Strukturierte Literaturanalyse

Nach der gründlichen Literaturrecherche, der anschließenden Sortierung und inhaltlichen Auseinandersetzung sowie der daraus folgenden Reduktion der ermittelten Literatur blieb die in Tabelle 5 aufgeführte Literatur übrig. Bevor diese im Detail vorgestellt wird, werden die ausgeschlossenen Texte kurz zusammengefasst und analysiert.

I. Ausgeschlossene Arbeiten

Wie in Kapitel 4.1 (linker Bereich der Abbildung 7) beschrieben, wurden 120 Suchergebnisse allein durch aufgrund des Titels als irrelevant für dieses Forschungsvorhaben eingestuft. Hauptgrund war, dass sie weder das Thema Unternehmensarchitektur noch den ÖPNV behandelten. Eine Analyse der Abstracts und Texte bestätigte diese Einschätzung. Zusätzlich wurden 18 Publikationen anhand ihrer Abstracts vertiefend untersucht, da sie den beiden untersuchten Themengruppen entsprachen (siehe Tabelle 5). Neben den beiden Hauptthemen Unternehmensarchitektur und ÖPNV wurde in weiteren Spalten stichwortartig das Hauptthema des jeweiligen Textes erfasst. Auf diese Weise konnten jene Publikationen erfasst werden, die beide Themen abdecken; diese wurden dann im Detail untersucht. Die in Tabelle 5 nicht grün markierten 9 Texte wurden trotz passender Titel ausgeschlossen, da sie keinen wesentlichen Beitrag zu einer zukünftigen Unternehmensreferenzarchitektur für ÖPNV-Unternehmen leisten würden, die die Integration von bedarfsgerechtem ÖPNV (inkl. NMS, MaaS etc.) unterstützt.

Im Folgenden werden die ausgeschlossenen Publikationen kurz zusammengefasst und die Gründe für ihre Ablehnung erläutert.

²⁸ Aktualisierte Zahlen siehe Kapitel 4.4.

Improving urban mobility by defining a smart data integration platform [155] (Tabelle 5, Nr. 1)

Der Beitrag beschreibt in erster Linie die Integration von Daten zu verschiedenen Verkehrs- und Informationssystemen, um eine zentrale Plattform zu entwickeln, die der Öffentlichkeit Verkehrsdaten bereitstellt. Der Fokus bei der Entwicklung dieser Plattform liegt auf dem Einsatz semantischer Technologien zur korrekten Interpretation der gesammelten Daten.

Passenger train service integration innovation analysis based on SOA [156] (Tabelle 5, Nr. 2)

Diese Arbeit untersucht Methoden und Technologien zur Systemintegration, die neue und innovative Schienenpersonenverkehrssysteme sowohl in Zügen als auch in Bahnhöfen ermöglichen. Sie basiert auf einer serviceorientierten Architektur (SOA) und weiteren Technologien wie Virtualisierungssimulation, Workflow, Konfiguration und Data Mining. Der Schwerpunkt liegt auf der Informations- und IT-Schicht in Form einer Transportplattform, nicht auf einer umfassenden Gesamtarchitektur.

Architecture of an integral information system for public road transport of passengers [157] (Tabelle 5, Nr. 3)

Dieser Artikel stellt ein mobiles Informationssystem für ein ÖPNV-Unternehmen vor. Ziel ist die Verbesserung der folgenden strategischen Aspekte: Fahrgastservice, Unternehmensplanung und Entscheidungsfindung. Das System, das auf der spanischen Insel Gran Canaria eingesetzt wird, integriert Echtzeitinformationen in die Fahrzeuge des Transportunternehmens.

Upgrading Approach for MaaS Level 4 Using UAF [158] (Tabelle 5, Nr. 5)

Der Beitrag untersucht die Umsetzung von Mobility as a Service (MaaS) als System von Systemen (SoS), das soziale und regionale Ziele integriert. Er schlägt einen iterativen Ansatz vor, der auf dem Unified Architecture Framework (UAF) basiert, um die Entwicklung von MaaS Level 4 zu ermöglichen. Anhand einer Fallstudie aus Japan wird demonstriert, wie dieser Ansatz angewendet werden kann.

On the Track to Application Architectures in Public Transport Service Companies [159] (Tabelle 5, Nr. 6)

Der Text analysiert den Einsatz von maschinellem Lernen (ML), Frameworks und KI-basierten Produkten als Bausteine in IT-Architekturen von Unternehmen. Er beschreibt weiterhin die Herausforderungen. Eine wesentliche besteht darin, den Schritt von prototypischen Lösungen hin zur Implementierung erprobter Systeme im Unternehmensumfeld zu schaffen. Kleine und mittlere Unternehmen sind oft unsicher, ob sie ihre internen Entwicklungsteams mit zusätzlichen ML- oder KI-Kompetenzen ausstatten sollen, um ihre IT-Lösungen mit KI-basierten Komponenten zu ergänzen. Der Text schlägt eine KI-Systemlandschaft für den ÖPNV-Sektor vor, die auf bestehenden KI-Domänen und -Ka-

tegorien basiert. Anwendungsfälle aus 3 verschiedenen Unternehmen werden gesammelt und in der vorgeschlagenen KI-Landschaft visualisiert. Das ermöglicht Einblicke in den Reifegrad verschiedener KI-basierter Komponenten und deren Einbettung in den Software Development Lifecycle (SDLC) für KI-basierte Software. Darüber hinaus wird die Entwicklung der KI-basierten IT-Architektur der letzten Jahre dargestellt, besonders die Kopplung und Entkopplung von Schichten und Ebenen in der Architektur.

PowerDriverDTSS: the advanced demand responsive transport service system [160] (Tabelle 5, Nr. 7)

Der Beitrag befasst sich mit PowerDriverDTSS von Powersoft, eine Hardware- und Software-Architektur, die auf einem eigenen Algorithmus basiert. Dieser ermöglicht bedarfsgesteuerte Verkehrsdienste ohne feste Fahrpläne, Routen und Haltestellen. PowerDriverDTSS löst das Hauptproblem dieses Dienstes, indem es Kundenbuchungen in Echtzeit mit der Fahrzeugroute kombiniert, diese optimal anpasst und einen hohen Qualitätsstandard für den Dienst garantiert. Ein italienisches Busunternehmen erprobte und evaluierte das System bereits.

Building a flexible on-demand public transport system using its techniques [161] (Tabelle 5, Nr. 8)

Die Hardware- und Software-Architektur PowerDriverDTSS von Powersoft basiert auf einem proprietären Algorithmus für bedarfsgesteuerte Verkehrsdienste ohne feste Fahrpläne, Routen und Haltestellen. Das System löst die Hauptprobleme dieses Dienstes, indem es Kundenbuchungen in Echtzeit ermöglicht, die Routen der Fahrzeuge optimiert und einen hohen Qualitätsstandard des Dienstes garantiert. Der Beitrag beschreibt den Einsatz des Systems von den Mailänder Verkehrsbetrieben ATM für den Service RadioBus. Es wurde zunächst in einem kleinen Testgebiet eingeführt, bevor es auf das gesamte Stadtgebiet von Mailand ausgeweitet wurde. Das System wird auch in den Regionen Parma und Modena eingesetzt.

Travel Information Service System for public travel based on SOA [162] (Tabelle 5, Nr. 9)

Der Text beschreibt einen Reiseinformationsdienst (TIS) als eine wichtige Komponente eines intelligenten Verkehrssystems (ITS). Da Reiseinformationen von verschiedenen Unternehmen oder Abteilungen stammen und es mehrere Anbieter für dieselbe Art von Informationen gibt, ist die Integration dieser Informationen zu einem plattform- und unternehmensübergreifenden Dienst gleichermaßen Desiderat und Herausforderung. Der Beitrag stellt ein auf SOA (serviceorientierte Architektur) basierendes Verkehrsinformationssystem vor, das die Integration verschiedener Anbieter ermöglicht, um Reisenden hochwertige Dienste zu bieten. Die Systemarchitektur und Schlüsseltechnologien umfassen Anforderungsermittlung, Registrierung, Dienstvergleich und Synthese. Ein experimentelles System zeigt die Machbarkeit dieser Technologien.

Modeling transportation systems: A case study with the open method praxeme [163] (Tabelle 5, Nr. 11)

Diese Arbeit basiert auf einem Forschungsprojekt der RATP-Gruppe, dem fünftgrößten ÖPNV-Unternehmen der Welt. Das Projekt zielt darauf ab, der RATP eine geeignete Methodik an die Hand zu geben, um der Komplexität und den Herausforderungen des Marktes zu begegnen. Das Unternehmen hat sich für die offene Praxeme-Methode entschieden und untersucht deren Anwendbarkeit im Verkehrssektor. Praxeme bietet einen effizienten architektonischen Rahmen, der verschiedene Aspekte des Unternehmenssystems verbindet. Eine Fallstudie zeigt den Wert eines modellbasierten Ansatzes aus der Perspektive von Entscheidungsträgern. Der Ansatz erwies sich als geeignet, um Probleme im Systembetrieb zu überblicken.

Die vorangehend vorgestellten 9 Texte befassen sich nicht primär mit der Entwicklung einer REA für ÖPNV-Unternehmen, die bedarfsgesteuerte Verkehrssysteme integrieren wollen, sondern mit Teillösungen. Aufgrund des geringen Mehrwerts wurden sie ausgeschlossen.

II. Thematisch passende Publikationen

Tabelle 6 listet Publikationen auf, die durch die strukturierte Literaturanalyse als thematisch passend und damit relevant für die Forschungsfragen erkannt wurden. Der Autor stellt diese Werke anschließend im Detail vor.

Tabelle 6: Ergebnis der Literaturanalyse

Bez.	Jahr	Autor	Titel	Journal
A. [164]	2008	Hwang/Lerner-Lam	Enterprise architecture planning for public transit	Transportation and Development Innovative Best Practices
B. [47]	2020	Sandkuhl/Würtz	Impact of New Mobility Services on Enterprise Architectures: Case Study and Problem Definition	Lecture Notes in Business Information Processing
C. [48]	2020	Sandkuhl/Würtz	Neue Mobilitätsdienste und ihre Auswirkungen auf Unternehmensarchitekturen: Eine Fallstudie	Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings – Series of the Gesellschaft für Informatik (GI)

Bez.	Jahr	Autor	Titel	Journal
D. [49]	2021	Sandkuhl/Würtz	Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services	IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop, EDOCW
E. [43]	2022	Sandkuhl/Würtz	A Target Enterprise Architecture Approach for New Mobility Services in Demand-Responsive Public Transport	CEUR Workshop Proceedings
F. [165]	2023	Ozpinar	A Hyper-Integrated Mobility as a Service (MaaS) to Gamification and Carbon Market Enterprise Architecture Framework for Sustainable Environment	Energies
G. [166]	2023	Zhou/Matsubara/Takada	Resilience analysis and design for mobility-as-a-service based on enterprise architecture modeling	Reliability Engineering and System Safety
H. [50]	2023	Sandkuhl/Würtz	Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive Public Transport	Book: Smart Transportation Systems 2023
I. [38]	2023	Sandkuhl/Würtz	Enterprise Architecture for Integration of Demand-Responsive Services in Public Transport	Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly

Die aufgeführten Publikationen erfüllen die in Kapitel 2.4 genannten Kriterien. Sechs der Ergebnisse (B., C., D. und E., H., I.) stammen von denselben Autoren und gehören zu einem Forschungsprojekt. Diese werden präsentiert und analysiert, nachdem die Artikel A., F. und G., die von unterschiedlichen Autoren stammen und verschiedene Forschungs- bzw. Praxisprojekte behandeln, vorgestellt wurden.

(A.) Enterprise architecture planning for public transit [164]

Mit der Modernisierung des ÖPNV-Systems in China gewinnt die Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien im Verkehrsbereich an Bedeutung. Die er-

folgreiche Implementierung dieser Systeme und die Verwaltung der zugrundeliegenden Daten sind entscheidend für die Unterstützung der aktuellen und zukünftigen Verkehrsdienste in China. Der Artikel beschreibt einen Ansatz zur Geschäfts- und Technologieplanung, genannt Enterprise Architecture Planning (EAP), der von führenden Verkehrsbetrieben in den USA genutzt wird. EAP ermöglicht die Planung und Implementierung von Technologien auf Basis offener Architekturen und Standards. Chinesische Verkehrsunternehmen können so IT-Anforderungen und Implementierungspläne definieren, dokumentieren und koordinieren, um die Effizienz zu steigern und der Gesellschaft bessere Dienstleistungen zu bieten.

(F.) A Hyper-Integrated Mobility as a Service (MaaS) to Gamification and Carbon Market Enterprise Architecture Framework for Sustainable Environment [165]

Dieser Beitrag stellt ein neues Enterprise Architecture Framework vor, das auf Gamification und Blockchain-Architektur basiert, um CO₂-Emissionen nachhaltig zu reduzieren. Vorgestellt wird ein optimierter MaaS-Ansatz. Eine Fallstudie zeigt Berechnungsansätze in einem integrierten System, das den Austausch von Aktivitäten im MaaS-Ökosystem²⁹ ermöglicht. Ziel ist ein vertrauenswürdiges, sicheres und skalierbares System für Stakeholder, Bürger, Verkehrsdienstleister und Technologieanbieter zu schaffen. Es werden keine numerischen Werte für Berechnungsparameter angegeben, sondern ein Ansatz für die Interoperabilität von Modulen vorgestellt.

(G.) Resilience analysis and design for mobility-as-a-service based on enterprise architecture modeling [166]

Ziel ist hier Entwicklung eines Dienstes, der mehrere Systeme, Plattformen und Unternehmen integriert – also eines Mobility-as-a-Service-Systems. Der Fokus liegt auf der funktionalen Sicherheit von Straßenfahrzeugen und deren Zuverlässigkeit im MaaS-Kontext. Basierend auf den identifizierten Problemen schlägt der Autor eine Methodik für die Analyse und Sicherstellung der Robustheit vor, um zuverlässige Mobilitätsdienste zu entwickeln. Ein kontrolliertes Experiment demonstriert die Wirksamkeit der Methode und vergleicht sie quantitativ mit einer Referenzmethode.

Nach eingehender Prüfung kann festgehalten werden: Die 3 Publikationen A., F. und G. leisten einen wissenschaftlichen Beitrag zur Entwicklung einer Referenz-Unternehmensarchitektur und zu weiteren Ausarbeitungen in Teilbereichen des Themas. Die weiteren Publikationen B., C., D., E., H. und I. wurden vom Autor dieser Dissertation gemeinsam mit Prof. Dr. Sandkuhl verfasst. Sie gehören zu dem hier bearbeiteten For-

²⁹ Ein Mobility-as-a-Service (MaaS)-Ökosystem beschreibt ein integriertes Verkehrskonzept, bei dem unterschiedliche Mobilitätsangebote – wie öffentlicher Verkehr, Carsharing, Ride-Hailing, Fahrradverleih und weitere Dienste – auf einer digitalen Plattform verknüpft werden. Ziel ist es, Nutzern eine nahtlose, flexible und bedarfsgerechte Mobilität anzubieten, bei der Planung, Buchung und Bezahlung über eine zentrale Schnittstelle erfolgen. Dieses Ökosystem umfasst neben den Mobilitätsanbietern auch Infrastrukturbetreiber, Technologieanbieter und regulatorische Instanzen, die gemeinsam dafür sorgen, dass MaaS als umfassende, nachhaltige und nutzerfreundliche Mobilitätslösung funktioniert [167, S. 3–14].

schungsprojekt, das sich mit der Entwicklung einer REA für klassische ÖPNV-Unternehmen befasst, in die New Mobility Services (NMS) integriert werden soll. Diese 6 Beiträge werden im Folgenden zusammengefasst.

(B.) Impact of New Mobility Services on Enterprise Architectures: Case Study and Problem Definition [47]

Der Artikel beleuchtet die Rolle von Enterprise Architecture Management (EAM) im Kontext der Digitalisierung sowie neuer Mobilitätsdienste im (NMS) öffentlichen Verkehr. Die Autoren führten eine Literaturrecherche und ein Experteninterview mit dem IT-Leiter der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) durch, um ihre Thesen zu prüfen. Sie stellten fest, dass die Entstehung neuer Mobilitätsdienste die Unternehmensarchitektur von Verkehrsunternehmen beeinflusst, jedoch bleibt unklar, ob dies das Kerngeschäft ernsthaft gefährdet. EAM, insbesondere das TOGAF-Framework, erweist sich als nützliches Werkzeug, um IT und Geschäftsstrategie zu verbinden. Die BVG wählte TOGAF wegen dessen strukturierten Ansatz und weiten Verbreitung. Die Autoren regen weitere Untersuchungen zur Integration von Mobilitätsplattformen in bestehende Unternehmensarchitekturen an. Um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen Verkehrsunternehmen Mobilitätsplattformen einbinden und steuern. Die Autoren empfehlen, dass Unternehmen eine Zielarchitektur für Mobilitätsplattformen entwickeln, Prozesse definieren und Schnittstellen, Produkte sowie Dienstleistungen so gestalten, dass andere Anbieter von Mobilitätssystemen problemlos teilnehmen können. Zukünftige Publikationen der Autoren sollen das Thema vertiefen und weitere Ergebnisse liefern.

(C.) Neue Mobilitätsdienste und ihre Auswirkungen auf Unternehmensarchitekturen: Eine Fallstudie [48]

Der Artikel untersucht, wie sich NMS wie Carsharing, Stadtfahrräder und E-Scooter auf die Unternehmensarchitektur von ÖPNV-Betreibern auswirken. Er bietet zunächst auf Basis einer Literaturanalyse einen Überblick über den Einsatz von Unternehmensarchitekturen im öffentlichen Verkehr und die Integration von NMS aus der Perspektive von Betreibern, Kunden und Mobilitätsdienstleistern. Thema sind ebenfalls die Anforderungen, die sich bei der Integration von NMS in die Unternehmensarchitektur stellen. Hierzu formuliert der Artikel abschließend Anforderungen. Die Forschung folgt dem Design-Science-Ansatz und zielt darauf ab, methodische und technologische Unterstützung für die NMS-Integration in die Unternehmensarchitektur von ÖPNV-Betrieben bereitzustellen. Die Autoren kombinierten Literaturrecherche, Fallstudie und deduktive Argumentation. Die Ergebnisse zeigen, dass es an erprobten Ansätzen zur Unterstützung der NMS-Integration mangelt. Eine Fallstudie und ein Experteninterview halfen, das Problem zu analysieren und Anforderungen an die methodische und technologische Unterstützung zu ermitteln. Die Studie zeigt die zentrale Rolle der Unternehmensarchitektur bei der NMS-Integration und identifiziert funktionale Anforderungen aus der Sicht von Betreibern, Mobilitätsdienstleistern und Kunden.

(D.) Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services [49]

Der Artikel beschreibt die Notwendigkeit eines standardisierten Ansatzes für die Integration neuer Mobilitätsdienste (NMS) in die Unternehmensarchitektur (EA) von Verkehrsunternehmen. Geprüft⁹ wird hier, wie sich Referenzarchitekturen für den ÖPNV erweitern lassen. Anhand einer Fallstudie des Ride-Pooling-Dienstes BerlKönig in Berlin wird ein erster Entwurf einer solchen Erweiterung entwickelt. Der Artikel vergleicht angebots- und bedarfsorientierte ÖPNV-Dienste und zeigt die funktionalen Anforderungen an ein integriertes ÖPNV-System, das beide Ansätze berücksichtigt. Der Artikel schließt daraus, dass künftige EA von Verkehrsunternehmen ein höheres Maß an Komplexität erfordern.

(E.) A Target Enterprise Architecture Approach for New Mobility Services in Demand-Responsive Public Transport [43]

Der Artikel stellt einen Ansatz zur Integration neuer Mobilitätsdienste in den bedarfsorientierten öffentlichen Verkehr vor und betont die strategische Bedeutung sowie die erforderlichen Kompetenzen für eine solche Integration. Eine erste Zielarchitektur wird anhand der Planung und Ressourcenallokation konkretisiert. Die Forschungsmethode kombiniert Literaturrecherche und konzeptionell-deduktive Arbeit; die erweiterte Zielarchitektur wird mit ArchiMate modelliert. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Integration bedarfsorientierter Dienste, insbesondere neuer Mobilitätsdienste, auf Basis einer Zielarchitektur 9effizient möglich ist. Zukünftige Beiträge sollen die Gesamtzielarchitektur darstellen, die strategischen Anforderungen durch die operative Architektur bewerten und das Forschungsprogramm im Rahmen des Design-Science-Ansatzes evaluieren.

(H.) Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive Public Transport [50]

Der Artikel beschreibt die Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Integration bedarfsorientierter Verkehrsdienste in traditionell operierende, also angebotsorientierte ÖPNV-Betriebe. Er erläutert die Forschungsmethodik, die Literaturanalyse und Experteninterviews umfasst, und beleuchtet die motivatorischen und strategischen Elemente der Architektur. Zudem untersucht der Text die Auswirkungen neuer Mobilitätsdienste auf ÖPNV-Betreiber und deren IT-Landschaft und hebt die Notwendigkeit der Integration und Verwaltung von NMS-Plattformen hervor. Ziel der betrachteten Teil-Architektur ist es, die Verbindung zwischen strategischen und motivatorische Ebenen bei ÖPNV-Betreibern besser zu verstehen. Der Artikel zeigt außerdem, wie die entwickelte Architektur von den Autoren am Beispiel der Planung und des Ressourceneinsatzes bewertet wurde und wie Expertenwissen in das Artefakt bzw. Modell einfluss.

(I.) Enterprise Architecture for Integration of Demand-Responsive Services in Public Transport [38]

Der Artikel analysiert die Herausforderungen und Auswirkungen der Integration von On-Demand-Diensten in traditionelle öffentliche Verkehrssysteme. Er schlägt eine Unternehmensarchitektur vor, um diese Veränderungen zu bewältigen, und untersucht den potenziellen Nutzen der Integration für die urbane Mobilität. Der Entwicklung des Architekturmodells dienten Literaturrecherche, Fallstudienforschung und konzeptionell-deduktive Arbeit. Die Studie betont, dass ÖPNV-Unternehmen neue Mobilitätsdienste aufnehmen und effektiv zu managen müssen, um langfristig erfolgreich zu bleiben.

Die Analyse der Dokumente zeigt, dass der Autor bei der Entwicklung der neuen Architektur auf die Publikationen B., C., D., E., H. und I. aus Tabelle 6 zurückgriff. Diese dienten als Grundlage für die geplante Unternehmensreferenzarchitektur.

Für den Bereich ÖPNV sind die in der folgenden Tabelle 7 aufgeführten Publikationen bekannt, die zusätzlich über Google Scholar ermittelt wurden.

Tabelle 7: Auswahl aus der analysierten Literatur

Nr.	Titel	Methode	Jahr
1.	IT-Systems in public transport/ ITTC Core Model [9]	Process-/Class-Model (UML)	2016
2.	Definition und Dokumentation der Nutzeranforderungen an eine offene Mobilitätsplattform: VDV 7046 [11]	Software architecture (UML)	2018
3.	Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 1: Rollenmodell und typische Kooperations-szenarien: 436-1 [12]	Software architecture (UML)	2019
4.	Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 2-1: Referenzarchitektur: 436-2-1 [13]	Software architecture (UML)	2019
5.	Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 2-2: Interaktionen zwischen den Systemkomponenten: 436-2-2 [14]	Software architecture (UML)	2019

Die in Tabelle 7 aufgeführte Quelle ist ein Werk, das in der vorliegenden Dissertation als praxisrelevante Referenz für die ÖPNV-Branche herangezogen wird. Seine Verwendung erfolgt in der ergänzenden Dokumentenanalyse, die eine wesentliche Komponente der wissenschaftlichen Forschung darstellt. Der Verfasser, Gero Scholz, ist ehemaliger Vorstandsvorsitzender der IVU Traffic Technologies AG, Berlin. Das Werk enthält die Grundzüge eines Branchenmodells (ITVU) [63], das den klassischen angebotsorientierten ÖPNV abbildet. Die in Tabelle 7 unter 2. bis 5. aufgeführten Titel stammen aus der internen Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und liegen ausschließlich in deutscher Sprache vor. Sie behandeln Architekturansätze, die Mobili-

tätsplattformen in klassische ÖPNV-Unternehmen integrieren sollen, um eine Erweiterung um einen bedarfsgesteuerten Personennahverkehr zu ermöglichen. Die vorgestellten Softwarearchitekturen erheben nicht den Anspruch, den Zweck oder die Anforderungen einer vollständigen Unternehmensarchitektur zu erfüllen. Sie wurden dementsprechend nicht in ArchiMate, sondern überwiegend in UML modelliert.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Literaturanalyse zeigt im untersuchten Bereich derzeit verschiedene Forschungsaktivitäten und daraus resultierende Publikationen. Unter den 9 näher untersuchten Quellen (siehe die grün hinterlegten Titel in Tabelle 5) stammen 6 aus einem Forschungsprojekt, das zahlreiche Überschneidungen mit der hier behandelten Fragestellung hat. Die übrigen 3 Publikationen könnten einen wissenschaftlichen Beitrag zum Thema leisten. Arbeiten im Kontext einer Unternehmensreferenzarchitektur für den ÖPNV könnten in folgenden Bereichen hilfreich sein:

- a. zur Einbeziehung der Erkenntnisse aus der Unternehmens- und Technologieplanung, bekannt als Enterprise Architecture Planning (EAP) [164],
- b. Ableitung von Lehren aus einem neuen Unternehmensarchitekturrahmen für integrierte Mobilität als Dienstleistung (MaaS) [165],
- c. Berücksichtigung der Ausfallsicherheit bei der Bereitstellung von MaaS auf der Grundlage einer EA-Modellierung mittels einer Analyse [166].

Der Autor empfiehlt, diese Aspekte weiter zu untersuchen und in künftige Arbeiten einzubeziehen.

Die 6 Publikationen [39, 44, 48–51], die aus einem Forschungsprojekt hervorgingen, nutzen die Design-Science-Research-Methode, um ein Architekturartefakt für ÖPNV-Unternehmen zu entwickeln, das NMS berücksichtigt. Dieses Artefakt bildet eine Kernarchitektur ab, die NMS integriert. Die Forschungsaktivitäten folgenden Phasen des DSR-Prozesses: Literaturanalyse, Experteninterviews, Anforderungsdefinition, Entwurf einer erweiterten Referenzarchitektur und Evaluation des Artefakts. Einige Projektergebnisse, insbesondere die Demonstration und Evaluation des Referenzmodells, wurden erst mit der vorliegenden Veröffentlichung dokumentiert.

Die thematische Abdeckung der VDV-Publikationen wurde im Rahmen einer eigenen Dokumentenanalyse des Archivs (Phase 2) erhoben.

Die in Kapitel 4.1 formulierte zentrale Frage dieses Forschungsabschnitts, die durch die Literaturanalyse beantwortet werden sollte (Gibt es Unternehmensarchitekturmodelle für ÖPNV-Betriebe, die NMS berücksichtigen?), lässt sich wie folgt beantworten:

Derzeit existiert kein Referenzmodell für eine Enterprise-Architektur im ÖPNV, das NMS (bedarfsorientierten Verkehr) einbezieht oder eine einheitliche Architektur auf Basis von ArchiMate vorsieht. Dieses Promotionsprojekt will die Forschungslücke füllen.

4.4 Replikation und Aktualisierung der Literaturanalyse

Die ursprüngliche Literaturanalyse wurde im Juni 2023 in der Literaturdatenbank Scopus durchgeführt und in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 dokumentiert. Um die Evidenzbasis aktuell und Aktualität und vollständig zu halten, wird die Analyse nun wiederholt und erweitert. Das Replikationsdesign orientiert sich an der in Kapitel 4.1 dargestellten Methodik von Kitchenham [70] und umfasst ein zusätzliches Zeitfenster vom 01.06.2023 bis zum 11.11.2025.

Anlass und Zielsetzung

Die erste strukturierte Literaturanalyse, basierend auf einem komplexen Suchbegriff in der Elseviers Scopus Datenbank, ergab 174 Treffer. Auswahl- und Ausschlusschritte sind in Tabelle 5 und Abbildung 7 dokumentiert. Seither können neue Studien erscheinen und Indexierungen aktualisiert worden sein. Um mögliche Zeit- und Indexierungs-Biases zu vermeiden und die Evidenzbasis zu erweitern, wird die Analyse aktualisiert.

Ziel ist es, den Forschungsstand zu EA und NMS (inkl. DRT und MaaS) zu ergänzen und die Implikationen der neueren Beiträge für das REA-Artefakt zu bewerten. Methodisch bleibt die Aktualisierung an die erste Suche angelehnt (Kitchenham [70]; Suchstrings, Ex- und Inklusionskriterien, Qualitätskriterien), erweitert jedoch den Zeitraum.

Replikationsdesign und Abweichungen zur Erstanalyse

Das Replikationsdesign der aktualisierten Literaturanalyse folgt der in Kapitel 4.1 beschriebenen Methodik und wahrt die Forschungsfrage sowie die SLR-Logik³⁰. Der in der Erstanalyse verwendete Recherche-Prozess sowie das dokumentierte SLR nach Kitchenham [70] werden unverändert übernommen. Die gegenüber der Erstanalyse von 06/2023 vorgenommenen Abweichungen werden begründet dargelegt.

Ziel und methodischer Bezug

Die Berichtsführung orientiert sich an PRISMA 2020 [65] (Checklisten, Flussdiagramm für updated reviews). Die DSR-Einbettung dient der Nachverfolgung von Erkenntnisflüssen in den Build-Evaluate-Zyklus des Artefakts, orientiert an Hevners Konzept der Rigor-Relevance-Balance [44] und dem Prozessmodell nach Peffers [45]). FEDS [52] als Evaluationsrahmen operationalisiert die Anforderungen an Replizierbarkeit und Nachvollziehbarkeit.

Suchraum und Zeitfenster

Für das Update ausschließliche Datenquelle bleibt Scopus, da die Suchlogik der Erstanalyse (Kapitel 4.1) dort vollständig unterstützt wird und der Fachbereich Wirtschaftsinformatik (IS, Management, CS) hinreichend abgedeckt ist. Das Zeitfenster wird vom 01.06.2023 bis 11.11.2025 festgelegt (Anlass: Update „seit Juni 2023 bis heute“),

³⁰ Die SLR-Logik nach Barbara Kitchenham et al. [71] bezieht sich auf den methodischen Ablauf, wie eine SLR in Informatik und Software Engineering durchgeführt werden soll. Kitchenham gilt mit ihren Arbeiten (v.a. dem Report „Procedures for Performing Systematic Reviews“ von 2004 und den späteren Updates 2007/2015) als zentrale Referenz.

womit die Erstanalyse (06/2023) fortgeschrieben wird, ohne deren Auswahllogik zu verändern. Die Anknüpfung an Kapitel 4.1 (Schlüsselwortsystematik) und das dort dokumentierte Protokoll bleiben bestehen (Tabelle 4).

Suchstring und Filter

Der ursprüngliche Suchstring wird unverändert übernommen, er lautet:

(TITLE-ABS-KEY (("enterprise architecture") OR ("enterprise model") OR ("business architecture") OR ("software architecture") OR ("information architecture") OR ("IT architecture") OR (enterprise AND architecture) AND (("new mobility service") OR ("new mobility solution") OR ("mobility as a service") OR ("demand oriented personal transport") OR ("demand responsive public transport") OR ("demand responsive transport service") OR ("demand oriented public transport") OR (public AND transport))) AND NOT (DOCTYPE(re) OR DOCTYPE(cr)))*

Der verwendete Scopus-String wird ergänzt um Zeitfilter June 2023 → Nov 2025 sowie Sprachfilter Englisch/Deutsch. DOCTYPE-Ausschlüsse (Review; Conference-Review) verhindern Doppelzählungen und fokussieren auf primäre Forschungsbeiträge wie Artikel und Konferenzbeiträge (vgl. Tabelle 4).

Einschluss- und Ausschlusskriterien (unverändert, präzisiert)

Eingeschlossen werden (i) Peer-reviewte Journal-Artikel und Konferenzbeiträge in Englisch und Deutsch, (ii) solche mit expliziten Bezug zu Enterprise Architecture (EA/EAM, Architekturen/Referenzarchitekturen) und New Mobility Services (NMS inkl. MaaS) im Kontext des ÖPNV, (iii) konzeptionelle oder empirische Beiträge mit überprüfbarer Methodik.

Ausgeschlossen werden (i) reine Übersichtsarbeiten, Editorials, Short Abstracts, Poster, (ii) Beiträge ohne EA-Bezug (z.B. reine Verkehrslogistik ohne Architekturbezug) sowie (iii) rein technische Fahrzeugarbeiten ohne Unternehmensarchitektur-/Integrationsbezug. Die Kriterien werden in der Screening-Phase anhand Titel, Abstract, Volltext (siehe unten) angewandt und im PRISMA-Flow³¹ dokumentiert.

Screening-Verfahren

Das Screening erfolgt zweistufig: Zunächst werden Titel und Abstract anhand der oben genannten Kriterien geprüft, anschließend die Volltexte der vorselektierten Beiträge. Entscheidungen und Begründungen werden protokolliert (Audit-Trail) und in einem PRISMA-Flow für updated reviews offengelegt (Identifikation → Deduplikation → Screening → Volltext → Einschluss). Ein Konsistenz-Check auf einer Stichprobe von 10 % sichert die Qualität (Re-Screening), Abweichungen werden konsentiert.

³¹ Der PRISMA-Flow (Identifikation → Deduplikation → Screening → Volltext → Einschluss) und die Abgleichung mit den unveränderten Ein-/Ausschlusskriterien sind im Review-Protokoll dokumentiert; die Update-Berichterstattung folgt PRISMA-2020-Checklisten [66] für Updated Reviews.

Qualitätsbewertung (QA)

Analog zur Erstanalyse bewertet eine Low-overhead-QA 5 Kriterien: Klarheit der Fragestellung (Q1), methodische Angemessenheit (Q2), Transparenz der Datenbasis (Q3), Architekturbezug (EA-Ebene, Artefaktbezug) (Q4) und ÖPNV/NMS-Domänen-Passung (Q5). Beiträge mit QA-Summe (z.B. $\geq 6/10$) gelten als „methodisch hinreichend“ und werden in die Synthese aufgenommen; Grenzfälle werden qualitativ begründet. Die QA-Heuristik stützt die FEDS-Eigenschaften Nützlichkeit, Integrationsfähigkeit und Erweiterbarkeit als Selektionsraster für Evidenzen, die in das Artefakt zurückgeführt werden.

Datenextraktion und -synthese

Für jedes eingeschlossene Paper werden standardisierte Informationen erhoben. Das umfasst etwa Bibliografie, Forschungsdesign, Domänenkontext, adressierte Architekturschicht(en) (Strategie-, Business-, Application- und Integration-Layer), Integrationsmechanismen (APIs, Standards wie OJP, TRIAS, OSDM, SIRI, TOMP), NMS-Bezug (DRT, MaaS, Plattform) sowie Design-Takeaways für die REA. Die Synthese kombiniert deskriptive Kartierung (Publikationsjahr, Venue, Methode) mit thematischer Bündelung (Integrationsmuster, Governance- und Capability-Bezüge, Datendomänen) und verknüpft die Ergebnisse mit den Artefakt-Bausteinen (Kapitel 7–9).

Durchführung der Update-Suchen

Aufbauend auf dem festgelegten Replikationsdesign wurde die Aktualisierung der Literaturanalyse nach einem protokollgestützten, reproduzierbaren Ablauf in Scopus mit den im Vorkapiteln festgelegten Parametern am 11.11.2025 (um 16:30 Uhr) durchgeführt.

Ergebnisse des Updates

Die aktualisierte Analyse bestätigte die Tendenzen der Erstanalyse und verdichtete die Evidenz vor allem in vier Bereichen: (i) referenzarchitektonische Lösungsansätzen für NMS und DRT im ÖPNV, (ii) Plattform- und Standardintegration (u.a. OJP, TOMP, OSDM, TRIAS, SIRI), (iii) Resilienz- und KRITIS-getriebene Architektur sowie (iv) Governance- und Capability-Bezüge. Die Berichterstattung folgt PRISMA-2020, die SLR-Logik bleibt unverändert; sämtliche Schritte wurden protokolliert (Audit Trail). Damit ist die Replizierbarkeit gegenüber Kapitel 4.4 gewahrt.

Deskriptive Befunde (qualitativ)

Die Mehrzahl der neu aufgenommenen Beiträge behandelt EA-basierte Integrationsentwürfe für NMS und MaaS sowie Evaluations- und Qualitätsmerkmale von EA im Mobilitätskontext. Beispielhaft:

- Würtz & Sandkuhl (2023, CSIMQ 34, S.62–83): partieller REA-Entwurf zur NMS-Integration als Erweiterung des ITVU-Kernmodells; initiale Evaluation und Ableitung architektureller Bausteine.

- Würtz & Sandkuhl (2023, Smart Transportation Systems, S. 125–137): inhaltliche Konsolidierung und Evaluation eines REA-Artefakts (FEDS-geleitet), mit Fokus auf Anwendbarkeit und Übertragbarkeit.
- Zhou/Matsubara/Takada (2023, Reliability Engineering & System Safety, Art. 108812): Resilienz-Analyse und -Design für MaaS auf Basis einer 9EA-Modellierung, mit Implikationen für KRITIS-geeignete Architekturmuster.
- Ozpinar (2023, Energies 16(5), Art. 2480): EA-Rahmen für hyper-integrierte MaaS-Plattformen (Gamification/Carbon-Market), relevant für Wertströme, Datenräume und API-Schichten von ÖPNV-EA.
- Würtz & Sandkuhl (2025, HMD, Early Access): Integrationsmuster für NMS in klassischen Verkehrsbetrieben (operativ-taktische Kopplung, Governance und Capability-Sicht), anschlussfähig an die REA-Artefaktlogik.

Synthetische Befunde (themenbezogene Bündelung)

Referenz- und Zielarchitekturen: Die Evidenz stützt REA-Ansätze, die ITVU-basierte Domänenstrukturen mit NMS-spezifischen Schichten (z.B. Vermittlung und Orchestrierung, Ticketing und Clearing, Daten- und Ereignisräume) verbinden. Die Kopplung klassischer angebotsorientierter und neuer bedarfsorientierter Systeme erfolgt über standardisierte Integrationsmechanismen (APIs, Ereignisbus, semantische Modelle).

Plattform- und Standardintegration: Beiträge zeigen, dass schnittstellen- und standardkonforme Architekturen (OJP, TOMP, OSDM u. a.) eine zentrale Voraussetzung für Multi-Provider-Szenarien sind. Dies unterstützt die im Artefakt verankerte Service- und Daten-Interoperabilität.

Resilienz und KRITIS-Bezug: EA-Modelle dienen als Träger für Resilienz-Design (Verfügbarkeit, Wiederanlauf, Störfalllogik) in MaaS-Ökosystemen. Die Modelle können um nicht-funktionaler Anforderungen (z. B. Resilience-by-Design, Observability) ergänzt werden.

Wert- und Governance-Bezüge: Neue Evidenzen betonen Capability-basierte Steuerung, Rollen- und Verantwortungsmodelle sowie Traceability. Sie stützen damit die Build-Evaluate-Rationale des REA-Artefakts.

Qualitätsbewertung (QA, heuristisch)

Die neu aufgenommenen Studien erreichen überwiegend die QA-Schwelle ($\geq 6/10$). Besonders überzeugend sind hinsichtlich methodischer Angemessenheit, Datenbasis-Transparenz, klarer EA- und Artefaktbezug, ÖPNV- und NMS-Passung Q2–Q5. Damit bestätigen die aktualisierten Befunde die Eignung der Evidenzbasis für die Rückführung ins Artefakt (gemäß DSR, FEDS).

Tabelle 8: Neu eingeschlossene Kernbeiträge (Scopus 06/2023–11/2025)

Autor(en), Jahr	Quelle	Beitragsschwerpunkt	EA und NMS-Relevanz
1. Würtz & Sandkuhl, 2023	[38, S. 62–83], <i>CSIMQ</i> 34	REA-Erweiterung (ITVU-basiert), initiale Evaluation	Architektur-Bausteine & Kopplungsmuster
2. Würtz & Sandkuhl, 2023	[50, S. 125–137], <i>Smart Transportation Systems</i>	REA- Evaluation (FEDS), Artefakteigenschaften	Nützlichkeit/Übertragbarkeit der REA
3. Zhou et al., 2023	[166], <i>Reliab. Eng. & Syst. Safety</i> , 108812	Resilienz-Design für MaaS via EA-Modellierung	NFR-Schärfung (Resilienz/KRITIS) Zuverlässigkeitstechnik und Systemsicherheit
4. Ozpinar, 2023	[165], <i>Energies</i> 16(5), 2480	Hyper-integrierte MaaS-EA (Plattform/Gamification/CO ₂)	Plattform-/Datenraum-Integration
5. Würtz & Sandkuhl, 2025	[51], <i>HMD</i>	Integrationsmuster in klassischen Betrieben	Governance/Capabilities & operative Kopplung

Obwohl die Scopus Abfrage vorab durch ein klar definiertes Zeitintervall begrenzt wurde, zeigten die Ergebnislisten zeitliche Überschneidungen (vgl. Tabelle 8). Alle Veröffentlichungen aus dem Jahr 2023 [38]; [50]; [165]; [166] wurden bereits im ersten Durchlauf der Literaturanalyse vollständig berücksichtigt. Nur die Veröffentlichung von Würtz & Sandkuhl aus dem Jahr 2025 [51] liefert zusätzliche Ergebnisse.

Auswirkungen auf Anforderungen und Artefakt

Die Analyse führte zu einer präzisierten Ableitungslogik und einer Erweiterung des REA-Artefakts. Ein zentraler Beitrag ist die HMD-Publikation von Würtz & Sandkuhl (2025) [51], die neue sowie präzisierte Anforderungen und Entwurfsimplikationen liefert.

(A) Präzisierung der Anforderungen

- Funktional F-1 (neu/geschärft): Einführung eines zweistufigen Transaktionsprozess im Vertrieb. NMS erfordern eine klare Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (rechtsverbindlich) mit nachgelagerter Abrechnung. Dies ist als prozessuale und daten- sowie ereignisbezogene Fähigkeit im Vertriebs- und Produktmanagement der REA zu verankern (Statuswechsel, Ereignisketten, Schnittstellen-)

verhalten). Würtz & Sandkuhl [51], insb. der Abschnitt „Anforderungen“ und der Vertriebssteil, liefern Begründung und Domänenbezug. Die zweistufige Commitment-Logik für NMS wird explizit beschrieben.

- Funktional F-2 (präzisiert): Erweiterung des ITVU-Kerns um NMS-Bausteine. Die NMS-Integration ist konzeptionell als additiver Referenz-Baustein zum etablierten ITVU-Kern auszugestalten; betroffen sind v.a. die Domänen Tarif und Produkt, Vertrieb und deren Schnittstellen in Planung und Lenkung. Dies schärft die in der Erstanalyse formulierte Integrationslogik und verankert den NMS-Bezug architekturmethodisch in der REA [51, Abschnitte zu ITVU-Basierung und REA-Beitrag].
- Funktional F-3 (präzisiert): Anforderungen aus VDV-Artefakten ableiten. Die Herleitung modellrelevanter Anforderungen bleibt an ITVU sowie VDV-Schriften (u.a. 70946, 436) gekoppelt. Würtz & Sandkuhl [51] konsolidieren dies in der Anforderungssektion (vgl. tabellarische Zusammenfassung, „Anforderungen“). Für das Update heißt dies: kein neuer Anforderungstyp, wohl aber eine präzisierte Ableitungslogik (Filter: ausschließlich modellrelevante Anforderungen).
- Nicht-funktional N-1 (geschärft): Präzisierung der Interoperabilität und Instanzierbarkeit. Aus der naturalistischen Mehrstufen-Evaluation der REA [51] folgt der Varianten- und Instanzierbarkeit (Skalierung über Unternehmensgrößen und Verantwortungsmodelle) sowie Interoperabilität zu bestehenden AO-Systemen. Dies bestätigt und präzisiert die nicht-funktionalen Anforderungen der Erstanalyse, ohne sie zu erweitern [51, Abschnitte zu Evaluations- und Architekturbeitrag].

(B) Artefaktänderungen an der REA

- Struktur B-1: Aufnahme eines Referenz-Bausteins „NMS-Integration“ in die REA-Schichten (Business-, Anwendungs-, Datenschicht). Der Baustein referenziert ITVU-Elemente und ergänzt NMS-spezifische Fähigkeiten wie Reservieren, Buchen sowie Abrechnen im Kontext NMS; Aggregator- und Operator-Rollen [51].
- Prozesse und Ereignisse B-2: Verankerung eines zweistufigen Commitment-Musters als Soll-Prozess in Vertrieb und Produkt (State-Machine Reservation → Booking → Settlement; Ereignisse/Policies für Statuswechsel; Schnittstellenverhalten zu externen Plattformen) [51].
- Daten und Schnittstellen B-3: Ergänzung von Datenobjekten (Reservation, Booking, Payment Instruction) sowie Übergangs- und Konsistenzregeln. Formale Kopplungspunkte zu bestehenden AO-Artefakten (Fahrplan, Produkt, Tarif) bleiben stabil, werden jedoch um NMS-spezifische Felder und Trigger erweitert [51].
- Traceability und Varianten B-4: Anforderungen aus der HMD-Publikation [51] werden nachvollziehbar auf REA-Capabilities, Services und Anwendungen abgebildet. In den Varianten (Szenarien S1–S4) wird der neue NMS-Baustein als delta-fähiger Bestandteil konfiguriert. Dabei zeigt er sich flexibel anpassbar für Operator- und Aggregator-Rollen, interne sowie externe Leistungserbringung (vgl. Kapitel 2.8 und 2.9,

vgl. dort die Darstellung der referenzierten Varianten- und Evaluationslogik der Arbeit).

(C) Einordnung des Review-Ergebnisses

Die SLR-Logik nach Kitchenham [70] und die PRISMA-Berichtssystematik [66] der Aktualisierung bleiben unverändert. Die Ergebnisse des Updates erzeugen keine Protokolländerungen, sondern Präzisierungen des Artefakts. Die Rigor-Relevance-Brücke wird durch die Mehrstufen-Evaluation der HMD-Arbeit zusätzlich gestützt; die Build-Evaluate-Rückkopplung ist entsprechend in Kapitel 4.4 fortgeschrieben.

Limitationen und Validität

Die Aktualisierung der Literaturanalyse folgt einem klar dokumentierten, replizierbaren SLR-Ansatz nach Kitchenham [70] mit PRISMA-Reporting [66]. Dennoch bestehen methodische Grenzen sowie Risiken und Einschränkungen der Validität, die im Folgenden ebenso offengelegt werden wie die getroffenen Mitigationsmaßnahmen.

- **Datenbank-Bias (Single-Source-Suche)**

Das Analyse-Update stützt sich ausschließlich auf Scopus. Das birgt zwei Risiken: (i) Lücken durch unvollständige Indexierung und (ii) fachdomänenspezifische Abdeckungslücken, etwa bei ÖPNV- und Transportjournalen.

Um dies abzumindern, wurden bei der Erstanalyse der Suchstring und Filter exakt dokumentiert (Audit-Trail), PRISMA-Flow angewandt sowie ein anlassbezogener Update-Plan (nach Wohlin) zur periodischen Re-Suche erstellt. Die konsistente Nutzung einer einzigen Datenbank sichert Vergleichbarkeit; zugleich ist ein Datenbank-Bias als Restriktion nicht auszuschließen [70, S. 21–22, 49–50; zu Identifikation, Screening und Reporting [70, S. 50]; zu Threats [66, S. 18–19].

- **Sprach- und Zeitfenster-Bias**

Die Beschränkung auf englisch- und deutschsprachige Literatur sowie den Zeitraum 01.06.2023–11.11.2025 kann relevante Studien aus anderen Sprachen oder Zeiträumen ausschließen. Mitigation: Die Filter wurden explizit protokolliert, die Zeitrestriktion wurde begründet und die Suchlogik unverändert fortgeführt (Protokolltreue) [70, S. 23, 49–50]; [66, S. 18–19].

- **Suchstring-Spezifität**

Der logisch verschachtelte EA × NMS-String erhöht die Präzision, kann jedoch thematische Randtreffer (z.B. SOA-/MaaS-Beiträge ohne explizites „EA“-Vokabular) übersehen. Mitigation: Um dies zu vermeiden, wurde das in Kapitel 4.1 validierte Keyword-System (Tabelle 4) beibehalten, DOCTYPE-Filter (Ausschluss Review und Conference Review) zur Vermeidung von Doppelevidenzen angewandt alle Screening-Entscheidungen dokumentiert [70, S. 21–22].

- Selektion- & Bewertungs-Bias (Screening/QA)

Subjektivität im Screening von Titeln, Abstracts und Volltexten sowie in der QA-Heuristik (5 Kriterien, 0–2-Skala) bleibt möglich. Mitigation: Ein zweistufiges Screening, die Dokumentation von Ausschlussgründen, ein Konsistenz-Check (10 %-Stichprobe), eine standardisierte Extraktion (Bibliografie, Kontext, Methode, Artefaktbezug) sowie eine thematische Synthese schaffen Abhilfe und reduzieren das Risiko [70, Screening S. 20–21, Extraktion S. 36–41].

- Externe Validität (Übertragbarkeit)

Die Generalisierbarkeit ist auf den Schnittbereich EA/EAM $\times$ NMS/DRT $\times$ ÖPNV ausgerichtet; damit sind die Ergebnisse nur mit Vorsicht auf benachbarte Mobilitätsdomänen anzuwenden. Mitigation: Die Ergebnisse des SLR-Updates wurden mit 9 domänenspezifischen Standards (z.B. OJP, TRIAS, OSDM, SIRI, TOMP) gekoppelt und mit naturalistischen Evidenzen aus den Evaluations-Episoden (FEDS-geleitete, formative und summative Episoden) zur Nützlichkeits- und Übertragbarkeitsprüfung trianguliert [52, S. 77–80]; [62, S. 80, 83, 86].

- Replizierbarkeit und Dokumentation

Alle Suchläufe, Filter, Deduplikationen, Screening-Entscheidungen und Exporte (RIS, CSV) wurden versioniert dokumentiert. Das Reporting gemäß PRISMA-2020 [66] stärkt die interne Validität und Nachvollziehbarkeit, kann jedoch die oben genannten Bias-Risiken nicht vollständig beseitigen [70, S. 49–50]; [66, S. 18–19].

Zwischenfazit Validität: Die methodische Angemessenheit ist gegeben, auch wenn die Vollständigkeit begrenzt bleibt. Durch Protokolltreue (Kitchenham/PRISMA), standardisierte Extraktion bzw. Synthese und FEDS-gestützte Triangulation mindern zentrale Validitätsrisiken. Die Monodatenbank-Suche und die sektorale Fokussierung bleiben als bewusste Einschränkungen [52].

Diskussion der Ergebnisse

Das SLR-Update (06/2023 bis 11/2025) bestätigt und präzisiert die in Kapitel 4.3 gezogenen Schlüsse zur Forschungslage an der Schnittstelle EA/EAM, NMS und ÖPNV:

1. Bestätigung des Kerndefizits

Es fehlen weiterhin domänenspezifische REA-Ansätze für die Integration bedarfsorientierter Dienste (speziell NMS) in klassische ÖPNV-Strukturen. Vorhandene Arbeiten behandeln Teilaspekte wie Plattformintegration, Standard-APIs oder Governance, liefern jedoch keine umfassende sichtenübergreifende REA. Die in Kapitel 4.3 identifizierte Forschungslücke bleibt bestehen.

2. Update zeigt Schwerpunktverschiebung

Seit 2023 liegt der Fokus stärker auf Plattform- und Schnittstellen-Ökosystemen (MaaS, DRT-Kopplung) sowie der Standardisierung entlang OJP, TRIAS, SIRI, OSDM und TOMP. Drei Design-Muster sind besonders relevant:

(i) Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich) als architektonisches Designprinzip (End-to-End-Verkettung von Journey-Planning → Reservierung → Buchung → Abrechnung)

(ii) Event- und API-basierte Integration zwischen Disposition/ITCS und DRT-Plattformen (u.a. TOMP-TripEvents) zur Synchronisation operativer Zustände

(iii) Datenpools als robuste Integrationsdreh scheiben statt vieler bilateraler Punkt-zu-Punkt-Schnittstellen (Skalierbarkeit, KRITIS, Segmentierung).

Diese Muster entsprechen den in den Evaluations-Episoden artikulierten Praxisanforderungen (z.B. Forderung nach Trennung von Reservierung und Buchung im VDV-Stakeholderkreis, Hinwendung zum Datenpool statt N-1-Schnittstellen-Pflege).

3. Implikationen für Anforderungen und Artefakt

- Capability-Shift: Die Ergebnisse des SLR-Updates betonen die Notwendigkeit, Capabilities bei der Vertriebs- und der Betriebslenkung zu erweitern um Partner- und Plattform-Koordination, KYC, IAM, Clearing und API-Governance (Verankerung in DP-/AS-Steckbriefen (siehe Anhang C und D) der REA).
- Governance und Compliance: Segmentierte Sicherheitszonen (PCI/PSD2/SEPA-Kontexte, KRITIS) und SLA-Kaskaden über Partnerketten treten als nicht-funktionale Leitplanken hervor.
- Traceability und RACI: Die Evidenzen bekräftigen die Einbindung in den 9DSR-Zyklus mit formativer wie summativer FEDS-Evaluation (Nützlichkeit, Übertragbarkeit) und die Fortführung der PRISMA-basierten Dokumentation für künftige Updates [52, S. 77–80]; [44, S. 80, 83, 86]; [66, S. 18–19]; [70, S. 49–50].

Eine abschließende Synthese zeigt, dass das Update die Erstanalyse um klarere Integrationsmuster (Trennung Reservierung/Buchung; Standard-APIs; Datenbroker) ergänzt und die zentrale Forschungslücke einer domänenspezifischen REA bestätigt. Die Ergebnisse sind konsistent mit dem DSR-Build-Evaluate-Pfad und stützen die bisherigen Entwurfsentscheidungen. Eine weitere Periodisierung der Updates (Wohlin-Heuristik) wird empfohlen, um Standard-Evolutionen (OJP/TRIAS/OSDM/TOMP) fortlaufend in die REA rückzukoppeln.

Zwischenfazit

Die Aktualisierung der systematischen Literaturanalyse (SLR) bestätigt die Ausgangsthese dieser Arbeit: Eine domänenspezifische REA ist für die Integration bedarfsorientierter Mobilitätsdienste (NMS, DRT, MaaS) in klassische, angebotsorientierte ÖPNV-Unternehmen notwendig und weiterhin wissenschaftlich unterversorgt. Substantiell neue Evidenz im betrachteten Zeitraum lieferten vor allem Würtz & Sandkuhl [51]. Deren Ergebnisse konkretisieren die Architektur- und Governance-Anforderungen, wobei sie auf Capability-Ausbau, Standard-API-Orchestrierung und KRITIS-resiliente Integrationsmuster fokussieren. Diese Evidenzlage stützt den im DSR-Prozess entwickelten Artefaktfokus und verlangt, die REA entlang daten-, plattform- und sicherheitsbezogener Architekturdimensionen fortzuschärfen. Vgl. zum replizierten SLR-Vorgehen und zur Einbettung in Kitchenham [70] und PRISMA [66] die Kapitel 2.4 und 4.4.

Implikation: Die Update-SLR führt keine Paradigmenwechsel ein, sondern schärft das Anforderungs- und Sicherheitsprofil sowie die Standard-/Ereignisorientierung der REA. Die Änderungen sind inkrementell-konsistent zur initialen REA (ITVU-Erweiterung) und erhöhen deren Übertragbarkeit und Prüfbarkeit im Sinne der DSR-Leitlinien (Utility/Rigor).

4.5 Ergänzende Einschätzung weiterer Datenbanken

Zur Absicherung der Literaturanalyse wurde stichprobenartig in weiteren Datenbanken (IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink und Google Scholar) gesucht. Ziel war eine Überprüfung der Vollständigkeit der identifizierten Kernpublikationen. Diese Überprüfung diente damit einer methodischen Robustheitskontrolle der im Rahmen der Hauptsuche gewonnenen Ergebnisse.

Die Suchparameter orientierten sich an den zuvor definierten Begriffskombinationen, wurden jedoch bewusst nicht in derselben formalen Strenge und Transparenz der systematischen Analyse operationalisiert und umfassen einen zeitlichen Suchraum von 2020 bis 2025 (5 Jahre). Die ergänzende Suche wurde daher explizit als qualitativ-indikative Prüfung konzipiert und die Suchstrings den einzelnen Datenbanken angepasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt und im Abschluss kurz erläutert.

Tabelle 9: Überprüfung der SLR in Scopus

Literaturdatenbank	Treffer	Verwertbar	Architektur [EA]			Verkehr [ÖPNV, NMS usw.]			Gesamt	
			identifiziert	relevant	irrelevant	identifiziert	relevant	irrelevant	relevant	irrelevant
Google Scholar										
Untersuchung: Zeitlich unbegrenzt	198	140	140	20	120	140	60	80	7	133
IEEE Xplore										
Untersuchung: 1999 bis 2025	74	74	7	6	1	18	16	2	2	72
ACM Digital Library										
Untersuchung: Zeitlich unbegrenzt	886	778	14	14	0	41	41	0	8	878
Springer Link										
Untersuchung: 2021 bis 2025										
zeitlich sortiert: begrenzt auf 1000 Treffer (letzten 25 Treffer dadurch nicht berücksichtigt)	1000	1000	38	29	9	54	44	10	12	988

Im Folgenden werden die Ergebnisse kurz erläutert:

1. Google Scholar

Von den 7 identifizierten relevanten Literatur wurde 1 Treffer schon in der vorgelagerten Literatur berücksichtigt. Sechs Treffer wurden anhand der vorhandenen Texte und Zusammenfassungen weiter untersucht.

2. IEEE Expore

Von den beiden Treffern wurde einer mit dem Titel „Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services“ als relevant identifiziert – dieser stammt von Würtz & Sandkuhl und ist eine Vorarbeit zu dieser Dissertation. Der zweite Treffer mit dem Titel „Upgrading Approach for MaaS Level 4 Using UAF“ wurde schon in der ersten Literaturanalyse (Scopus – Elsevir) untersucht.

3. ACM Digital Library

Von den 8 Treffern wurden 2 Titel schon in der früheren Literaturanalyse untersucht („Integration of health and public transport data to enable decision support for seniors to reduce risk of infection with communicable diseases“ und „Pronto: support for real-time decision making“). Die restlichen 6 Treffer wurden anhand der vorhandenen Zusammenfassungen weiter inhaltlich untersucht.

4. Springer Link

Von den 8 Treffern wurde 1 Treffer als relevant identifiziert. Der Titel „Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive Public Transport“ von Würtz & Sandkuhl stellt eine Vorarbeit zu dieser Dissertation dar. Elf Treffer wurden anhand der vorhandenen Zusammenfassungen weiter inhaltlich untersucht.

Die ergänzende Recherche ist aufgrund der bewusst reduzierten Formalisierung als qualitativ-indikative Robustheitskontrolle zu interpretieren und nicht als Vollständigkeitsnachweis im Sinne der systematischen Hauptanalyse (vgl. [67, 71]).

Es wurden keine zusätzlichen zentralen Beiträge gefunden, die einen nennenswerten Beitrag zum Dissertationsthema liefern würden und die Schlüsse der systematischen Analyse substantiell verändern würden. Einzelne zusätzliche Publikationen wiesen thematische Nähe auf, boten jedoch keine neuen theoretischen oder empirischen Erkenntnisse für die Ableitung der Anforderungen oder die Ausgestaltung der REA. Die ergänzende Prüfung stärkt die Annahme, dass die verwendete Literaturbasis hinreichend vollständig und wissenschaftlich belastbar ist.

4.6 Gesamtfazit

Die Literaturanalyse und ihre Aktualisierung weisen auf eine weiterhin bestehende Forschungslücke hin, die sich aus den dokumentierten Such- und Screening-Ergebnissen ableitet (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4; methodisch vgl. [67, 71]).

Es fehlt weiterhin ein Ansatz, der eine Enterprise-Architektur für klassische ÖPNV-Unternehmen mit Komponenten bedarfsorientierter Mobilitätsdienste (NMS (DRT), MaaS) vereint. Diese Leerstelle betrifft sowohl die strategische als auch die fachliche und technische Ebene einer solchen Architektur. Die Erstanalyse (Kapitel 4.3) zeigt, dass vorhandene wissenschaftliche Publikationen überwiegend Teilphänomene behandeln – etwa Plattformstrukturen, Mobilitätsservices, Resilienz- oder Datenarchitekturen –, ohne diese in ein konsistentes architekturtheoretisches Rahmenwerk einzubetten.

Die replizierte Analyse (Kapitel 4.4) stärkt und präzisiert die drei bereits in der Erstanalyse erkannten Befunde:

1. im Forschungsfeld mangelt es an EA-basierten Integrationsmodellen;
2. Branchenreferenzen wie ITVU eignen sich nur begrenzt zur Abbildung hybrider und bedarfsorientierter Angebotsformen;
3. Governance-, Daten- und Organisationsschnittstellen spielen eine zentralere Rolle als rein technologische Aspekte.

Neue Publikationen aus dem Zeitraum 2023 bis 2025 stützen diese Befunde. Lediglich Würtz & Sandkuhl [51] erweitern die Evidenzbasis substantiell, indem sie Capabilities und Integrationsmuster als entscheidungsrelevante Architekturdimensionen genauer ausarbeiten.

Die ergänzende Analyse weiterer Literaturdatenbanken (Kapitel 4.5) bestätigt die Ergebnisse der Scopus-Recherche und untermauert die Vollständigkeit der ursprünglichen Evidenzbasis. Keiner der zusätzlich geprüften Beiträge verändert die theoretischen Schlussfolgerungen der systematischen Analyse oder ergänzt diese um bislang übersehene konzeptionelle Bausteine.

Damit liegt ein methodisch abgesichertes Forschungsbild vor; die Grenzen der Evidenzbasis und der ergänzenden Recherchen werden als Limitationen transparent ausgewiesen [67, 71]. Die vorliegende Dissertation adressiert die identifizierte Forschungslücke, indem sie ein entsprechendes Artefakt (REA) entwickelt und evaluiert. Die Literaturanalyse liefert dazu eine fundierte inhaltliche Grundlage.

5 Relevanz und Problemanalyse

Nachdem Kapitel 4 den Forschungsstand durch eine strukturierte Literaturanalyse beleuchtet hat, untersucht dieses Kapitel die Relevanz des Forschungsvorhabens sowie das zugrunde liegende Problem näher.

5.1 Einleitung zur Relevanz

Die Einbindung bedarfsorientierter Verkehrslösungen, bekannt als New Mobility Services (NMS), in den klassischen ÖPNV ist ein zentrales Anliegen der aktuellen Mobilitätsforschung [168, S. 2–4]. Angesichts des fortschreitenden urbanen Wachstums, veränderter Mobilitätsbedürfnisse und des steigenden Drucks durch ökologische sowie ökonomische Herausforderungen gewinnt dieses Thema zunehmend an Bedeutung [169, S. 1–3]; [4, S. 3294–3295].

Traditionelle ÖPNV-Unternehmen stehen vor der Aufgabe, flexible, digitale und bedarfsorientierte Mobilitätslösungen zu integrieren, um den Ansprüchen einer vernetzten und umweltbewussten Gesellschaft gerecht zu werden [4, S. 1–3]. Der verstärkte Einsatz von NMS wie Carsharing, Ridepooling oder On-Demand-Bussen eröffnet neue Möglichkeiten der Verkehrsgestaltung. Gleichzeitig verändert er nicht nur das Nutzungsverhalten der Fahrgäste, sondern stellt auch hohe betriebswirtschaftliche und technologische Anforderungen an die bestehenden Strukturen klassischer ÖPNV-Betreiber [170, S. 115ff.]; [171, S. 10–15].

Die Integration von NMS wird durch mehrere Faktoren vorangetrieben: die steigende Nachfrage nach flexiblen Mobilitätsangeboten, den technologischen Fortschritt bei digitalen Mobilitätsplattformen und die Notwendigkeit, ökologische Nachhaltigkeit mit wirtschaftlicher Effizienz zu verbinden [169, S. 1–3]; [171, S. 5–7]. Dies erfordert nicht nur technologische Anpassungen, sondern auch tiefgreifende Veränderungen in Organisationen und Prozessen [172, S. 10–12].

Diese Analyse rückt die genannten Probleme bzw. Herausforderungen in den Fokus. Ziel dieses Kapitels ist es, die Relevanz der Integration neuer Mobilitätsdienste in traditionelle ÖPNV-Systeme aufzuzeigen. Technologische, ökonomische und ökologische Aspekte werden betrachtet, um darzustellen, warum der klassische ÖPNV an seine Grenzen stößt und wie NMS-Lösungen bieten können [170, S. 119–126].

5.2 Herausforderungen des klassischen ÖPNV

Der klassische ÖPNV steht vor großen Herausforderungen, die eine tiefgreifende Transformation nötig machen. Diese betreffen Infrastruktur sowie wirtschaftliche und ökologische Aspekte.

5.2.1 Kapazitäts- und Infrastrukturengpässe

Steigende Bevölkerungszahlen und Mobilitätsbedürfnisse setzen städtische ÖPNV-Systeme unter Druck. Verkehrsüberlastungen, veraltete Infrastruktur und eine unzureichende Vernetzung mit alternativen Mobilitätsformen behindern eine effiziente Beförderung; die letzten beiden Aspekte betreffen nicht nur Metropolregionen [173, S. 5–12].

Klassische ÖPNV-Systeme mit festgelegten Routen und Fahrplänen können kurzfristige oder spezielle Mobilitätswünsche kaum erfüllen [174, S. 15–17]. Die fehlende Flexibilität führt dazu, dass viele Nutzer unzufrieden sind [174, S. 18–20]. Starre Fahrpläne und Linien führen oft zu Ineffizienz: Während der Spitzenzeiten sind die Fahrzeuge überlastet, außerhalb davon fahren viele fast leer [175, S. 13–15].

Diese ungleichmäßige Nutzung verschärft die bestehende Kapazitätsproblematik, weil sich die Fahrzeugverfügbarkeit kaum optimieren lässt. Gleichzeitig ist der notwendige Ausbau der Infrastruktur teuer und dauert aufgrund langer Planungs- sowie Bauzeiten lange [176, S. 1–3], was eine schnelle Anpassung an die steigende Nachfrage erschwert. In Ballungszentren fehlen daher häufig flexible Lösungen, um auf veränderte Mobilitätsanforderungen zu reagieren. Ein bi-modales System, das Linienverkehr mit Ride-Pooling-Shuttles verbindet, könnte eine nachhaltige und flexible Alternative sein [177, S. 2–4]. Das größte ÖPNV-Unternehmen in Deutschland, die DB-Regio³² [178]; [179], hat das erkannt und setzt dabei zentral auf:

- vernetzte Mobilitätsketten, z.B. eine Kombination aus Zügen, Bussen, On-Demand-Shuttles und Mietfahrzeugen [180],
- eine stärkere Integration von Mobilitätsanbietern (durch NMS und MaaS), was zwar Zusatzkosten für Fahrgäste bedeuten könnte, aber langfristig die Anzahl der Autos in den Ballungsräumen reduzieren könnte [181]; [132]; [182]: Medienbeiträge werden hier ausschließlich als Illustration aktueller Diskurse genutzt und nicht als empirischer Wirkungsnachweis.)

5.2.2 Ökonomische und ökologische Restriktionen

Klassische ÖPNV-Unternehmen stehen nicht nur vor infrastrukturellen Herausforderungen, sondern auch unter wachsendem wirtschaftlichen und ökologischen Druck [183, S. 12–18]. Steigende Betriebskosten, sinkende Fahrgastzahlen in bestimmten Segmenten und die Konkurrenz durch private Mobilitätsanbieter wie Fahrdienste, Car- und Bikeshaaring verschärfen die Lage [4, S. 329–335]. Die starren Strukturen des klassischen ÖPNV führen oft dazu, dass die erzielten Einnahmen die Betriebs- und Wartungskosten nicht decken, was die wirtschaftliche Stabilität vieler Verkehrsbetriebe gefährdet [6, S. 104–109].

³² Die DB Regio AG ist als Teil der Deutschen Bahn AG im gesamten deutschen Bundesgebiet für den regionalen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zuständig. Sie gliedert sich in die Bereiche DB Regio Schiene und DB Regio Straße.

Gleichzeitig fordern Gesellschaft und Politik verstärkt nachhaltige und emissionsarme Verkehrslösungen [4, S. 3298–3300]. Der Klimawandel und die Notwendigkeit, CO₂-Emissionen zu senken, erhöhen den Handlungsdruck auf den öffentlichen Sektor [7, S. 1012–1015]. In Deutschland verpflichten gesetzliche Vorgaben die Verkehrsbetriebe, aktiv zur Umweltentlastung beizutragen [3, S. 9–12]. Dies erfordert nicht nur technologische Anpassungen, sondern auch eine wirtschaftliche Neuausrichtung, um ökologische und betriebswirtschaftliche Ziele in Einklang zu bringen [6, S. 105–109].

Die Integration von NMS könnte hier Abhilfe schaffen [4, S. 3294–3303]. Flexible, bedarfsorientierte Mobilitätsangebote, kombiniert mit klassischem ÖPNV, können Kosten senken, neue Einnahmequellen erschließen [7]; [6, S. 104–116] und den ökologischen Fußabdruck der Verkehrsunternehmen deutlich verringern [4, S. 3294–3303].

5.3 Probleme bei der Integration neuer Mobilitätsdienste

Neue Mobilitätsdienste in klassische ÖPNV-Strukturen einzubinden, stellt eine große Herausforderung dar. Dabei gilt es, sowohl technologische Hürden als auch organisatorische und prozessuale Barrieren zu überwinden, die im Folgenden näher beleuchtet werden.

5.3.1 Technologische Hürden

Die Integration neuer Mobilitätsdienste in den klassischen ÖPNV stellt eine erhebliche technologische Herausforderung dar [184, S. 234–240]; [185, S. 57–63]; [186]. Viele ÖPNV-Unternehmen arbeiten mit IT-Systemen, die auf traditionelle Betriebsmodelle ausgelegt sind und zeitgemäße, datengetriebene Mobilitätslösungen nicht unterstützen [184, S. 234–240]; [185, S. 57–63]. Dies führt zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Einbindung flexibler Plattformen. Deren Integration erfordert daher hohe Investitionen in die IT-Infrastruktur [184, S. 234–240]; [185, S. 57–63].

Ein zentrales Problem ist die fehlende Interoperabilität zwischen den Systemen der ÖPNV-Unternehmen und den Plattformen von Ridepooling- und Carsharing-Anbietern [187, S. 12–15]; [188, S. 25–30]. Die mangelnde Standardisierung der Schnittstellen behindert den Datenaustausch und die Kommunikation zwischen den Systemen, was eine reibungslose Integration erschwert [189, S. 40–45]. Um dies zu lösen, sind folgende Maßnahmen notwendig [142, S. 32–37]:

1. Echtzeit-Datenverarbeitung für eine präzise Steuerung und Koordination der Verkehrsmittel sowie eine dynamische Routenplanung [190, S. 1ff.],
2. Harmonisierung der Ticketing-Systeme, um ein nahtloses und benutzerfreundliches Mobilitätserlebnis zu schaffen [191].

Veraltete IT-Infrastrukturen in vielen ÖPNV-Unternehmen erschweren zudem die Einführung zeitgemäßer Technologien wie Echtzeitdatenverarbeitung und serviceorientierte Architekturen (SOA) [184, S. 234–240]. Der Übergang zu flexiblen, skalierbaren IT-Strukturen ist für die Integration von NMS unverzichtbar. Eine serviceorientierte Archi-

tektur könnte eine modulare, interoperable Basis schaffen, die eine sichere und effiziente Kommunikation zwischen Mobilitätsplattformen ermöglicht, ohne bestehende Systeme zu destabilisieren [192].

5.3.2 Betriebliche Herausforderungen

Neben den in Abschnitt 5.3.1 diskutierten technologischen Hürden zeigen sich bei der Integration von NMS (DRT) in den ÖPNV Herausforderungen bei der täglichen Leistungserbringung, vor allem Konsistenz-, Änderungs-, Abrechnungs- und Governance-Probleme. Diese sind architekturelevant, weil sie typischerweise domänenübergreifend wirken (Planung – Betrieb – Vertrieb – Abrechnung) und mehrere Akteure betreffen (ÖPNV, Verbund, Plattformen, NMS-Provider, Zahlungsdienstleister). Daher sind sie nicht nachhaltig durch punktuelle Einzelmaßnahmen in isolierten Systemen beherrschbar. Im Folgenden werden fünf zentrale Problemfelder im Kontext der betrieblichen Praxis konkretisiert. Aus den genannten Punkten werden Anforderungen abgeleitet, die zur Konsistenz des Referenz-Zielbildes beitragen.

i. Tarif-/Produktänderungen und Multi-Channel-Rollout

Tarif- und Produktänderungen sind im Betrieb von ÖPNV-Systemen keine rein fachliche Anpassung, sondern Release-Ereignisse, die zeitkritisch, versioniert und konsistent über alle Vertriebskanäle und Endgeräte hinweg wirksam werden müssen. In den Smart-Ticketing-Guidelines der EU-Urban-ITS-Expertengruppe wird dies explizit als Anforderung an Distribution Channels formuliert: Smart Ticketing soll Reisenden die Planung und Buchung über den jeweils bevorzugten Vertriebskanal ermöglichen und erfordert damit eine kanalübergreifende, konsistente End-to-End-Abwicklung [193, S. 2].

Betrieblich verschärft sich die Problemlage durch kanal- bzw. gerätespezifische Teillösungen. Der UITP-Bericht beschreibt etwa „Online remote loading“ als wartungsintensiv, weil spezifische Versionen je Betriebssystem/Browser vorzuhalten und häufige Upgrades durchzuführen sind [194, S. 9]. Gleichzeitig wird in der Literatur als zentraler betrieblicher Vorteil von Account-/ID-basiertem Ticketing hervorgehoben, dass Geschäftsregeln (u.a. Tarife) im Backoffice angewandt werden. Dadurch erhöht sich die Flexibilität von Tarifstrukturen, während die Fahrkarte bzw. das Medium primär als Identifier oder Token dienen [195, S. 9].

Für die betriebliche Begründung einer einheitlichen Referenzarchitektur folgt daraus: Ohne eine zentrale Datenquelle für Tarif-/Produktregeln, klar definierte Mechanismen für Versionierung, Rollout und Rollback sowie eine verbindliche Verteil- und Testlogik über alle Vertriebskanäle steigt das Risiko von Inkonsistenzen (z.B. unterschiedliche Preis-/Produktstände), Erlösabweichungen und Revisionsproblemen.

ii. End-to-End-Orchestrierung: Reservierung ≠ Buchung

Mit NMS (DRT) wird Vertrieb häufig zweistufig: Reservierung (unverbindliche Vormerkung) und Buchung (verbindlicher Vertrag inkl. Zahlungs-/Abrechnungskonsequenzen) müssen betrieblich getrennt werden, weil sie unterschiedliche Zustandsübergänge, Fris-

ten und Fehlerfälle erzeugen (z.B. Ablauf/No-Show/Storno, Kapazitätsfreigabe, doppelte Buchungseignisse). In MaaS-Kontexten wird Ticketing zunehmend als „Gateway/Access to mobility“ beschrieben, und nach einer Buchung erhält der Nutzer häufig ein „right to access“, das als Token oder Identifier in account-basierten Architekturen verarbeitet wird [196, S. 12].

Damit entsteht ein operatives Erfordernis nach klarer Zustands- und Ereignislogik über Kanäle und Partner hinweg. Die UITP-Darstellung der MaaS-Rollen (MaaS Operator, MaaS Integrator, MSP) zeigt zugleich, dass Buchung und Zahlung – und damit die buchungswirksame Kette – nicht zwingend beim ÖPNV-Unternehmen liegen, sondern je nach Kooperationsmodell verteilt werden [196, S. 6].

Eine Referenzarchitektur muss daher die Trennung von Reservierung und Buchung nicht nur funktional, sondern als Governance- und Verantwortlichkeitsproblem modellieren: Wer darf reservieren, wer bucht, wer trägt Haftung oder Serviceverpflichtung, und welches System ist „System of Record“ für die jeweiligen Zustände?

iii. Payment, Clearing, Revenue-Share und Reconciliation

Sobald mehrere Akteure an einer Reisekette beteiligt sind, wird Abrechnung zu einem wiederkehrenden Betriebsprozess: Settlement-Zyklen, Revenue-Sharing-Regeln, Prüfpfade und Reconciliation-Mechanismen sind notwendig, um Erlöse und Leistungen nachvollziehbar zuzuordnen. Die FTA-Studie zur Mobility Payment Integration benennt „Payment Settlement and Revenue Reconciliation“ als zentrales Themenfeld und zugleich Datensicherheit und -schutz während der Zahlungsabwicklung als große Herausforderung [197, S. 6].

Dieselbe Quelle konkretisiert die Anforderung an multimodale Anbieter, vorab zweckmäßige Revenue-Sharing-Vereinbarungen zu treffen (u.a. Aufteilungsregeln, Settlement-Taktung) [197, S. 72]. Die betriebliche Konsequenz ist, dass Clearing nicht auf eine Schnittstelle reduziert werden kann, sondern eine End-to-End-Kette aus Datenobjekten (Leistungs-/Nutzungsnachweis, Buchungs-/Zahlungsstatus, Settlement-Lines), Rollen (Abrechnung/Prüfung) und Governance (Regeln, Streitfälle, Audit) bildet. Eine einheitliche Referenzarchitektur begründet hierfür wiederverwendbare Muster (Daten-/Event-Kontrakte, Prüfschritte, Zuständigkeiten), wodurch Integrations- und Abstimmungsaufwand über Partnergrenzen hinweg reduziert und Auditierbarkeit erhöht wird.

iv. Betrieb von Echtzeit- und Partnerketten: Monitoring, Incident, SLA

Mit steigender NMS-Integration verschiebt sich die operative Perspektive vom reinen Fahrbetrieb hin zu einem Servicebetrieb: Echtzeitketten (Status, ETA, Störungen, Kapazitäten) müssen überwacht, Incidents koordiniert und SLAs über Organisationsgrenzen hinweg eingehalten werden. Multi-Vendor-Konstellationen verschärfen die Koordinationslast. Der SUMC-Leitfaden beschreibt am Fall Hop Fastpass, dass eine Open-architecture-Beschaffung zu getrennten Lieferanten für zentrale Funktionsblöcke (TVM, Web/Mobile, Accessibility, Backend-Platform-Manager) führte; die parallele Entwicklung von Frontend und noch nicht fertigem Backend erzeugte Bottlenecks, was Integrationsrisiken verdeutlicht [198, S. 15].

Auf MaaS-Ebene wird zudem hervorgehoben, dass MaaS-Operatoren Zahlungsabwicklung und Gebührenverteilung (Compensation Engine) übernehmen können [196, S. 6]. Daraus folgt betrieblich: Monitoring-, Logging- und SLA-Messpunkte müssen so entworfen sein, dass sie auch in Partnerketten nachweisbar funktionieren (inkl. Eskalationspfade und Verantwortlichkeitszuordnung). Eine Referenzarchitektur liefert hierfür konsistente Integrationsanker (API-/Event-Kontrakte, Observability-Bausteine, Incident-Schnittstellen) und verhindert, dass Betriebssicherheit nachträglich durch Ad-hoc-Integrationen untergraben wird.

v. Datenqualität, Datenhoheit und Compliance im operativen Betrieb

Datenqualität und Datenhoheit wirken im Betrieb unmittelbar auf Kundenerlebnis und Erlössicherung: verspätete oder inkonsistente Daten führen zu fehlerhaften Angeboten, inkonsistenter Auskunft, fehlerhaften Abrechnungen und erhöhtem Supportaufwand. Die Mobility Payment Integration-Studie beschreibt Daten-Sharing-Vereinbarungen und Privacy-Agreements als zentrale Governance-Bausteine. Sie diskutiert dabei explizit, dass private Anbieter (z.B. TNCs) häufig nicht bereit sind, granularen Trip-Datenzugang zu gewähren; dadurch entstehen Aushandlungs- und Aggregationsprobleme [197, S. 62–64].

Ergänzend betont die UITP im Kontext von MaaS-Konzepten, dass (i) monetäre Flüsse zu sichern sind und (ii) die gemeinsame Datennutzung auf einer „agreed and transparent basis“ erfolgen muss. Zugleich wird empfohlen, personenbezogene Daten zu anonymisieren bzw. aggregieren [197, S. 21]. Eine Referenzarchitektur muss daher Daten- und Compliance-Anforderungen als Querschnittsfähigkeit modellieren: System-of-Record-Regeln, Zugriffsrechte, Nutzungszwecke, Lösch-/Aufbewahrung, Audit-Trails sowie Qualitätsschwellen (Aktualität/Vollständigkeit/Genauigkeit) – und dies konsistent über die Domänen hinweg.

vi. KRITIS/OT–IT-Segmentierung als betriebliche Randbedingung

KRITIS-Randbedingungen und die OT/IT-Segmentierung sind nicht nur Sicherheitsprinzipien, sondern laufende Betriebsrealität: Partnerzugriffe, Änderungen und Integrationspfade müssen zonenkonform umgesetzt, geprüft und auditiert werden. NIST beschreibt im „Guide to Industrial Control Systems Security“ die Notwendigkeit, zwischen Corporate- und Control-Netzen zu segmentieren und empfiehlt ausdrücklich DMZ-Architekturen (Firewall with DMZ), um direkte Kommunikationspfade zu vermeiden; mit gut geplanten Rulesets kann damit „little or no traffic“ direkt zwischen Corporate und Control Network passieren [199, S. 5–11]. Zudem wird zusammenfassend hervorgehoben, dass „most secure, manageable, and scalable“ Architekturen typischerweise mindestens drei Zonen inkl. einer oder mehrerer DMZs umfassen [199, S. 5–13].

Für den ÖPNV-Betrieb bedeutet dies: OT-nahe Systeme (z.B. Leitstelle/ITCS und Fahrzeug-/OBU-Komponenten) müssen gegenüber IT-Domänen und Partner-Ökosystemen gekapselt werden; Integrationsübergänge sind kontrolliert (DMZ) zu führen und über Monitoring/Logging auditierbar zu machen. Eine Referenzarchitektur schafft hier die kon-

sistente Grundlage, um Sicherheits- und Betriebsanforderungen frühzeitig im Lösungsentwurf zu verankern und nicht erst nachträglich als Betriebshemmnis zu adressieren.

Die in diesem Kapitel beschriebenen betrieblichen Herausforderungen begründen zusammen die Notwendigkeit eines einheitlichen, variantenfähigen Referenz-Zielbildes: Nur wenn Prozesse, Datenobjekte, Schnittstellenkontrakte, Verantwortlichkeiten und Zonenlogik konsistent zusammengeführt werden, lassen sich Multi-Channel-Updates, Reservierungs-/Buchungsorchestrierung, Clearing/Reconciliation sowie Echtzeit- und Partnerketten unter Compliance- und KRITIS-Randbedingungen robust betreiben.

5.3.3 Organisatorische und prozessuale Barrieren

Neben den technologischen Hürden behindern auch starre Strukturen und Prozesse die Integration von NMS in den klassischen ÖPNV [200, S. 12–17]. Viele Verkehrsbetriebe arbeiten mit historisch gewachsenen, hierarchischen Organisationsstrukturen, die stark reguliert sind und sich nur schwer an die Agilität und Flexibilität neuer Mobilitätslösungen anpassen lassen [200, S. 18–22]. Diese Strukturen erschweren die Einführung dynamischer Betriebsmodelle und flexibler Angebote, die für eine erfolgreiche Integration von NMS notwendig sind [169, S. 3]; [4, S. 3295–3296].

Hinzu kommen regulatorische Unsicherheiten. Oft fehlen klare rechtliche Rahmenbedingungen für die Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Verkehrsbetrieben und privatwirtschaftlichen Mobilitätsanbietern, was innovative Lösungen verzögert [200, S. 12–17]; [201, S. 45–50]. Um diese Hürden zu überwinden, müssen Entscheidungsstrukturen und Genehmigungsprozessen schneller und flexibler werden [202, S. 5–9]; [203, S. 60–65].

Die Integration von NMS erfordert zudem eine Neuausrichtung der Geschäftsmodelle und eine veränderte Rolle des ÖPNV im Mobilitätsökosystem [204, S. 110–113]. Verkehrsbetriebe müssen sich als Plattformen und Koordinatoren verschiedener Mobilitätsdienste verstehen statt nur als Anbieter von Transportlösungen [169, S. 3–4]; [10, S. 5–7]. Dieser Paradigmenwechsel verlangt eine strategische Neuausrichtung und Kooperationen mit externen Mobilitätsanbietern, um multimodale Angebote effizient zu orchestrieren [205, S. 1–2]; [10, S. 5–7].

5.4 Anwendungsrelevanz: Bedeutung von NMS

5.4.1 Bedarfsgesteuerter Verkehr und Stadtentwicklung

Die Integration bedarfsorientierter Mobilitätsdienste in den ÖPNV kann einen erheblichen Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung leisten [206, S. 137]. Durch optimierte Verkehrsflüsse und die Verknüpfung mit bestehender Infrastruktur lassen sich Staus reduzieren [133, S. 6, 17–19], Emissionen senken [207, S. 9] und die Lebensqualität in Städten, aber ebenso im ländlichen Raum steigern [134, S. 5–7, 18]; [208, S. 4–6].

Ein Vorteil von NMS liegt in ihrer Flexibilität und Skalierbarkeit. Sie ermöglichen es, Mobilitätsangebote gezielt in unterversorgte Gebiete auszuweiten oder in Spitzenzeiten zu-

sätzliche Kapazitäten bereitzustellen [209, S. 339–344]. Besonders in dicht besiedelten urbanen Räumen ergänzen Car-, Ride- und Bikesharing-Dienste die klassische Verkehrsplanung effektiv [210, S. 2, 10]. Diese Dienste reduzieren den Autoverkehr sowie die Zahl geparkter Autos. Zugleich fördern sie multimodale Konzepte, die verschiedene Verkehrsträger effizient verknüpfen [211, S. 11].

Damit spielt die Integration von NMS auch eine zentrale Rolle bei der Neugestaltung städtischer Räume. Weniger private Pkw und weniger Parkflächen bedeuten mehr Raum für Fußgänger, Radfahrer oder Grünflächen [135, S. 7]. MaaS-Plattformen bilden dabei einen entscheidenden Baustein. Sie bündeln die verfügbaren Mobilitätsangebote auf einer zentralen Schnittstelle, wodurch der Zugang für Bürger vereinfacht und die Nutzung nachhaltiger Verkehrsmittel gefördert wird [185, S. 58–59].

5.4.2 Nutzungsverhalten und Kundenanforderungen

Das veränderte Verhalten der Nutzer und die steigenden Ansprüche an Mobilität machen die Integration von NMS unverzichtbar [201, S. 23]. Kunden erwarten heute flexible, bequeme und nachhaltige Lösungen, die über starre Fahrpläne und feste Routen hinausgehen [212, S. 2]. Klassische ÖPNV-Systeme erfüllen diese Erwartungen oft nur unzureichend, was die Notwendigkeit neuer, individueller Angebote bzw. Transportoptionen unterstreicht [201, S. 23].

Zeitgemäße Mobilitätslösungen müssen multimodale und digitale Angebote bereitstellen, die verschiedene Verkehrsmittel kombinieren und eine nahtlose Nutzung ermöglichen [10, S. 3]. Nutzer schätzen intuitive Buchungssysteme, Echtzeit-Informationen und eine hohe Verfügbarkeit der Dienste [184, S. 236]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen ÖPNV-Unternehmen ihre Serviceangebote erweitern und digitale Plattformen entwickeln, die klassischen ÖPNV und flexible Mobilitätsdienste integrieren [185, S. 58].

Untersuchungen zeigen, dass Kunden, die NMS nutzen, zufriedener sind und multimodalen Angeboten treu bleiben [213, S. 7]. Das verdeutlicht: Eine erfolgreiche Integration von NMS verbessert nicht nur die Servicequalität, sondern stärkt langfristig die Kundenbindung und Attraktivität des ÖPNV [175, S. 14].

5.5 Fallbeispiel BVG: On-Demand-Ridepooling „BerlKönig“

In den bisherigen Abschnitten von Kapitel 5 wurde die Problemstellung des ÖPNV auf einer allgemeinen Ebene behandelt. Um den betrieblichen Bezug zu konkretisieren, wird im Folgenden das On-Demand-Ridepooling-Angebot BerlKönig der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) als Fallbeispiel herangezogen.

Der BerlKönig startete 2018 als gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsprojekt von BVG und Via/ViaVan betrieben. Das appbasierte Ridepooling-System nutzt Algorithmen, um Fahrtwünsche zu bündeln, die räumlich und zeitlich zusammenpassen. Fahrgäste buchen ihre Fahrten flexibel per Smartphone [49]. In der innenstädtischen Variante Berl-

König A ergänzte der Dienst das Liniennetz in der Tarifzone A, bevor das Projekt 2022 nach vier Jahren Laufzeit planmäßig endete [214].

5.5.1 Betriebliche Ausgangslage und Integrationsproblem

Ridepooling-Dienste wie der BerlKönig bieten eine hohe zeitliche und räumliche Flexibilität, Echtzeit-Disposition und die Bündelung von Fahrtwünschen über Matching-Algorithmen aus. Sie gelten als digitale, bedarfsorientierte Ergänzung zu klassischen, angebotsorientierten Linienverkehren [215, S. 13–18]. Eine Bestandsaufnahme zu On-Demand-Ridepooling in Deutschland zeigt, dass die meisten Dienste heute explizit in den ÖPNV integriert sind. Die Integration erfolgt vor allem entlang der Dimensionen Tarif, Vertrieb, Information und organisatorische Einbettung [216].

Für die BVG stellte sich vor der Einführung des BerlKönigs das Problem:

Wie tief soll und kann ein neues, digital gesteuertes On-Demand-Angebot wie der BerlKönig in bestehende Strukturen integriert werden – insbesondere in Bezug auf Tarif- und Ticketintegration, Vertriebskanäle, Daten- und Erlösflüsse sowie die IT-Architektur?

Die Fallstudie von Würtz et al. [49] (eine Vorarbeit zu dieser Dissertation) zur Integration des BerlKönigs in die EA der BVG zeigt, dass der Partner ViaVan als Subdienstleister wesentliche operative Funktionen (z.B. Disposition, Fahrtenabwicklung, Teile des Vertriebs) erbrachte. Die IT-Systeme des BerlKönigs waren nur rudimentär an das auf dem ITVU-Branchenmodell aufbauende IT-System der BVG angebunden [49]. Die begrenzte Integrationstiefe betrifft alle zentralen Bereiche:

- Tariflich und vertrieblich war der BerlKönig ein eigenständiges Produkt mit eigener App und Buchungslogik, unabhängig von klassischen BVG-Tickets.
- Organisatorisch ist der Dienst stark von einem externen Partner abhängig.
- Technik: Daten- und Prozessketten, etwa in der Erlöszuordnung oder beim Reporting, waren nur punktuell harmonisiert.

Die BVG stand somit nicht nur vor der generellen Herausforderung der Integration neuer Mobilitätsformen in den ÖPNV, sondern vor einem konkreten Design-Problem, das die Integrationstiefe betrifft:

Welche Ereignisse, Ressourcen und Akteure sollen in welcher Granularität mit bestehenden Ticket- und Vertriebssystemen verknüpft werden, um den BerlKönig als Teil des BVG-Angebots zu modellieren – und wo bleibt er bewusst eigenständig?

5.5.2 Resource-Event-Agent-Modell als Lösungsansatz

Das Resource-Event-Agent-Modell nach Geerts und McCarthy [217] bietet einen ontologischen Rahmen, um wirtschaftliche Phänomene entlang der Kategorien Ressourcen, Ereignisse und Agenten zu modellieren [218]. Es dient sowohl als allgemeines Rech-

nungslegungsmodell als auch als Enterprise-Ontologie für integrierte Informationssysteme [219, S. 554–578].

Überträgt man diesen Ansatz auf den BerlKönig, lassen sich zentrale Elemente wie folgt strukturieren:

Ressourcen

- Fahrzeugkapazität (Sitzplätze in den Ridepooling-Fahrzeugen)
- Fahrerzeit bzw. operative Leistungskapazität
- Fahrberechtigungen/Tarifprodukte (z.B. BerlKönig-Fahrten, Kombinationen mit BVG-Tickets)
- Geld- und Forderungspositionen (Erlöse durch Fahrgäste, Vergütungen an ViaVan, Fördermittel)

Ereignisse

- Buchung (Anfrage und Bestätigung einer Fahrt)
- Disposition (automatisches Pooling und Routenbildung)
- Transport (tatsächliche Beförderung des Fahrgasts)
- Zahlung (Kauf bzw. Belastung in einer App, ggf. Storno/Erstattung)
- Abrechnung und Erlösverteilung zwischen BVG, ViaVan und ggf. Fördergebern

Agenten

- Fahrgäste als Leistungsempfänger
- BVG als öffentlicher Leistungserbringer und Systemverantwortlicher
- Via/ViaVan als operativer Partner und Plattformbetreiber
- Ggf. weitere Agenten wie Taxiunternehmen, Zahlungsdienstleister oder öffentliche Fördergeber

Die Modellierung zeigt, welche Ereignisse (z.B. Buchung, Fahrt, Zahlung) welche Ressourcen verbrauchen oder erzeugen (z.B. Fahrberechtigung, Erlöse, Kapazität) und welche Agenten daran beteiligt sind. So lässt sich die Integrationstiefe des BerlKönigs in die Strukturen der BVG systematisch gestalten:

- Auf fachlicher Ebene erlaubt das Modell, die Kopplung zwischen klassischem ÖPNV-Ticketing und BerlKönig-Fahrten präzise abzubilden. Beide werden als Teil desselben Wertschöpfungsnetzwerks modelliert, etwa durch die gemeinsame Ressource „Fahrberechtigung“ mit unterschiedlichen Ausprägungen.
- Auf IT-/Architekturebene dient das Modell als konzeptionelle Zwischenschicht, um Schnittstellen zwischen BVG-Systemen (z.B. Vertrieb, Abrechnung) und den von ViaVan bereitgestellten Systemen konsistent zu definieren und zu standardisieren. Dies unterstützt Ansätze, Ticketing- und ÖPNV-Daten auf Basis domänenspezifischer Ontologien zu harmonisieren [150].

- Auf steuerungs- und controllingbezogener Ebene erleichtert das Modell die Nachvollziehbarkeit von Erlös- und Leistungsflüssen zwischen BVG und Partnern: Jeder wirtschaftliche Austausch wird durch Dualitätsbeziehungen zwischen Leistungsergebnissen (Transport) und Gegenleistungsereignissen (Zahlung, Erlösverteilung) beschrieben [218, S. 554–578].

Die Fallstudie beantwortet damit die eingangs gestellte Problem nach der Integrationstiefe:

Die BVG muss langfristig ein digitales plattformbasiertes On-Demand-System mit eigenständiger IT- und Betreiberstruktur in eine historisch gewachsene, linien- und fahrplanorientierte Unternehmensarchitektur integrieren. Diese Ontologie samt dem damit einhergehenden REA-Modell bietet einen systematischen Rahmen, um die Integrationstiefe entlang von Ressourcen, Ereignissen, Agenten transparent zu gestalten und sowohl fachlich als auch technisch konsistent in das Gesamtsystem BVG (bzw. ÖPNV) einzubetten.

5.6 Szenarien: Integration von NMS im ÖPNV

Um den Gestaltungs- und Evaluationsraum der angestrebten REA präzise zu fassen, unterscheiden wir 4 Integrationsszenarien. Diese decken die Spannweite zwischen rein externer Anbindung und vollständiger Eigenleistung systematisch ab und machen damit sowohl strategische als auch architekturelle Variationspunkte sichtbar. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass die Integration bedarfsorientierter Mobilität, also NMS, in klassischen, angebotsorientierten ÖPNV-Unternehmen geschäftlich hochrelevant ist. Da sie jedoch in der EA-Forschung bislang nur punktuell behandelt wird, besteht Bedarf an methodischer Orientierung und wiederverwendbaren Strukturmodellen. Unsere Szenarien knüpfen an den in der Domäne etablierten ITVU-Kern an, der als „Industrie-Referenz“ für Prozesse, Rollen und Systeme dient und um NMS-Funktionalität erweitert wird.

Szenario 1 (S1) (Nicht-Integration/Anbindung) beschreibt die lose Kopplung externer NMS über Schnittstellen bzw. MaaS-Plattformen ohne tiefgreifende organisatorische oder prozessuale Veränderungen im Verkehrsunternehmen.

Szenario 2 (S2) (White-Label-Kooperation) verankert NMS sichtbar im Marktauftritt des ÖPNV-Unternehmens, lässt die operative Plattform jedoch beim Partner; architekturseitig dominieren Frontend-Integration und standardisierte Datenaustauschbeziehungen.

Szenario 3 (S3) (Hybride Integration) stellt einen Broker- bzw. Koordinationsmodus dar, in dem das Verkehrsunternehmen Buchung/Reservierung, Tarif-/Produktgestaltung, Dispatch-Koordination und Governance übernimmt, während Teile der Durchführung (Fahrzeuge/Fahrpersonal) durch Partner erfolgen. Die daraus resultierenden Anforderungen betreffen insbesondere SLA-/Partner-Management, Revenue-Sharing und Daten-/API-Governance sowie die Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich) (Tr./Bu. → siehe Glossar) gemäß OJP-Logik (siehe Glossar).

Szenario 4 (S4) (Vollintegration) schließlich modelliert die vollständige interne Leistungserbringung einschließlich digitaler Plattform, Disposition und Flotte und bildet damit die maximal anspruchsvolle Zielausprägung; in unserer Arbeit dient diese als Basissicht, gegen die die niedrigeren Integrationsgrade als Delta-Varianten ausgeprägt werden.

Über alle Szenarien hinweg werden die strategischen Treiber (z.B. First/Last-Mile, Reduktion motorisierten Individualverkehrs, Stakeholder-/Kundenzufriedenheit) und die dafür notwendigen Capabilities (digitale Plattform, NMS-Management, Daten-/Sicherheitskompetenzen) konsistent auf Motivations-, Geschäfts- und Anwendungsebene gespiegelt. Die Szenarien S1–S4 bilden einen abgestuften Integrations- und Governance-Raum und fungieren damit als konzeptionelles Rückgrat für Anforderungsspezifikation, Variantenbildung und Evaluation des Artefakts im Sinne des Design-Science-Vorgehens; die anschließende Evaluation folgt einer FEDS-basierten Strategie (formativ, summativ, künstlich, naturalistisch), um die Nützlichkeit und Qualität der Szenarien-Ausprägungen empirisch abzusichern.

Die Kurzmatrix (Tabelle 10) verdichtet den Szenarienraum entlang von 6 Integrationsdimensionen (Strategie, Prozesse, Systeme/IT, Personal/Organisation, Daten, Recht/Regulatorik) und macht den Übergang von externer Kopplung (S1) über White-Label (S2) und hybride Koordination (S3) bis zur Vollintegration (S4) explizit. Sie fußt auf einer Erweiterung des ITVU-Kernmodells um bedarfsorientierte Dienste und fungiert als kompaktes Management-Artefakt, an das die Referenz-Enterprise-Architektur anknüpft. Szenarien werden als Variantenrahmen verstanden: S4 dient als Basissicht (End-to-End-Fähigkeit im Unternehmen), S1–S3 als Delta-Ausprägungen mit klaren Verantwortungsgrenzen (Owned/Shared/Partner); damit wird die Notwendigkeit einer NMS-Erweiterung für Prozesse, Rollen und Systeme begründet.

Architekturleitend differenziert die Matrix die Stufen; insbesondere S3 erfordert OJP-konform die Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich), eine Partner-/SLA-Steuerung mit Revenue-Sharing/Clearing sowie eine domänenbasierte Integrationsarchitektur mit Datendrehscheibe, wie z.B. eines durchgängigen Enterprise Service Bus (ESB) über sicherheitskritische Zonen (im Einklang mit VDV-Diskurs und KRITIS-Zonierung).

Methodisch schlägt Tabelle 10 die Brücke zu Kapitel 7 und 8: In Kapitel 7 werden die in der Kurzmatrix fixierten Verantwortlichkeiten je Dimension in ArchiMate operationalisiert (S4 als Referenzsicht, S3/S2/S1 als Overlay-Deltas). In Kapitel 8 fungieren Szenarien und Dimensionen als Evaluanden und Rahmenbedingungen im Sinne des FEDS-Ansatzes (formativ, summativ, künstlich, naturalistisch); hieran lassen sich Utility- und Qualitätskriterien (u.a. Interoperabilität, SLA-Erfüllung, Sicherheits-/Compliance-Nachweise, Genauigkeit der Einnahmenaufteilung, Anschlussqualität) präzise operationalisieren und episodisch prüfen.

Die in diesem Rahmen abgeleiteten Szenarien werden in der zweiten Evaluationsphase (Phase II) in den Evaluationsepisoden VIII und IX (Kapitel 8.2.8 und 8.2.9) empirisch aufgegriffen und vertieft geprüft.

Tabelle 10: Kurzmatrix: Szenario und Integrationsdimensionen

	S1	S2	S3	S4
Strategie	Portfolio-Erweiterung via externer NMS/ MaaS; Pipeline bleibt Kern; geringe Investitionen.	Markenführung beim ÖPNV, Plattform extern; Fokus auf Reichweite/UX; Pipeline mit Plattform-Branding.	Broker-/Plattformfähigkeit als Kern-Capability; Make-or-buy; Last-Mile/Netzergrünung; Pipeline und Plattform koexistent.	Mobilitätsdienstleister End-to-End; NMS als Kernbestandteil; maximale Steuerung/Skalierbarkeit.
Prozesse	Interne Kernprozesse unverändert; NMS-Nutzung via externe App; nur Schnittstellenprozesse.	Kundenschnittstelle (Support/Vertrieb) intern; Durchführung extern; Basis-SLAs; einfache Rückkopplung.	Reservierung (unverbindlich) vs. Buchung (verbindlich) trennen; internes Pricing/Koordination; Dispatch und Durchführung: Shared/Partner; Revenue-Sharing/Clearing.	End-to-End intern: Planung-Buchung-Dispatch-Durchführung-Abrechnung; dynamische On-Demand-Prozesse integriert.
Systeme/IT	Leichte API-Anbindung (MaaS/Partner); kein internes Dispatch; ITCS/RBL unberührt.	White-Label-Frontend (Brand/SSO); Backend extern; Standard-APIs/OJP-Antworten.	Eigene Mobilitäts-/Buchungsplattform, Dispatch-Cockpit; API-Gateway und Datendrehscheibe/Data-Pool; keine ESB-Durchkopplung über KRITIS-Zonen.	Vollständige Plattform (Buchung/Dispatch/OPS) integriert mit ITCS/RBL; Vertrieb (z.B. PTnova), Telematik/OBU; Data-Broker/Analytics.
Personal/Organisation	Kein neues Kern-Personal; ggf. Marketing/1st-Level-Support.	Kundendienst/Marketing intern; Partner-Management leicht.	NMS-Programmleitung, Partner-/SLA-Owner, Dispatcher, Daten/API-Governance; ggf. kleine Subflotte.	Alle Rollen intern: Dispatcher, Fahrer, Flotten-/Tarif-/Daten-/Security-Rollen; größerer Organisationsumbau.
Daten	Aggregat-/Nutzungsdaten minimal; Reporting via Partner.	Buchungs-/Kundendaten geteilt; Datenschutz/Verträge (DPA).	Echtzeit-Events (Position/Status), SLA-/Clearing-Daten; Harmonisierung; Data-Pool für Analytik/KPIs.	Vollständige Datenhoheit: Operativ und Analytik; starke PII-/Krypto-/Audit-Anforderungen.
Recht/Regulatorik und Betrieb	Betreiber-/Haftungsrisiken bei Partner; kaum zusätzliche Genehmigungen.	Co-Branding; geteilte Verantwortung; klare SLAs/DPA.	Geteilte Betreiberrollen (eigene Subflotte genehmigungspflichtig), SLA-/Haftungsteilung, Einnahmenaufteilung; FS-/Zugangs-Checks als neue Fähigkeit.	Volle Betreiberverantwortung (Genehmigung, Haftung, KRITIS/ISMS, DSGVO) für On-Demand-Dienst.

5.7 Fazit der Problemanalyse

Die Analyse zeigt, dass die Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen eine dringliche wie komplexe Aufgabe ist. Um den wachsenden Anforderungen an zeitgemäße, flexible und bedarfsorientierte Mobilität gerecht zu werden, sind sowohl technolo-

gische als auch organisatorische Anpassungen unvermeidlich: Die bestehenden Strukturen und Prozesse sind nicht geeignet, die Transformation erfolgreich zu bewältigen.

Eine nachhaltige, wirtschaftlich tragfähige und nutzerorientierte Mobilitätsstrategie erfordert die Entwicklung neuer Technologien. Gleichmaßen ist eine tiefgreifende Umstrukturierung der Geschäftsmodelle zwischen öffentlichen und privaten Anbietern essenziell, um Synergien zu nutzen und die Integration effizient zu gestalten. Eine REA kann dazu beitragen, diesen Transformationsprozess systematisch zu unterstützen.

Zusätzlich lässt sich aus der Problemanalyse und den in Kapitel 5.5 systematisierten Integrationsszenarien S1–S4 (von der losen Anbindung externer NMS bis zur vollständigen Eigenleistung) folgern, dass die Einbindung bedarfsorientierter Mobilität in angebotsorientierte ÖPNV-Strukturen konsistent entlang 6 Gestaltungsdimensionen zu entwerfen ist:

- Strategie (Markenführung, Plattform-/Broker-Fähigkeit, Make-or-Buy),
- Prozesse (einheitliche Kopplung an der Kundenschnittstelle mit klarer Trennung von unverbindlicher Reservierung und verbindlicher Buchung, Regeln für Pricing, Dispatch, Clearing/Einnahmenaufteilung),
- Systeme/IT (API-Management, OJP-kompatible Standard-Schnittstellen, Datenpool/Data-Broker, bei höheren Integrationsgraden Dispositions-Cockpits und Integration in ITCS/RBL und Vertriebssysteme),
- Personal/Organisation (neue Rollen und Governance, z.B. FS-/Zugangs-Checks),
- Daten (z.B. Harmonisierung und Qualität von Echtzeit-, SLA- und Clearing-Daten) sowie
- Recht/Regulatorik und Betrieb (mit wachsender Betreiberverantwortung zunehmende KRITIS-/ISMS-/DSGVO-Pflichten).

Zusammenfassend lässt sich die Problemanalyse darauf zuspitzen, dass die Herausforderung im ÖPNV nicht nur auf abstrakter Systemebene (Tarifkomplexität, Verbundstrukturen, neue Mobilitätsangebote) liegen, sondern sich konkret am Gestaltungsproblems der Integrationstiefe in die Unternehmens-IT materialisieren. Am Beispiel des On-Demand-Ridepooling-Dienstes BerlKönig der BVG wird deutlich, dass neue, plattformbasierte Angebote oft nur partiell in bestehende Tarif-, Vertriebs- und IT-Strukturen eingebunden werden. Dies kann führt zu Medienbrüchen, redundanten Datenbeständen und intransparenten Erlösflüssen führen.

Die Resource-Event-Agent-Ontologie nach Geerts und McCarthy [217] greift dieses Problem auf, indem sie betriebliche Wertschöpfungsvorgänge entlang von Ressourcen, Ereignissen und Agenten strukturiert. Sie bietet damit einen konsistenten Rahmen für die Integration heterogener Systeme. Für ÖPNV-Unternehmen bedeutet dies, Integrationsentscheidungen – etwa bei On-Demand-Diensten, neuen Vertriebskanälen oder MaaS-Plattformen – nicht primär als technische Schnittstellenprobleme zu betrachten,

sondern als Fragen der Abbildung ökonomischer Austauschbeziehungen im Sinne des Resource-Event-Agent-Modell.

Aus dieser Perspektive ergeben sich drei zentrale Handlungsempfehlungen für ÖPNV-Unternehmen wie die BVG:

Aus dieser Perspektive ergeben sich drei zentrale Handlungsempfehlungen für ÖPNV-Unternehmen wie die BVG:

1. Resource-Event-Agent-Modell in der EA verankern: Resource-Event-Agent-Modelle können in bestehende Architektur-Repositories (z.B. auf Basis von TOGAF, ArchiMate) integriert werden, um Ticketing-, Erlös- und Leistungsflüsse durchgängig abzubilden. Sie dienen als „fachliche Schicht“ zwischen Geschäftsprozess- und Applikationsebene. Studien belegen, dass Resource-Event-Agents und im Besonderen Resource-Event-Agent-Ansätze als Enterprise Ontology geeignet sind, unterschiedliche Informationssysteme auf einer gemeinsamen semantischen Basis zu harmonisieren [217, S. 1–16].
2. Resource-Event-Agent-basierte Domänenmodelle nutzen: Bei der Einführung bzw. Vergabe von On-Demand-Ridepooling-Diensten sollten Resource-Event-Agent-Modelle die geplanten Leistungs- und Erlösbeziehungen zwischen Verkehrsunternehmen, Plattformbetreibern und Fahrgästen abbilden. Dies umfasst vor allem die Modellierung von Buchungs-, Transport-, Zahlungs- und Abrechnungsereignissen, die laut aktuellen Forschungsergebnissen als kritisch für eine ÖPNV-integrierte Ausgestaltung beschrieben werden [220, S. 47–90].
3. Resource-Event-Agent als gemeinsame Sprache in Verbünden und Ökosystemen etablieren: Auf Verbund- bzw. Plattformebene treten viele Herausforderungen auf, etwa Tarifintegration, Erlösaufteilung oder Datenräume. Resource-Event-Agent-Modelle können im Rahmen einer REA als gemeinsame ontologische Sprache dienen, um die Rollen der Akteure und ihre Austauschbeziehungen konsistent zu modellieren und organisationsübergreifend zu teilen. Studien zur Integration verteilter Unternehmensmodelle zeigen, dass ein solcher Ansatz die Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit von Architekturbausteinen fördert [221, S. 395–409].

Die Problemanalyse verdeutlicht, dass Resource-Event-Agent-Modelle im ÖPNV nicht nur als abstraktes Rechnungslegungsmodell, sondern als praktisches Gestaltungswerkzeug für Integrationsentscheidungen auf Unternehmens- und Verbundebene dienen kann. Der Fall BerlKönig zeigt exemplarisch, wie Resource-Event-Agent-Modelle Entscheidungsspielräume zur Integrationstiefe systematisch strukturieren können – ein Befund, der sich auf weitere digitale Mobilitätsangebote von ÖPNV-Unternehmen übertragen lässt.

Zum Abschluss überführt Kapitel 6 – insbesondere Unterkapitel 6.5 – die in diesem Kapitel beschriebenen technologischen, betrieblichen und organisatorischen Herausforderungen in szenariobasierte Soll-Anforderungen (S1–S4). Kapitel 7 setzt diese anschließend in einer DP-basierten, variantenfähigen REA um, einschließlich VP-, Schnittstellen- und Zonenleitplanken.

6 Anforderungen an das Artefakt

In diesem Kapitel untersucht der Autor die Anforderungen an eine Unternehmensarchitektur bzw. an ein Designartefakt, das bedarfsorientierten Verkehr in ein klassisch angebotsorientiertes ÖPNV-Unternehmen integriert. Die Quellen, aus denen die Anforderungen an das Artefakt abgeleitet wurden, werden im Folgenden erläutert. Eine Übersicht über die weiteren Unterkapitel bietet Tabelle 11.

Tabelle 11: Erhebung der Anforderungen

Methoden	Erhebung
1. Literaturrecherche	Die strukturierte Literaturanalyse ermittelte primär die folgenden Architekturansätze als passend für die festgestellten Anforderungen: 1. ITVU-Branchenmodell (Kapitel 6.1) 2. VDV-Referenzarchitekturen (in Form einer Schriftenreihe) (Kapitel 6.2)
2. Fallstudie BerlKönig	Die Fallstudie basiert auf einem Experteninterview und liefert Informationen zur Integration von NMS in ein klassisches ÖPNV-Unternehmen (Kapitel 6.3).
3. Architektur Assessment	Die Fallstudie BerlKönig diente als Grundlage, um eine detaillierte Architektur zu entwickeln und durch Assessments zu bewerten (Kapitel 6.3.2, 8.2.1).
4. Szenario-Analyse	Eine Szenario-Analyse ermittelte die Anforderungen an bedarfs- und angebotsorientierten Verkehr sowie an verschiedene Integrationsstufen von AO/BO (Kapitel 6.5).
Zusammenfassung	Mehrere Tabellen fassen die durch die Literaturrecherche, Fallstudie und Szenario-Analyse gewonnenen Anforderungen zusammen. Sie zeigen funktionale und nicht-funktionale Anforderungen sowie Szenarien- und Validitätskriterien) (Kapitel 6.4).

Für das Management von ÖPNV-Unternehmen identifizierte der Autor 2 Architekturmodelle, die zwischen IT-Unterstützung als Funktionsblöcke einerseits und IT-Systemen sowie -Anwendungen andererseits unterscheiden. Diese Modelle, das ITVU-Branchenmodell (Kapitel 6.1) und die VDV-Architekturen (Kapitel 6.2), konzentrieren sich auf die herkömmlichen Funktionen des ÖPNV. Sie bilden jedoch eine solide Grundlage, um NMS-spezifische Funktionsblöcke zu integrieren und bestehende Funktionen anzupassen.

Um die inhaltliche Vollständigkeit zu gewährleisten, wurden neben den drei einleitend genannten VDV-Schriften auch weitere relevante VDV-Veröffentlichungen systematisch

einbezogen (vgl. Kapitel 6.2.1, Tabelle 13; systematische Einordnung: Anhang A, siehe „Einordnung VDV-Schriften“). Zusätzlich flossen Anforderungen aus Quellen außerhalb des VDV-Korpus ein. Diese sind als eigenständiger Abschnitt unter der Überschrift „Weitere Anforderungen außerhalb des VDV-Korpus“ in Kapitel 6.2.2 zusammengefasst. Beide Gruppen von Quellen bilden die Grundlage für die in Kapitel 6.4 synthetisierten bzw. dargestellten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie für die Szenario-abgeleiteten Anforderungen in Kapitel 6.5. Die systematische Einordnung und Traceability sind in den Anhängen A und B dokumentiert.

6.1 ITVU-Branchenmodell

Das ITVU-Branchenmodell, entwickelt und bis 2016 gepflegt von Gero Scholz (IVU Traffic Technologies AG), ist eine Art vereinfachtes Branchenmodell des klassischen ÖPNV [63]. Die neueste Version findet sich in der Publikation „IT-Systeme im ÖPNV“ aus dem Jahr 2016 [9]. Das Domänenmodell beschreibt generische Funktionsblöcke (Abbildung 8; [9]) und grundlegende Datenstrukturen (Klassen) des ÖPNV.

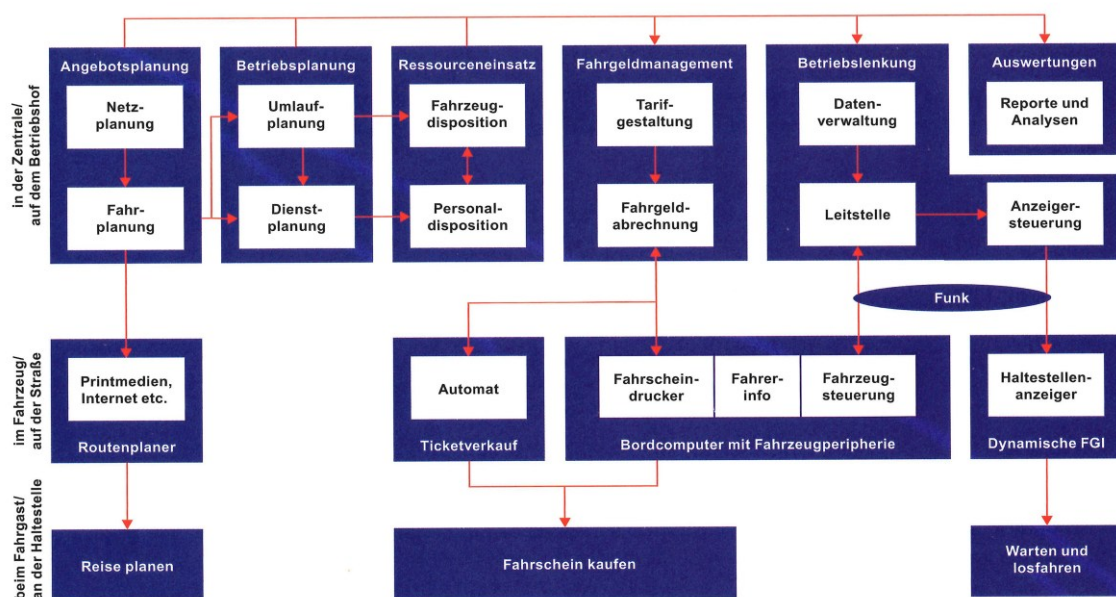


Abbildung 8: Systeme des ITVU-Branchenmodell nach Scholz [9]

Das ITVU-Modell umfasst 42 IT-Systeme bzw. Anwendungen, die in Kurzprofilen beschrieben werden. Diese enthalten:

- Namen in der Form,
- Benennung,
- Funktionszusammenfassung,
- Übersicht über Datenflüsse zwischen Anwendern,
- Benutzer- bzw. Akteursrollen.

Abbildung 9 zeigt den Teil des Klassenmodells, auf dem das ITVU-Modell [9] basiert. Die oben aufgeführten Attribute (wie Benennung, Funktionszusammenfassung usw.) werden beispielhaft für die Anwendung „Fahrplanplanung (-gestaltung)“ dargestellt.

Name	plan.timetable
Bezeichnung	Fahrplanung
Art	zentral
Nutzer	Fahrplaner
Funktionen	Beschreibung von Fahrwegen Definition von Linien Erfassen von Fahrzeitprofilen je Strecke und Tageszeit Festlegung von Fahrten, Zuordnung von Fahrzeugtypen Verwendung variabler Gültigkeitsmuster (Fahrplanperiode, Tagesart, einzelner Kalendertag) Zuordnung von Aspekten (Regelverkehr, Baustelle, Schülerverkehr, Werksverkehr) zu Fahrten Definition von Anschlüssen
Datenflüsse	→ plan.block Menge der Fahrten → pool.data Menge der Fahrten zur Abstimmung mit Verbundpartnern und zur Erstellung von Druckerzeugnissen → contract.management Fahrplandaten verbindliche Anschlüsse

Abbildung 9: Profil einer Anwendung im ITVU-Branchenmodells nach Scholz [9]

Das ITVU-Sektorenmodell stellt 16 Rollenbeschreibungen für Benutzer bzw. Akteure zur Verfügung, deren Aktivitätsprofile detailliert beschrieben werden. Als Beispiel wird hier die Beschreibung der Rolle „Auskunftsperson“ aus einem Profiltext wiedergegeben:

„Die Fahrplanauskunft setzt die Verkehrsnachfrage auf dem zuvor erstellten Netz um. Häufig werden die Rollen von Netzplaner und Fahrplaner nicht getrennt, da beide Tätigkeiten eng miteinander verbunden sind. Der Fahrplaner definiert die Fahrten für jede Linie (Häufigkeit und genaue Zeiten) und berücksichtigt die Anschlussbeziehungen. Er bestimmt den einzusetzenden Fahrzeugtyp und berücksichtigt Einschränkungen, die sich aus der Streckenführung ergeben können. Außerdem werden eventuell erforderliche Sonderausstattungen, wie z.B. behindertengerechte Zugänge, festgelegt. Die Netz- und Fahrplanplanung kann in der Verantwortung des Verkehrsunternehmens liegen oder im Verkehrsvertrag festgelegt werden, je nachdem, wie differenziert der Aufgabenträger die zu erbringenden Verkehrsleistungen vorgibt.“ [63]

Ausgehend von den in Abbildung 8 dargestellten Anwendungen ordnet das ITVU-Branchenmodell Daten- und Prozessstrukturen den Systemen in einem Klassenmodell zu [9]. Es bietet einen Einstieg in spezielle Bereiche der Unternehmensarchitektur, be-

rücksichtigt jedoch keine umfassende Bewertung von Geschäftsprozessen wie etwa Rechnungswesen, Personalmanagement oder Marketing.

6.2 Beiträge aus nicht-wissenschaftlichem Bereich

Dieses Kapitel fasst praxisnahe Erkenntnisse aus dem nicht-wissenschaftlichen Bereich zusammen. Es umfasst in Kapitel 6.2.1 deutschsprachige Beiträge des Branchenverbands VDV sowie in Kapitel 6.2.2 weitere, z.T. internationale branchenseitige Beiträge. Beide Bereiche liefern – im Sinne des DSR-Relevanzzyklus – praxisbezogene Anforderungen für die Entwicklung des Artefakts [44, S. 80]; [52, S. 77–89].

6.2.1 Beiträge des VDV

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) veröffentlicht regelmäßig Fachbeiträge in seiner Schriftenreihe. Für diese Dissertation ist das Thema „Digitalisierung: Zentrale Systeme“ besonders relevant. Für die Entwicklung einer Unternehmensarchitektur wurde v.a. die Mitteilung VDV-7046 [11] von März 2018 berücksichtigt; diese legt Definition und Dokumentation von Nutzeranforderungen an eine Open-Mobility-Plattform vor. Zudem flossen Erkenntnisse aus 3 weiteren Veröffentlichungen vom August 2019 ein: VDV-436-1 [12], VDV-436-2-1 [13] und VDV-436-2-2 [14]. Diese befassen sich ebenfalls mit offenen Mobilitätsplattform. Die Erkenntnisse zu diesen Beiträgen wurden genutzt, um die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Unternehmensarchitektur mit den Anforderungen aus der Praxis abzugleichen.

Über die im oben vorgestellten Schriften VDV-7046 sowie VDV-436-1/-2-1 und -2-2 hinaus ordnet Tabelle 12 die für das Untersuchungsfeld relevanten VDV-Beiträge und schafft damit eine Terminologie für die folgenden Analysen. Sie dient als komprimierte Referenzliste der in dieser Arbeit genutzten Normen und Mitteilungen und wird in Anhang A: Einordnung VDV-Schriften weiter untersucht. Zugleich bildet sie die Grundlage für die spätere Architekturdiskussion, in der diese Schriften als normative Anker für Schnittstellen, Datenmodelle, Integrationsprinzipien dienen. Anhang A ergänzt die Kurzbeschreibungen der Tabelle 12 u.a. um eine erweiterte Übersicht über:

- a. Architekturebene(n) (Business/Application/Technology),
- b. Anforderungsbezug (z.B. Interoperabilität, Datenobjekte/IDs, Governance/Sicherheit) und
- c. primären Einsatzkontext (z.B. Plan-/Ist-Daten, Auskunft, On-Board).

Tabelle 12 bietet damit einen Überblick über das fachliche und technische Fundament der Dissertation und eine gute Nachvollziehbarkeit.

Tabelle 12: Relevante VDV-Schriften

VDV-Schrift	Kurzbeschreibung
VDV 300	IBIS-Wagenbus: serieller Fahrzeugbus zur Kopplung u.a. von Bordrechner, Anzeigen und Ansagen
VDV 301	IP-basierte Bordkommunikation/Servicearchitektur für Fahrzeug-IT und Backend/ITCS (IBIS-IP)
VDV 451	Austauschformat für Daten zwischen ÖPNV-Anwendungen (Planungs-/Dritt-systeme).
VDV 452	Schnittstelle „Liniennetz/Fahrplan“ (Planned Data) für Planung ↔ ITCS ↔ Auskunft
VDV 453	Ist-Daten für dynamische Fahrgastinformation/Anschlusssicherung (SIRI-Subset, Pub/Sub)
VDV 454	Ist-Daten für Reiseauskunft (SIS/REF-SIS; SIRI-konform)
VDV 459	Schnittstelle für nachfragegesteuerte Verkehre (AST/On-Demand) zur Leitstellen-/Info-Integration
VDV 462	NeTEx-DE-Profil: Implementierungsregeln für standardisierten Austausch geplanter Daten
VDV 4312	Schnittstellenbeschreibung der (Echtzeit-)Auskunftsplattform (TRIAS/EKAP)
VDV 432	Identifikatoren für Haltestellen/Objekte (z.B. DHID/Global ID)
VDV 433	Identifikatoren für Linien und Fahrten (DLID/DTID/DFID) – durchgängig für Plan/RT/Auskunft
VDV 456	Infrastruktur-Datenmanagement (IDMVU) für schienengebundene Netze/Assets
VDV 463	Lade- und Depotmanagement für E-Bus: CMS-Schnittstelle inkl. Vorkonditionierung/Steuerung
VDV 461	ITCS ↔ BMS Ist-Daten-Schnittstelle (Leitstelle/Betriebshof-Management)
VDV 455	Dienstplandaten (Roster/Fahrerzuordnung) Dienstplanung ↔ ITCS/AVMS
VDV 261	Vorkonditionierung von E-Bussen (Heizen/Kühlen) über ISO 15118-VAS
VDV 736-1/-2	Umgang mit Störungsmeldungen/SIRI-SX-Profile für Ereignis-/Störungsinfos

Die intensive Beschäftigung mit den VDV-Veröffentlichungen führte zu der Idee, ein zentrales Dateninterface wie z.B. einen Enterprise-Service-Bus (ESB, siehe Abbildung 18) einzusetzen, der den Datenaustausch zwischen Anwendungen standardisiert. So können Unternehmen jederzeit über eine Art Zwischenarchitektur unkompliziert neue Dienste erstellen. Dies bietet viele Vorteile – es ermöglicht etwa zentrale Tarifumstellungen, die alle angeschlossenen Subsysteme wie Fahrkartenautomaten oder Buskassen über eine Anwendung einbeziehen.

Viele interviewte Experten bewerteten den ESB als Kommunikationsschnittstelle positiv. Einige wiesen jedoch darauf hin, dass bestehende Systemlandschaften eine kurzfristige Umsetzung erschweren und gesetzliche Vorgaben bspw. zu KRITIS, IT- und Cybersicherheit zu berücksichtigen sind.

Auf eine ausführliche Darstellung, wie sie für das ITVU-Branchenmodell erfolgte, wird hier bewusst verzichtet. Die VDV-Schriften sind frei verfügbar und wurden für diese Arbeit stark verdichtet und speziell in den Objektdarstellungen aufgenommen.

6.2.2 Nicht-VDV-Beiträge zur Integration von NMS

Neben der VDV-Schriftenreihe beeinflussen europäische Normen, Rechtsakte, De-facto-Standards und Open-Source-Referenzimplementierungen die Integration bedarfsorientierter Mobilitätsservices (NMS/DRT) in bestehende ÖPNV-Architekturen. Dieses Kapitel bündelt die relevanten Beiträge, die im VDV publiziert bzw. nicht publiziert wurden, entlang von Governance, Geschäfts-APIs, Sicherheit/Identität sowie Referenz-Stacks. Die Struktur folgt der in Kapitel 7 eingeführten REA-Logik (Daten-, Anwendungs-, Technologie- und Governance-Schicht) und verknüpft diese direkt mit Architektursichten und Evaluationskriterien (Kapitel 8). Tabelle 13 listet alle untersuchten Branchenstandards – aus relevanten VDV-Veröffentlichungen und den einbezogenen Quellen außerhalb des VDV-Korpus – auf. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit sind Anhang B: Einordnung Nicht-VDV-Schriften, die in Tabelle 13 aufgelistet sind, im Anhang zusätzlich mit dazugehöriger Literaturquelle sowie mit einem Link versehen, dokumentiert (vgl. Anhang B: Einordnung Nicht-VDV-Schriften).

Tabelle 13: Korrespondierende Normen im Überblick³³

Norm	Hauptkriterium	VDV
ITS-Richtlinie/MMTIS-Durchführungsakte Richtlinie 2010/40/EU (ITS) und Delegierte Verordnung (EU) 2017/1926	Governance & Rechtsrahmen	umgesetzt
EU Data Act/PSI (Open-Data) Verordnung (EU) 2023/2854 („Data Act“) und Richtlinie (EU) 2019/1024 (PSI/Open-Data)	Governance & Rechtsrahmen	umgesetzt
eIDAS 2.0/EU-Wallet Verordnung (EU) 2024/1183 („eIDAS 2.0“/EU-Wallet; Änderung der VO (EU) 910/2014)	Governance & Rechtsrahmen	umgesetzt
NIS2 (Cyber) Richtlinie (EU) 2022/2555 („NIS 2“)	Governance & Rechtsrahmen	
Transmodel (EN 12896) Transmodel, Teile 1–x	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	umgesetzt

³³ Die VDV-Zuordnungen sind praxisorientierte Bezüge (typische Kopplungspunkte) und keine offizielle 1:1-Abbildung.

Norm	Hauptkriterium	VDV
NeTEx (EN 16614) NeTEx, Teile 1–3	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	umgesetzt
SIRI (EN 15531) SIRI, aktuelle Fassung	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	umgesetzt
ISO 24014-1 (IFM) PT-Interoperable fare managem: system	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	umgesetzt
GTFS/GTFS-Realtime	De-facto-Standards & Open-APIs	umgesetzt
GBFS (General Bikeshare Feed Specification)	De-facto-Standards & Open-APIs	
MDS (Mobility Data Specification)	De-facto-Standards & Open-APIs	
TOMP-API (Transport Operator to MaaS Provider)	De-facto-Standards & Open-APIs	
UIC OSDM (IRS 90918-10)	Vertrieb & Zahlung	umgesetzt
EMVCo Contactless/PCI-DSS	Vertrieb & Zahlung	umgesetzt
Mobility Data Space (DE)	Datenräume & Plattformen	
MDM/mCLOUD/Mobilithek (BMDV)	Datenräume & Plattformen	umgesetzt
ISO/IEC 27001/27701	Sicherheit & Identität	
OAuth 2.0/OpenID Connect (FAPI-Profile)	Sicherheit & Identität	umgesetzt
IEC 62443 (Industrial Automation & Control Systems Security)	Sicherheit & Identität	
OpenTripPlanner/Navitia/MOTIS/Digitransit	Referenz-Stacks & OSS	umgesetzt
Pelias/Photon (Geocoding)	Referenz-Stacks & OSS	
Keycloak, Kong/Apigee Kafka/NATS	Referenz-Stacks & OSS	

Nicht-VDV-Beiträge bilden die Grundlagen ab, um NMS skalierbar, auditierbar und interoperabel in ÖPNV-Unternehmen zu integrieren. Sie stützen sich auf europäisches Recht und liefern klare Begriffe sowie Vorgaben für effiziente Abläufe. In Summe entsteht ein föderationsfähiges Zielbild: VDV-Schnittstellen sichern die deutsche Bran-

chenkompatibilität, ergänzt durch EU-Normen, offene Geschäfts-APIs und Datenräume. Diese ermöglichen grenzüberschreitende, herstellerunabhängige End-to-End-Prozesse. Diese Doppelverankerung senkt Integrationsrisiken (Kapitel 11) und verbessert die Übertragbarkeit der Ergebnisse (Kapitel 9–10).

6.3 BerIKönig – Beitrag zur Ausgestaltung der REA

Dieses Kapitel nutzt den Ride-Pooling-Dienst „BerIKönig“ der BVG als praktisches Beispiel, um die zuvor abgeleiteten Anforderungen zu konkretisieren und das Integrationsprinzip der REA an einem realen NMS zu demonstrieren [49, S. 122–129].

Die Aussagen basieren auf Primärdaten aus einem Experteninterview und ist als fallbezogener Befund zu interpretieren. Sie wurde im Sinne einer nachvollziehbaren Fallstudien-dokumentation (Chain of Evidence) methodisch verortet [72], [61].

Im Fokus steht die organisatorisch-prozessuale und informationstechnische Kopplung an das ITVU-Kernmodell (vgl. Abbildung 8: Systeme des ITVU-Branchenmodell nach Scholz ; Abbildung 10: Integration BerIKönig: Nutzung von Subdienstleistern). Ausgangspunkt sind Fallstudienbefunde, etwa das kooperative Betriebsmodell mit ViaVan und die geringe IT-Integration. Diese werden in den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 als Delta-Sichten systematisiert [38, S. 72–73].

Der Integrationsgrad wird als operationalisierte Bewertungsdimension ausgewiesen (Kriterien/Indikatoren), und die Zuordnung wurde durch Notizen in einem Fragebogen mit Integrations-Diagramm (Abbildung 10) und einem Protokoll dokumentiert. Damit ist die Aussage als Primärdatenergebnis reproduzierbar.

Der Abschnitt dient zugleich als methodischer DSR-Nachweis (Demonstration/Evaluation) für die Tragfähigkeit der REA-Bausteine [52, S. 77–89].

6.3.1 Fallstudie BerIKönig

Ermittelt werden konnten die zentralen Unterschiede einer NMS-fähigen Unternehmensarchitektur im Vergleich mit den Architekturen des VDV und der von Scholz. Die Fallstudie BerIKönig analysiert die Integration eines NMS in die Unternehmensarchitektur der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Grundlage der Untersuchung ist ein Interview mit dem Mobilitätsexperten der BVG, Michael Bartnik [222] (Anhang Z: Experteninterview Michael Bartnik-BVG -Protokoll [Digitale Quelle]). Der BerIKönig, ein Mitfahrdienst der BVG, wurde bis Juli 2022 als neues Mobilitätsangebot entwickelt [223]. Der Dienst wurde in 2 Varianten betrieben:

BerIKönig A: Anrufsammeltaxi mit freier Zielwahl im inneren Berliner S-Bahn-Ring (Tarifzone A). Diese Variante war eine Kooperation zwischen BVG und ViaVan, einer Tochtergesellschaft des Daimler-Konzerns. ViaVan betrieb den Dienst im Auftrag der BVG und unterstützte Managemententscheidungen durch die Bereitstellung von Informationen. Im November 2017 beantragten die Partner die Genehmigung für das BerIKönig-Konzept, und im September 2018 nahm der Dienst seinen Betrieb auf [223].

BerlKönig BC: Anrufsammeltaxi mit festem Ziel (nächstgelegener U-Bahnhof) und halbvariabler Route, der Dienst wurde im äußeren Berliner S-Bahn-Ring und in den Dörfern östlich von Berlin angeboten (Tarifgebiete B und C). Die Variante BerlKönig BC geht auf eine Initiative der Berliner Taxi-Innung zurück; realisiert wurde sie in einer Zusammenarbeit der Taxi-Innung mit BVG, ViaVan und Taxi Berlin. Der vom Bund geförderte Dienst nahm im Sommer 2019 seinen Betrieb auf. Da diese Variante aufgrund von Mittelstreichung im Mai 2021 – also vor dem Untersuchungszeitraum dieser Dissertation – eingestellt wurde, wurde sie nicht berücksichtigt [224].

Im Experteninterview mit Michael Bartnik von der BVG [222] ging es v.a. um die organisatorisch-prozessuale und informationstechnische Integration des Dienstes in die ITVU-Architektur. Zentral im Rahmen dieser Forschungsarbeit sind die folgenden beiden Fragen:

1. In welcher Form und in welchem Umfang wird die BVG bei der Umsetzung des Services unterstützt und wie integrativ ist diese Unterstützung?
2. Inwieweit ist die IT des BerlKönig in die IT-Strukturen der BVG eingebunden?

Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt.

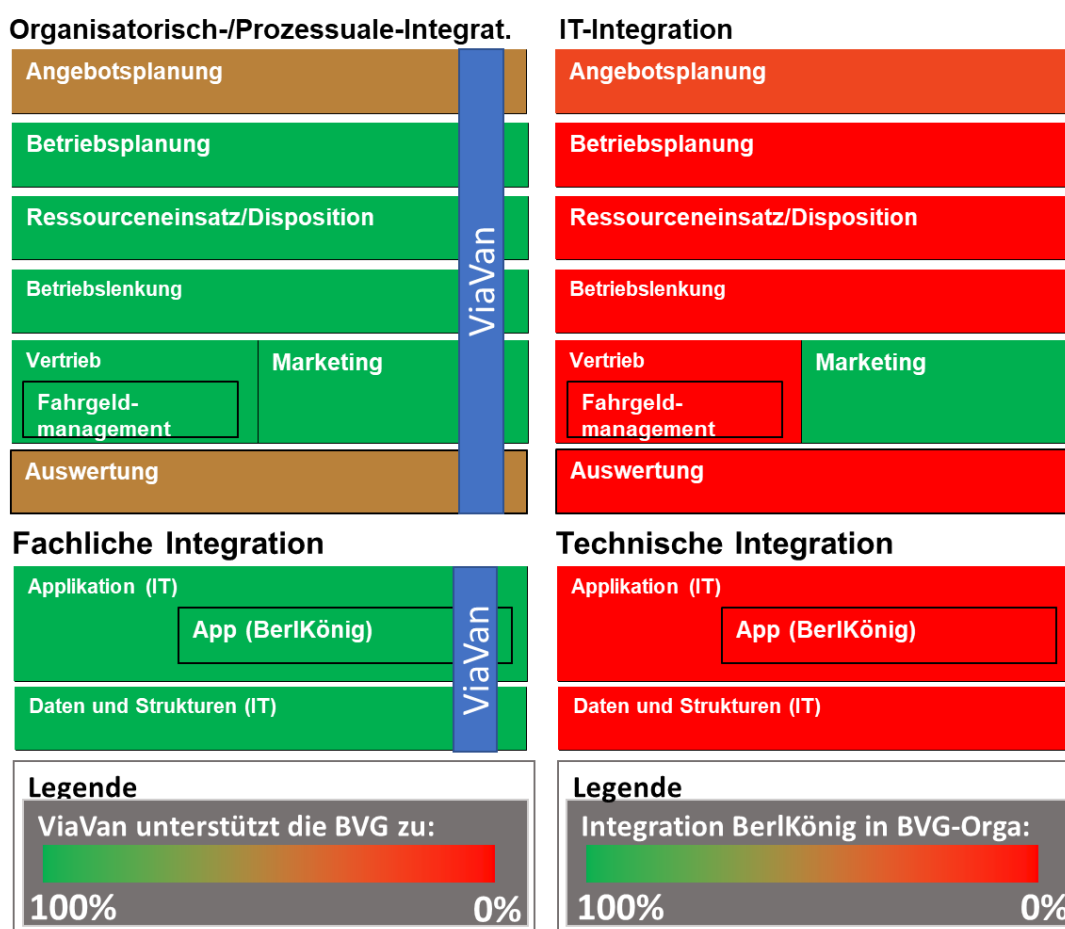


Abbildung 10: Integration BerlKönig: Nutzung von Subdienstleistern

Das Experteninterview ergab, dass ViaVan die BVG in erheblichem Umfang unterstützt. Wie auf der linken Seite des Diagramms zu sehen ist (Abbildung 10), beträgt der Beitrag in fast allen Bereichen 100%. Mit Ausnahme der Angebotsplanung und -auswertung betreibt der Partner die Dienstleistung im Auftrag der BVG weitgehend eigenständig. Zudem unterstützt ViaVan die Angebotsplanung mit Informationen aus dem Betrieb und stellt Auswertungen über die Auslastung des Services zur Verfügung.

Im Vergleich zur operativen Integration ist die IT-Integration der einzelnen Servicemodule praktisch nicht vorhanden, wie die rechte Seite des Diagramms zeigt (siehe Abbildung 10). Eine Ausnahme bilden dabei die Bereiche Serviceplanung und Marketing. Hier gibt es eine geringe Integration durch den Einsatz und die gemeinsame Nutzung von Standardsoftware (z.B. Microsoft Office).

Zusammenfassend lassen sich die eingangs gestellten Fragen wie folgt beantworten: Der BerIKönig-Service wird maßgeblich von ViaVan betrieben. Technisch und organisatorisch betreibt ViaVan den Dienst weitgehend eigenständig. Die eingesetzten IT-Systeme sind jedoch nicht in die IT-Architektur der BVG integriert.

6.3.2 Integration des BerIKönig

Dieses Kapitel beschreibt die erforderlichen Schritte, um einen NMS-Dienst wie den BerIKönig in ein angebotsorientiertes ÖPNV-Unternehmen zu integrieren. Als Beispiel wird die einfache Integration des Vertriebs- und Tarifmanagementbereichs des BerIKönig-Dienstes in die BVG-Struktur skizziert. Die vorgeschlagene Lösung orientiert sich an der derzeitigen Ausrichtung der BVG, die einem traditionellen Organisations- und Geschäftsmodell folgt. Dies stellt einen ersten Schritt dar, um eine umfassendere Unternehmensarchitektur zu entwickeln, die sowohl den klassisch angebotsorientierten ÖPNV-Betrieb als auch die nachfrage- bzw. plattformorientierten NMS-Dienste integriert. Diese Betrachtungsebene (siehe Abbildung 12) wurde im Experteninterview getestet, erwies sich jedoch für den Experten als zu detailliert. Es wurde daraufhin entschieden, zwischen dem ITVU-Branchenmodell und der Modellierungsebene BerIKönig (siehe Abbildung 12), die etwa der Prozessebene 2 entspricht, zu wählen.

Abbildung 11 zeigt die Funktionsblöcke einer Gesamtlösung. Der Fokus liegt auf dem Vertriebsbereich, insbesondere dem Fahrgeldmanagement, das durch vorgelagerte Ticketing-Prozesse ausgelöst wird. Der Service von BerIKönig ist ausschließlich über den Vertriebskanal App erreichbar. Es gibt keine andere Möglichkeit, diesen Service zu buchen und zu nutzen. Daher sind Benutzerfreundlichkeit/Usability und Verfügbarkeit der App entscheidend.

Die Funktionsblöcke des Vertriebssystems gliedern sich in 7 Systeme, die zusammen die Struktur des Vertriebssystems bilden. Jedes System enthält Anwendungsfunktionen, die für die Erfüllung der Systemanforderungen relevant sind. Als Beispiel wird im Folgenden der Bereich des Abrechnungssystems beleuchtet.

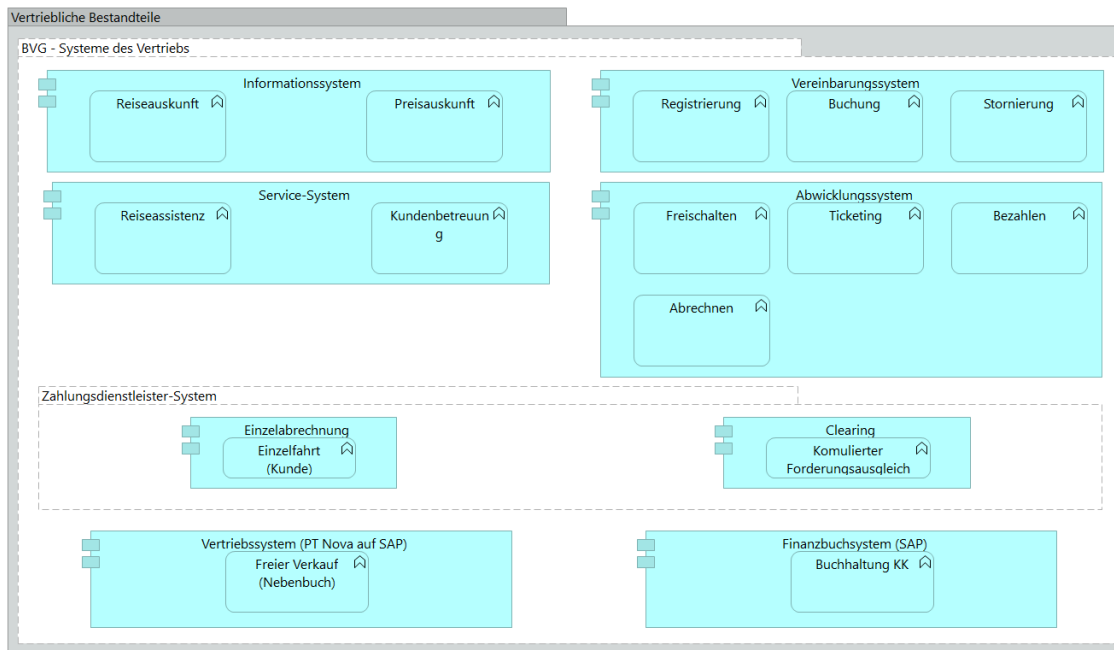


Abbildung 11: Funktionsblöcke des Vertriebsbereichs am Beispiel BerlKönig

Die folgenden Anwendungsfunktionen sind für die Abwicklung des Geschäftsprozesses im Abrechnungssystem wichtig:

- Freischaltung: Nach der Registrierung im Vertragssystem muss der Kunde unternehmensseitig freigeschaltet (aktiviert) werden, damit er Transaktionen auf der Plattform abschließen kann.
- Fahrscheinausstellung: Die gebuchte Reisegenehmigung wird in Form eines Tickets bereitgestellt.
- Bezahlung: Der Zahlungsvorgang erfolgt über einen externen Zahlungsdienstleister, der den Betrag vom Kunden bzw. Fahrgast einzieht.
- Abrechnung: Die Abrechnung zwischen Zahlungsdienstleister und BVG erfolgt monatlich. Dabei werden Geldbeträge und Informationen bzw. Transaktionsdaten (einzeln und gesamt) ausgetauscht.

Abbildung 12 zeigt eine vom Autor entwickelte Architekturlösung zur Integration des Vertriebs- und Fahrgeldmanagements des BerlKönig-Dienstes in die Gesamt-IT der BVG. In späteren Diskussionen mit Experten stellte sich heraus, dass der Detaillierungsgrad der Architektur für eine umfassende Betrachtung des Kernmodells zu tief war. Das ITU-Sektorenmodell erwies sich hingegen als geeignet [222]. Die aus diesem ersten Architekturansatz gewonnenen Erkenntnisse flossen in die weiteren Überlegungen ein.

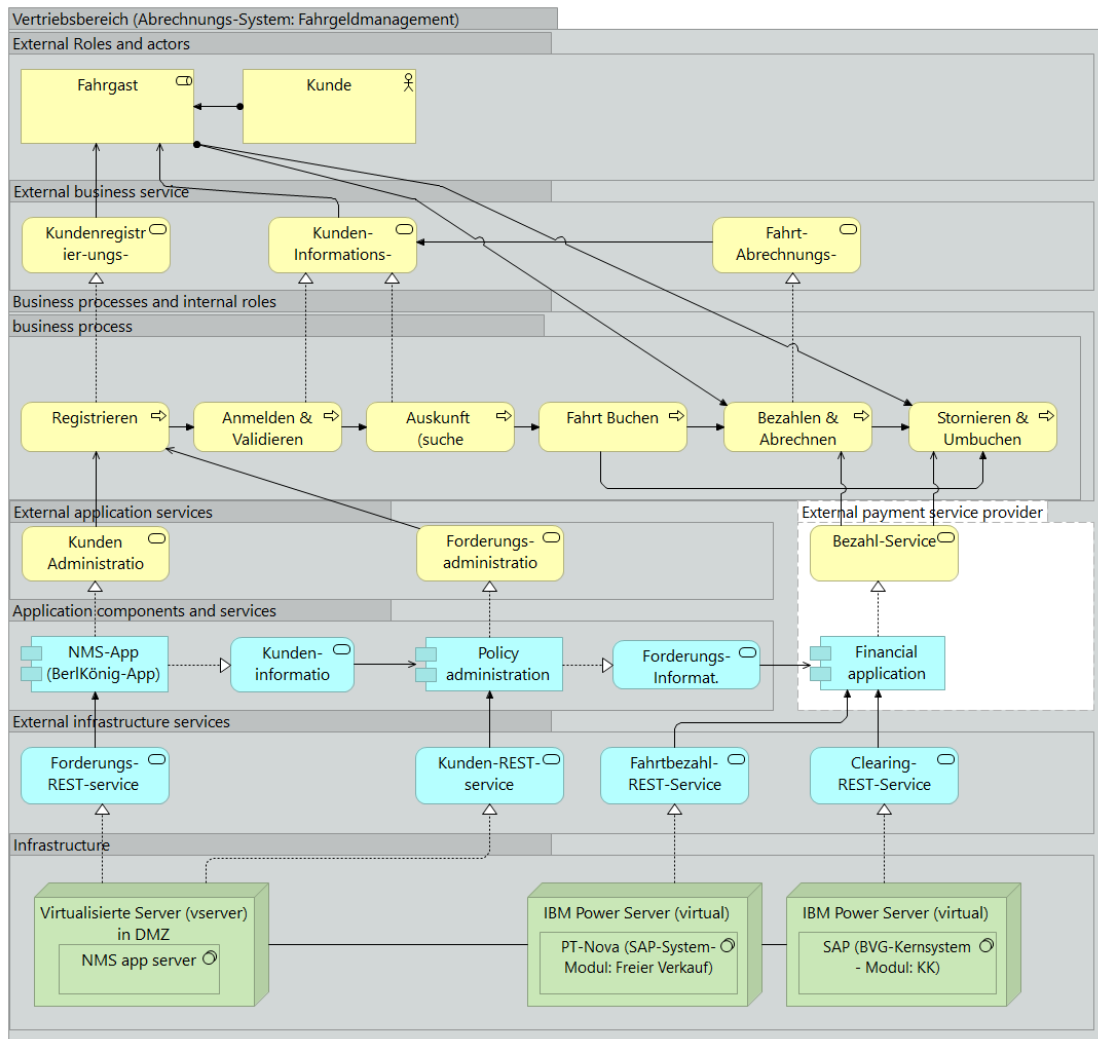


Abbildung 12: Zielarchitektur für die Integration von Vertriebs- und Tarifmanagement des BerlKönig-Services

Der Schwerpunkt bei der entwickelten Architekturlösung liegt auf dem Forderungsmanagement. Die verwendete Infrastruktur – abgesehen von der Hintergrundsoftware der App – entspricht der der BVG. Auf der genannten Hardware kommen 3 Softwaresysteme zum Einsatz:

- PTnova (Hansecom) auf Basis SAP/Hana als Nebenbuchhaltung für den Vertriebskanal,
- NMS App Server (Hintergrundsoftware) als zentrale Anwendung für die App,
- das SAP-Kernsystem der BVG für die Abrechnung mit dem Zahlungsdienstleister (Clearing).

Ausgehend von diesen zentralen Systemen entwickelte der Autor eine zeitgemäße IT-Architektur, die die Ebenen durch standardisierte Dienste verbindet. Die Untersuchung des BerlKönigs zeigte jedoch, dass der Detaillierungsgrad der entwickelten Architekturausprägung zu tief war. Diese Erkenntnis sollte bei der Erstellung der ersten Referenzarchitektur berücksichtigt werden.

6.4 Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen

Die zentralen funktionalen Anforderungen an eine Unternehmensarchitektur, die NMS einbezieht, basieren auf den Analysen des ITVU-Branchenmodells und der VDV-Architekturen (Kapitel 6.1 bis 6.3). Tabelle 14 fasst diese funktionalen Anforderungen, die später bei der Architekturentwicklung berücksichtigt werden, zusammen. Es werden nur die Anforderungen aufgeführt, die sich auch im Modell widerspiegeln sollen.

Tabelle 14: Funktionale Anforderungen an eine NMS-berücksichtigende EA (A)

A. NMS	Die Architektur muss die Anforderungen neuer Mobilitätsdienste einbeziehen. Die Hauptanforderungen sind im Folgenden nach den wichtigsten Kernprozessen gegliedert:
A.1 Planung	Alle Planungs(-teil-)prozesse müssen um bedarfsorientierte Elemente ergänzt werden. Dazu gehören konkret die Planung für bedarfsgerechten Transport und die Anpassung der Dienst- und Einsatzplanung an die Anforderungen der NMS.
A.2 Ressourcenmanagement	Der Ressourceneinsatz muss für den bedarfsorientierten Verkehrsanteil erweitert werden. Im Gegensatz zur klassischen linienbezogenen Einsatzplanung organisiert man hier Fahrzeug- und Personal v.a. durch die Disposition von Mietfahrzeugen aller Art und der dafür benötigten Mitarbeitenden.
A.3 Tarif- und Produktmanagement	Das Tarif- und Produktmanagement muss um den Bereich der Fahrten- und Mietangebote – konkret um deren Gestaltung – erweitert werden. Die dafür benötigten bedarfsorientierten Leistungen und Entgeltkalkulationen fließen in den Produktkatalog ein und erweitern die angebotsorientierten Tarifdaten.
A.4 Betriebliche Steuerung	Die Verkehrssteuerung, die besonders die Leitstellen unterstützt, muss so ausgebaut und weiterentwickelt werden, dass sie den bedarfsgerechten Personennahverkehr (auch autonom) optimal unterstützt.
A.5 Vertrieb	Der Vertrieb muss sowohl angebots- als auch bedarfsorientierte Dienste abdecken können. Dazu sind folgende Prozesse und Systeme funktional zu erweitern: - Reiseinformationen und -planung - Buchung - Abrechnung
A.6 Digitale Plattform	Es muss eine zentrale und integrative Plattform für den Vertrieb der NMS geschaffen werden. Sie soll die Anforderungen aus A.5 erfüllen und eine optimale Nutzererfahrung (Customer Journey) gewährleisten.

Tabelle 15 listet die nicht-funktionalen Anforderungen an eine Referenz-Unternehmensarchitektur auf, die den bedarfsgerechten ÖPNV berücksichtigt. Diese Kriterien, basierend auf Erkenntnissen von Razavi, Aliee und Badie [225], dienen auch zur Bewertung des ersten Modellentwurfs der Unternehmensarchitekturlösung in Kapitel 8.

Über die in Tabelle 15 genannten existieren weitere nicht-funktionale Anforderungen an die Unternehmensarchitektur, dazu gehören etwa Zuverlässigkeit, Überwachung, Testen und Protokollierung sowie Sicherheit. Diese Anforderungen blieben bei der Ausarbeitung sowie bei der Entwicklung der Unternehmensarchitektur zunächst unberücksichtigt. Aufgrund der angestrebten offenen Modularität der Unternehmensarchitektur könnten sie jedoch integriert werden.

Tabelle 15: Nicht-funktionale Anforderungen an eine NMS-berücksichtigende EA (B)

B.1 Plattformunabhängigkeit	Die Architektur muss hardware- und softwareunabhängig sein.
B.2 Skalierbarkeit	Die Architektur muss für Unternehmen unterschiedlicher Größe geeignet sein und entsprechend eine hohe Skalierbarkeit aufweisen.
B.3 Flexibilität	Die Architektur muss flexibel und schnell an den sich dynamisch verändernden NMS-Markt anpassbar sein.
B.4 Wiederverwendbarkeit von Komponenten	Architekturkomponenten sollten entlang des Prozessablaufs wiederverwendbar sein.
B.5 Interoperabilität	Die Architektur sollte durch definierte und einheitliche Schnittstellen und Dienste eine hohe Interoperabilität gewährleisten.
B.6 Vereinfachung	Die Architektur soll möglichst verständlich und für ÖPNV-Experten schnell nachvollziehbar sein.

Die Anforderungen aus Tabelle 14 (funktional) und Tabelle 15 (nicht-funktional) bilden die Grundlage für die Entwicklung der Architektur, die in Kapitel 7.2 vorgestellt wird.

6.5 Szenario-abgeleitete Anforderungen

Aus dem in Kapitel 5.5 eingeführten Szenarienraum (S1: Nicht-Integration/Anbindung; S2: White-Label-Kooperation; S3: Hybride Integration/Koordination und Teilexécution; S4: Vollintegration) lassen sich funktions- wie qualitätsbezogene Soll-Anforderungen für das Referenzartefakt ableiten, die entlang aller Architekturschichten (Motivation, Business, Anwendung, Technologie) konsistent umzusetzen sind und die ITVU-Kernstruktur um NMS-Funktionalität systematisch erweitern. Methodisch wird S4 als Basissicht (End-to-End-Fähigkeit im Unternehmen) interpretiert; S1–S3 werden als Delta-Varianten mit klaren Verantwortlichkeiten (Owned/Shared/Partner) ausgeprägt, wodurch die Variationspunkte in Prozessen, Systemen, Daten und Governance präzise verortet werden können. Daraus folgen:

- (ii) **Governance- und Verantwortungsanforderungen:** Für jede Domäne (Planung/Ressourceneinsatz, Vertrieb/Tarif, Betriebslenkung, Plattform/Integration, Daten-/API-Governance, Reservierung/Buchung, Einnahmen/Clearing, Security/KRITIS, Compliance, Partner/SLA) ist eine verbindliche Zuordnung „Owned/Shared/Partner“ vorzunehmen; S3 verlangt explizit Broker-/Plattform-Capabilities und Make-or-Buy-Entscheidungen (Koordination und Teilexekution im Verbund mit Partnern), während S4 eine vollständige Eigenleistung einschließlich Disposition und Durchführung fordert.
- (iii) **Prozess- und Produktanforderungen:** Über alle Szenarien hinweg ist die Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich) als architekturleitendes Prinzip umzusetzen (OJP-Konformität); dies beeinflusst Front- und Back-Office-Prozesse, Schnittstellendesign und die Haftungslogik in hybriden Ketten (insbesondere S3).
- (iv) **Plattform- und Integrationsanforderungen:** Ab S2 sind standardisierte Partner-APIs (Availability/Quote/Trip-Events) und ein API-Gateway/IAM zwingend; ab S3 ist eine eigene Mobilitäts-/Buchungsplattform mit Dispatch-Koordination (eigene Subflotte und Partnerflotten) erforderlich; Event-basierte Integration und eine Datendrehscheibe/Data-Broker sind zu bevorzugen, durchkoppelnde unternehmensweite ESB-Konstrukte über KRITIS-Domänen hingegen zu vermeiden (Single-Point-of-Compromise, Audit-Scope, Resilienz).
- (v) **Daten- und Analytikanforderungen:** Für S2–S4 sind Datenharmonisierung (NMS ↔ PT-Daten), PII/Consent-Management, SLA-Reporting sowie ein Data-Pool (zur Reduktion bilateraler N-1-Schnittstellen, als Single-Source-of-Delivery für Analytik und KPI wie Wartezeit, Anschlussqualität, Auslastung) verbindlich vorzusehen.
- (vi) **Betriebs- und Informationsanforderungen:** Multimodale Fahrgast-/Anschluss-/Störungsinformation ist szenarienübergreifend sicherzustellen; Real-time-Dispatch-/Pooling-Fähigkeiten sind in S3 (Shared) und S4 (Owned) vorzuhalten und mit ITCS/RBL und Telematik zu koppeln.
- (vii) **Finanz- und Clearinganforderungen:** In S2–S3 sind Revenue-Sharing und Nebenbuch → Hauptbuch-Prozesse (z.B. Verbund-Abrechnung, PT-Kernsysteme) als Shared umzusetzen, in S4 Owned; die Genauigkeit und Prüfbarkeit der Einnahmenaufteilung ist durch geeignete Daten- und Prozesskontrollen zu gewährleisten.
- (viii) **Security/KRITIS- und Resilienzanforderungen:** Für alle Szenarien gelten Domänen-/Netz-Zonierung, starke Authentisierung/Autorisierung (OAuth/OIDC, HSM/Krypto), SIEM/Monitoring/Audit und Vulnerability/Patch-Prozesse; die Integrationsarchitektur ist so zu entwerfen, dass KRITIS-Kernsysteme logisch/physisch separiert und nicht durch generische ESB-Busse kompromittierbar sind.

- (ix) **Compliance- und Lizenzanforderungen:** Mit zunehmendem Integrationsgrad verlagern sich Betriebspflichten (Genehmigungen, Haftung, Versicherung) in Richtung Owned; neue Fähigkeiten wie Führerschein-/Zugangsprüfung (FS-Check) sind – je nach Dienst (Ride-/Car-Sharing) – in S3 (Owned) und S4 (Owned) zu etablieren.
- (x) **Strategische Ziel-/Capability-Anforderungen:** Über alle Szenarien hinweg müssen die Treiber, wie z.B. First/Last-Mile, Reduktion motorisierten Individualverkehrs, Kundenzufriedenheit und ökologische Zielsetzungen, in fähigkeitsbasierte Sollzustände (z.B. digitale Plattform, NMS-Management, Daten-/Sicherheitskompetenzen) übersetzt und auf Motivations-, Geschäfts- und Anwendungsebene konsistent gespiegelt werden.

Insgesamt beantworten die Szenario-abgeleiteten Anforderungen die in der Literatur identifizierte Lücke einer EA-gestützten NMS-Integration in klassische ÖPNV-Unternehmen, indem sie normative Leitplanken für Verantwortungen, Prozesse, Schnittstellen und Daten liefern und zugleich die Erweiterbarkeit des ITVU-Kernmodells sicherstellen.

Die Integrationsmatrix ist ein normatives Zuordnungsinstrument, das je Prozess/Teilfunktion (Y-Achse) und Integrationsszenario (X-Achse) die Verantwortungslage als Owned (ÖPNV intern), Shared (ÖPNV + Partner) oder Partner (extern) festlegt. Sie schafft Transparenz über Rollen, Schnittstellen, Governance, sichert die Konsistenz zwischen Anforderungen (Kapitel 6), ArchiMate-Designvarianten (Kapitel 7) und Evaluation (Kapitel 8) und bildet damit die verbindliche Brücke vom Szenarienraum zur operativen Ausgestaltung.

Diese Management-Übersicht verdichtet die Szenarien S1–S4 entlang zentraler Integrationsdimensionen (Strategie, Prozesse, Systeme/IT, Personal, Daten, Recht/Regulatorik). Sie zeigt graduelle Verantwortungs- und Architekturverschiebungen (von externer Kopplung bis Vollintegration) und markiert architekturleitende Prinzipien (z.B. OJP-Logik Reservierung ≠ Buchung, domänenbasierte Integration). Die Kurzmatrix dient als Einstieg und Referenzrahmen für die folgenden Detailmatrizen.

Domänen dienen in dieser Dissertation als operative Ordnungsebene (vgl. Kapitel 3.1.2), um Verantwortungen und Integrationspfade Szenario-bezogen zu präzisieren. Die Tabelle 16 bis Tabelle 19 zeigen für jede Domäne und jeden Prozess die Verantwortungsgrade (Owned/Shared/Partner) in den Szenarien S1 bis S4 und bilden so das normative Instrument zur Steuerung der Integration. Dieser Mechanismus macht Variabilität sichtbar (z.B. AO meist Owned; BO Partner/Shared oder Owned) und sichert die methodische Belastbarkeit der in diesem Kapitel abgeleiteten Anforderungen. Die Szenariologik (S1–S4) dient als Referenzrahmen für die spätere Formalisierung in der RACI-Matrix (Kapitel 7.1) und den Variationspunkten (Kapitel 7.2).

Domäne Planung und Ressourceneinsatz

Diese Matrix (vgl. Tabelle 16) ordnet 9 Planungs- und Dispositionsprozesse (u.a. Fahrgastzählung und Analyse, Planung usw.) den Szenarien S1–S4 über die jeweilige Domäne zu. Leitbild: Die AO-Kette bleibt in allen Szenarien überwiegend Owned; BO-Funktionen wandern mit steigendem Integrationsgrad von Partner/Shared (S1/S2/S3) zu Owned (S4). So wird Koordination vs. Durchführung in hybriden Setups (S3) klar trenn- und steuerbar.

Tabelle 16: Domäne Planung und Ressourceneinsatz

Prozess	S1	S2	S3	S4
Fahrgastzählung und Analyse	Owned	Shared	Owned	Owned
Planung AO (Netz/Angebot)	Owned	Owned	Owned	Owned
Planung BO-Verkehr (Gebiete/Zeiten)	Partner	Shared	Owned	Owned
Fahrplanung (AO)	Owned	Owned	Owned	Owned
Umlaufplanung (AO)	Owned	Owned	Owned	Owned
Dienstplanung (AO oder BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Einsatzplanung (rein BO)	Partner	Shared	Shared	Owned
Fahrzeugdisposition (AO oder BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Personaldisposition (AO oder BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)

Legende zu Tabelle 16, Tabelle 17, Tabelle 18 und Tabelle 19: Owned = intern; Shared = gemeinsam; Partner = extern. Szenarien: S1 = Nicht-Integration/Anbindung; S2 = White-Label-Kooperation; S3 = Hybride Integration (Koordination + Teilexekution); S4 = Vollintegration

Domäne Tarif- und Produktmanagement

Für Tarif- und Produktgestaltung (AO), Fahr- und Mietgestaltung (BO) sowie Produktkataloggestaltung (AO und BO) zeigt die Matrix (Tabelle 17), dass AO-Tarife/Produkte in allen Szenarien Owned bleibt, während BO-Preislogiken (Min./Km/Dynamik) von Partner (S1) über Shared (S2) zu Owned (S3/S4) übergehen. Die Kataloghoheit (AO und BO)

ist in S1/S2 Shared und wird ab S3 Owned – Voraussetzung für einheitliche Produkte auf der eigenen Plattform.

Tabelle 17: Domäne Tarif- und Produktmanagement

Prozess	S1	S2	S3	S4
Tarif- und Produktgestaltung (AO)	Owned	Owned	Owned	Owned
Fahr- und Mietgestaltung (BO)	Partner	Shared	Owned	Owned
Produktkataloggestaltung (AO und BO)	Shared	Shared	Owned	Owned

Domäne Betriebslenkung

Die Matrix (Tabelle 18) bewertet Fahrgastinformation (AO und BO), kurzfristige Verkehrsdisposition (AO und BO) und Fahrleistungserbringung (AO und BO). Im AO-Zweig bleiben Disposition/Erbringung/Info in allen Szenarien Owned (ITCS/RBL-geführt). Im BO-Zweig liegen sie in S1–S2 überwiegend beim Partner, in S3 Shared (ÖPNV koordiniert; Teile der Durchführung extern) und in S4 vollständig Owned. Damit werden Echtzeit-Koordination und Servicequalität im On-Demand-Betrieb szenariengerecht verankert.

Tabelle 18: Domäne Betriebslenkung

Prozess	S1	S2	S3	S4
Fahrgastinformation (AO und BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
kurzfristige Verkehrsdisposition (AO und BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Fahrleistungserbringung (AO und BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)

Integrationstabelle: Domäne Vertrieb

Die Matrix (Tabelle 19) umfasst Reiseauskunft und -planung (AO und BO), Buchung – verbindlich (AO und BO), Reservierung – nicht verbindlich (nur BO) sowie Abrechnung intern/extern (AO und BO). Kerngedanke ist die OJP-konforme Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich): In S1–S2 verbleibt BO-Reservierung/Buchung weitgehend beim Partner, in S3–S4 werden beide Owned geführt. Die Abrechnung (intern/extern) ist AO-seitig durchgängig Owned, BO-seitig von

Partner/Shared (S1/S2/S3) zu Owned (S4) ansteigend – mit Shared-Clearing dort, wo Verbund-/Partner-Abgleiche nötig bleiben.

Tabelle 19: Domäne Vertrieb

Prozess	S1	S2	S3	S4
Reiseauskunft und -planung (AO und BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Buchung – verbindlich (AO und BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Reservierung – nicht verbindlich (BO)	Partner	Partner	Owned	Owned
Abrechnung intern (AO)	Owned (AO)/ Partner (BO)	Owned (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)
Abrechnung extern (BO)	Shared (AO)/ Partner (BO)	Shared (AO)/ Shared (BO)	Shared (AO)/ Shared (BO)	Owned (AO)/ Owned (BO)

6.6 Schlüsselanforderungen und Szenario-übergreifende Leitplanken

Die Anforderungsermittlung bündelt einen triangulierten Evidenzkorpus aus systematischer Literaturanalyse (v.a. ITVU-Branchenmodell und VDV-Referenzarchitekturen) und einer Fallstudie zur Integration des BVG-BerlKönig, ergänzt um ein Architektur-Assessment. Damit liegen die Entwurfsleitplanken für das Referenzartefakt über alle Architekturschichten konsistent vor. Funktional verlangt die REA die vollständige Mitführung NMS-spezifischer Fähigkeiten in 6 Kernbereichen:

- (A.1) Erweiterung aller Planungs- und Teilplanungsprozesse um bedarfsorientierte Elemente (inkl. dienst- und einsatzplanerischer Anpassungen),
- (A.2) Ressourceneinsatz für den BO-Anteil (Personal-/Fahrzeugdisposition, inkl. Mietflotten),
- (A.3) Tarif- und Produktmanagement mit Fahrten-/Mietpreisgestaltung und Integration in den Produktkatalog,
- (A.4) betriebliche Steuerung mit kurzfristiger Verkehrsdisposition und Fahrleistungserbringung (inkl. autonomer/selbst erbrachter Leistungen),
- (A.5) vertriebliche Ende-zu-Ende-Prozesse—Reiseinformation/-planung, Buchung, Abrechnung—für AO und BO, sowie

- (A.6) eine zentrale, integrierte digitale Plattform als vertriebliches Kopplungs- und Erlebnissystem („Customer Journey“) für NMS.

Nicht-funktional bestehen folgende Qualitätsanforderungen an die Architektur:

- (B.1) Plattformunabhängigkeit,
- (B.2) Skalierbarkeit (über Unternehmensgrößen hinweg),
- (B.3) Flexibilität (lose Kopplung, Schnittstellen),
- (B.4) Wiederverwendbarkeit von Komponenten,
- (B.5) Interoperabilität (standardisierte Dienste und Schnittstellen) sowie
- (B.6) Verständlichkeit/Vereinfachung.

Zusätzliche, zunächst nachrangig behandelte Querschnittsanforderungen (u.a. Zuverlässigkeit, Überwachung, Test/Protokollierung, Sicherheit) sind aufgrund der modularen Offenheit nachrüstbar.

Szenario-abgeleitete Soll-Anforderungen präzisieren Variationspunkte und Verantwortlichkeiten entlang eines Integrationsraums: S4 (Vollintegration) dient als Basissicht für End-to-End-Fähigkeit im Unternehmen; S1–S3 (Nicht-Integration/Anbindung, White-Label, hybride Koordination/Teilexekution) werden als Delta-Varianten mit klarer „Owned/Shared/Partner“-Zuweisung je Domäne ausgeprägt, was Prozess-, System-, Daten- und Governance-Variabilität nachvollziehbar verortet.

Die Fallstudie belegt zugleich den zentralen Integrationsbedarf (operativ hoher Partnerbeitrag, geringe IT-Kopplung) und begründet damit die Forderung nach einer integrierten Vertriebs-/Clearing-Architektur mit standardisierten Services.

Insgesamt bilden die funktionalen (A.1–A.6; Tabelle 14), nicht-funktionalen (B.1–6; Tabelle 15) und Szenario-bezogenen Anforderungen die normative Grundlage, an der Entwurf, Variantenbildung, Traceability und Evaluation des Artefakts ausgerichtet und in den Folgekapiteln systematisch nachgewiesen werden.

Die in Kapitel 5 beschriebenen Problemfelder – von Kapazitäts- und Infrastrukturengpässen (Kapitel 5.2.1) über ökonomisch-ökologische Restriktionen (Kapitel 5.2.2) bis zu technologischen (Kapitel 5.3.1) sowie organisatorisch-prozessualen Hürden (Kapitel 5.3.2) – wurden in Kapitel 6 in Szenario-basierte Anforderungen übersetzt und konkretisiert (Kapitel 6.5). Das folgende Kapitel operationalisiert diese daten- und semantikbezogen (Kapitel 7.1.6). Die Referenzarchitektur definiert dazu Leitplanken für Interoperabilität und Sicherheit (Kapitel 6.2; Kapitel 6.5), einschließlich der OJP-konformen Trennung von Reservierung und Buchung sowie der Regeln zur Einnahmenaufteilung und zum Clearing.

7 Design und Umsetzung des Artefakts

Auf der in Kapitel 6 konsolidierten Anforderungsbasis aufbauend, skizziert dieses Kapitel die initiale REA zur Integration von NMS in traditionelle ÖPNV-Unternehmen sowie deren Entwicklungsprozess. Der Architekturentwurf berücksichtigt die in Kapitel 6 dargestellten inhaltlichen Anforderungen sowie die Anforderungen an die Architektur selbst.

Im Fokus stehen die Qualitätsanforderungen an das Architekturartefakt – Referenzmodell, Architekturbeschreibung, Framework. Im Sinne der DSR-Evaluation werden hierfür formativ Eigenschaften wie Vollständigkeit, Konsistenz, Verständlichkeit, Nützlichkeit, Erweiterbarkeit und Integrationsfähigkeit geprüft. Der FEDS-Rahmen [52] charakterisiert Evaluationsepisoden entlang der Dimensionen Zweck (formativ und summativ) sowie Paradigma (naturalistisch und künstlich) und führt durch einen Vier-Schritte-Prozess: Ziele definieren, Strategie wählen, zu evaluierende Eigenschaften bestimmen und Episoden designen. Formative naturalistische Episoden – etwa Experten-Reviews, Szenario-basierte Walkthroughs oder Fallstudien – bewerten die Nützlichkeit des Artefakts im realen Nutzungskontext. Künstliche Episoden hingegen liefern kontrollierte Nachweise zur Wirksamkeit (Efficacy) [52, S. 77ff., 80–81]; [46, S. 33–34].

Auf dieser Grundlage entstand ein Architekturansatz, der Fachexperten in der ÖPNV-Branche einen nachweisbaren Mehrwert bieten soll. Zunächst wurde die grundlegende Struktur des Designs festgelegt (Domänenzuschnitt, Views/Viewpoints, Schnittstellenprinzipien), bevor die Bausteine iterativ verfeinert und mit empirischem Feedback rückgekoppelt wurden.

Kapitel 8 erläutert die Evaluation der entwickelten Architektur, die Evaluationsphasen sowie den damit verbundenen iterativen Prozess zwischen Anforderungen, Design und Evaluation. Zudem beschreibt es die Architekturstruktur, die sich über alle Evaluationsphasen hinweg nur rudimentär verändert hat.

7.1 Struktur der REA: Variabilitäts- und Traceability-Konzept

Diese Arbeit operationalisiert das Governance-Design der REA mithilfe einer prozessgenauen RACI-Matrix³⁴ für jedes Szenario (S1–S4) und alle 4 Domänen. Die Matrix zeigt Organisationsträger (intern/Partner/beides) und AO/BO je Zelle, ist auf den Domänen- und Prozess- (PD) Katalog (Anhang C und D) rückführbar und verankert die in den Ka-

³⁴ Die RACI-Matrix (Responsible, Accountable, Consulted, Informed) stellt ein anerkanntes Instrument zur systematischen Abgrenzung und Zuordnung von Verantwortlichkeiten innerhalb organisatorischer Strukturen und Prozesse dar. Sie dient der eindeutigen Definition von Rollen entlang der Prozesskette, wodurch Schnittstellenkonflikte, Verantwortungsüberschneidungen und Kommunikationsdefizite reduziert werden können. In der wissenschaftlichen Literatur wird RACI als Bestandteil des Verantwortungs- und Governance-Managements verstanden, insbesondere im Kontext komplexer interdisziplinärer Organisations- und IT-Systeme. Die Anwendung der RACI-Logik unterstützt Transparenz wie Nachvollziehbarkeit von Entscheidungswegen und fördert die Kohärenz zwischen strategischer und operativer Verantwortungsebene (vgl. Crawford, 2005; Project Management Institute, 2021).

piteln 5.5 und 6.5 abgeleiteten Fähigkeiten und Anforderungen. Tabelle 20 dient als Referenz für die Domänenkapitel und die Delta-Sichten.

Die REA gliedert sich zugunsten eines umfassenden Ansatzes und zur Beherrschung der Komplexität in die folgenden Bereiche:

1. **Strategisch-motivatorischer Bereich (Kapitel 7.1.7):** Dieser Bereich zeigt die Abhängigkeiten zwischen Anspruchsgruppen/Stakeholdern und den Fähigkeiten/Capabilities eines ÖPNV-Unternehmens. Er verankert strategische Treiber wie First-/Last-Mile, Nachfrageflexibilisierung oder Sicherheits- und KRITIS-Anforderungen in fähigkeitsbasierten Sollzuständen (u.a. digitale Mobilitätsplattform, NMS-Tarif-/Preisgestaltung, Partner-/SLA-Management, Daten-/API-Governance).
2. **Operativer Bereich (Kapitel 7.1.8):** Hier werden die Zusammenhänge zwischen Geschäfts- und Anwendungsebene (Business-Services/-Prozesse, Application-Services/-Komponenten) dargestellt. Hierzu gehören integrations- und sicherheitsrelevante Technologieanker wie API-Gateway/IAM, Data-Broker/Datendrehscheibe, Event-Streaming, ITCS/OBU, SIEM/HSM.
3. **Verbindung zwischen strategischen und operativen Ebenen (Kapitel 7.1.7):** Dieser Bereich beschreibt die verbindenden Mechanismen zwischen strategisch-motivatorischer und operativer Ebene der REA.

Die entwickelte Architektur erläutert den ersten und zweiten Bereiche in Unterkapiteln: Kapitel 7.4.2 konkretisiert die Geschäfts- und Anwendungsebene, Kapitel 7.4 verdichtet die erhobenen Anforderungen in Form eines ersten Entwurfs des Artefakts. Der dritte Bereich verbindet die unter 1. und 2. vorgestellten Architekturbereiche über eine durchgängige Traceability-Kette (Requirement → Capability → Service/Prozess → IT-Bau-stein), die strategische Ziele in operatives Handeln überführt.

Die (oben erleuterte) Dreiteilung (1., 2. und 3. Bereich) bildet ein Grundprinzip der REA.

Auf Basis der Szenarien S1–S4 (Kapitel 5.5) und der daraus abgeleiteten Anforderungen (Kapitel 6.5) präzisiert dieses Kapitel die REA methodisch: S4 (Vollintegration) bildet die konsistente Basissicht mit End-to-End-Fähigkeit, S1–S3 werden als Delta-Sichten dar-übergelegt. Die Szenarien steuern die Variabilität: Verantwortungsgrenzen zwischen ÖPNV-Unternehmen und Partnern sind je Prozess und nach Angebots- (AO) bzw. Bedarfsorientierung (BO) klar definiert. Die prozessuale Struktur folgt den 4 Fachdomänen Planung & Ressourceneinsatz, Tarif- & Produktmanagement, Betriebslenkung sowie Vertrieb (inkl. Abrechnung).

Das Governance-Design wird über eine prozessgenaue RACI-Matrix je Szenario (S1–S4) operationalisiert. Die Matrix weist Organisationsträger (intern/Partner/beides) und AO/BO je Zelle aus, ist auf den Domänen-/Prozess-Katalog (IDs 1–20) rückführbar und dient als Referenz für Domänenkapitel und Delta-Sichten (Kapitel 7.3). Methodisch stützt sich das Modell auf die in der REA beschriebenen Prozessartefakte, die Evaluation mit Praktikern (BVG, BSAG, SWM, VDV) sowie die zuvor etablierten AO/BO-Unterschiede.

So lassen sich Variationspunkte in Prozessen, Systemen, Daten und Governance präzise verorten und mit der Evaluation in Kapitel 8 verknüpfen.

Anzumerken sei im Voraus, dass die in diesem Kapitel definierten Artefakte (Steckbriefe) die atomaren Bausteine der Architektur bilden. Ihre strukturelle Vernetzung sowie die formalen Abhängigkeitsregeln (z.B. zwischen Constraints und Variationspunkten) werden im Rahmen der Lösungspräsentation in Kapitel 9.3.1 in einem konsolidierten Inhaltsmetamodell zusammengeführt. Die folgende Darstellung fokussiert daher zunächst auf die inhaltliche Definition der Einzelkomponenten.

7.1.1 Variabilität und Verantwortungsmodell

Dieses Unterkapitel präzisiert das in Kapitel 7.1 eingeführte Governance-Design der REA durch ein prozessgenaues RACI-Modell für jedes Szenario (S1–S4) und alle Prozesse der 4 Domänen (Planung und Ressourceneinsatz, Tarif- und Produktmanagement, Betriebslenkung, Vertrieb). Das in Kapitel 6.5 domänenbasiert operationalisierte Verantwortungsmodell wird in Tabelle 20 als RACI-Matrix je Szenario formalisiert. Die untenstehende Matrix (Tabelle 20) weist zusätzlich den Organisationsträger (intern, Partner, beides) und die Verkehrsorientierung (AO/BO) je Zelle aus. Sie ist traceable zum DP-Katalog (DP-IDs 1–20) und verankert die in den Kapiteln 5.5 und 6.5 abgeleiteten Anforderungen; nur tatsächlich genutzte RACI-Rollen werden ausgewiesen (kein Zwang zu allen Buchstaben). Damit verknüpft die Matrix das Governance-Design samt RACI mit Architekturkonstrukten (Schnittstellen, Daten, Security). Sie sichert die Nachvollziehbarkeit von Anforderungen zu operativen Elementen und bildet Leitplanken wie Security-Segmentierung sowie Daten- und Clearing-Verantwortung ab. Die Matrix der Tabelle 20 dient damit als verbindliche Referenz für Domänen, Prozesse und Delta-Sichten und als Grundlage für die Variantenbildung in Kapitel 7.2.

Tabelle 20: RACI je Prozess und Szenario (S1–S4) inkl. Organisationsträger

Prozess	S1	S2	S3	S4
DP-I Planung und Ressourceneinsatz				
DP-1 Fahrgastzählung & Analyse	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner,	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: R=A=Intern, C=Partner, I=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-2 Planung (AO)	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: —	AO: R=A=Intern, BO: —
DP-3 Planung (BO)	AO: — BO: R=A=Partner	AO: — BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: — BO: R=A=Intern, C=Partner	AO: — BO: R=A=Intern

Prozess	S1	S2	S3	S4
DP-4 Fahrplanung (AO)	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern
DP-5 Umlaufplanung (AO)	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —
DP-6 Dienstplanung (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern, BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern, BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-7 Einsatzplanung (BO)	BO: R=A=Partner	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-8 Fahrzeugdisposition (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner,	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-9 Personaldisposition (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-II Tarif- und Produktmanagement				
DP-10 Tarif- & Produktgestaltung (AO)	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —	AO: R=A=Intern BO: —
DP-11 Fahr- & Mietgestaltung (BO)	BO: R=A=Partner	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=A=Intern, C=Partner	BO: R=A=Intern
DP-12 Produktkataloggestaltung (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern
DP-III Betriebslenkung				
DP-13 Fahrgastinformation (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: R=A=Intern, C=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern
DP-14 Kurzfristige Verkehrsdisposition (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-15 Fahrleistungserbringung (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner

Prozess	S1	S2	S3	S4
DP-IV Vertrieb				
DP-16 Reiseauskunft & -planung (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern, C=Partner BO: R=A=Intern, C=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern
DP-17 Buchung – verbindlich (AO, BO)	AO: R=A=Intern BO: R=A=Partner	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern, I= —	AO: R=A=Intern BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	AO: R=A=Intern BO: R=A=Intern, C=Partner
DP-18 Reservierung – nicht verbindlich (BO)	BO: R=A=Partner	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=A=Intern C=Partner
DP-19 Abrechnung intern (AO)	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern	AO: R=A=Intern
DP-20 Abrechnung extern (BO)	BO: R=A=Partner	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=Partner, A=Intern, C=Intern	BO: R=A=Intern, C=Partner

In Unterabschnitt (A.) werden die Gestaltungsprinzipien, die sich aus der Analyse der Tabelle 20 ergeben, dargestellt.

Gestaltungsprinzipien des RACI-Modells

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus Tabelle 20 in Form von Gestaltungsprinzipien diskutiert:

1. Primat der Aufgabenträgerschaft und Konzessionsverantwortung:

Accountability (A) für regel- und sicherheitskritische AO-Prozesse (z.B. Netz-/Fahrplanung, Betriebslenkung, interne Abrechnung) verbleibt in allen Szenarien bei der internen Organisation, auch wenn Responsibility (R) in BO-Teilprozessen temporär bei Partnern liegen kann (S2/S3). Dies folgt der in Kapitel 5.5 beschriebenen Aufgabenlogik klassischer ÖPNV-Unternehmen und der in Kapitel 6.5 formulierten Compliance-Anforderungen.

2. AO-führt, BO-ergänzt:

Die Reihenfolge „AO planen → BO ergänzen/andocken“ ist prozessual verbindlich (u.a. Netz- vor BO-Gebietsplanung; Fahr-/Umlaufplanung vor BO-Einsatzplanung). Daraus ergibt sich in der Matrix regelmäßig R/A Intern für AO-Prozesse und R Partner, A Intern für BO-Prozesse in S2 (White-Label) bzw. R Beides, A Intern in S3 (Hybrid). Diese Priorisierung wurde in den Expertengesprächen expliziert (Netz- → Fahr- → Umlaufplanung; BO nachgelagert).

3. Kritikalitäts- und Sicherheitssegmentierung:

KRITIS-nahe Betriebs- und Leitstellenprozesse werden in der Governance nicht übergreifend „monolithisch“ gekoppelt; das RACI spiegelt dies, indem A/R hierfür Intern (auch in S2) bleibt und externe Partner höchstens Consulted/Informed sind (Segmentierung und „kein universeller ESB über alles“ als Sicherheitsprinzip).

4. Trennung Reservierung vs. Buchung:

In der Vertriebsdomäne gilt Szenario-übergreifend die EU-konforme Trennung zwischen nicht bindender Reservierung und verbindlicher Buchung; die Matrix weist hierfür in S2/S3 je nach White-Label- bzw. Hybrid-Ausprägung A Intern bei Buchung und R Partner bei BO-Reservierungen aus (OJP-Logik).

5. Make-or-Buy als Variabilitätshebel:

Die RACI-Zuweisungen operationalisieren die in Kapitel 5.5 und 6.5 beschriebenen Make-or-Buy-Entscheidungen: In S2/S3 wird R für BO-Teilexekutionen bewusst extern vergeben, während A für Leistungsversprechen, SLA und Clearing intern verbleibt; S4 internalisiert R/A vollständig.

Szenariologik: RACI-Schwerpunkte je Szenario

Im Folgenden werden die durch das RACI-Modell identifizierte Schwerpunkte je Szenario untersucht und dokumentiert:

- S1 (Nicht-Integration/Anbindung):

AO-Prozesse: R/A Intern; BO-Prozesse (falls parallel durch Dritte erbracht) liegen außerhalb der REA-Governance (R/A Partner), das ÖPNV-Unternehmen ist höchstens I/C (Schnittstellen, Anschlussinformationen). Vertrieblich verantwortet das Unternehmen nur AO-Buchungen, BO-Vorgänge verbleiben beim Partner.

- S2 (White-Label-Kooperation):

Das Unternehmen verantwortet das Gesamt-Leistungsversprechen gegenüber Fahrgästen (A Intern), während die BO-Erbringung und BO-Tarifierung/Mietpreisbildung operativ bei Partner (R) liegt. AO bleibt R/A Intern. Informations- und Dispositionsprozesse sind R Beides (AO intern; BO partnerseitig), jeweils mit A Intern.

- S3 (Hybride Integration/Koordination & Teilexekution):

Die interne Organisation koordiniert und exekutiert Teile des BO selbst (R Beides; A Intern). Die Matrix weist in Planung, Disposition, Fahrgastinformation und Buchung häufig R Beides aus, um Koordinations- und Kopplungspflichten (Anschlussqualität, Feeder-Logik) abzubilden.

- S4 (Vollintegration):

Durchgehende Internalisierung: R/A Intern in allen Prozessen (AO und BO). Partner erscheinen, wenn überhaupt, als Consulted (z.B. Hersteller/Plattform-Zulieferung), nicht als Verantwortliche.

Domänenspezifische Interpretation der RACI-Matrix

In Tabelle 21 werden die RACI-Ergebnisse aus Tabelle 20 zusammengefasst und domänenspezifisch je auffälligem Szenario mit Anmerkungen aufbereitet.

Tabelle 21: Zusammenfassung RACI-Ergebnisse

Prozess	Erkenntnisse und Anmerkungen
DP-1 Fahrgastzählung & Analyse	S1: R/A Intern (AO); BO-Datenquellen nur C/I. S2/S3: R Beides; A Intern – Partner liefert BO-Nutzungsdaten, interne Analytics verantwortet die Gesamtinterpretation (Bias-Kontrollen, Kapitel 6.5). S4: R/A Intern.
DP-2 Planung (AO) (Netz/Angebot)	Durchgehend R/A Intern (S1–S4). BO-Partner maximal C (Anschluss-/Feederbedarfe).
DP-3 Planung (BO) (Gebiete/Zeiten)	S1: R/A Partner (außerhalb). S2: R Partner; A Intern (White-Label). S3: R Beides; A Intern (gemeinsame Gebiets- und Zeitfensterdefinition). S4: R/A Intern.
DP-4 Fahrplanung (AO)	Durchgehend R/A Intern (S1–S4). BO-Partner maximal C (Anschluss-/Feederbedarfe).
DP-5 Umlaufplanung (AO)	Durchgehend R/A Intern (S1–S4). BO-Partner maximal C (Anschluss-/Feederbedarfe).
DP-6 Dienstplanung (AO, BO)	AO-Anteile: stets R/A Intern. BO-Anteile: S1 R/A Partner, S2 R Partner; A Intern, S3 R Beides; A Intern, S4 R/A Intern. Damit wird die in Kapitel 6.5 geforderte Anschlussqualität (zeitlich-räumliche Synchronisierung AO ↔ BO) organisatorisch abgesichert.
DP-7 Einsatzplanung (BO)	BO-Anteile: S1 R/A Partner, S2 R Partner; A Intern, S3 R Beides; A Intern, S4 R/A Intern.
DP-8 Fahrzeugdisposition (AO, BO)	AO-Anteile: stets R/A Intern. BO-Anteile: S1 R/A Partner, S2 R Partner; A Intern, S3 R Beides; A Intern, S4 R/A Intern.

	Damit wird die in Kapitel 6.5 geforderte Anschlussqualität (zeitlich-räumliche Synchronisierung AO ↔ BO) organisatorisch abgesichert.
DP-9 Personaldisposition (AO, BO)	AO-Anteile: stets R/A Intern. BO-Anteile: S1 R/A Partner, S2 R Partner; A Intern, S3 R Beides; A Intern, S4 R/A Intern. Damit wird die in Kapitel 6.5 geforderte Anschlussqualität (zeitlich-räumliche Synchronisierung AO ↔ BO) organisatorisch abgesichert.
DP-10 Tarif- & Produktgestaltung (AO)	S1–S4: R/A Intern (Konzessions- und Verbundlogik).
DP-11 Fahr- & Mietgestaltung (BO)	S1: R/A Partner (keine Integration). S2: R Partner; A Intern (White-Label-Preislogik). S3: R Beides; A Intern (Leitplanken-Pricing; Algorithmenkompetenz intern aufbauen). S4: R/A Intern.
DP-12 Produktkataloggestaltung (AO, BO)	S1: AO R/A Intern; BO R/A Partner. S2: R Beides; A Intern (einheitliches Marken-/Katalogversprechen). S3: R Beides; A Intern. S4: R/A Intern.
DP-13 Fahrgastinformation (AO, BO)	S1: AO R/A Intern; BO-Feeds I/C. S2/S3: R Beides; A Intern (End-to-End-Verantwortung für Echtzeit- Konsistenz, inkl. Störungsinformation). S4: R/A Intern.
DP-14 Kurzfristige Verkehrsdisposition (AO, BO)	S1: getrennte Disposition (R/A Intern AO; R/A Partner BO). S2: R Beides; A Intern (Koordination an Schnittstellen). S3: R Beides; A Intern mit stärkerer interner Koordination. S4: R/A Intern. Die Sicherheits- und KRITIS-Anforderungen begründen die durchgehende A Intern.
DP-15 Fahrleistungserbringung (AO, BO)	AO stets R/A Intern; BO gemäß S1–S4 sukzessive von R/A Partner (S1) über R Partner; A Intern (S2), R Beides; A Intern (S3) zu R/A Intern (S4).
DP-16 Reiseauskunft & -planung (AO, BO)	S1: AO R/A Intern, BO I/C. S2/S3: R Beides; A Intern (einheitliche Oberfläche, Multi-Provider-Routen). S4: R/A Intern.

DP-17 Buchung – verbindlich (AO, BO)	Trennung zu IV.3 (Reservierung) beachten: S2/S3 A Intern (Gesamterlebnis/Haftung), R Beides (operative BO-Buchung beim Partner möglich), S4 R/A Intern. (Trennung zu Reservierung beibehalten.)
DP-18 Reservierung – nicht verbindlich (AO)	S1: R/A Intern S2/S3 A Intern, R Intern, Partner C/I; S4 R/A Intern. Keine Dispositionsauslösung (Komfort/Prognose). <i>Hinweis: „Reservierung verbindlich (BO)“ ist funktional Buchung und wird nicht als eigene Zeile geführt; sie geht in IV.2 (BO) auf.</i>
DP-19 Abrechnung intern (AO)	S1–S4: R/A Intern.
DP-20 Abrechnung extern (BO)	S1 R/A Partner (außerhalb); S2 R Partner; A Intern (White-Label-Clearing), S3 R Beides; A Intern (gemeinsame Datengrundlage/Clearing), S4 R/A Intern. <i>Die Interviews (insb. Interview Evaluationsepisode: III. und V.) betonen hierfür die Notwendigkeit einer standardisierten Datenhaltung (Datenpool/Data Broker bzw. eines zentralen Dienstleisters) statt vieler bilateraler Schnittstellen.</i>

Die Anmerkungen zeigen Muster der Wiederholung für die Implementierung der Szenarien auf und die Szenarien werden im Verlauf der Arbeit weiter untersucht.

Implikationen für Governance, Risiko und Architekturkopplung

Im Folgenden werden 3 Beispiele für Implikationen für die Governance bzw. Risiken für die Kopplung der Architektur angezeigt:

1. SLA-Kaskaden und Haftungslogik. In S2/S3 ist A Intern für kundenseitige Leistungsversprechen zu hinterlegen; R Partner wird über SLA-Kaskaden (z.B. Pünktlichkeit in Feeder-Fenstern, Storno-/No-Show-Regeln) abgeleitet. Dies adressiert die in Kapitel 6.5 geforderte SLA-Erfüllung und Anschlussqualität Szenario-übergreifend.
2. Security by Segmentation. Die RACI-Zuordnung spiegelt Domänenseparierung und Rechte-/Rollenmodelle (KRITIS). Verantwortlichkeiten in Leitstelle/Disposition bleiben A Intern; Partnerzugriffe sind C/I und technisch logisch segmentiert.
3. Daten- und Clearingkompetenz. Für IV.5 (Abrechnung extern) und I.1 (Fahrgastzahlung) entstehen in S2/S3 erhöhte Anforderungen an Datenqualität und Standardisierung.

rung (Transmodel/OJP-Kontexte; Revenue-Sharing-Genauigkeit). Die Interviews befürworten einen Datenpool/Broker als Architekturprinzip, was die in der RACI-Matrix verankerte A Intern für Aggregation/Validierung untermauert.

Zusammenfassung

Die RACI-Matrix fungiert im REA-Kontext als operatives Kopplungsinstrument zwischen Governance und Architektur: Sie ermöglicht Szenario-Switching (z.B. S2 → S3, Pilot → Regelbetrieb) durch rasches „Durchkonfigurieren“ von Zuständigkeiten; jede RACI-Zelle ist traceable auf die in Kapitel 6.5 formulierten Anforderungen (u.a. Trennung Buchung/Reservierung, Anschlussqualität, Security) und auf die in Kapitel 5.5 begründeten Fähigkeiten. Die Zuordnungen sind mit ITVU/REA kompatibel (AO-Kern intern, BO variabel integrierbar) und wurden in der Fallarbeit BVG/Jelbi validiert.

Tabelle 20 operationalisiert so die Integrationsvariabilität der REA: AO bleibt führend und accountable, BO wird abgestuft (S1 → S4) integrierbar und in S2/S3 koordiniert verantwortet (A intern, R Partner/„Beides“). Damit verbindet das RACI-Modell organisatorische Verantwortung mit architektonischer Kopplung (Schnittstellen-, Daten-, Sicherheitsprinzipien) und adressiert die in Kapitel 6.5 geforderten Utility/Quality-Ziele—Interoperabilität, SLA-Erfüllung, Security, Revenue-Sharing-Genauigkeit und Anschlussqualität – Szenario-übergreifend und prozessscharf.

Hinweis zur Leseführung: Für Detailausprägungen je Prozess wird auf Tabelle 20 verwiesen; die dortige Kennzeichnung Intern/Partner/Beides sowie (AO/BO) ist als verbindlicher Teil der REA Instanziierung zu verwenden und in die organisationsspezifischen Rollen- und Datenhoheitskonzepte zu überführen (Kapitel 7.1 und 7.2).

7.1.2 Traceability über Domänen und Prozesse

Um eine durchgängige Nachverfolgbarkeit (Traceability) sicherzustellen, werden sämtliche Architekturelemente der REA direkt mit dem in Anhang C definierten Domänen- und Prozess-Katalog verknüpft (Domänen-Prozess-Katalog, 1–20). In der Basissicht (S4) sind daher jedem Business-Service oder -Prozess, jedem Application-Service oder -Komponentenbaustein sowie jedem Daten- oder Technologieanker die zugehörigen Prozess-IDs zugeordnet.

Beispiele:

- DP-17 Buchung (AO/BO) → Business Service „Buchung“, Application Service „Booking API“/Komponente „Booking Core“, Datenobjekt „Booking“;
- DP-14 kurzfristige Disposition (AO/BO) → Business Process „Kurzfrist-Dispo“, Application Service „Dispatch Orchestrator“, Event-Strom „TripEvents“.

Die lückenlose Nachvollziehbarkeit wird in der Tabelle 22 domänen- bzw. prozessorientiert (DP) dargestellt.

Tabelle 22: Crosswalk DP (Basissicht S4/alle DPs)

DP	Business-Prozess	Application Service (Kern)	Application Component (Kern)	(Standard-) Datenanker (Kern)
I. Planung & Ressourceneinsatz: DP-1...DP-9				
1	Fahrgastzählung & Analyse	AS-01-A	AP-1	(VDV 457) DO-1, DO-3
2	Planung (AO)	AS-02-A	AP-2	(NeTEx) DO-4, DO-20
3	Planung (BO) (Gebiete/Zeiten)	AS-03-A	AP-3	DO-6, DO-102
4	Fahrplanung (AO)	AS-03-B	AP-3	(VDV 452/NeTEx) DO-8
5	Umlaufplanung (AO)	AS-04-A	AP-4	(VDV 452) DO-10
6	Dienstplanung (AO/BO)	AS-05-A	AP-5	(VDV 455) DO-14
7	Einsatzplanung (BO)	AS-14-A	AP-7	(VDV 459) DO-24, DO-15
8	Fahrzeugdisposition (AO/BO)	AS-07-A	AP-7	(MQTT) DO-68, DO-25
9	Personaldisposition (AO/BO)	AS-06-A	AP-6	(REST - intern) DO-72
II. Tarif- und Produktmanagement: DP-10...DP-12				
10	Tarif- u. Produktgestaltung (AO)	AS-10-A	AP-10	(VDV-KA) DO-7, DO-42
11	Fahr- und Mietgestaltung (BO)	AS-10-B	AP-10	(REST) DO-43, DO-107
12	Produktkataloggestaltung (AO/BO)	AS-10-C	AP-10	DO-61, DO-44
III. Betriebslenkung: DP-13...DP-15				
13	Fahrgastinformation (AO/BO)	AS-14-B	AP-14	(SIRI, GTFS-RT) DO-47, DO-52
14	Kurzfristige Verkehrsdisposition (AO/BO)	AS-14-C	AP-14	(TOMP) DO-69
15	Fahrleistungserbringung (AO/BO)	AS-15-A	AP-15	(MQTT, GPS) DO-71, DO-24

DP	Business-Prozess	Application Service (Kern)	Application Component (Kern)	(Standard-) Datenanker (Kern)
IV. Vertrieb: DP-16...DP-20				
16	Reiseauskunft & Reiseplanung (AO/BO)	AS-17-A	AP-17	(OJP/TRIAS) DO-101
17	Buchung (AO/BO, verbindlich)	AS-18-B	AP-18	(OSDM) DO-105
18	Reservierung (BO, unverbindlich)	AS-18-A	AP-18 (ggf. via AP-20)	(OJP/TRIAS/TOMP) DO-104
19	Abrechnung intern (AO/BO)	AS-19-A	AP-19 (ggf. via AP-20)	(PCI-DSS) DO-86
20	Abrechnung extern/Clearing (AO/BO)	AS-20-A	AP-19 & AP-20	(CSV/EDIFACT) DO-111

7.1.3 Integrations- und Sicherheitsleitbild

Die operative Ausgestaltung folgt einem domänen- und zonenorientierten Integrationsprinzip (siehe Kapitel 5.3 und Kapitel 6: Resilienz- und Sicherheitsziele) mit strikter Trennung OT-naher Betriebsdomänen (insb. DP-1–9, DP-13–15) von IT-/Vertriebsdomänen (insb. DP-16–20) sowie einer Partner-Zone. Kopplungen erfolgen ausschließlich über API-Gateway/IAM, Event-/Streaming-Backbone und Data-Broker (DMZ); ein durchgehender ESB wird vermieden (vgl. Abbildung 41), um Angriffsfläche und Audit-Scope zu reduzieren.

Abbildung 24 (Interface-Contracts) operationalisiert dieses Prinzip für alle DPs 1–20: je DP werden der zugehörige Application Service (AS) (vgl. Anhang H), die Applikationen (Anhang D), der Schnittstellentyp (Sync/Event/Batch), die Kern-DO/EV (Anhang) sowie der Standardanker konsolidiert. Damit ist die DP-übergreifende Schnittstellenlandschaft (u.a. SIRI, TOMP TripEvents, OJP/TRIAS, OSDM/Custom, CSV/ EDIFACT (T+1)) eindeutig verortet und als Grundlage für Implementierung, Test und Monitoring nutzbar.

Tabelle 23: Interface-Contracts (DP-1...DP-20)

DP	Application Service (AS) (Anhang H)	Schnittstelle Provider (AP)→ Consumer (AP)	Typ	Payload: Kern-Datenobjekte (DO) & Events (EV)	Format/ Standard
1	Zähldaten-Export/Auslastungsdienst (AS-01-A)	AP-1 (AFZS) → AP-2/AP-3	Event/ Batch	DO-1, DO-3, DO-41 EV-1 (CountsUpdated), EV-2 (ForecastUpdated)	VDV 457/ JSON

DP	Application Service (AS) (Anhang H)	Schnittstelle Provider (AP)→ Consumer (AP)	Typ	Payload: Kern-Datenobjekte (DO) & Events (EV)	Format/ Standard
2	Angebotsvorgaben-Dienst (AS-02-A)	AP-2 (Planung) → AP-3	Batch	DO-4 (Netz), DO-20 (Regeln) EV-3 (OfferPlanPublished), EV-4 (OfferPlanUpdated)	Proprietär/ NeTEx
3	Fahrplan-Export/Netzobjekt-Katalog (AS-03-A)	AP-3 (Fahrplan) → AP-14/AP-7	Event	DO-6 (ServiceZones), DO-102 (Kapazität) EV-5 (SlotsPublished), EV-6 (SlotUpdated)	Event-Backbone (Avro/ JSON)
4	Fahrplan-Export (Publikation) (AS-03-B)	AP-3 (Fahrplan) → AP-13/AP-11	Batch	DO-8 (Fahrplan), DO-4 (TripPattern) EV-7 (TimetablePublished), EV-8 (TimetableUpdated)	VDV 452/ NeTEx (Eur.Profile)
5	Umlauf-Export (AS-04-A)	AP-4 (Umlauf) → AP-5/AP-14	Batch	DO-10 (Umlauf/Block) EV-9 (UmlaufPublished), EV-10 (UmlaufUpdated)	VDV 452/ Proprietär
6	Dienstplan-Export (Roster) (AS-05-A)	AP-5 (Dienst) → AP-6/AP-14	Batch/ Sync	DO-14 (Dienst), DO-17 (Verfügbarkeit) EV-11 (RosterPublished), EV-12 (RosterChanged)	VDV 455/ REST
7	Realtime-Feed (ITCS-Soll)/ Deployment Plan API (AS-14-A)	AP-14 (ITCS) → AP-7/AP-6	Sync	DO-15 (PersonalSoll), DO-24 (Fahrt-Soll) EV-13 (DeploymentIssued), EV-14 (DeploymentUpdated)	VDV 459/ REST

DP	Application Service (AS) (Anhang H)	Schnittstelle Provider (AP)→ Consumer (AP)	Typ	Payload: Kern-Datenobjekte (DO) & Events (EV)	Format/ Standard
8	Zuteilungs- dienst/Dis- patch-API (AS-07-A)	AP-7/AP-14 → AP-8/AP-15	Sync/ Event	DO: DO-68 (Dispo- Order), DO-25 (Fz- Status) EV-15 (Dis- patchOrderIssued), EV-16 (VehicleSta- teChanged)	VDV 459/ MQTT
9	Einsatzstatus- Dienst (Crew) (AS-06-A)	AP-6/AP-14 → AP-15/EXT	Sync	DO: DO-72 (Fahr- erstatus), DO-21 (Tausch) EV-17 (CrewAssig- ned), EV-18 (Crew- StateChanged)	Proprietär/ REST
10	Tarif-/Produkt- API (AS-10-A)	AP-10 (TPDB) → AP-16/AP-18	Batch/ Sync	DO-7 (Struktur), DO-42 (Tarifdaten) EV-19 (FareRule- Changed), EV-20 (ProductUpdated)	VDV-Kern- applikation/ XML
11	Entitlement- Regeln/BO Pri- cing (AS-10-B)	AP-10 (Pricing) → AP-16/AP-18	Sync	DO-43 (Preise), DO-107 (Entitle- ments) EV-21 (PricingRu- leChanged), EV-22 (QuoteCreated)	REST (JSON)
12	Produkt-Kata- log/MDM- Service (AS-10-C)	AP-10 (MDM) → AP-16/AP-17	Sync/ Batch	DO-44 (Produkte), DO-61 (Metadaten) EV-23 (Catalog- Published), EV-24 (OfferingChanged)	REST/ (XML)
13	DFI-Publika- tionsdienst/ Realtime-Feed (AS-14-B)	AP-14/AP-11 → EXT (Apps/Web)	Event/ Sync	DO-52 (Störung), DO-47 (ETA), DO- 70 (FGI) EV-25 (Service- Alert), EV-26 (Pre- dictionUpdated)	SIRI (ET/ SX/VM)/ GTFS-RT

DP	Application Service (AS) (Anhang H)	Schnittstelle Provider (AP)→ Consumer (AP)	Typ	Payload: Kern-Datenobjekte (DO) & Events (EV)	Format/ Standard
14	Störungsdienst/Dispatch-Events (AS-14-C)	AP-14 ↔ AP-15	Event/ Sync	DO-69 (Incident), DO-68 (Entscheidung) EV-27 (Disruption-Detected), EV-28 (DispatchDecision)	TOMP (TripEvents)/ VDV 453
15	Positions-/Event-Dienst (OBU) (AS-15-A)	AP-15 (OBU) → AP-14/EXT	Sync/ Event	DO-71 (GPS), DO-24 (Ist-Fahrt) EV-29 (TripEvent), EV-30 (Vehicle-Telemetry)	MQTT/ VDV 454 (OT-Integr.)
16	Booking-API (Commit) (AS-18-B)	AP-17 (RAS) → AP-16/EXT	Sync	DO-101 (Trip/Offer), DO-98 (Route) EV-31 (Journey-Calculated), EV-32 (OfferUpdated)	OJP/ TRIAS
17	Booking-API (Commit) (AS-18-B)	AP-18 (Buchung) → AP-16/AP-19	Sync	DO-105 (Booking), DO-88 (Ticket) EV-33 (Booking-Confirmed), EV-34 (TicketIssued)	OSDM/ REST
18	Booking-API (Reservation-Part) (AS-18-A)	AP-18 (Buchung) ↔ AP-16	Sync	DO-104 (Reservierung/Token) EV-35 (ReservationCreated), EV-36 (ReservationExpired)	OJP/ TRIAS/ TOMP
19	Authorize/Capture/Refund-APIs (AS-19-A)	AP-19 (Payment) → AP-18/ AP-20	Sync/ Event	DO-86 (Zahl Daten), DO-115 (Logs) EV-37 (Payment-Authorized), EV-38 (PaymentCaptured)	REST (PCI-DSS)

DP	Application Service (AS) (Anhang H)	Schnittstelle Provider (AP)→ Consumer (AP)	Typ	Payload: Kern-Datenobjekte (DO) & Events (EV)	Format/ Standard
20	Settlement-Reports/Clearing-Dienst (AS-20-A)	AP-19/AP-20 → EXT (Partner)	Batch	DO-111 (Settlement), DO-46(Split) EV-39 (Clearing-Settled), EV-40 (Reconciliation-Delta)	CSV/ EDIFACT

Legende zu Tabelle 23 und Tabelle 24: AS (Application Service) = konkreter Dienstbaustein gemäß Anhang H; AP (Application Component) = verantwortliche Softwarekomponente (Provider) bzw. Konsument gemäß Anhang D; Payload (DO/EV) = Definiert den inhaltlichen „Vertrag“ der Schnittstelle (welche Datenobjekte und Ereignisse übertragen werden), konsistent mit Tabelle 24; Format = präferierter Integrationsstandard für diese Schnittstelle in der Zielarchitektur (S3/S4).

7.1.4 Semantik, Daten- und Ereignismodelle (DP-basiert).

Um die semantische Kohärenz zu wahren, werden für jede DP die wesentlichen Datenobjekte sowie die dazugehörigen Events/Topics dokumentiert und mit einem Standard-/Schnittstellenanker (sofern vorhanden) verknüpft. Die konsolidierte Übersicht in Tabelle 24 fasst damit pro DP die Kern-DOs, die Kern-Events/Topics und die relevanten Standards zusammen. Diese Übersicht bildet die Grundlage für eine einheitliche Publikations- und Integrationslogik (z.B. Event-Backbone/Streaming, APIs/Exports), für Monitoring (Topic-/Event-basierte Observability) sowie für die Ableitung von Testfällen und die Evaluation (z.B. Zuordnung von KPIs/Qualitätskriterien wie Latenz, Vollständigkeit und Idempotenz auf die in Tabelle 24 ausgewiesenen Kernobjekte und Ereignisse).

Tabelle 24: Daten- & Ereignismodell je DP (DP-1...DP-20)

DP	Datenobjekte (DO)	Kern-Events (EV)	Schnittstellenanker
1	DO-1 Fahrgastzahlen- daten DO-3 Beförderungsnach- fragedaten DO-41 Prognosedaten	EV-1 CountsUpdated EV-2 ForecastUpdated	interne Datenplattform; ggf. VDV-/AVL-Quellen (je Ursprung)
2	DO-4 Liniendaten DO-9 Haltestellendaten DO-20 Regel-/ Restriktionsdaten	EV-3 OfferPlanPublished EV-4 OfferPlanUpdated	(optional) NeTEx/GTFS als Mapping-/Exportanker

DP	Datenobjekte (DO)	Kern-Events (EV)	Schnittstellenanker
3	DO-6 Stadtplanungsdaten (Zones) DO-102 Kapazitäts-/Ressourcenplanungsdaten	EV-5 SlotsPublished EV-6 SlotsUpdated	Einsatzslot-Modelle & Event-Kopplung (ITCS/OBU)
4	DO-8 Fahrplandaten DO-4 Liniendaten (TripPattern)	EV-7 TimetablePublished EV-8 TimetableUpdated	(optional) NeTeX/GTFS
5	DO-10 Umlaufplanungsdaten	EV-9 UmlaufPublished EV-10 UmlaufUpdated	intern; Übergabe an WFM/Dispatch
6	DO-14 Dienstplanungsdaten DO-17 Verfügbarkeitsdaten	EV-11 RosterPublished EV-12 RosterChanged	BO ab S3 in internen WFM/Roster-Flows
7	DO-15 Personaldaten (Dispo) DO-24 Fahrtausführungsdaten (Plan)	EV-13 DeploymentIssued EV-14 Deployment-Updated	Übergabe an Disposition (DP-8/DP-9)
8	DO-68 Dispositionsdaten DO-25 Fahrzeugstatusdaten	EV-15 Dispatch-OrderIssued EV-16 VehicleState-Changed	Echtzeit-Kopplung Depot/ITCS (OT-nah)
9	DO-72 Fahrer-/Personalstatusdaten DO-21 Tausch-/Wunschkienst-Daten	EV-17 CrewAssigned EV-18 CrewState-Changed	Dispatch Cockpit/WFM-Anker
10	DO-7 Tarifstrukturdaten DO-42 Tarifdaten	EV-19 FareRuleChanged EV-20 ProductUpdated	(optional) VDV-Tarif-/Produktdaten als Referenzkorpus
11	DO-43 Fahrgeld-/Mietkonditionen (BO) DO-107 Regel-/Parametrisierungsdaten	EV-21 PricingRule-Changed EV-22 QuoteCreated	Pricing Engine & Governance (ab S3 intern)
12	DO-44 Produktdaten DO-61 Publikationsmetadaten	EV-23 CatalogPublished EV-24 OfferingChanged	Voraussetzung für konsistente Angebotsbereitstellung
13	DO-52 Störungsinformation	EV-25 ServiceAlert (SIRI)	„Info Hub“ mit SIRI/TOMP-Events & SLA-Monitoring

DP	Datenobjekte (DO)	Kern-Events (EV)	Schnittstellenanker
	DO-47 Abfahrts-/Ankunftsinformationen DO-70 FGI-Daten	EV-26 PredictionUpdated	
14	DO-69 Störungsdaten DO-68 Dispositionsdaten (Entscheidung)	EV-27 DisruptionDetected EV-28 DispatchDecision	„Dispatch Orchestrator“ & TripEvents (TOMP TripEvents)
15	DO-24 Fahrtausführungsdaten DO-71 Fahrzeug-/Lokalisierungsdaten	EV-29 TripEvent EV-30 VehicleTelemetry	OT-nahe Quellen (ITCS/OBU) & Event-Backbone (Streaming)
16	DO-101 Anfragedaten/Angebotsvorschlag DO-98 Routeninformationen	EV-31 JourneyCalculated EV-32 OfferUpdated	OJP/TRIAS
17	DO-105 Buchungsdaten DO-88 Ticket-/Mediumsdaten	EV-33 BookingConfirmed EV-34 TicketIssued	OSDM/custom
18	DO-104 Reservierungsdaten	EV-35 Reservation-Created EV-36 Reservation-Expired	OJP/TRIAS
19	DO-86 Zahldaten DO-115 Payment-Transaktionslogs	EV-37 Payment-Authorized EV-38 PaymentCaptured	interne PSP-/Payment-Flows & Broker-Kapselung
20	DO-111 Clearing-Daten DO-46 Erlösaufteilungsdaten	EV-39 ClearingSettled EV-40 ReconciliationDelta	CSV/EDIFACT (T+1)

7.1.5 Strategisch-motivatorischer vs. operativer Bereich

Die REA wird in einen strategisch-motivatorischen und einen operativen Bereich gegliedert. Der strategisch-motivatorische Bereich beschreibt Treiber, Ziele, Anforderungen u.w.; der operative Bereich spezifiziert die resultierenden Architekturbausteine und deren Beziehungen in den relevanten Sichten.

Tabelle 25: VP-Definitionen

VP	DP	Kerninhalt (Stichworte)	Impact (B/A/D/I)	Standard-/Anker (Kern)
PR 01-03	3; 6–9	BO-Planung (Slots/TimeWindows) Dienstplanung (WFM/Roster) Disposition AO/BO (Echtzeit, Anschlussqualität)	B/A/D/I	SlotModel OT/IT-Kopplung Depot/ITCS (TripEvents-Ref)
TP 01- 03	10– 12	Tarif-/Produktgestaltung; BO-Preis- logik + Governance; Produktkatalog/ MDM-Hoheit	B/A/D	(optional) VDV-Tarif/ Produkt-Referenzkorpus Catalog/MDM
OPS 01-02	13– 15	Fahrgastinformation (Info Hub, SLA) Kurzfrist-Disposition/Erbringung (Orchestrierung, Events)	B/A/D/I	SIRI, TOMP-Events TOMP TripEvents Dispatch Orchestrator
SA 01-03	16– 20	Reiseauskunft/Planung Reservierung≠Buchung Billing/Clearing intern/extern	B/A/D/I	OJP/TRIAS OSDM/custom CSV/EDIFACT (T+1)
INT 01-03	cross	Zonen-/Integrationsleitbild Standards Daten/Events+QoS	A/D/I	API-Gateway/IAM Event-Backbone Data-Broker; Tabelle 24 & DO-Steckbriefe
SEC 01	cross	Security/KRITIS/Compliance (AuthN/Z, Audit, Härtung)	I	IAM/OAuth/OIDC (kon- zeptionell) SIEM/Audit
ORG 01-02	cross	Make-or-buy/Plattform Partner/ SLA+ Clearing Rollen/Prüfprozesse	B/I	SLA-Monitoring Clearing-Nachweise

Legende zu Tabelle 25: B=Business; A=Application; D=Data/Events; I=Integration/Security; Detailverweis: Ausprägungen/Optionen (z.B. S1–S4), Nachweise/KPIs, Migration etc. sind in Anhang F (VP-Steckbriefe) dokumentiert; fachliche/operative Details je DP/AP/DO in den Anhängen C–E.

Zur Sicherstellung einer konsistenten Traceability wird eine Cross-Verlinkung über zwei Anker umgesetzt: (1) die DP-Zuordnung zur operativen Verortung der Architekturbeiträge (konsolidiert in Tabelle 22, sowie (2) die VP-Zuordnung als Brücke zwischen motivatorischen Aussagen und operativen Ausprägungen. Tabelle 25 stellt hierfür die VP-Definitionen in steckbrief-kompatibler Form bereit (DP-Scope, betroffene Architekturelemente, relevante Standard-/Schnittstellenanker) und dient als Index auf die Detailausarbeitung in den VP-Steckbriefen (Anhang F). Dadurch ist die Nachvollziehbarkeit von Motivation über Variationsentscheidungen bis zur operativen Modellierung sowie zur Ableitung von Monitoring-, Test- und Evaluationsartefakten systematisch gewährleistet.

7.1.6 Strategisch-motivatorischer Architekturbereich

Ziel dieser Ebene ist es, die motivatorische und strategische Rechtfertigung für die bedarfsorientierten Erweiterungen innerhalb der Architektur darzustellen. Der Autor verfolgte hierbei einen deduktiven Ansatz, indem er die Struktur auf Grundlage von Good bzw. Best Practices [226] vorgab und diese anschließend mit den erhobenen Daten und Informationen füllte.

Dafür modellierte er die strategische Ebene dieses Bereichs, die *Capabilities* (Fähigkeiten) und *Course of Action* (Vorgehensweise) beinhaltet. Diese beiden Elemente sind durch Realisierungszusammenhänge verbunden. Das heißt, Fähigkeiten befähigen ein Unternehmen, eine bestimmte Vorgehensweise zu verfolgen. Um das tun zu können, muss eine oder mehrere Requirement/s (Anforderung/en) erfüllt sein. Diese beiden Elemente (Course of Action und Requirements) stellen den Übergang zwischen strategischer und motivatorischer Ebene dar. Dadurch können Entscheidungen für eine Änderung in der Architektur begründet und Einflüsse verdeutlicht werden.

Die Anforderungen (Requirements) ermöglichen es dem Unternehmen, ein Outcome (Ergebnis) zu erreichen, das wiederum auf ein gesetztes Goal (Zielsetzung) einzahlt.

Die Zielsetzung wird durch einen *Driver* (Treiber) flankiert, der vom jeweiligen Stakeholder (Interessensvertreter) initiiert wurde. Abbildung 13 stellt neben der Struktur auch den inneren Zusammenhang des strategisch-motivatorischen Bereichs dar.

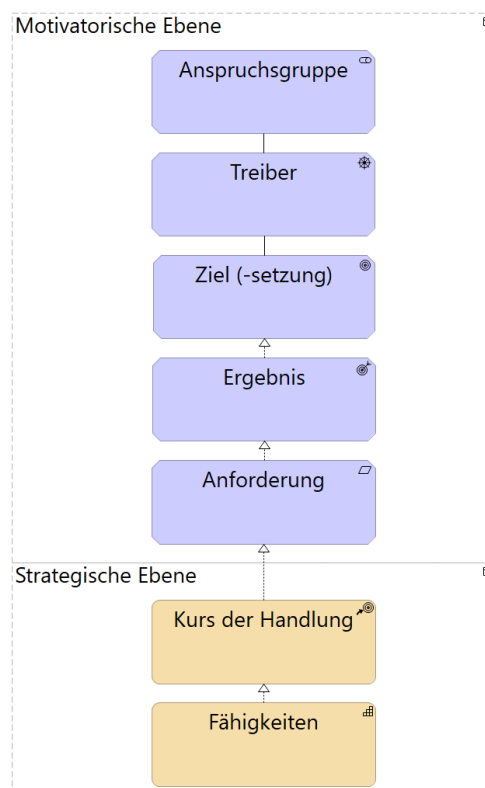


Abbildung 13: Strategisch-motivatorischer Bereich

Später (siehe Kapitel 7.1.9) werden die Fähigkeiten der strategischen Ebenen zur Rechtfertigung operativer Vorgaben (Prozesse, Schnittstellen usw.) herangezogen.

7.1.7 Operative Architekturbereich

Der Autor geht auf der operativen Ebene, bestehend aus Geschäftsebene und Anwendungsebene induktiv vor: Aus früheren Teilarchitekturen leitet er einen Kernprozess für das Management eines ÖPNV-Unternehmens ab. Die übrigen Elemente wurden sachlich-logisch den unterschiedlichen Ebenen zugeordnet. Daraus ergibt sich die in Abbildung 14 dargestellte Struktur:

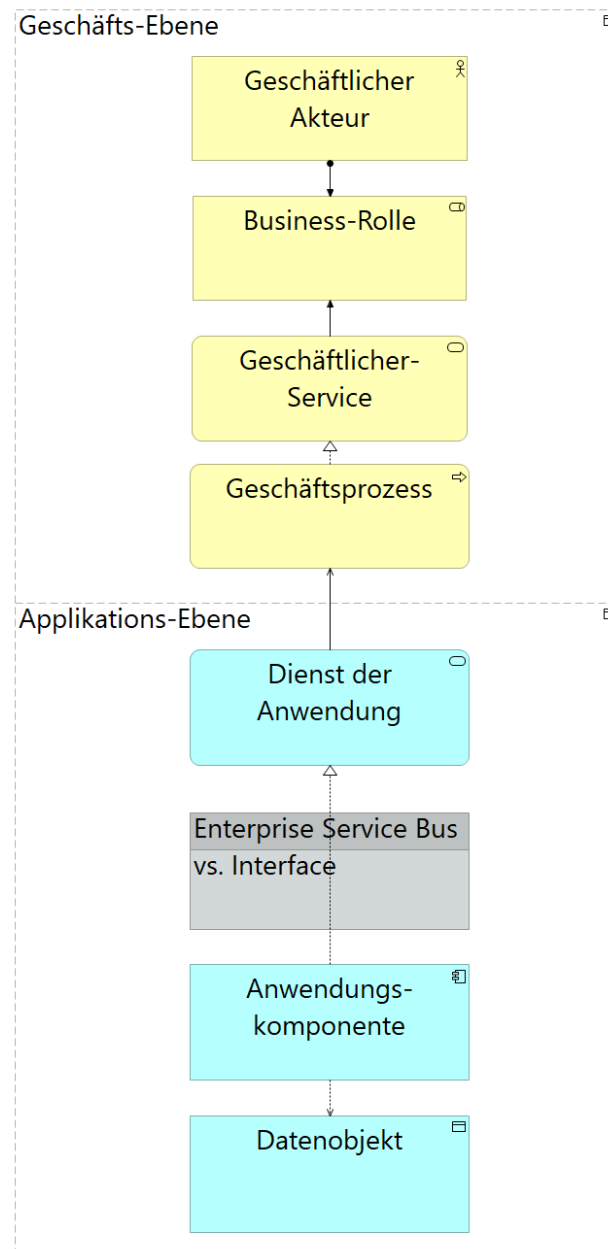


Abbildung 14: Geschäfts- und Anwendungsebene

Abbildung 14 zeigt die entwickelte Struktur, die auf dem zentralen Prozess basiert (siehe Abbildung 17 in Kapitel 7.4.2). Der Autor modellierte diesen Prozess auf Grundlage der Ergebnisse der Literaturrecherche. Darauf aufbauend formulierte er den Geschäftsbe-
reich aus. Der Prozess wurde dabei nach oben durch einen Geschäftsdienst (Business
Process) und nach unten durch einen Anwendungsdienst (Application Service) abge-

grenzt. Zwischen Geschäftsdienst und Anwendungskomponente galt es noch eine Integrationsebene zu berücksichtigen, um Anwendungen und deren Daten für alle anderen Anwendungen zugänglich zu machen. Zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung der Architektur war noch unklar, ob diese Aufgabe ein Enterprise Service Bus (ESB) als Anwendung übernehmen oder ob ein klassisches Interface in Form eines Application Integration Layer (siehe Abbildung 14) verwendet werden sollte. Diese Frage wurde im Rahmen der Evaluationen intensiv diskutiert. Die Idee, Anwendungen über eine Integrations-schicht zu verbinden, stammt von der BVG und anderen ÖPNV-Unternehmen wie etwa dem Hamburger Verkehrsverbund. Ziel ist es, die Versorgung der Fahrscheinautomaten und Verkaufsstellen mit aktuellen Tarif- und Produktdaten über Standardschnittstellen zu automatisieren und dadurch – gerade bei einer Umstellung – zu vereinfachen. Die Anwendungskomponenten stellen über Anwendungsdienste Schnittstellen für andere Anwendungen bereit und ermöglichen den Zugriff auf Datenobjekte.³⁵

7.1.8 Verbindung zwischen strategischen und operativen Ebenen

Dieses Kapitel erläutert die Verbindung zwischen beiden Bereichen der Architektur. Es wird ermittelt, welches Element der Geschäfts- oder Anwendungsebene im operativen Bereich die Fähigkeiten (Capabilities) unterstützt (siehe Abbildung 15).

Ziel ist es, die Fähigkeiten mit der grundsätzlichen strategischen Ausrichtung der deutschen ÖPNV-Branche zu verknüpfen. Darüber hinaus zeigte das Kapitel, wie die operative Ebene jene Fähigkeiten bereitstellt, die ein ÖPNV-Unternehmen für die Herausforderungen des digitalen Wandels – in dieser Forschungsarbeit speziell die Integration von NMS – benötigt.

7.1.9 Zusammenfassung

Die REA-Basissicht (S4) vereint den strategisch-motivatorischen und den operativen Bereich zu einem kohärenten, prüfbareren Zielbild, das über DP-IDs und Variationspunkte traceable ist. Die Szenarien S1–3 entstehen als verantwortungsgetriebene Overlays auf dieser Basissicht; die Zonen- und Schnittstellenarchitektur stellt Resilienz, Sicherheit und Interoperabilität sicher. Die anschließenden Unterkapitel 7.2 (Variantenkatalog je Szenario) und 7.3 (Delta-Sichten und Leitplanken) führen diese Architektur DP-basiert aus und bereiten die empirische Evaluation in Kapitel 8 vor.

³⁵ In dieser Dissertation werden Felder nur dann betrachtet, wenn dies für die Kernaufgabe „NMS-Integration in klassischem ÖPNV“ wichtig ist. Ansonsten werden gleichartige Daten zu Datenobjekten zusammengefasst. Die Fahrplandaten enthalten bspw. Informationen zu Linien, Haltestellen und Zeiten.

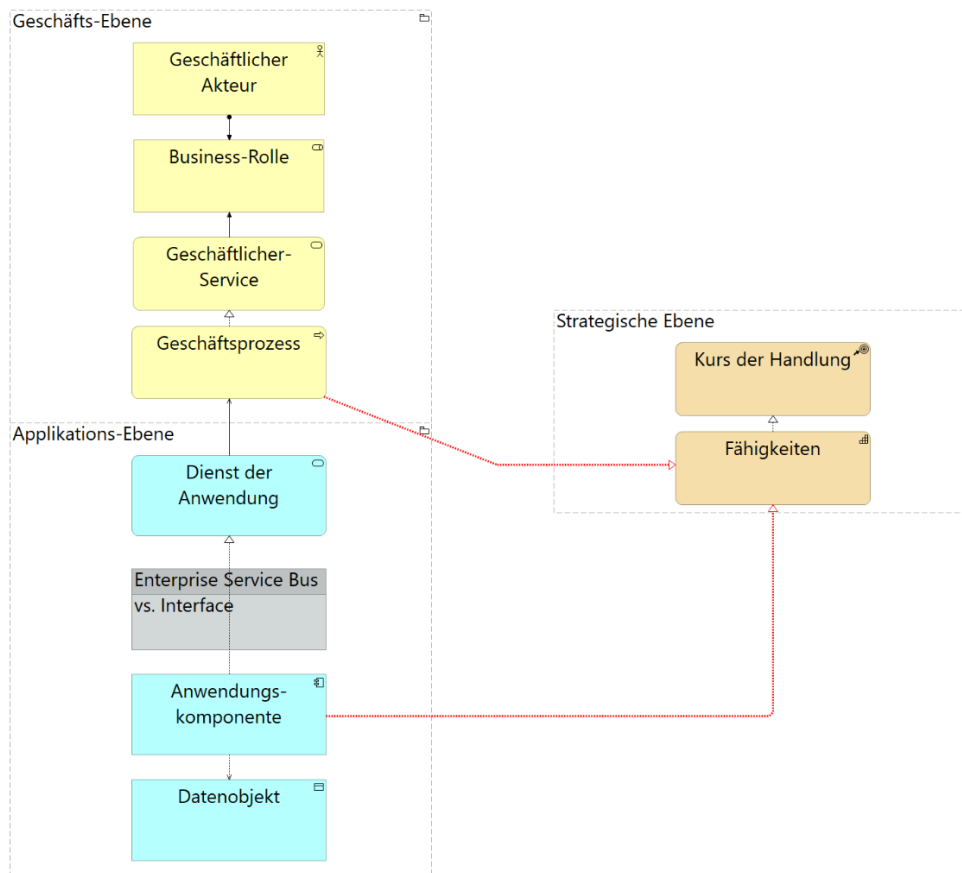


Abbildung 15: Operative Elemente ermöglichen die benötigten Fähigkeiten

7.2 Variantenkatalog der REA

Der Variantenkatalog, dargestellt in standardisierten VP-Steckbriefen in Anhang F, übersetzt die in Kapitel 6.5 definierten Szenario-basierten Anforderungen (S1–S4) in konfigurierte REA-Varianten. Er verknüpft das in Kapitel 7.1 entwickelte Variabilitäts- und Verantwortungsmodell – basierend auf Domänen- und Prozess-IDs (DP-I, DP-II, DP-III, DP-IV, DP-1–DP-20, vgl. Anhang C) sowie den Rollen der RACI-Matrix – mit konsistenten Architekturentscheidungen auf Geschäfts-, Anwendungs- und Integrationsebene.

Auf Grundlage der RACI-Formalisierung (Kapitel 7.1) werden Domänen- und Prozessverantwortungen in Variationspunkte (VP) mit klarer Semantik überführt. Diese VPs sind formal definiert (Name, Ziel, Scope/DP-IDs, Verantwortung S1–S4, Architektur-Impact, Schnittstellen/Standards, Daten/Events, Security/KRITIS, KPIs & Nachweise, Migration, Risiken/Kontrollen). Die Optionen (Owned/Shared/Partner) stammen aus den Domänen-Matrizen (Kapitel 6.5), während die DP-ID die Nachverfolgbarkeit sichert. Cross-cutting-VPs (INT/SEC/ORG) setzen Leitplanken, etwa für OJP/TRIAS vs. OSDM, Zonen-/DMZ-Kopplung via API-Gateway, Event-Backbone, Data-Broker sowie Clearing/SLA-Monitoring (C4).

Methodisch dient S4 (Vollintegration) als Basissicht. S1–S3 werden als Delta-Varianten in Form von Overlays dargestellt, die Verantwortungsverschiebungen je DP abbilden

(vgl. Kapitel 7.1, 7.2, 7.3). Die Szenariologik S1–S4 (Nicht-Integration/Anbindung → White-Label-Kooperation → Hybride Integration → Vollintegration) bildet den normativen Rahmen für die Variantenbildung und deren Bewertung.

7.2.1 Metamodell des Variantenkatalogs

A) Entitäten und Beziehungen

Der Katalog ist DP-basiert strukturiert und umfasst:

- Variationspunkt (VP) = {Name, Ziel/Rationale, Scope (betroffene DP IDs), Verantwortung je Szenario (S1–S4: Owned/Shared/Partner), Architekturimpact (Business/Application/Integration-Sicht), Schnittstellen/Standards, Datenobjekte/Ereignisse, Security/KRITIS-Leitplanken, KPIs & Nachweise, Migrationspfad, Risiken/Kontrollen}. Die Definition der VP folgt dem in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Prinzip der Verantwortungsverschiebungen je DP, gebündelt als architekturwirksame Variationspunkte.
- Optionen = Wertebereich der Verantwortung (Owned/Shared/Partner) je Szenario S1–S4; abgeleitet aus den Integrationsmatrizen in Kapitel 6.5 je Domäne.
- Traceability Anker = DP ID (Domänen-/Prozess-Katalog DP-1...DP-20), Crosswalk DP → ArchiMate-Elemente (Business Services/Prozesse, Application Services/Komponenten) sowie Daten/Event Artefakte.

B) Dokumentationseinheiten

Die VPs verweisen auf die Domänen-Prozess-Steckbriefe (Anhang C) mit Zweck, Stakeholdern, Schnittstellen, Standards, KPIs, Security-Hinweisen je DP-Cluster, und auf die Applikations- (Anhang D) sowie Datenobjekt-Steckbriefe (Anhang E) als bindende Detailreferenzen.

7.2.2 Struktur des Variantenkatalogs (prozessbezogene VPs)

Die REA folgt der Domänenstruktur:

1. Planung & Ressourceneinsatz (DP-I),
2. Tarif- und Produktmanagement (DP-II),
3. Betriebslenkung (DP-III) und
4. Vertrieb (DP-IV).

Für jede Domäne werden die nachfolgenden Kern-VPs geführt; die S1–S4 Zuweisungen stammen aus den Integrationsmatrizen in Kapitel 6.5.

A) Planung & Ressourceneinsatz (DP-1 bis DP-9)

- VP PR 01: BO-Planung (Gebiete/Zeiten, DP-3). Verantwortung: Partner → Shared → Owned → Owned (S1 → S4). Architekturimpact: Bedarf an On-De-

mand-Planungsdiensten, Einsatzslot-Modellen und Dispositionsvorgaben steigt mit Integrationsgrad; Kopplung an ITCS/OBU über Event Streams.

- VP PR 02: Dienstplanung AO/BO (DP-6). Verantwortung (AO/BO): S1 Owned/Partner, S2 Owned/Shared, S3 Owned/Shared, S4 Owned/Owned. Konsequenz: BO-Dienstplanung ab S3 in internen WFM/Roster Flows; Trennung OT/IT wahren.
- VP PR 03: Disposition Fahrzeug/Personal AO/BO (DP-8/9). Verantwortung (AO/BO) entwickelt sich je Szenario von Owned/Partner (S1) bis Owned/Owned (S4). Architekturleitbild: domänen-/zonenbasierte Integration, Echtzeit-Kopplung zu Depot/ITCS.

B) Tarif- und Produktmanagement (DP-10 bis DP-12)

- VP TP 01: Tarif-/Produktgestaltung AO (DP-10). Durchgängig Owned (S1–S4); damit interne Hoheit über AO-Preis/Produkt.
- VP TP 02: Fahr-/Mietpreisgestaltung BO (DP-11). Partner → Shared → Owned → Owned; erfordert ab S3 die interne formale Steuerung der Preislogik und ihrer Änderungen (Pricing Engine und Governance).
- VP TP 03: Produktkatalog Hoheit AO & BO (DP-12). Shared → Shared → Owned → Owned; Voraussetzung für einheitliche Plattformprodukte und konsistente Angebotsbereitstellung.

C) Betriebslenkung (DP-13 bis DP-15)

- VP OPS 01: Fahrgastinformation AO/BO (DP-13). AO stets Owned; BO wechselt von Partner/Shared (S1–S3) nach Owned (S4). Implikation: Info Hub mit SIRI/TOMP-Events und SLA-Monitoring.
- VP OPS 02: Kurzfrist-Disposition AO/BO (DP-14) und Fahrleistungserbringung AO/BO (DP-15). AO durchgängig Owned; BO: Partner → Partner → Shared → Owned. Konsequenz: ab S3 Dispatch Cockpit-/TripEvents-Integration; ab S4 vollständige interne Orchestrierung.

D) Vertrieb (DP-16 bis DP-20)

- VP SA 01: Reiseauskunft/-planung AO/BO (DP-16). Übergang hin zu Owned (AO/BO) ab S3; OJP-fähiger Journey Hub, Deep Links/Hand overs.
- VP SA 02: Reservierung (nur BO, unverbindlich, DP-18) vs. Buchung (AO/BO, verbindlich, DP-17). Kerngrundsatz: Reservierung ≠ Buchung (OJP Logik) über alle Szenarien; Verantwortung BO seitig: Partner → Partner → Owned → Owned. Konsequenzen: getrennte Front-/Back-Office-Prozesse, Haftungslogik, Schnittstellenkontrakte (OJP/TRIAS für Journey/Reservation; OSDM/custom für Booking).

- VP SA 03: Abrechnung intern/extern (DP-19/20). AO intern Owned; BO intern von Partner/Shared zu Owned (S4); externes Clearing AO/BO von Shared zu Owned (S4) – mit Shared Clearing, wo Verbundabgleiche erforderlich bleiben.

Hinweis zur DP-Referenzierung: Die VP-Cluster und ihre Verantwortungszuweisungen sind den in Kapitel 6.5 dokumentierten Tabellen je Domäne entnommen (Tabelle 13–16).

7.2.3 Technologische und integrative Variationspunkte (cross cutting)

- VP INT 01: Zonen-/Integrationsleitbild. Durchgängig anzuwenden: strikte Segmentierung von OT-nahen Betriebsdomänen (ITCS/RBL, Depot/OBU) gegenüber IT/Vertrieb und Partner-Zone; Kopplung ausschließlich über API-Gateway/IAM, Event Backbone und Data Broker in der DMZ; unternehmensweit durchlaufende ESBs über alle Zonen werden vermieden (Resilienz/KRITIS, Observability).
- VP INT 02: Standards & Schnittstellen. Szenario-abhängig zu konfigurieren: OJP/TRIAS für Journey/Reservation, OSDM (IRS 90918 10) für Buchung, SIRS VM/ET sowie TOMP TripEvents in BO-Ketten; VDV Reihe (z.B. 430/431, 453/454/459, 462/461/463) als Referenzkorpus für Interoperabilität und Datenobjekte/IDs.
- VP INT 03: Daten/Events & Semantik. DP-basierter Daten/Event-Katalog mit Erzeugern/Verbrauchern, Topics/Channels, Qualitätskriterien (PII Einstufung, Latenz, Vollständigkeit, Idempotenz) als verbindliche Grundlage für Veröffentlichung, Monitoring und Tests.
- VP SEC 01: Security/KRITIS & Compliance. Starkes AuthN/Z (OAuth/OIDC), SIEM/Audit, Härtung/Vulnerability-Prozesse, Domänen-/Netz-Zonierung; zunehmende Betreiberpflichten und Nachweispflichten mit wachsendem Integrationsgrad.

7.2.4 Organisations- und Governance-Variationspunkte

- VP ORG 01: Make or Buy & Plattformfähigkeit. S3 verlangt Broker-/Plattform-Capabilities (Koordination und Teilleistung), S4 vollständige Eigenleistung inkl. Disposition/Durchführung.
- VP ORG 02: Partner-/SLA-Management und -Clearing. In S2–S3: Revenue Sharing, Nebenbuch → Hauptbuch Prozesse, SLA/Qualitätssteuerung; in S4 Ownership.
- VP ORG 03: Rollen und Prüfprozesse (z.B. FS-/Zugangs-Checks). Aufbau neuer Rollen sowie Kompetenzen je Integrationsgrad (insb. S3, 4).

7.2.5 Referenz-Konfigurationen je Szenario (Auszug)

- S1 Nicht-Integration/Anbindung. AO-Kernprozesse Owned; BO-Nutzung via Partner App; interne Plattform-/Dispatch-Fähigkeiten nicht erforderlich; Journey/Booking v.a. Partner; Clearing extern/Shared.

- S2 White-Label-Kooperation. Kundenschnittstelle (Brand/SSO) intern; operative Plattform extern; Buchung/Reservierung BO weiterhin beim Partner; Kataloghoheit AO & BO-Shared; Clearing intern/extern Shared.
- S3 Hybride Integration. Trennung Reservierung (unverbindlich) ≠ Buchung (verbindlich); intern: Pricing/Katalog, Buchung BO, Dispatch-Koordination; Durchführung teils extern (Shared); Data Broker/API-Gateway etabliert.
- S4 Vollintegration (Basissicht). End-to-End intern: Planung → Buchung → Dispatch → Durchführung → Abrechnung; AO/BO in allen DP-Clustern Owned; vollständige Plattformintegration mit ITCS/RBL/Vertrieb/Telematik.

7.2.6 Konsistenz und Abhängigkeitsregeln (Cross Tree Constraints)

- C1 (OJP Prinzip): Wenn VP SA 02 Owned (BO Buchung) (S3/S4), dann muss VP SA 02 Reservierung als separaten Prozess führen und VP INT 02 (OJP/TRIAS) aktiv sein.
- C2 (Kataloghoheit): VP TP 03 Owned (ab S3) ist Voraussetzung für VP SA 01 Owned (Journey/Offers) und für konsistent bewertete Angebotsobjekte (Fare/Price Quotes) im Buchungsprozess.
- C3 (KRITIS-Zonen): Aktivierung VP INT 01 (Zonenarchitektur) ist obligatorisch, sobald OT-nahe DP (1...9; 13...15) mit IT/Vertrieb gekoppelt werden; unternehmensweite ESB-Durchkopplung ist zu vermeiden.
- C4 (SLA/Clearing): Wenn VP ORG 02 Shared/Partner (S2/S3), dann sind Clearing Schnittstellen (CSV/EDIFACT) und SLA-Monitoring verpflichtend in den VP INT 02 Kontrakten zu führen.

7.2.7 Nachweise, KPIs und Evaluationseinbettung

Jeder VP enthält Erfolgskriterien/KPIs (z.B. p95 Wartezeit BO, Quote Reservierung (Reservation) → Booking, Payment Success, Clearing Abweichung, Info Aktualität) und Evidenzmethoden (Monitoring/Audit, Szenario-basierte Walkthroughs, Experten-Reviews). Diese sind mit dem FEDS-basierten Evaluationsdesign (formativ, summativ und naturalistisch, künstlich) verknüpft. Für die summative Feldevaluation empfiehlt der Katalog längsschnittliche KPI-Vergleiche (Auslastung, mittlere Wartezeit, Anschlussqualität, Störungsrobustheit) und, wo möglich, A/B-Tests zu Integrationsmustern.

7.2.8 Umsetzungshilfen und Artefakt-Bezüge

- Delta-Sichten. S1–S3 werden als Overlays auf der S4-Basissicht visualisiert; die Responsibility Map per DP- und die VP-Tabellen (Tabelle 22; Tabelle 25) sichern Nachvollziehbarkeit.
- Prozess-, Applikations- und Datensteckbriefe. Für jede VP-Konfiguration verweisen die Domänen-Prozess-Steckbriefe (DP), Applikationssteckbriefe (AS) und Datenob-

jekte (DS) auf verbindliche Eingaben und Ausgaben, Schnittstellen und Security-Vorgaben.

- Gesamtarchitektur. Die prozessuale Struktur (Abbildung 17) und die entwickelte REA (Abbildung 26) bilden den visuellen Rahmen für Variantenkonfiguration und Systemeinbettung.

7.2.9 Muster-VP-Steckbrief (Beispiel)

VP SA 02 – Reservierung (DP-18) vs. Buchung (DP-17)

Ziel: OJP-konforme Trennung Reservierung (unverbindlich) ≠ Buchung (verbindlich); klare Haftungs-/SLA-Beziehungen in BO-Ketten. Scope: DP-16 bis DP-20.

Verantwortung:

- BO Reservierung/Buchung S1–S2 Partner, S3–S4 Owned;
- AO Buchung S1–S4 Owned; Abrechnung intern AO Owned,
- BO von Partner/Shared zu Owned (S4).

Architekturimpact:

- Journey Hub (OJP/TRIAS), Booking Core (OSDM), API Gateway/IAM, Data Broker;
- Event Hooks zu ITCS/Dispatch.

Daten und Ereignisse:

- Offer/Quote, Reservation, Booking/Ticket/Token, TripEvents, Billing/Clearing Stati (SLAs, Idempotenz).

Security/KRITIS:

- Zonen Trennung, starke AuthN/Z, Audit Trails.
- KPIs: Reservation → Booking ≥ 85 %, Payment Success ≥ 98 %, Billing Abweichung < 0,1 %.

Migration:

- S2 → S3: interne Booking Capabilities aufbauen;
- S3 → S4: Clearing Ownership, vollständige Dispatch-Integration.

7.2.10 Zusammenfassung

Der Variantenkatalog liefert konkrete, DP-basierte Variationspunkte mit Szenario-spezifischen Verantwortungsausprägungen, technologisch abgesicherten Integrationsmustern und prüfbaren Erfolgskriterien. Er macht die REA konfigurierbar und evaluierbar, hält die Traceability von Anforderungen (Kapitel 6) über Design (Kapitel 7) bis zur Evaluation (Kapitel 8) und verankert die AO/BO-Logik pro Prozess in einem konsistenten Zielbild.

Verweise:

- Integrationsmatrizen je Domäne: Tabelle 13–16 (Kapitel 6.5)
- Prozessstruktur/REA-Gesamtsichten: Abbildungen 16, 24 und 25
- Integrations-/Sicherheitsleitbild und Schnittstellenkontrakte: Kapitel 7.1.3; Standards (OJP/TRIAS/OSDM/SIRI/TOMP; VDV-Reihe)

Dieses Kapitel bietet damit den Variantenkatalog der REA, der die Umsetzung des Artefakts in den 4 Domänen – Planung & Ressourceneinsatz, Tarif-/Produktmanagement, Betriebslenkung, Vertrieb – und den Szenarien S1–S4 systematisch steuert.

7.3 Delta-Sichten und Leitplanken

Delta-Sichten dienen als zentrales Analyseinstrument, um überprüfbare Abweichungen zwischen dem Referenz-Zielbild (S4) und den Integrationsszenarien S1–S3 klar darzustellen. Sie machen zudem deren Auswirkungen auf Governance und Architektur sichtbar. S4 bildet den methodischen Bezugspunkt; S1–S3 werden als Overlays mit den Markierungen Owned, Shared, Partner analysiert und entlang der Dimensionen Prozess, System, Datenobjekt sowie Event bewertet. Jede Abweichung lässt sich bis auf Prozess-IDs zurückverfolgen. Dokumentiert werden u.a. Schnittstellenlage (AuthN/Z, Payload-Kerne, SLAs, Fehler/Retry), semantische Artefakte (Objekte, Events, Topics inkl. Qualitätskriterien) und Zonierungsleitplanken. So verbinden Delta-Sichten die Anforderungen aus Kapitel 6 mit den Design-Entscheidungen aus Kapitel 7 und der Evaluation, die in Kapitel 8 dargestellt wird.

7.3.1 Vorgehenskonzept und Darstellungsprinzipien

S4 bündelt in einer Basissicht die strategisch-motivatorische und die operative Ebene in einem kohärenten Zielbild; S1–S3 werden als verantwortungsgetriebene Overlays dargestellt. Die Visualisierung erfolgt als S4-Modell (Kapitel 9.3) mit eingeblendeten Differenzen. Normative Variationspunkte (VP) verweisen je Änderung auf (i) betroffene Prozess-IDs, (ii) Szenario Verantwortung und (iii) Constraints (OJP-konforme Trennung Reservierung ≠ Buchung, SLA/Clearing-Pfad, KRITIS-Zonierung).

Für die Traceability wird jedes Architecturelement (Business Service/Prozess, Applications-Service/Komponente, Daten-/Technologieanker) explizit mit Prozess-IDs gekennzeichnet (Crosswalk DP → ArchiMate). Damit wird die Delta-Ausprägung prüf- und versionierbar.

Für das Integrations- und Sicherheitsleitbild übernehmen die Delta-Sichten die Zonen-/Domänensegmentierung (OT-nahe Betriebsdomänen getrennt von IT-nahe Domänen und Partner-Zone) und bevorzugen API-Gateway und Data Broker/Event Streaming gegenüber durchkoppelnden ESB-Konstrukten über KRITIS-Zonen.

7.3.2 Bestandteile einer Delta-Sicht (Inhaltselemente)

Eine vollständige ausformulierte Delta-Sicht umfasst:

- Szenario-Steckbrief. Kurzcharakteristik, Integrationsgrad, Leitprinzipien (z.B. Reservierung ≠ Buchung), Rollenverschiebungen.
- Responsibility Map (Prozess und Szenario). Zuordnung Owned/Shared/Partner je DP-Prozess – konsistent zu Kapitel 6.5 und Variantenkatalog (vgl. Anhang F).
- Prozess-Delta. Benannte Änderungen auf Prozess-/Teilprozess-Ebene (Ein-/Austritte, Vor-/Nachlagerungen, Kontrollpunkte) mit DP-Bezug.
- Rollen/Organisation. Neue oder veränderte Verantwortungen (z.B. Broker/Plattform Fähigkeit in S3), Make-or-buy-Entscheide.
- Applikations-Delta. Betroffene Application Services/Komponenten (z.B. Booking Core, Dispatch Cockpit, Clearing), inkl. Schnittstellen-Portfolio (OJP/TRIAS, OSDM/TOMP, VDV Kerne).
- Daten-/Objekt-Delta. Änderungen an Objekten (Reservation, Booking, Ticket/Entitlement, TripEvents), Identifikatoren, Lebenszyklen.
- Integrations-/Security-Delta. Zonenübergänge, Data Broker Bindings, Observability, IAM/OAuth/OIDC, KRITIS Nachweise (SIEM/Audit).
- Finance-/Clearing-Delta. Verschiebungen Nebenbuch → Hauptbuch, Revenue Sharing, Verbund Clearing (S3 Shared → S4 Owned).
- Recht/Compliance. Betreiberpflichten (Genehmigungen, Haftung, Versicherungen), KYC/FS Check je Dienst (Ride/Car Sharing).
- KPIs & Qualitätsnachweis. Szenario-adäquate Soll-Metriken (z.B. Reservation → Booking ≥ 85 %, BO-Wartezeit p95 ≤ 8 min, Payment Success ≥ 98 %).
- Migrationspfad. Archetypischer Schrittplan (Pilot → Koordination → Durchführung), Daten/Schnittstellen Cut Over, Kontrollpunkte.
- Risiken/Kontrollen. Architekturrisiken (z.B. ESB-Durchkopplung, Audit Scope) und Gegenmaßnahmen (Domänensegmentierung, Zero Trust, Data Pool).

7.3.3 Delta-Sicht S3 ↔ S4 – differenzielle Ausprägungen je Prozess

Die folgende verdichtete Gegenüberstellung ordnet die in Kapitel 6.5 normierten Prozesse (Prozess 1–20, vgl. Anhang C) nach Verantwortungslogik in S3 (hybrid/brokered) und S4 (vollintegriert).

Tabelle 26: S3 ↔ S4 Ausprägung von Planung & Ressourceneinsatz

ID	Prozessname	Veränderung der Verantwortung
I.1	Fahrgastzählung & -analyse	S3 Owned → S4 Owned (keine)
I.2	Planung (AO) (Netz/Angebot)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
I.3	Planung (BO) (Gebiete/Zeiten)	S3 Owned → S4 Owned (keine)

ID	Prozessname	Veränderung der Verantwortung
I.4	Fahrplanung (AO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
I.5	Umlaufplanung (AO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
I.6	Dienstplanung (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO & BO)
I.7	Einsatzplanung (BO)	S3 Shared → S4 Owned (keine)
I.8	Fahrzeugdisposition (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO, BO)
I.9	Personaldisposition (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO, BO)

Interpretation: Die AO-Kette ist in beiden Szenarien Owned; BO-Funktionen wandern in S4 vollständig inhouse, während S3 die Koordination (Broker) übernimmt und Teile der Durchführung Shared/Partner verbleiben.

Tabelle 27: S3 ↔ S4 Ausprägung von Tarif- & Produktmanagement

ID	Prozessname	Veränderung der Verantwortung
II.1	Tarif-/Produktgestaltung (AO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
II.2	Fahr-/Mietgestaltung (BO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
II.3	Produktkataloggestaltung (AO, BO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)

Leitplanke: AO bleibt stets Owned; BO-Preislogiken gehen in S3/S4 in Owned über; Kataloghoheit ab S3 Owned.

Tabelle 28: S3 ↔ S4 Ausprägung der Betriebslenkung

ID	Prozessname	Veränderung der Verantwortung
III.1	Fahrgastinformation (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO, BO)
III.2	kurzfristige Verkehrsdisposition (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO, BO)
III.3	Fahrleistungserbringung (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Shared (BO) → S4 Owned (AO, BO)

Tabelle 29: S3 ↔ S4 Ausprägung beim Vertrieb

ID	Prozessname	Veränderung der Verantwortung
IV.1	Reiseauskunft & -planung (AO, BO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
IV.2	Buchung – verbindlich (AO, BO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
IV.3	Reservierung – nicht verbindlich (AO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)
IV.4	Abrechnung intern (AO, BO)	S3 Owned (AO)/Owned (BO) → S4 Owned (AO, BO) (keine)
IV.5	Abrechnung extern (AO, BO)	S3 Owned → S4 Owned (keine)

Leitprinzip (domänenweit): OJP-konforme Trennung Reservierung (unverbindlich) ≠ Buchung (verbindlich).

7.3.4 Delta-Sicht S3 ↔ S4 – System-, Daten- und Integrationsunterschiede

- Plattform/IT:
 - S3: eigene Mobilitäts-/Buchungsplattform (Broker), Dispatch Cockpit, API-Gateway/IAM, Data Broker/Data Pool; keine ESB-Durchkopplung über KRITIS-Zonen.
 - S4: Vollständige Plattform integriert mit ITCS/RBL, Vertrieb (z.B. PT Kern), Telematik/OBU, Analytics.
- Standards/Schnittstellen: OJP/TRIAS für Journey/Reservation, OSDM/TOMP für Booking/TripEvents, VDV 453/454 (DFI/Realtime), VDV 301 (IBIS IP). S3, S4 unterscheiden sich primär in Tiefe und Umfang der internen Kopplung.
- Datenobjekte und Lebenszyklen: Reservation → Booking → Durchführung → Abschluss; Event Hooks an ITCS/Dispatch; durchgehende IDs (Reservation/Booking/Ticket/TripEvents).
- Security/KRITIS: Domänen-/Netz-Zonierung, starke Authentisierung/Autorisierung, SIEM/Audit; S3, S4 identische Leitplanken, aber größerer Nachweisumfang in S4.

7.3.5 Delta-Sicht S3 ↔ S4 – Finance/Clearing, Recht und Organisation

- Finance/Clearing: S3 mit Revenue Sharing sowie Shared Clearing (Nebenbuch → Hauptbuch-Brücken); S4 Owned inkl. prüfbarer Einnahmenaufteilung.
- Recht/Regulatorik und Betrieb: S3: geteilte Betreiberrollen (eigene Subflotte genehmigungspflichtig), SLA/Haftung geteilt, FS/Zugangs-Checks als neue Fähigkeit; S4: volle Betreiberverantwortung (Genehmigung, Haftung, KRITIS/ISMS, DSGVO).

- Organisation/Rollen: S3 erfordert Broker/Plattform Capability (Programmleitung, Partner/SLA-Owner, Dispatcher, Daten/API Governance); S4 erweitert auf Fahrer-, Flotten-, Tarif- und Security-Rollen und breiten organisatorischen Umbau.

7.3.6 KPIs und Qualitätsnachweis in Delta-Sichten

Delta-Sichten legen zielgerichtete und Szenario-adäquate Zielwerte und Messpunkte fest. Beispielhaft sind hier einige Zielwerte aufgeführt:

- Journey Latenz p99 < 500 ms;
- Reservation → Booking ≥ 85 %;
- Payment Success ≥ 98 %;
- Billing/Clearing Abweichung < 0,1 %.
- BO-Wartezeit p95 ≤ 8 min;
- Dispo-Reaktionszeit p95 < 30 s;
- Info-Aktualität ≥ 99 % < 60 s;
- SLA-Erfüllung ≥ 98 %.

Die genannten Leistungskennzahlen (KPIs) sind in den Domänen- sowie Applikationssteckbriefen als normative Sollgrößen hinterlegt und bilden die Grundlage für eine zukünftige formative wie auch summative Evaluation gemäß dem FEDS-Rahmen. Die Durchführung dieser weiteren Evaluationsepisoden liegt außerhalb des Umfangs der vorliegenden Dissertation.

7.3.7 Nutzung in Entwurf, Variantenbildung und Evaluation

In den Build-Schleifen dienen Delta-Sichten als Arbeitsmittel, um Designentscheidungen DP-basiert nachzuvollziehen, Varianten prüfbar zu machen und die Nachvollziehbarkeit (Tabellen/Crosswalks) sicherzustellen.

In der Evaluation (FEDS) bilden Szenarien und Integrationsdimensionen die Evaluanden. Dabei werden Nutzen/Utility und Qualitätskriterien wie Interoperabilität, SLA-Erfüllung, Sicherheits- und Compliance-Nachweise, Genauigkeit der Einnahmenaufteilung und Anschlussqualität episodisch geprüft.

Beispielhafte Mini-Delta-Sicht S3 → S4 (kompakt)

Scope: Prozesse: 13...20 (Betriebslenkung & Vertrieb).

- Hauptdelta: Durchführung BO (Shared → Owned), Abrechnung extern (Shared → Owned), Tiefe der Integration (Dispatch/ITCS/OBU koordiniert → integriert).
- Schnittstellenportfolio: Unverändert standardisiert (OJP/TRIAS, TOMP/OSDM, VDV 453/454), aber mehr interne Services in S4.

- Kontrollpunkte: Reservation $\neq$ Booking, Clearing-Prüfpfade, KRITIS-Zonen-Übergänge (DMZ/Gateway), Audit Trails.

7.3.8 Zusammenfassung

Delta-Sichten machen die Variabilität der REA greifbar, indem sie klare Verantwortungsüberlagerungen, Prozess-basierte Nachvollziehbarkeit/Traceability und zonenbasiertes Integrationsleitbild schaffen. Am Beispiel S3 $\leftrightarrow$ S4 zeigen sie den graduellen Übergang vom Broker- und Koordinationsmodus zur vollständigen internen Leistungserbringung – präzise prozessgesteuert, systemgestützt und mit überprüfbaren Qualitätszielen. So ermöglichen sie stringente Migrationspfade und prüfbare Evaluationsnachweise im Rahmen des DSR.

7.4 Erste Architekturversion

Im Folgenden wird die initial entwickelte Unternehmensarchitektur (EA) für ÖPNV-Unternehmen vorgestellt. Sie umfasst die strategische und taktische sowie die operative und betriebliche Ebene. Beleuchtet werden insbesondere die prozessbezogenen Wechselwirkungen der operativen Ebene.

7.4.1 Strategische Betrachtung der EA

Dieses Kapitel beschreibt die Zusammenhänge, etwa hinsichtlich strategischer Ausrichtung und motivatorischer Gründe, die ein traditionelles ÖPNV-Unternehmen erfüllen muss, um bedarfsorientierten Verkehr in seine Organisation zu integrieren. Die strategische und motivatorische Perspektive ergänzen die Anforderungen, Ergebnisse, Endzustände und Veränderungen der Organisation mit den verantwortlichen Stakeholdern der Organisation. Diese Sicht auf die Zielarchitektur verdeutlicht die Verbindung zwischen der strategischen Ebene eines ÖPNV-Unternehmens und der Motivationsebene.

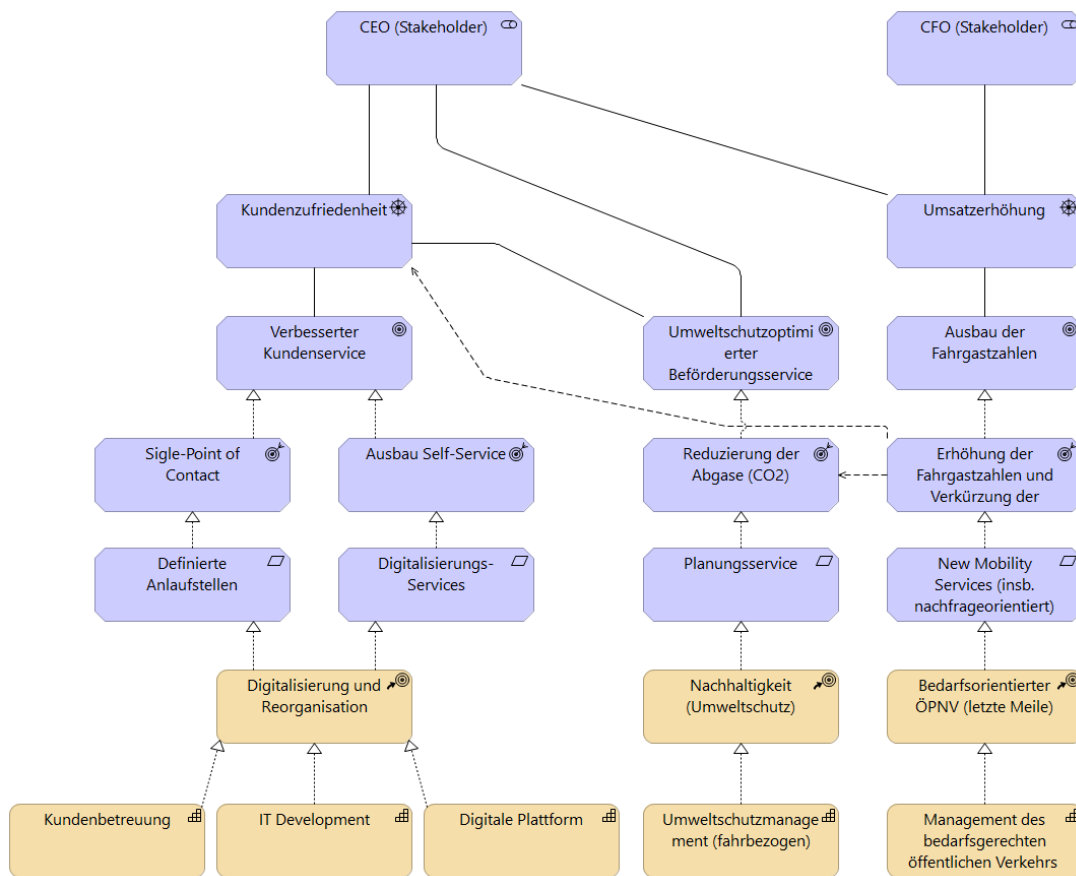


Abbildung 16: Strategische Betrachtung der Integration von bedarfsorientiertem Verkehr (insbes. NMS) in traditionelle ÖPNV-Unternehmen

Abbildung 16 zeigt auf der untersten Ebene die Fähigkeiten, die ein ÖPNV-Unternehmen aktuell benötigt, um bedarfsgerechten Verkehr anzubieten. Zu den klassischen Fähigkeiten, wie Kundenservice und IT-Entwicklung, kommen digitale Plattformen, bedarfsorientiertes Verkehrsmanagement sowie Umweltschutz hinzu. Letzterer ist in Deutschland in den Satzungen aller Verkehrsunternehmen verankert und muss berücksichtigt werden.

Abbildung 16 verdeutlicht weiterhin, wie Fähigkeiten die Anforderungen beeinflussen, die ein Unternehmen durch Ressourcenmanagement umsetzt. Diese Umsetzung führt zu Ergebnissen, die einen Zielzustand herbeiführen. Dieser Zielzustand verändert die Organisation, was Stakeholdern entweder wünschen bzw. fordern oder akzeptieren müssen.

Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Fähigkeit, bedarfsgerechten ÖPNV zu steuern, die Möglichkeit eröffnet, Kunden auf der letzten Meile zu bedienen. Das erhöht die Zahl der Kunden und sorgt für kürzere Wartezeiten dank besserer Anschlussmöglichkeiten. Die verbesserte Auslastung der Verkehrsmittel und die Erhöhung der Kundenzahl senken die Abgasemissionen im Betriebsgebiet des Verkehrsunternehmens durch Verringerung des Individualverkehrs. Gleichzeitig steigt die Kundenzufriedenheit durch bessere Verbindungen und umweltfreundliche Angebote. Die höhere

Nachfrage steigert den Umsatz, was den Zielen der Stakeholder, insbesondere CIO und CFO, zugutekommt.

7.4.2 Betrachtung der Geschäfts- und Anwendungsebene

In diesem Kapitel beleuchtet der Autor, wie Prozesse und die zugehörigen Rollen oder Akteure in einem ÖPNV-Unternehmen zusammenwirken, um Verkehrsdienstleistungen bereitzustellen.

Die Prozesselemente in diesem Architekturartefakt sind wie üblich entlang der Wertschöpfungskette angeordnet (siehe Abbildung 17): von links nach rechts, also vom Input zum Output.

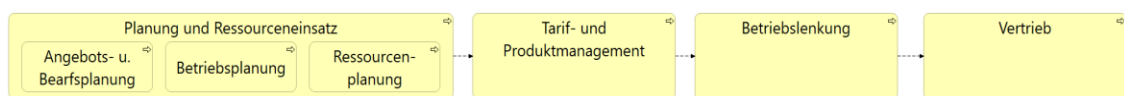


Abbildung 17: Prozessstruktur des Architekturartefakts

Alle weiteren Elemente dieser Teil-Architektur bauen auf dieser Struktur auf.

Um eine zeitgemäße, an neue Herausforderungen anpassbare Architektur zu entwickeln, wurden 2 Ansätze in Betracht gezogen:

1. ein serviceorientierter Architekturansatz auf Geschäfts- und auf Anwendungsebene, der die Organisation flexibler macht,
2. eine zentralisierte Kommunikation zwischen den Komponenten über einen Enterprise Service Bus auf der Anwendungsebene, der die Kommunikation standardisiert und technisch bündelt.

Abbildung 18 zeigt die Gesamtarchitektur mit Geschäfts- und Anwendungsebene. Dabei wurden die benötigten Datenobjekte den jeweiligen Anwendungen zugeordnet und erläutert.

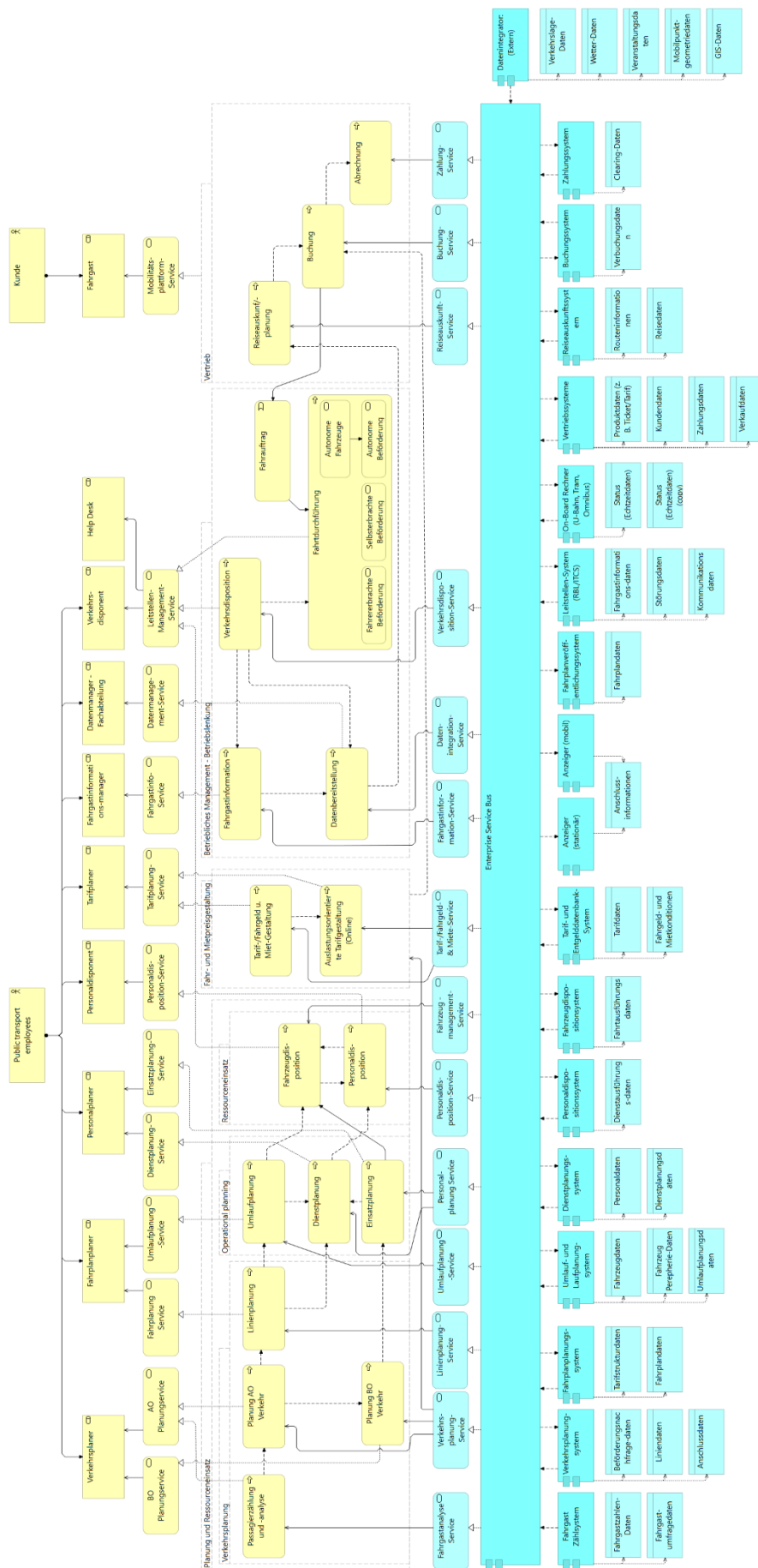


Abbildung 18: Erste Version der operativen REA

Die vorgestellte Architektur gliedert sich in die relevanten Stakeholder, die ausführenden Geschäftsrollen, Dienste und Prozesse sowie die Anwendungsdienste und Anwendungen. Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, orientiert sich die EA an der analysierten Prozessstruktur von Verkehrsunternehmen und unterteilt sich in die folgenden Hauptbereiche:

- Planung und Ressourceneinsatz

Dieser Bereich umfasst die Planung der Leistungserstellung. Hier verschmelzen betriebliche Verkehrsplanung und Ressourceneinsatz zu einer integrierten, voneinander abhängigen Verkehrs- und Betriebsplanung. Ziel ist eine effiziente Leistungserbringung.

- Fahr- und Mietpreisgestaltung

Hier werden die Ergebnisse der angebotsorientierten Planung in Produkte und Tarife überführt. Zudem werden bedarfsorientierte Leistungen mit Mietpreisen versehen oder externe Mietpreise konsolidiert und für die Abrechnung bereitgestellt.

- Betriebliches Management

Das Betriebsmanagement erbringt oder unterstützt Leistungen durch Business Services wie Verkehrsplanung, Fahrtenbearbeitung oder Fahrgastinformation.

- Vertrieb

Dieser Bereich deckt die gesamte Reiseplanung, Buchung und Abrechnung von Fahr- und Mietpreisen ab. Im Zentrum steht eine Mobilitätsplattform, die alle Mobilitätsformen – ob angebots- oder bedarfsorientiert – miteinander verbindet.

Aufbauend auf Kapitel 7.4.2 zeigt das Folgekapitel 7.4.3 die Kopplung der strategisch-motivatorischen mit der operativen Ebene. Als Beispiel für eine solche Kopplung wurde die Stützung der Verkehrsplanung mittels der strategischen Fähigkeiten des Unternehmens ausgewählt.

7.4.3 Unterstützung der strategisch-motivatorischen Ebene

Dieses Kapitel untersucht, wie die Strategie von der operativen Geschäfts- und der Anwendungsebene (strategisch-operative Kopplung) gestützt wird. Der Fokus liegt dabei ausschließlich auf dem bedarfsorientierten Verkehr, nicht auf dem Umweltschutz, der in der Motivationsstrategie berücksichtigt wurde.

Das Modell in Abbildung 16 dient als Grundlage der Analyse. Das nachstehende Diagramm in Abbildung 19 zeigt, welche Organisationselemente die übergreifenden strategischen Fähigkeiten fördern oder umsetzen.

Dabei wird deutlich, wie operative Komponenten die Fähigkeiten als strategisches Verhalten prägen. Die Geschäftsdienst-Nachfrageplanung, die Geschäftsprozessplanung des bedarfsgerechten Verkehrs und die Anwendungsdienst-Verkehrsplanung unterstüt-

zen das Fähigkeitsmanagement im bedarfsgerechten öffentlichen Verkehr. Zudem stärkt die Verkehrsplanung der Anwendungsdienste die IT-Entwicklungsfähigkeit.

Die Verkehrsplanung beeinflusst damit maßgeblich das zentrale Fähigkeitsmanagement eines bedarfsorientierten ÖPNV-Unternehmens.

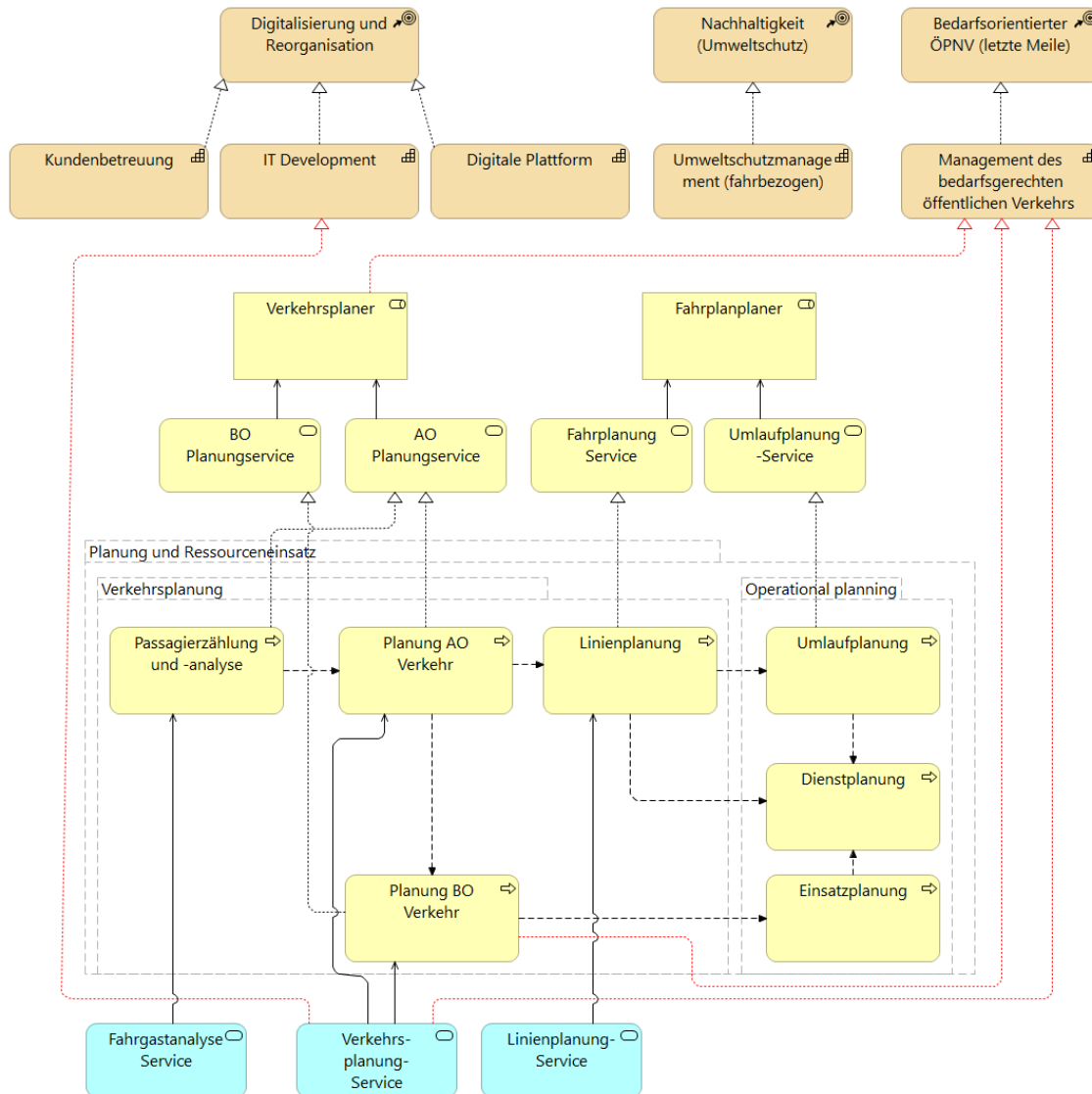


Abbildung 19: Verkehrsplanung im Kontext der strategischen Anforderungen

7.5 Vorgehensweise zur Erstellung der REA

Dieses Kapitel präzisiert die methodische Vorgehensweise zur Entwicklung der REA für die Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen. Die Vorgehenslogik ist im DSR-Paradigma verankert (Kapitel 2.3) und nutzt ein FEDS-basiertes Evaluationsdesign, das Ziele, Strategien, zu prüfende Eigenschaften und Episoden in einem Vier-Schritt-Prozess festlegt (Kapitel 2.8).

Die in Kapitel 6 konsolidierten und operationalisierten funktionalen (A.1–A.6) und nicht-funktionalen (B.1–B.6) Anforderungen dienen als Entwurfsleitplanken und als Kriterien der formativen, überwiegend naturalistischen Evaluation (Kapitel 6, 6.4 und 8).

Die in Tabelle 3 eingeführte Bewertungsmatrix kodifiziert die methodische Positionierung der REA zwischen deduktiven Leitplanken (Rahmenwerke) und induktiver Evidenz (Empirie). Tabelle 30 instanziiert diese Matrix für die vorliegende Arbeit: Für jedes Kriterium werden deduktive Bezüge (z.B. TOGAF/ArchiMate) und induktive Belege (z.B. Fallbezüge/Evaluationsepisoden) traceable ausgewiesen. Damit fungiert Tabelle 30 als Rückverfolgungstabelle im Sinne von REAM (hybride Methodenintegration; vgl. auch FEDS-Rahmung bei Venable et al. [52, S. 77–89] und Hevner et al. [62, S. 182–201, 235–247, 242–266]).

7.5.1 Zielsetzung und methodischer Rahmen

Die REA-Entwicklung folgt dem DSR-Prozessmodell nach Peffers et al. (6 Schritte von Problemidentifikation bis Kommunikation) und wird durch Hevners Three-Cycle View (Relevanz-, Rigor-, Design-Zyklus) zyklisch gerahmt (Kapitel 2.3).

Zur externen Fundierung spezifiziert das Peffers-Modell [45, S. 45–77] den prozeduralen Ablauf der DSR-Tätigkeiten, während Hevner [62, S. 87–92] die Kopplung von Problemraum, Wissensbasis und Artefaktentwicklung über 3 Zyklen formalisiert; Hevner et al. [44, S. 75–105] liefern die Leitlinien für Rigor und Relevanz.

Die Dissertation konkretisiert diese Rahmung und verweist für die Feinausgestaltung der Subaktivitäten (Inputs/Outputs, Controls/Resources) auf ein Methoden-Framework, das die Arbeitsteilung zwischen Build und Evaluate schärft (Kapitel 2.3).

7.5.2 Instanziierte methodische Einordnung

Dieser Absatz überführt die in Kapitel 3.3.4 (Tabelle 3) entwickelte generische methodische Einordnung in eine instanziierte Bewertung der konkreten Vorgehensweise dieser Dissertation. Damit wird nachgewiesen, dass die Herleitung, Konstruktion und Evaluation der Referenzarchitektur entlang einheitlicher Kriterien erfolgt und für jedes Kriterium der Tabelle 30 sowohl deduktive als auch induktive Nachweise vorliegen. Tabelle 30 dient als Nachweis- und Rückverfolgungstabelle (Traceability): Sie markiert die Erfüllung (Deduktion/Induktion) und gibt präzise Belegstellen in der Arbeit an. Dabei wird in Tabelle 30 zu jedem Kriterium der Matrix (Tabelle 3) die konkrete Belegstelle in dieser Dissertation angegeben (Kapitel/Abschnitte/Abbildungen/Tabellen). Damit werden Build-Entscheide (z.B. Metamodell-Elemente) und Evaluate-Schleifen (z.B. formative Episoden nach FEDS) methodisch rückgekoppelt. Die Abbildung verbindet deduktive Kohärenz (z.B. Kapitel 3.1.1–3.1.2) und induktive Passung (z.B. Kapitel 8.2.8, Episode VIII) innerhalb eines REAM-kompatiblen Vorgehens.

Dabei verfolgt die Instanziierung 2 eng miteinander verbundene Zwecke:

- (1) Transparenz und Rigor: Durch die sichtbare Abbildung methodischer Entscheidungen und Evidenzen wird die wissenschaftliche Nachvollziehbarkeit (Traceability) des Artefaktentwurfs gestärkt.
- (2) Relevanz und Utility: Die Tabellenbezüge zeigen, wo das Artefakt normativ anschlussfähig (Standards/Frameworks) und praktikabel (empirisch validierte, evaluierte Eignung) ist – ein Kernanliegen bei Referenzarchitekturen.

Tabelle 30: Nachweis über die Verwendung des hybriden Ansatzes

Kriterien ³⁶	Deduktiver Ansatz (top-down)	Induktiver Ansatz (bottom-up)
1. Verwendung theoretischer Modelle/Rahmenwerke	Kapitel 3.1.1–3.1.2; Kapitel 6.1–6.2	Integration von Rahmenwerken mit Empirie: Kapitel 7.5.1; Kapitel 8.1–8.2
2. Nutzung empirischer Daten	Evaluationsepisoden und Rückkopplung: Kapitel 8.2, Tabelle 31; Kapitel 8.1–8.3; Abbildung 22	Fallstudie BerlKönig: Kapitel 6.3.1–6.3.2
3. Ziel: generalisierbares Soll-Modell	Finale REA: Abbildung 26; Kapitel 9.1.1–9.1.3	Generalisierung und empirische Absicherung: Kapitel 7.5.1; Kapitel 8.1–8.2
4. Ziel: empirisch fundiertes Modell	FEDS-Design und Ergebnisspiegelung: Kapitel 2.8; Abbildung 22	Evaluationsbefunde: Kapitel 8.1–8.3
5. Iterativer Entwicklungsprozess	Strategie und Episoden: Kapitel 8.1; Kapitel 8.2, Tabelle 31	Iterationen: Kapitel 7.5.4
6. Kombination Theorie ↔ Praxis	Kapitel 3.1.1–3.1.2	Kapitel 6.1–6.3
7. Methodische Anleitung (Phasen/Schritte)	DSR-Rahmen: Kapitel 2.1–2.3	REAM-Verortung und Anwendung: Kapitel 3.3.3; Kapitel 7.5.1
8. Systematische Evaluation	FEDS-Vier-Schritt und Ergebnistabellen: Kapitel 2.8; Kapitel 8.1–8.3; Abbildung 22	naturalistische Episoden: Kapitel 8.2, Tabelle 31

³⁶ Kriterien gemäß Tabelle 3; Evaluationsmerkmale gemäß Kapitel 8.1–8.3.

Im Sinne von REAM werden normative Leitplanken (z.B. Auswahl/Setup von Rahmenwerken, Metamodell-Entscheide) systematisch mit empirischer Evidenz (Fallbezüge, Experten-Episoden, naturalistische Evaluation) verzahnt [46]. Die Evaluation folgt dem FEDS-Vorgehen (formativ, summativ, künstlich, naturalistisch; Vier-Schritt-Prozess), wodurch Build-Evaluate-Schleifen methodisch fundiert werden [52]. Daraus resultiert das hybride Vorgehen (Deduktion + Induktion) als konstitutives Prinzip der Artefaktentwicklung.

Im Folgenden werden die in Tabelle 30 dargestellten Nachweise je Kriterium erläutert.

1. Verwendung theoretischer Modelle/Rahmenwerke

Deduktiv: Auswahl und leitende Nutzung etablierter Frameworks (z.B. TOGAF/ArchiMate), Ableitung von Sichten/Schichten/Metamodell-Elementen aus der Literatur (Kapitel 3.1.1–3.1.2). Domänenspezifische Referenzen (ITVU/VDV) strukturieren die Fachbausteine (Kapitel 6.1–6.2).

Induktiv: Anpassungen und Konkretisierungen dieser Leitplanken aus Fall- und Praxisbezug (z.B. BerlKönig-Case, Kapitel 6.3) sowie Experten-/Review-Episoden (Evaluation, Kapitel 8.2, Tabelle 31), die Benennungen, Zuschnitt und Schnittstellen empirisch justieren.

Hybrid-Konsequenz: Theoretische Leitplanken werden ko-getrieben durch Empirie verfeinert (REAM-Logik).

2. Nutzung empirischer Daten (Fallstudien, Interviews, Experten-Reviews)

Deduktiv: Empirie dient validierend zur Plausibilisierung/Abdeckung des aus den Rahmenwerken abgeleiteten Soll-Bildes (z.B. Abgleich von Rollen/Prozessen/Schnittstellen in Kapitel 9 mit Framework-Annahmen aus Kapitel 3).

Induktiv: Primäre Datengrundlagen sind Fallstudie(n), Workshop-Einsichten und vorhandene Architekturen (Kapitel 6.3.1–6.3.2), ergänzt um naturalistische Episoden (Kapitel 8.1–8.3, Abbildung 22; Tabelle 31).

Hybrid-Konsequenz: Empirie liefert Input (Induktion) und Validierung (Deduktion) in demselben Zyklen (REAM + FEDS).

3. Ziel: generalisierbares Soll-Modell (REA)

Deduktiv: Das Zielbild wird entlang normativer Metamodell-/Framework-Kohärenz konstruiert (Sichten, Schichten, Capabilities).

Induktiv: Die Generalisation erfolgt über Abstraktion aus Fällen/Episoden und wird im Artefakt ausgewiesen (Kapitel 9.1.1–9.1.3); die finale REA (Abbildung 26) spiegelt empirisch induzierte Zuschnitte wider.

Hybrid-Konsequenz: Das Soll-Modell ist gleichzeitig normativ tragfähig und empirisch belastbar.

4. Ziel: empirisch fundiertes Modell

Deduktiv: Die empirische Fundierung bestätigt (summativ) die Nützlichkeit/Kohärenz des deduktiv konstruierten Zielbildes (diskutiert in Kapitel 8.3).

Induktiv: Fundierung entsteht primär aus formativ-naturalistischen Episoden (z.B. Kapitel 8.2, Tabelle 31; Abbildung 22), die konkrete Änderungen am Modell auslösen.

Hybrid-Konsequenz: Fundierung ist integriert in den Konstruktionsprozess (REAM) und methodisch durch FEDS abgesichert.

5. Iterativer Entwicklungsprozess (Build-Evaluate-Loop)

Deduktiv: Iteration dient u.a. der Schärfung normativer Entscheidungen (z.B. Rahmenwerk-Konsequenzen auf die Schichtenbildung; Kapitel 7.5.1).

Induktiv: Iterationen resultieren aus neuen Befunden (z.B. begriffliche Harmonisierung, Service-/Datenzuschnitt), dokumentiert über Episoden (Kapitel 8.1–8.2) und Delta-Beschreibungen.

Hybrid-Konsequenz: Iteration ist konstitutiv (REAM): Deduktion und Induktion wechselwirken innerhalb derselben Zyklen (Kapitel 7.5.4; Kapitel 8.1).

6. Kombination aus Theorie und Praxis

Deduktiv: Theorie/Standards (TOGAF/ArchiMate/ITVU/VDV) strukturieren Terminologie, Sichten und Artefaktlogik (Kapitel 3.1.1–3.1.2; Kapitel 6.1–6.2).

Induktiv: Praxisdaten steuern Priorisierung, Detaillierungsgrade und Integrationspunkte (z.B. BerlKönig, Kapitel 6.3; Evaluationsfeedback, Kapitel 8.2).

Hybrid-Konsequenz: Theorie und Praxis sind balancierte Ko-Evidenzen (REAM).

7. Methodische Anleitung zur Konstruktion (Phasen/Schritte)

Deduktiv: Vorgehen ist rahmenwerksgetrieben (phasen-/metamodellbasiert, Kapitel 2.3; Kapitel 3.3).

Induktiv: fallstudiengetriebene Exploration/Musterbildung führt zu instanziierten Designentscheidungen (Kapitel 6.3; Kapitel 8.2).

Hybrid-Konsequenz: REAM kombiniert definierte Phasen mit empirischen Schleifen; FEDS liefert die Evaluations-Mikrostruktur (Ziele, Strategie, Eigenschaften, Episoden, Kapitel 8.1–8.2).

8. Durchführung einer systematischen Evaluation

Deduktiv: Ex-ante-/Ex-post-Prüfungen beurteilen die Kohärenz des normativen Zielbildes (z.B. Abgleich mit Qualitätskriterien/Leitlinien, Kapitel 8.3).

Induktiv: Naturalistische, formative Episoden mit Stakeholdern prüfen Nützlichkeit/Passung im Nutzungskontext (Kapitel 8.1–8.3; Abbildung 22; Tabelle 31).

Hybrid-Konsequenz: Evaluation ist verpflichtend strukturiert (FEDS) und integraler Bestandteil des REAM-Vorgehens (formativ → Refinement; summativ → Absicherung).

Zusammenfassend zeigt Tabelle 30, dass die Arbeit nicht einfach einer reinen Schule (nur deduktiv oder nur induktiv) folgt, sondern ein hybrides, REAM-kompatibles Vorgehen realisiert, das theoretische Kohärenz und empirische Tragfähigkeit gleichzeitig adressiert. Dadurch wird die Referenzarchitektur sowohl wissenschaftlich abgesichert (Rigor) als auch praktikabel (Relevance/Utility).

7.5.3 Ableitung der Entwurfsziele und Anforderungen

Die Entwurfsziele der REA werden aus einem triangulierten Anforderungskorpus abgeleitet: strukturierte Literaturanalyse (ITVU, VDV), Fallstudie BerlKönig und ein Architektur-Assessment; die Erhebung ist in Tabelle 11 zusammengefasst (Kapitel 6).

Die funktionalen Anforderungen A.1–A.6 (Tabelle 14) adressieren zentrale Domänenfunktionen: Planung (A.1), Ressourcenmanagement (A.2), Tarif-/Produktmanagement (A.3), betriebliche Steuerung (A.4), Vertrieb (A.5) und digitale Plattform (A.6) (Kapitel 6.4).

Die nicht-funktionalen Anforderungen B.1–B.6 (Tabelle 15) definieren Qualitätsmerkmale wie Plattformunabhängigkeit (B.1), Skalierbarkeit (B.2), Flexibilität (B.3), Wiederverwendbarkeit (B.4), Interoperabilität (B.5) und Vereinfachung (B.6) (Kapitel 6.4).

Jedes Architekturelement wird nach dem Traceability-Prinzip eindeutig auf Anforderungen (A/B) referenziert und später in der Evaluationsmatrix (Abbildung 22) wieder aufgegriffen.

7.5.4 Architekturprinzipien, Domänenzuschnitt und Sichten

Die REA folgt einem zweigeteilten Aufbau mit klaren Viewpoints:

- (i) strategisch-motivatorischer Bereich: Kette Stakeholder → Driver → Goal → Outcome → Requirement → Course of Action → Capabilities als deduktive Begründungslinie für Änderungsentscheidungen (Kapitel 7.1.7; Abbildung 13), und
- (ii) operativer Bereich: Geschäfts- und Anwendungsebene mit Integrationsschicht, induktiv aus dem Kernprozess hergeleitet (Kapitel 7.1.8; Abbildung 14).

Die operative Struktur wird über einen zentralen Prozess (Abbildung 17) und eine standardisierte Integrationsschicht (z.B. ESB bzw. Application Integration Layer) gekapselt, um lose Kopplung und Austauschbarkeit zu sichern (Kapitel 7.1.8).

Externe Fundierung: Die Three-Cycle View liefert die theoretische Grundlage für die Kopplung strategischer und operativer Sichten via Artefakt-Iterationen [62, S. 87–92].

7.5.5 Iterativer Entwurf: Build-Schleifen mit formativer Evaluation

Die REA entsteht in Iterationen; nach jedem Entwurfsschritt erfolgt eine formative, überwiegend naturalistische Evaluation. Das FEDS-Rahmenwerk operationalisiert dies als Vier-Schritt-Prozess (Ziele, Strategie(n), Eigenschaften, Episoden-Design) und unterscheidet die Dimensionen Zweck (formativ, summativ) und Paradigma (naturalistisch, künstlich) (Kapitel 2.8).

Die Dissertation implementiert FEDS in mehreren Episoden (Kapitel 8; Abbildung 22 „Evaluationsmatrix“) und dokumentiert dabei u.a. Experten-Reviews, Szenario-basierte Walkthroughs, Modell-/Dokumentensichtungen; die Ergebnisse präsentiert (Kapitel 8.3).

Externe Fundierung wird durch FEDS spezifiziert: warum, wann, wie, was zu evaluieren ist [52, S. 77–89].

7.5.6 Modellierungstaktik je Ebene

Im Folgenden wird die Modellierungstaktik so gefasst, dass die deduktiv hergeleitete strategisch-motivatorische Ziel- und Fähigkeitsstruktur als normatives Bezugssystem dient, an das die induktiv aus dem domänenspezifischen Kernprozess abgeleiteten Geschäfts-, Service- und Anwendungssichten rückgekoppelt und konsistent ausdifferenziert werden.

Strategisch-motivatorische Ebene (deduktiv)

Ausgehend von Good/Best-Practice werden Capabilities und Courses of Action modelliert; Requirements bilden die Kopplung zwischen strategischer Zielkette und operativen Vorgaben (Kapitel 7.1.7; Abbildung 13).

Operative Ebene (induktiv)

Ein domänenspezifischer Kernprozess strukturiert Geschäftsprozesse, Business Services, Anwendungsdienste und Anwendungen; eine Integrationsschicht entkoppelt Komponenten über definierte Schnittstellen (Kapitel 7.1.8; Abbildung 14; Abbildung 17).

Die Wechselwirkungen zwischen Strategie und Operation werden exemplarisch in Kapitel 9.1.7 (Verkehrsplanung) sowie in der Capability Map (Abbildung 32) transparent gemacht.

7.5.7 Qualitätssicherung und Traceability

Die Qualitätssicherung orientiert sich an den nicht-funktionalen Kriterien B.1–B.6 (Tabelle 15) sowie an Modell- und Referenzmodell-Qualitäten; die Erfüllung wird im Evaluationskapitel je Episode belegt (Kapitel 6.4; Kapitel 8).

Die Evaluationsmatrix (Abbildung 22) und die Ergebnisübersichten (Kapitel 8.3) verknüpfen Anforderung → Architekturelement(e) → Eigenschaft/Episode → Befund und sichern damit Nachvollziehbarkeit (Traceability) über alle Iterationen hinweg.

7.5.8 Ergebnisintegration und Artefaktversionierung

Iterative Rückkopplungen führten zu konsolidierten Artefaktständen (u.a. Präzisierungen der Anwendungsschicht, Schärfung der Prozess- und Capability-Sichten). Die finale REA wird in Abbildung 26 zusammengeführt; die prozessuale Struktur (Abbildung 25) sowie bereichsspezifische Modelle (Ressourcenplanung: Abbildung 27; Tarif/Produkt: Abbildung 28; Betriebsmanagement: Abbildung 29; Vertrieb: Abbildung 30) operationalisieren die Umsetzung.

Die ergänzende Capability Map (Abbildung 32) dient der Management-Kommunikation über strategische Fähigkeitsbedarfe (Kapitel 9.1.8).

7.5.9 Dokumentation, Kommunikation und Replizierbarkeit

Die Dokumentation umfasst Artefaktbeschreibung, View-Katalog, Schnittstellenprinzipien sowie Evaluationsdesign und -befunde (Kapitel 7–9, v.a. Abbildung 13–Abbildung 17; Abbildung 25–Abbildung 32). Die Dissertation kommuniziert die Resultate entlang des DSR-Prozessmodells und reflektiert Validität, Grenzen, Praxisimplikationen und Beiträge (Kapitel 10; Kapitel 11).

Externe Fundierung: Die Kommunikations- und Replizierbarkeitsanforderungen folgen den DSR-Leitlinien [44, S. 75–105] und der prozessualen DSR-Methodik [45, S. 45–77].

8 Evaluation der entwickelten Architektur

Die Evaluation eines DSR-Artefakts prüft laut Johannesson und Perjons [60, S. 137] den Nutzen der Referenz-Enterprise-Architektur (REA) – hier für den ÖPNV. Sie klärt konkret, wie gut die entwickelte Architektur die anfangs festgelegten Anforderungen erfüllt.

Die Evaluation einer REA soll die Perspektiven der Stakeholder, die Qualität der Architekturprodukte und -dienste sowie die praktische Anwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit einbeziehen. Sie muss sicherstellen, dass die Architektur wirksam, effizient und auf Geschäftsziele ausgerichtet ist.

Im Mittelpunkt stehen dabei:

1. die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen (siehe Kapitel 6.4) und
2. die Kriterien (Kapitel 3.2.5), die den Referenzcharakter des entwickelten Artefakts, also der Architektur belegen.

8.1 Gestaltung der Evaluation

Für das Design der Evaluation kam das Framework for Evaluation in Design Science (FEDS) von Venable et al. [52] zum Einsatz. Dieses Kapitel beschreibt, wie das von FEDS vorgeschlagene vierstufige Verfahren angewandt wurde.

Die in Tabelle 3 ausgewiesenen Kriterien werden operationalisiert, indem sie auf die Evaluationsmerkmale des FEDS-Prozesses (Ziele, Strategie, Eigenschaften, Episoden) nach Venable et al. [52, S. 77–89] gemappt werden. Tabelle 30 dient dabei als Index der Nachweis (Lines of Evidence): Jeder deduktive Nachweis wird einer Ex-ante-/Ex-post-Prüfung (z.B. Normenkohärenz), jeder induktive Nachweis einer naturalistischen Episode (Kapitel 8.2) zugeordnet. Das Ergebnis wird in Abbildung 22 und Tabelle 14 verdichtet.

Die Evaluationsziele sind deckungsgleich mit den in Kapitel 7.5.2 aus einem triangulierten Anforderungskorpus (ITVU-/VDV-Literatur, Fallstudie BerlKönig, Architektur-Assessment) abgeleiteten Entwurfszielen und prüfen systematisch die funktionalen (A.1–A.6) sowie die nicht-funktionalen Anforderungen (B.1–B.6); die Zuordnung wird über die Evaluationsmatrix (Abbildung 22; Kapitel 8.3) nachverfolgt.

Das Evaluationsvorgehen folgte dabei einem bewusst zweiphasigen Design, das analytische und szenariobasierte Elemente kombinierte. In einer ersten Phase wurde die entwickelte REA im Rahmen eines strukturierten Walkthrough-Verfahrens untersucht, das die Evaluationsepisoden I. bis VII. umfasste. Ziel dieser Phase war es, die Architektur schrittweise entlang der identifizierten Domänen, Prozesse und Artefakte überwiegend naturalistisch geprägt zu prüfen und deren interne Konsistenz, Vollständigkeit sowie Übereinstimmung mit den abgeleiteten Anforderungen systematisch nachzuvollziehen. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser analytischen Durchdringung wurde das Vorgehen in einer zweiten Phase durch ein Playthrough-basiertes Verfahren ergänzt, in dem die REA entlang der Szenarien S1 bis S4 aktiv durchgespielt wurde. Dadurch konnte die

Tragfähigkeit der Architektur als Entscheidungs- und Ordnungsrahmen unter variierenden Integrations-, Governance- und Verantwortlichkeitskonfigurationen evaluiert werden.

Die im Abschnitt 7.4.3 des vorherigen Kapitels vorgestellte Unternehmensarchitektur wurde in 9 Iterationen evaluiert. Der Prozess beginnt mit der Festlegung der Evaluationsziele (Kapitel 8.1.1), gefolgt von der Auswahl einer passenden Evaluationsstrategie (Kapitel 8.1.2), der Bestimmung relevanter Evaluationsmerkmale (Kapitel 8.1.3) und dem Entwurf von Evaluationsepisoden (Kapitel 8.2).

8.1.1 Ziele der Evaluation

Venable et al. [52] nennen im FEDS-Ansatz 4 zentrale, teils konkurrierende Ziele für eine DSR-Evaluation: (1) wissenschaftliche Stringenz, (2) Umgang mit Designunsicherheiten, (3) ethische Aspekte und (4) Effizienz. Johannesson und Perjons [60, S. 141] ergänzen: (5) Analyse möglicher Nebenwirkungen des Artefakts und (6) Vergleich mit der Leistungsfähigkeit von bestehenden Ansätzen.

Jede DSR-Evaluationsstrategie richtet sich nach dem jeweiligen Kontext [60, S. 141]. Entsprechend beschreibt dieses Kapitel zunächst den Evaluationskontext der Referenzarchitektur für klassische ÖPNV-Unternehmen, die bedarfsorientierten Verkehr (NMS) integrieren wollen. Anschließend folgen die Evaluationsziele.

Seit Mitte 2014 begleitete der Autor verschiedene Projekte, besonders in den Bereichen IT und Organisation, zahlreicher ÖPNV-Unternehmen. Ab 2017 verschob sich der Schwerpunkt zunehmend auf EAM-Projekte. Dabei waren zentrale Ziele dieser Projekte, die Transparenz und Austausch zwischen IT- und Fachabteilungen zu erhöhen und die Veränderungsfähigkeit der Unternehmen zu stärken. Während dieser Zeit bestand enger Kontakt zu Fachleuten aus den Bereichen Leitstelle, Vertrieb und Angebotsmanagement. Der Austausch mit Praktikern aus unterschiedlichen Arbeitsbereichen und Hierarchieebenen während der Projekte – etwa Unternehmens- und IT-Berater, Führungskräfte, Softwareentwickler, Unternehmensarchitekten und Kundenbetreuer – war intensiv und regelmäßig. Dabei entstanden nicht nur methodische Grundlagen für ÖPNV-Unternehmen; auch Enterprise Architecture Management (EAM) wurde in vielen ÖPNV-Unternehmen in allen relevanten Bereichen eingeführt und umgesetzt. Die Vielfalt der beteiligten Unternehmen, die Heterogenität der Beteiligten und die Größe der Teams verringerte das Risiko einer einseitigen Bewertung des Artefakts. Es wurde so ebenfalls sichergestellt, dass die Architektur, die teilweise auf Good Practices basiert, auch im realen Umfeld Anwendung fand.

Neben dem Evaluationskontext beeinflussen weitere Faktoren die Gestaltung der Evaluationsstrategie: die Liste der gestellten Anforderungen und die Art der Architektur. Bei der Anforderungserhebung (siehe Kapitel 6.4) wurden 6 funktionale (A1 bis A6) und 6 nicht-funktionale Anforderungen (B1 bis B6) an die Architektur definiert. Für jede Anforderung legte der Autor Eignungskriterien fest. Da die Evaluation primär untersuchen soll, inwieweit die Anforderungen erfüllt sind [44, S. 85], leiten sich daraus die Evaluations-

ziele ab. Hinsichtlich der Art der Architektur gilt: Verschiedene DSR-Artefakte erfordern unterschiedliche Evaluationsdesigns. Da dieses Forschungsvorhaben auf dem wiederverwendungsorientierten Konzept eines Referenzmodells basiert, gilt eine Architektur dann als erfolgreich, wenn die Akteure der adressierten Domäne sie anwenden und bewerten.

Zusammengefasst gilt die entwickelte REA dann als effektiv, wenn sie die definierten Anforderungen erfüllt und eine Enterprise-Architektur für ein ÖPNV-Unternehmen liefert, die Praktiker anwenden. Da der Fokus auf der Effektivität im Rahmen der Anforderungen⁷ liegt, werden die anderen genannten Punkte (1–5 dieses Kapitels) nur im Kapitel 8.1.3 teilweise berücksichtigt.

Das Evaluationskonzept für die REA verfolgt 3 zentrale Ziele:

1. ZIEL 1: Evaluation der Referenz-Enterprise-Architektur hinsichtlich aller funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen und Modellkomponenten.
2. ZIEL 2: Evaluation der Referenz-Enterprise-Architektur in mehreren formativen, naturalistischen Episoden: In realen Umgebungen wird fortlaufend Feedback eingeholt, um Lern- oder Entwicklungsprozesse zu fördern.
3. ZIEL 3: Bewertung der Wirksamkeit der Architektur als Referenz anhand der in Kapitel 3.2.2 genannten Kriterien, die Felix Timm 2020 in seiner Dissertation [46] zusammenstellte. Die Ergebnisse des Architekturentwurfs müssen von ÖPNV-Experten bewertet werden, die die Architektur in der Praxis anwenden werden.

Abschließend kann die zentrale Frage der Evaluation, die in einer Nachbetrachtung in Kapitel 8.3 beantwortet wird, formuliert werden:

Erfüllt die entwickelte Referenz-Enterprise-Architektur (REA) die Erwartungen von ÖPNV-Experten an ihre Effektivität?

Zusätzlich zu den bereits definierten Evaluationszielen (vgl. FEDS) werden die Zielkaskaden je Szenario (ab Evaluationsepisode VIII.) wie folgt zusammengefasst:

- *Utility/Nützlichkeit (alle Szenarien)*: Die REA muss die funktionalen (A.1–A.6) und nicht-funktionalen Anforderungen aus Tabelle 15 (B.1–B.6) in den 4 REA-Domänen (Planung & Ressourceneinsatz, Tarif- & Produktmanagement, Betriebslenkung, Vertrieb/Abrechnung) in jedem Szenario konsistent erfüllen. Referenz sind die in Kapitel 6.5 abgeleiteten Anforderungen.
- *Governance/Verantwortung (S1–S4)*: Die RACI-Zuweisungen je Prozess und der Owned/Shared/Partner-Logik müssen dem Variabilitäts- und Verantwortungsmodell (Kapitel 7.1, 7.2) entsprechen.
- *Interoperabilität und Integrationsqualität (v.a. S2, S3)*: Die OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung, korrekte Clearing-/SLA-Wege sowie die Konsistenz der Delta-Sichten ($S3 \leftrightarrow S4$) bzgl. System-, Daten- und Governance-Unterschieden sind sicherzustellen. Hypothese H1 (S3): Die Trennung von Reservierung und Buchung senkt Clearing-Abweichungen auf $< 0,1\%$ (vgl. VP-Steckbrief SA 02).

- *Security und Resilienz (alle Szenarien, v.a. S3, S4)*: Die Zonierung und Segmentierung (KRITIS-Kontext), AuthN/Z, Audit-Trails und Betriebsüberwachung müssen entlang der integrations- und sicherheitsrelevanten Technologieanker (API-Gateway/IAM, Data-Broker, Event-Streaming, SIEM/HSM) nachweisbar sein. Hypothese H2: Die in Kapitel 7.1 definierten Leitplanken sind in S3, S4 prüf- und auditierbar.
- *Wirksamkeit und Effizienz (FEDS)*: Formative Evidenz aus naturalistischen Episoden (z.B. Experten-Walkthroughs je Szenario) und künstliche Evidenz (Testfälle, Konformitätsprüfung) werden ex ante geplant und ex post verdichtet (Abbildung 21, Tabelle 10).

Beispielhafte KPI-Ziele (ableitbar aus VP-Steckbriefen):

Reservation → Booking-Quote $\geq 85\%$ (S2/S3), Payment-Success $\geq 98\%$ (S2/S3/S4), Billing-Abweichung $< 0,1\%$ (S3/S4).

8.1.2 Strategie zur Evaluation des Artefakts

Im zweiten von FEDS [52] vorgesehenen Schritt werden die Strategien zur Evaluation des Artefakts festgelegt. Venable et al. [52] schlagen 4 Strategien vor, die sich in der Abfolge der Evaluationsepisoden unterscheiden. Der Rahmen definiert eine Matrix des Evaluationszwecks (formativ oder summativ) und des Evaluationsparadigmas (künstlich oder naturalistisch). Laut Venable et al. [52, S. 80–81] ist eine Evaluationsstrategie ein geplanter Ablauf von Evaluationen, der für das jeweilige DSR-Projekt geeignet ist. Obwohl jeder Ablauf vom Kontext des DSR-Projekts abhängt, sollte eine Evaluationsstrategie von einem Zustand ohne Evaluation zu einer – wenn möglich – summativen und naturalistischen Evaluation führen.

Aufbauend auf den Evaluationszielen aus Kapitel 8.1.1 wird eine Evaluationsstrategie entwickelt. Die Design-Risiken sind nicht primär technischer Natur, da die grundlegenden Technologien (APIs, Plattformintegration, Microservices) grundsätzlich verfügbar sind (vgl. Kapitel 7.4.2). Vielmehr liegen Design-Risiken in:

- der organisatorischen Integration von NMS in klassische Betriebsmodelle (Kapitel 9.1.3, 9.1.5),
- der strategischen Akzeptanz innerhalb bestehender Unternehmensziele (Kapitel 7.1.7),
- der Rollen- und Fähigkeitsverschiebung im Unternehmen (Kapitel 9.1.8),
- und der Anwender- und Kundensicht (z.B. Nutzererwartungen an digitale Buchungssysteme, Kapitel 9.1.6).

Damit zeigen sich die Design-Risiken der Architektur eher nutzer- als technologieorientiert. Entsprechend wird eine Strategie gewählt, die sich an dem Human Risk und Effectiveness-Ansatz orientiert und eine formative Evaluation in naturalistischen Settings fo-

kussiert. Die geplanten Evaluationsepisoden folgen einer einheitlichen Struktur und orientieren sich an den Ergebnissen der Anforderungsanalyse.

Die Evaluationsstrategie unterscheidet pro Szenario die FEDS-Rahmen Zweck und Paradigma (vgl. Kapitel 2.8) und koppelt sie mit den abweichenden Varianten und Delta-Artefakten (Kapitel 7.2, 7.3), wie z.B.:

1. *Formativ und naturalistisch (S1–S4)*: Moderierte Szenario-Walkthroughs mit Fach- und IT-Stakeholdern (BVG, BSAG, SWM, VDV) zur Prüfung von RACI, Owned/Shared/Partner-Zuweisungen, Prozess-/System-/Daten-Deltas und KPI-Plausibilitäten. Output: Evaluationsprotokolle als Nachweis (Lines of Evidence) für **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**
2. *Formativ und künstlich (S2/S3)*: Konformitätstests zu OJP/TRIAS/OSDM-Artefakten (z.B. Reservierung, Angebot, Buchung, Token), Constraint-Checks (Cross-Tree-Constraints) und Schnittstellenverträge (Payload-Kerne, SLAs, Fehler/Retry). Output: Prüfprotokolle mit Positiv- und Negativfällen.
3. *Summativ und naturalistisch (S3/S4)*: Delta-Sichten-Review (S3 ↔ S4) im Kontext realer Betriebs- und Clearing-Abläufe (Einnahmenaufteilung, Disposition, Störungen) inkl. Messpunkten (Anschlussqualität, Datenlatenzen, Fehlerquoten). Output: Abgleich des Zielbildes S4 mit der Ist-Tauglichkeit.
4. *Summativ und künstlich (alle Szenarien)*: Szenario-übergreifende Prüfung auf Vollständigkeit und Konsistenz (Traceability-Matrix; Anforderung → Element → Eigenschaft/Episode → Befund) als Abschluss der Iteration. Output: aktualisierte Evaluationsmatrix (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Diese Strategie erweitert die bereits dokumentierte FEDS-Anwendung (4 Schritte: Ziele, Strategie, Eigenschaften, Episoden) um eine explizite Szenario-Schicht und verknüpft sie mit Kapitel 7.2 und 7.3 (Varianten/Deltas).

Die Ergebnisse jeder Episode fließen kontinuierlich in die REA ein, wodurch eine erweiterte Version entsteht, die in der nächsten Phase als Ausgangsarchitektur dient. Die Evaluationszeitpunkte sind im Kapitel 8.1.4, Tabelle 31 aufgeführt.

Abschließend sei angemerkt, dass die sequenziell angelegte FEDS-Strategie (Ziele → Strategie → Eigenschaften → Episoden) bereits im Design verankert ist. Indem die Build-Schleifen mit formativer Evaluation (Kapitel 7.5.5) verkoppelt werden, sind Strategie und Durchführung konsistent aufeinander bezogen.

8.1.3 Eigenschaften der Evaluation

Die Evaluation der Enterprise Referenzarchitektur basiert auf einem systematischen, wissenschaftlichen Ansatz nach den Prinzipien des FEDS von Venable et al. [52]. Formative und summativ Bewertungsmethoden werden kombiniert, um die Architektur umfassend hinsichtlich ihrer Qualität, Anwendbarkeit und Effektivität zu bewerten.

Ein zentrales Merkmal der Evaluation ist der iterative, formative Charakter, der es ermöglicht, kontinuierlich Feedback aus der Praxis zu integrieren und die Architektur schrittweise zu verbessern. Dies entspricht der Zielsetzung, die Architektur nicht nur theoretisch zu validieren, sondern auch ihre Anwendbarkeit und Nützlichkeit in realen Kontexten zu überprüfen. Im Einklang mit Venable et al. [52] wird eine Strategie nach dem Human Risk und Effectiveness-Ansatz verfolgt, die eine Bewertung in realistischer Umgebung mit Stakeholdern ermöglicht.

Zusätzlich erfolgt eine summative Evaluation zur abschließenden Überprüfung der Effektivität und Effizienz. Diese stellt sicher, dass die Architektur die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen (A1–A6 und B1–B6) aus Kapitel 6.3.2 erfüllt. Insbesondere wird geprüft, ob die Architektur für ÖPNV-Unternehmen geeignet ist, die NMS integrieren wollen.

Die Eigenschaften der Evaluation lassen sich durch folgende Kriterien konkretisieren:

1. Zielgerichtetheit: Die Evaluation validiert die definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie die Wirksamkeit der Architektur in der Praxis. Sie untersucht v.a. die Effektivität der Architektur zur Integration von NMS in ÖPNV-Unternehmen.
2. Systematische Struktur: Die Methodik folgt einem klaren Vorgehensmodell, das sich an den 4 Schritten des FEDS orientiert: (1) Zielsetzung, (2) Auswahl der Strategie, (3) Definition der Merkmale und (4) Entwurf der Episoden.
3. Objektivität und Reliabilität: Standardisierte Metriken sowie empirische Daten aus strukturierten Experteninterviews und Szenario-Analysen gewährleisten Objektivität. Um eine hohe Reliabilität zu gewährleisten, sind die Prozesse und Ergebnisse umfassend dokumentiert und damit nachvollziehbar.
4. Praxisrelevanz und Anwendbarkeit: Die Anwendbarkeit der Architektur in realen ÖPNV-Unternehmen ist ein zentrales Kriterium der Evaluation. Dazu wird die Architektur in naturalistischen Episoden getestet, um ihre Praxistauglichkeit und Akzeptanz zu bewerten.
5. Reproduzierbarkeit und Validität: Die Evaluation folgt einem transparenten Prozess, der es ermöglicht, die Ergebnisse zu reproduzieren und die Validität der Erkenntnisse zu überprüfen.

Ergänzend zur naturalistischen Evaluation werden artifizielle Bewertungen im Laborkontext durchgeführt. Ziel ist die Überprüfung spezieller Merkmale des Artefakts wie etwa Struktur, Leistungsbezug oder Qualität.

Neben den in diesem Kapitel angelegten Eigenschaften werden die Szenario-sensitiven Prüfkriterien beispielhaft entlang der Kurzmatrix (Kapitel 5.5) verankert und mit Messpunkten hinterlegt:

- Strategie/Capability-Fit: Deckung von Treibern (z.B. First-/Last-Mile, Kundenzufriedenheit) mit Capabilities (digitale Plattform, NMS-Management, Da-

ten/Security-Kompetenzen); Messpunkte: Abdeckung/Redundanzen; Reifegrad (CMMI-ähnlich).

- Prozess-/RACI-Kohärenz: Konsistenz der Prozessketten (AO/BO) je Szenario; Messpunkte: RACI-Eindeutigkeit (ohne Mehrdeutigkeiten), Anzahl Governance-Konflikte.
- System-/Daten-Interoperabilität: OJP-konforme Trennungen, Event-/Payload-Konsistenz, Datendrehscheibe; Messpunkte: Schnittstellen-Konformität, Retry/Fehlerquoten, Datenlatenzen.
- Security/KRITIS-Zonierung: Nachweis von AuthN/Z, Audit-Trails, SIEM/HSM-Integration; Messpunkte: Audit-Checkliste erfüllt/abweichend.
- Finance/Clearing/Compliance: Korrektheit Einnahmen-/Clearing-Flüsse; Messpunkte: Billing-Abweichung (Ziel < 0,1 %), SLA-Erfüllung.

Die Auswahl folgt der in Kapitel 7.1 verankerten Integrations-/Sicherheitsleitlinie und den nicht-funktionalen Anforderungen aus Kapitel Tabelle 15 (Kriterien B.1–B.6, u.a. Interoperabilität, Skalierbarkeit, Verständlichkeit).

Die Auswahl der zu prüfenden Eigenschaften folgt den Architekturprinzipien und der Modellierungstaktik: Im Fokus stehen die konsistente Kopplung der strategisch-motivatorischen und operativen Sichten (zweigeteilter Viewpoint mit Integrationsschicht) sowie Austauschbarkeit und Interoperabilität der Komponenten. Dies entspricht den in Kapitel 7.5.7 spezifizierten Qualitätsmerkmalen (u.a. Interoperabilität, Skalierbarkeit, Verständlichkeit) und dem Traceability Prinzip.

8.1.4 Vorstellung der Evaluationsepisoden

Bewertung und Konkretisierung der REA erfolgte in mehreren Evaluationsepisoden. Sie sind in Tabelle 31 mitsamt des jeweiligen Fokus aufgeführt.

Tabelle 31: Evaluationsepisoden

Episode	Datum	Paradigma	Methode
I. Architektur Check I	Anfang 2022	Formativ/ Artifiziell	Laboratorische Analyse: Architek- turkomponenten
II. Bremer Straßen- bahn AG (BSAG), Bremen	3.11.2022 7.11.2022	Formativ/ Naturalistisch	Experteninterview und -bewertung Transkribierte Aufzeichnung Inhaltsanalyse

Episode	Datum	Paradigma	Methode
III. Stadtwerke München	5.4.2023	Formativ/ Naturalistisch	Experteninterview und -bewertung Transkribierte Aufzeichnung Inhaltsanalyse
IV. Architektur Check II	Mitte 2023	Formativ/ Artifiziell	Laboratorische Analyse: Architek- turkomponenten
V. VDV-Tagung, Rostock	19.10.2023	Formativ/ Naturalistisch	Experteninterview und -bewertung Einzelprotokoll
VI. VDV-Experten	5.12.2023	Summativ/ Naturalistisch	Experteninterview und -bewertung Transkribierte Aufzeichnung Inhaltsanalyse
VII. Enterprise-Architekt, BVG	11.1.2024	Summativ/ Naturalistisch	Experteninterview und -bewertung Einzelprotokoll
VIII. Szenario Analyse	September 2025	Summativ/ Artifiziell	Laboratorische Analyse: Anforderungen der Szenarien überprüft.
IX. Gesamtevaluation Architektur	November 2025	Summativ/ Artifiziell	Bewertung Gesamtarchitektur

Die episodische Abfolge ist an die Versionierung der Artefakte gekoppelt (Kapitel 7.5.8): Rückkopplungen führten iterativ zu konsolidierten Ständen (u.a. Präzisierung der Anwendungsschicht, Schärfung von Prozess- und Capability-Sichten), was die spätere Gesamtevaluation vorbereitet und die Replizierbarkeit durch die Dokumentationslogik in Kapitel 7.5.9 absichert.

Die Experteninterviews der Evaluationsepisoden II., III. und VI. wurden digital aufgezeichnet, transkribiert und nach Mayring [61] inhaltsanalytisch ausgewertet. Die Interviews der Episoden V. und VII. dokumentierte der Autor in einem Protokoll, ergänzt durch Notizen eines weiteren Anwesenden. Anschließend wurden diese ausgewertet.

Als Ergänzung zu den geplanten Episoden enthält Evaluationsepisode IX in Kapitel 8.2.9 eine Szenario-bezogene Episode. Sie greift den Variantenkatalog (Kapitel 7.2) und die Delta-Sichten (Kapitel 7.3) auf, knüpft unmittelbar an die dort dokumentierten Variationspunkte an und sichert zentrale Designentscheidungen bzw. Leitplanken (z.B. KRITIS-Zonierung, Schnittstellen-Governance) empirisch ab. Dies geschieht durch die Einbindung Szenario-spezifischer Delta-Sichten.

Alle Ergebnisse sind schriftlich dokumentiert. Die Ergebnisse der einzelnen Evaluationsepisoden werden im Kapitel 8.2 erläutert. Die abschließende Überprüfung und Bewertung der REA findet sich in Kapitel 9.

8.2 Evaluationsepisoden

Zur gezielten Überprüfung und Weiterentwicklung der REA finden wie geplant 9 Evaluationsepisoden statt. Sie kombinieren verschiedene Methoden und analysieren spezifische Aspekte der Architektur in realen und simulierten Anwendungsszenarien. Die folgenden Unterkapitel stellen Vorgehen und Ergebnisse dieser Episoden dar. Die zusammengefassten Ergebnisse aller Evaluationsepisoden sind in der finalen Version der Architektur zu sehen, die in Kapitel 9 präsentiert wird.

8.2.1 Episode I: Architektur Check I

Bei der im Rahmen der Anforderungsanalyse (Kapitel 6.3) entwickelten prototypischen Architekturlösung des BerlKönig zeigte sich: Die Zielgruppe, bestehend aus IT- und Fachabteilungsmitarbeitern sowie dem Management, empfand sie als zu detailliert. Diese Erkenntnis führte dazu, die Detaillierungstiefe der REA gezielt anzupassen (Kapitel 7), um technische und geschäftliche Anforderungen besser zu adressieren. Die Architektur (Abbildung 18) diente in dieser Episode als Evaluationsobjekt. Die Ergebnisse der Evaluationsepisode I. wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 1_Evaluation – Architektur Check I [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

In dieser Evaluationsepisode wird das entwickelte Artefakt in einem artifiziellen Setting bewertet, um durch den Abgleich mit funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen möglichst frühzeitig Schwachstellen zu erkennen und gezielt Optimierungen vorzunehmen. Diese Art der Evaluation dient der kontinuierlichen Verbesserung während der Entwicklung des Artefakts. In diesem Forschungsvorhaben erfolgte sie in einer kontrollierten Umgebung mit Komponententests. Außerdem wurde überprüft, ob der Architekturentwurf konsistent ist, das heißt, ob die verwendeten Komponenten und die Beziehungen zwischen den Komponenten den Entwurf stützen.

Methoden und Vorgehen7

Die in Kapitel 7.4.2 in Abbildung 18 dargestellte erste Version einer REA wurde mit den in der Anforderungsanalyse ermittelten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen auf Komponentenebene verglichen. Dies geschah in einer laborbasierten, artifiziellen Analyse, die strukturelle und konzeptionelle Schwächen frühzeitig aufdecken sollte.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Prüfung der Erfüllung von funktionalen (Tabelle 32) und nicht-funktionalen (Tabelle 33) Anforderungen lieferte die in den folgenden beiden Tabellen dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 32: Erfüllung funktionaler Anforderungen

A. Integration von NMS	NMS werden auf allen Ebenen der Enterprise Architecture berücksichtigt, besonders auf der prozessualen Ebene. <i>Dieser Punkt wurde im Rahmen der laborbasierten, artifiziellen Prüfung (Episode I: Architektur Check I) anhand der Erfüllung der Anforderungen A.1 bis A6 geprüft und als erfüllt bewertet.</i>
A.1 Planung	Der Planungsprozess wurde um bedarfsorientierte Komponenten erweitert. Neue Elemente wie die Einsatzplanung kamen hinzu, während bestehende Teilkomponenten, etwa die Dienstplanung, um bedarfsorientierte Aufgaben erweitert wurden. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
A.2 Ressourcenmanagement	Die Personal- und Fahrzeugdisposition wurde um bedarfsorientierte Elemente erweitert. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
A.3 Tarif- und Produktmanagement	Das zentrale Tarif- und Produktmanagement wurde um den Prozess Fahrpreis- und Mietpreisgestaltung für bedarfsorientierten Verkehr erweitert. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
A.4 Betriebliche Steuerung	Die Verkehrssteuerung wurde in 2 Bereichen erweitert: a. in der kurzfristigen Verkehrsdisposition, die die Leitstelle unterstützt, bedarfsorientierte Anforderungen zu erfüllen, b. in der Fahrleistungserbringung durch Funktionen wie selbsterbrachte und autonome Beförderung. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
A.5 Vertrieb	Der Vertrieb wurde um Reiseinformation, Planung und Buchung ergänzt. Diese Prozesse sind entscheidend für den ÖPNV-Vertrieb. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
A.6 Digitale Plattform	Die digitale Plattform prägt sich hier auf der Anwendungsebene aus. Diese Anforderung kann: a. separat umgesetzt oder b. durch eine Erweiterung des Vertriebssystem gelöst werden. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>

Die erste Version der Referenz-Enterprise-Architektur deckt alle in der Anforderungsanalyse ermittelten funktionalen Anforderungen ab.

Tabelle 33: Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen

B.1 Plattformunabhängigkeit	Die Enterprise Architecture (EA) referenziert im technischen Bereich über generalisierte Schnittstellen auf Anwendungen, die aber keinem Hersteller proprietär zuzuordnen sind. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
B.2 Skalierbarkeit	Die EA basiert auf Anforderungen aus VDV-Dokumenten und dem ITVU-Kernmodell von Scholz. Hinweise zu Größenklassen von Unternehmen fehlen in den Quellen. Zukünftig müssen Experten aus Verkehrsunternehmen unterschiedlichster Größe die EA evaluieren. <i>Dieser Punkt konnte in der ersten Evaluation nicht abschließend geklärt werden, da mehr als ein Expertenfeedback (aus unterschiedlichen ÖPNV-Unternehmen verschiedener Größenklassen) erforderlich ist.</i>
B.3 Flexibilität	Die REA ist durch Business- und technische Schnittstellen sowie die Entkoppelung von Anwendung und Daten über eine zentrale Schnittstelle (Datendrehscheibe, etwa ein ESB) flexibel gestaltet. Diese Struktur unterstützt flexible wie schnelle Anpassungen an den sich verändernden Markt des bedarfsgerechten Personennahverkehrs. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
B.4 Wiederverwendbarkeit von Komponenten	Die Wiederverwendbarkeit von Komponenten ist auf allen Ebenen gewährleistet. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
B.5 Interoperabilität	Die zentrale Datendrehscheibe (Schnittstelle) und die gekapselten Dienste sichern die Interoperabilität. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>
B.6 Vereinfachung	Während der Anforderungsermittlung wurde – basierend auf der BerlKönig-Entwicklung – entschieden, die Architektur zugunsten der Alltagstauglichkeit deutlich zu vereinfachen. <i>Dieser Punkt wurde geprüft und als erfüllt angesehen.</i>

Alle funktionalen Anforderungen wurden erfüllt. Die Analyse zeigte auch, dass eine der nicht-funktionalen Anforderung noch nicht als erfüllt angesehen werden kann: B2 Skalierbarkeit³⁷ wurde in Episode I nicht als erfüllt bewertet, sondern als offen markiert, da die Bewertung eine breitere Evidenzbasis (mehrere Unternehmensgrößenklassen) erfordert; die weitere Einordnung erfolgt in den Folgeepisoden.

³⁷ In den nachfolgenden Episoden erfolgt eine vertiefte Untersuchung der Skalierbarkeit (B2).

Zusammenfassend ergab die Prüfung der Anforderungen die folgenden Ergebnisse:

1. NMS sind auf allen Ebenen der Enterprise-Architektur berücksichtigt, besonders aus prozessualer Perspektive.
2. Die Architektur erwies sich als flexibel. Einzelne Module wurden weiterentwickelt, um die Interoperabilität zu verbessern.
3. Eine nicht-funktionale Anforderung, B.2 wurde als nicht geklärt eingestuft und für die nächsten Entwicklungsphasen als Schwerpunkte festgelegt.

Die gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung der Architektur ein.

Strategisch-motivatorische Ebene des Architekturentwurfs

Im strategischen Architekturbereich sollte die Beziehung zwischen Stakeholder (Anspruchsgruppe), Driver (Treiber) und Goal (Ziel) konsistent als Association-Relation umgesetzt werden. Diese ist zwar – im Vergleich mit der im Entwurf (Abbildung 16) verwendeten Influence-Relation – semantisch schwächer, entspricht jedoch besser den Standards einer Referenz-EA und ist methodisch angemessener:

- (i) In ArchiMate beschreibt Influence eine gerichtete Wirkbeziehung mit expliziter Beitragssemantik (inkl. Vorzeichen bzw. Stärke). Sie eignet sich daher für kausale Zusammenhänge zwischen Motivationselementen (z.B. Driver/Assessment → Goal) [71, Kap. 5.2.3, S. 53–54]. Association hingegen ist eine unspezifizierte, generische Beziehung, die sich besonders für frühe oder referenzhafte Modelle anbietet und später in Instanzen präzisiert werden kann [71, S. 54].
- (ii) Für die Kette Stakeholder–Driver–Goal empfiehlt der Standard ausdrücklich die Association-Relation. Treiber werden Stakeholdern „associated“ („drivers that are associated with a stakeholder [...] are often called ‘concerns’“ [71, S. 64]). Damit ist im Stakeholder-Driver-Glied die Association sogar die sprachlich präferierte Relation, während eine Influence hier eine ungesicherte Kausalbehauptung darstellt.
- (iii) Als Referenz-EA bleibt die REA bewusst neutral und vermeidet universell gültige Wirkannahmen. Die Kausal-Spezifizierung – wo sinnvoll als Influence mit Vorzeichen und Stärke – erfolgt erst im Instanzmodell des Unternehmens entlang der DP-Verknüpfungen und Capabilities der strategisch-motivatorischen Ebene (Kapitel 7.1.7).
- (iv) Die Umstellung auf Association stärkt die normative Rückbindung der REA an etablierte Rahmenwerke wie TOGAF und ArchiMate. Diese fordern semantische Strenge auf der Motivationsebene. Der frühere Entwurf (Abbildung 16) wird daher im Sinne der Standardkonformität angepasst.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen dieser Evaluationsphase ergeben sich die folgenden Empfehlungen:

1. Reduzierung der Detaillierungstiefe: Die Architektur sollte – insbesondere für die Managementebene – verständlicher dargestellt werden und weniger detailliert sein.
2. Verbesserung der Interoperabilität: Die Schnittstellen zu externen Mobilitätsdienstleistern müssen präziser ausgearbeitet und beschrieben werden, um eine nahtlose Integration zu gewährleisten.
3. Skalierbarkeit und Performance-Optimierung: Die Architektur sollte weiter auf Skalierbarkeit geprüft werden, v.a. für Großstädte mit hoher Nutzerdichte.
4. Anpassung des Beziehungstyp zwischen Stakeholder, Driver und Goal im strategischen Bereich der REA.

Diese Handlungsempfehlungen flossen in die nächsten Entwicklungszyklen der Architektur ein und bildeten die Grundlage für weitere Evaluationen.

Die Befundlage wurde über das in Kapitel 7.5.7 beschriebene Zuordnungs-/Traceability-Prinzip in der Evaluationsmatrix (Abbildung 22, Kapitel 8.3) systematisch auf

Anforderung → Architekturelement → Evaluationsbefund

gemappt.

8.2.2 Episode II: BSAG

Die zweite Evaluationsrunde basierte maßgeblich auf einem Experteninterview mit dem CIO der Bremer Straßenbahn AG (BSAG). Die Ergebnisse dieser Evaluationsepisode wurde in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 2_Evaluation – Bremen – 3-11- und 7-11-2022 [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Die BSAG wurde aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung und ihrer Unternehmensgröße als Evaluationspartner ausgewählt: Ziel war es, die entwickelte Architektur auf ihre Praxistauglichkeit für ein etabliertes, kleines ÖPNV-Unternehmens zu prüfen. Im Fokus stand, inwiefern die Architektur den strategischen und operativen Anforderungen eines ÖPNV-Unternehmens gerecht wird.

Methode und Vorgehen

Die Evaluation erfolgte in einem formativen/naturalistischen Setting durch ein Experteninterview. Da es hierbei um die Bewertung der Architektur durch den Experten ging, wurde die Architektur präsentiert und die Rückmeldungen des CIO auditiv aufgezeich-

net. Im Nachgang transkribierte der Autor die Aufzeichnung samt Zeitangaben und unterzog diese einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [61].

Die Analyse orientierte sich an qualitativen Kriterien wie Verständlichkeit, Relevanz und Anpassungsfähigkeit (Anforderungen) der Architektur.

Die beiden Interviews mit dem CIO der Bremer Straßenbahn AG, Jörg Stephan Rings, fanden statt am 3. November 2022 (Interview 1, [227]) und am 7. November 2022 (Interview 2, [228]). Gegenstand der Interviews und Grundlage für die Bewertung war die im Designprozess entwickelte und im Zuge der Evaluation überarbeitete Unternehmensarchitektur (Kapitel 5). Die Ergebnisse dieser Evaluationsepisode wurden in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung [50] diskutiert und dokumentiert.

Anzumerken ist hier, dass die später verwendeten IDs (z.B. DP-01, DP-I, AP-1 usw.) in dieser frühen Phase der Dissertation noch nicht verwendet wurden. Die in der Evaluation verwendeten IDs entnehmen Sie bitte der Abbildung 20: Überarbeitete Version Geschäfts-/Anwendungsarchitektur.

Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse lassen sich 3 Bereichen zuordnen: Bewertung der Geschäftsstrategieebene (I.), Bewertung der Geschäfts- und Anwendungsebene (II.) und die Bewertung der Planung und des Ressourceneinsatzes (III.).

I. Geschäftsstrategische Ebene

Die Evaluation der Unternehmensarchitektur lieferte Erkenntnisse über die strategische Ausrichtung der Bremer Straßenbahn AG. Der CIO des Unternehmens identifizierte Eckpunkte für einen Ausbau der Architektur, darunter die stärkere Einbindung verschiedener Stakeholder-Gruppen und die Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs.

Nach einer ersten Vorstellung des strategisch-motivatorischen Architekturbereichs inkl. der zentralen Ziele bewertete der Interviewpartner die strategische Architektur positiv [227, 0:53:00]. Zudem verwies er auf Ähnlichkeiten zum Modell der Hamburger Hochbahn. Bei den folgenden beiden Punkten sah er Veränderungs- bzw. Erweiterungspotenzial:

1. Kundenzufriedenheit erweitern zu Stakeholder-Zufriedenheit [227, 0:56:00]: Der Befragte regte an, die Kundenzufriedenheit um die Zufriedenheit weiterer Stakeholder-Gruppen zu ergänzen. Der Autor folgte diesem Vorschlag und integrierte die Stakeholder-Zufriedenheit als übergeordnetes Konzept, das die Kundenzufriedenheit einschließt (Pfeil von Stakeholder- zu Kundenzufriedenheit).
2. Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs [227, 0:57:00–00:59:00]: Hierbei wies der Befragte auf ein zentrales Ziel von Eigentümern bzw. Aufgabenträger von ÖPNV-Unternehmen (im deutschen Raum meist eine Gemeinde oder Stadt) hin: Die

Förderung ökologischer Aspekte durch die Reduzierung oder Substitution des motorisierten Individualverkehrs.

Beide Punkte – ein erweitertes Konzept der Zufriedenheit von Stakeholdern sowie die Reduktion des motorisierten Individualverkehrs – flossen in die neue Version der Architektur ein. Eine weitere geplante Evaluationsrunde wird prüfen, ob der aktualisierte Ansatz tragfähig ist.

Abbildung 24 in Kapitel 9.1.1 zeigt die Ergänzungen, die auf den Erkenntnissen aus Interview 1 [227] basieren, im Vergleich zur ursprünglichen Version (siehe Abbildung 16 aus Kapitel 7.4.1).

II. Geschäfts- und Anwendungsebene

Auch die Geschäfts- und Anwendungsebene der Architektur wurde während des Expertengesprächs kritisch geprüft. Der Experte schlug hier vor, Prozesse [227, 0:4800–0:50:00]; [228, 0:35:00–0:38:00] umzubenennen und angebots- und bedarfsorientierte Planung [227, 0:37:00–0:3800, 0:50:00] zu unterscheiden. Diese Änderungsvorschläge flossen in die überarbeitete Architektur ein. Die Darstellung der Prozesse im Bereich „Planung und Nutzung von Ressourcen“ erhielt positives Feedback. Sie überzeugte durch branchenübliche Terminologie, ausreichende Detailgenauigkeit (bzw. Granularität) und Vollständigkeit. In einem weiteren Interview bewertete man die Struktur erneut, insbesondere die Business Services und Business-Rollen. Dabei hob der CIO die Korrektheit, Eignung und Praxistauglichkeit für ein ÖPNV-Unternehmen in der Größe der BSAG [228, 1:01:00–1:02:00, 1:16:00–1:18:00] der definierten Elemente des Modells hervor.

Besonders positiv wurde das Konzept einer zentralen Datendrehscheibe für die technischen Dienste bewertet. Sie soll es Unternehmen ermöglichen, neue Dienste schnell und einfach zu entwickeln. Der CIO zeigte sich von der vorgestellten Unternehmensarchitektur beeindruckt und äußerte, dass diese seine Arbeit, v.a. bei Erweiterungen und Migrationen, vereinfachen werde.

III. Bewertung am Beispiel der Planung und des Ressourceneinsatzes

Die Erkenntnisse aus dem Experteninterview über die Beziehungen innerhalb und zwischen der Geschäfts- und Anwendungsebene werden am Beispiel der Planung und des Ressourceneinsatzes kritisch geprüft und bewertet. Die daraus resultierenden Änderungsbedarfe werden berücksichtigt, dokumentiert und erläutert.

Abbildung 20 zeigt die überarbeitete Version, die das Ergebnis dieser Evaluationsepisode darstellt.

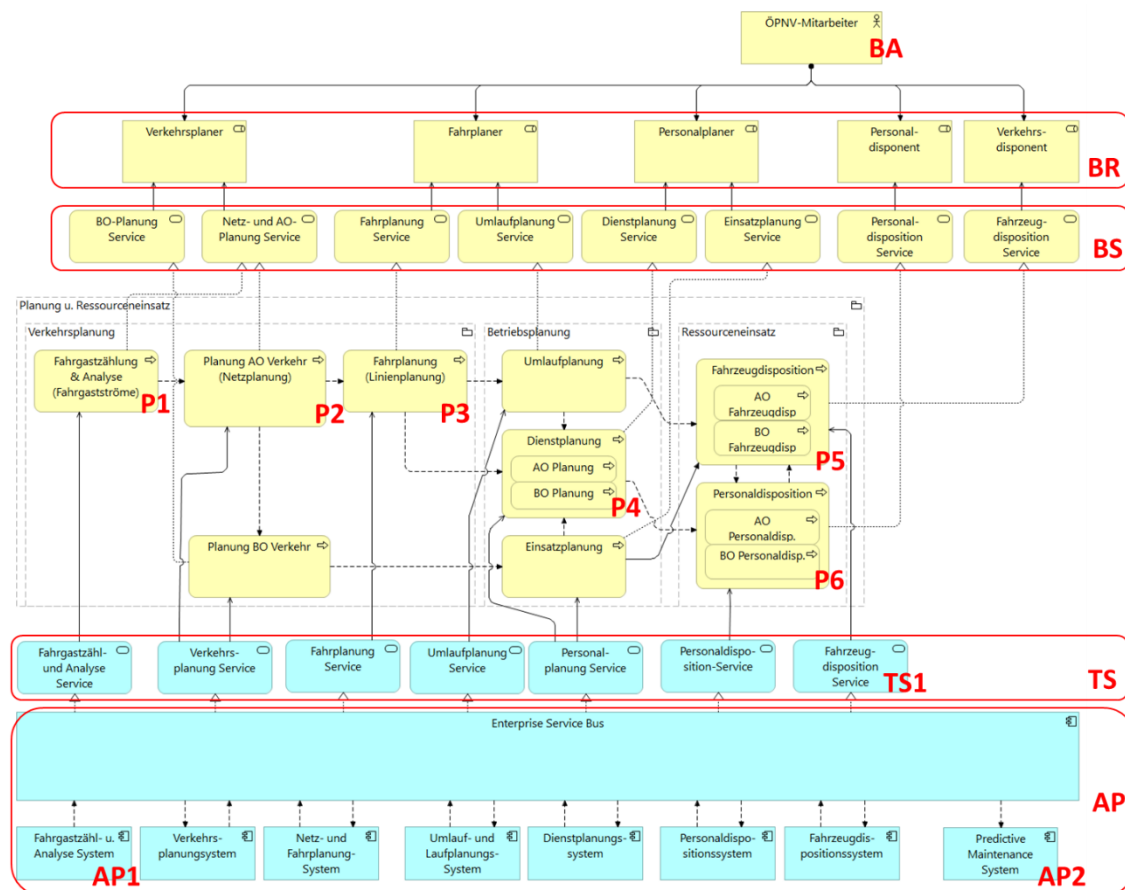


Abbildung 20: Überarbeitete Version Geschäfts-/Anwendungsarchitektur

Die in Abbildung 20 dargestellten Ergebnisse werden in Tabelle 34 ausführlich erläutert. Ab hier beziehen sich alle Angaben – insbesondere die roten Zahlen und Buchstaben – bis zum Abschluss dieses Unterkapitels auf Abbildung 20.

Tabelle 34: Erläuterung der Bewertungsergebnisse auf Prozessebene

Nr.	Quelle, Minute	Erläuterung
P1	[227, 0:41:00]	Um das Modell verständlicher zu machen, sollte der Prozessname „Fahrgastzähl- und Analysesystem“ um den Zusatz „(Fahrgastströme)“ ergänzt werden. Das verdeutlicht, dass es nicht (nur) um Zähl-daten geht, sondern auch um Ergebnisse von Fahrgastbefragungen, ausgewertete Handydaten und – laut Befragtem besonders wichtig – um Stadtplanungsdaten, die den aktuellen sowie den zukünftigen Verkehrsbedarf präzise abbilden.
P2	[227, 0:50:00]	Der Befragte empfahl außerdem, den Begriff „Prozess“ durch den Zusatz „(Netzplanung)“ zu erweitern, um die gängige Fachterminologie zu berücksichtigen.

Nr.	Quelle, Minute	Erläuterung
	[227, 0:55:00–0:63:00]	Er skizzierte den üblichen Ablauf bei der angebotsorientierten Prozessplanung: von der Netzplanung über die Linienplanung bis zur Umlaufplanung, also von der Grob- zur Feinplanung. Die bedarfsorientierte Planung ist der Netzplanung als eigenständiger Prozess nachgelagert. Dem Befragten fielen viele neue Dienstleistungen ein, die sich auf Grundlage der gewonnenen Informationen entwickeln ließen. So könnten etwa an hochfrequentierten Standorten (Knotenpunkten) gezielt nicht-verkehrsbezogene Produkte angeboten werden.
P3	[227, 0:63:00]	Der Befragte schlug vor, den Begriff „Linienplanung“ zum besseren Verständnis durch „Fahrplanplanung (Linienplanung)“ zu ersetzen, da viele, besonders kleinere Verkehrsunternehmen den Begriff „Fahrplanplanung“ bevorzugen.
P4	[227, 1:13:00]	Die Dienstplanung erfordert aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen eine Unterscheidung zwischen bedarfsgerechter Dienstplanung und angebotsorientierter Umlaufplanung. Das Modell wurde deshalb um entsprechende Teilprozesse (Bedarf/Angebot) ergänzt.
P5	[227, 0:36:00]	Auch bei der Fahrzeugdisposition unterscheidet man zwischen bedarfsorientierter und angebotsorientierter Disposition, da beide Teilprozesse unterschiedliche Merkmale aufweisen. Die angebotsorientierte Disposition konzentriert sich auf das zentrale Fuhrparkmanagement, das auf Betriebshöfen der Verkehrsunternehmen erfolgt. Die bedarfsorientierte Disposition, z.B. bei Sharing-Anbietern, stellt das Servicepersonal in den Mittelpunkt, das die Fahrzeuge – meist nachts – an bestimmte Standorte wie Mobilitätsknotenpunkte zurückbringt.
P6	[227, 0:36:00, 1:05:00]	Auch bei der Personaleinsatzplanung gibt es Unterschiede. Der interviewte Experte betonte den erheblichen Unterschied zwischen stationärer und mobiler Personaleinsatzplanung.

Die Evaluation des Bereichs „Planung und Nutzung von Ressourcen“ schloss mit der Frage an den interviewten Experten, ob die Prozessdarstellung für diesen Bereich ausreichend sei [227, 1:30:00–1:35:00]. Der Befragte erklärte:

- a. Die verwendeten Begriffe seien branchenüblich und verständlich.
- b. Die Granularität sei ausreichend für das interne IT-Verständnis und die Diskussion mit der Fachabteilung.
- c. Die Darstellung sei vollständig.
- d. Das Modell sei für Personen mit Kenntnissen im öffentlichen Verkehr leicht verständlich.

Im späteren Interview 2 [228] wurde die Struktur weiter geprüft. Dabei betrachtete man die Ebenen Business Services (siehe BS in Abbildung 20) und Business Role (siehe BR in Abbildung 20). Ziel der Business Services ist es, Rollen und Prozess über klar definierte Services zu entkoppeln. Die analysierten Rollen ordnete man der Ebene „Wirtschaftsakteur“ (siehe BA in Abbildung 20) zu – in diesem Fall einem Mitarbeiter des Verkehrsunternehmens.

Laut der befragten Person [228, 0:10:00] sind die definierten Business Services (siehe BS in Abbildung 20) hinsichtlich Terminologie, Granularität und Vollständigkeit korrekt, modelltauglich und für erfahrene ÖPNV-Mitarbeiter nachvollziehbar. Dasselbe gilt für die modellierten Geschäftsrollen in diesem Bereich [228].

Anschließend bewertete man die Ebene der technischen Dienste (siehe TS in Abbildung 20) und die Anwendungsebene. Die Anwendungsebene wird mithilfe von technischen Diensten von den Prozessen entkoppelt. Diese Dienste greifen über einen zentralen Enterprise Service Bus (ESB) auf die Fachanwendungen zu. Der ESB fungiert als Datendrehscheibe, die Unternehmen in Zukunft die schnelle und einfache Entwicklung neuer Dienste ermöglicht, da alle Daten über diese ESB-Anwendung verfügbar und orchestrierbar sind. Das Konzept der Einführung einer Datendrehscheibe überzeugte den Interviewpartner, da die Hamburger Hochbahn diesen Ansatz langfristig als universellen ESB verfolgt [228]. Anschließend bewertete man im Interview die technischen Dienste. Dabei wurde lediglich bei TS1 (siehe Abbildung 20) empfohlen, den Begriff „Fahrzeugmanagement“ zum besseren Verständnis durch „Fahrzeugdisposition“ zu ersetzen.

Die Anwendungen tauschen Daten über ein zentrales Interface, ggf. eine ESB-Anwendung, aus. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Fachanwendungen – etwa das Fahrgastzähl- und Fahrgastanalysesystem –, über ein zentrales Interface bzw. die zentrale ESB-Anwendung geladen und entladen werden. So stehen die Daten von Fachanwendungen auch anderen Anwendungen zur Verfügung.

Der Bereich Planung und Nutzung von Ressourcen umfasst 7 Fachanwendungen, die über die ESB-Anwendung Daten austauschen. Dabei ist zu beachten, dass die Anwendung AP1 (siehe Abbildung 20) – Passagierzähl- und Analysesystem – i.d.R. aus mehreren Anwendungen besteht. Beispiele hierfür sind das Fahrgastzählsystem (in Bussen

und Straßenbahnen und als Hintergrundsystem), Systeme zur Fahrgastbefragung und zur statistischen Hochrechnung sowie Stadtplanungssysteme.

Im Interview [228, 0:26:00–0:30:00] schlug die befragte Person zudem vor, eine spezialisierte Anwendung für die Wartung des Fuhrparks des Unternehmens einzuführen. Dieses Predictive Maintenance System (siehe AP2 in Abbildung 20) könnte Fahrzeugdaten, die über die Fahrzeugrechner (Onboard-Unit) in den Fahrzeugen erfasst werden, übertragen, mithilfe eines digitalen Zwillings auswerten und so eine optimierte Wartung berechnen.

Am Ende des zweiten Interviews [228] stellte der Interviewer die folgenden Fragen, um die grundlegende Bewertung abzuschließen:

Frage 1 [228, 1:09:00]: „Wie ist Ihr Gesamteindruck von der vorgestellten Unternehmensarchitektur?“

Antwort: „Ehrlich gesagt? Sehr gut, ich habe immer davon geträumt, so etwas zu haben. Wir haben sogar schon einmal im VDV in unserer Arbeitsgruppe vor 2 Jahren darüber diskutiert. Wäre es nicht toll, wenn wir so eine Blaupause hätten, wie unsere ganze Welt aussehen würde? Der einhellige Tenor war, so etwas gibt es nicht.“

Frage 2 [228, 1:10:00]: „Würde eine solche Unternehmensarchitektur Ihre Arbeit als CIO erleichtern?“

Antwort: „Ja, natürlich, der erste Eindruck hat das schon beantwortet [...]. Für uns ist das eigentlich eine Hilfe, wenn man entweder expandieren will oder vielleicht migrieren will.“

Frage 3 [228, 1:11:00]: „Halten Sie die Unternehmensarchitektur für den öffentlichen Verkehr für wissenschaftlich relevant?“

Antwort: „[...] Ob ich eine Unternehmensarchitektur für wissenschaftlich relevant halte? Ja, sofort. Für PT [public transport] natürlich schon, ja. Weil, ich kann davon profitieren.“

Fazit und Handlungsempfehlungen

Die vorgestellte Unternehmensarchitektur erweist sich in dieser Evaluationsphase als betriebswirtschaftlich relevant für den ÖPNV. Der interviewte Experte betrachtet sie als wertvolle Ressource, die sowohl ihm – in seiner Rolle als CIO – als auch dem Unternehmen zugutekommen könnte. Die positive Resonanz unterstreicht, dass eine gut konzipierte Unternehmensarchitektur wesentlich zur strategischen Ausrichtung und Effizienzsteigerung in Unternehmen des ÖPNV beiträgt.

Die Evaluation, basierend auf dem Experteninterview, zeigt, dass die ursprünglich entwickelte Struktur – angelehnt an den angebotsorientierten Architekturansatz nach Scholz [9] und die Erfahrungen des Autor, gezielt erweitert werden kann. Die Ergebnisse

verdeutlichen, welche Architekturbausteine für einen bedarfsgerechten Verkehr angepasst oder ergänzt werden müssen.

Der Befragte bestätigte die Nützlichkeit einer solchen Referenz-Unternehmensarchitektur für seine Arbeit als CIO. Die „grüne Wiese“-Sicht³⁸ auf eine kohärente Unternehmensarchitektur erleichtert die Erweiterung und Migration neuer bedarfsgerechter Prozesse, Dienste und technischer Komponenten. Die in der Einleitung gestellte Frage, wie sich NMS auf die EA von ÖPNV-Organisationen auswirken, lässt sich nach der ersten Auswertung folgendermaßen beantworten: Die Integration von bedarfsgerechtem Verkehr wirkt sich auf alle Bereiche der Organisation aus. Neben der Anpassung von Prozessen müssen auch Fähigkeiten, Rollen und Business Services sowie technische Dienste, Anwendungen und Datenstrukturen überarbeitet werden. Die modulare Architektur bleibt dabei flexibel: Sie lässt offen, welche Leistungen das ÖPNV-Unternehmen selbst erbringt und welche externe Dienstleister übernehmen.

Für die Weiterentwicklung der Architektur ergeben sich daraus 3 zentrale Handlungsempfehlungen:

1. Erweiterung der strategischen Ziele: Sie sollten Maßnahmen zur Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs explizit einbeziehen.
2. Integration von Stakeholder-Interessen: Mechanismen zur Berücksichtigung der Bedürfnisse verschiedener Stakeholder-Gruppen sollten ergänzt werden.
3. Flexibilität und Modularität stärken: Die Architektur muss so weiterentwickelt werden, dass sie künftige Mobilitätsdienste problemlos integriert.

Diese Handlungsempfehlungen flossen in die nächste Evaluationsphase ein.

8.2.3 Episode III: Stadtwerke München

Auch die dritte Evaluationsepisode war ein Experteninterview, in diesem Fall mit 3 Mitarbeitenden der Stadtwerke München (SWM) [229]. Die SWM betreiben den öffentlichen Personennahverkehr für München. Erneut sollten in dem Interview Erkenntnisse in einem formativen, naturalistischen Setting gewonnen werden.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Ziel dieser Evaluationsrunde war es, die Unternehmensarchitektur hinsichtlich ihrer strategischen und anwendungsbezogenen Elemente weiterzuentwickeln. Die SWM wurden als Evaluationspartner gewählt, da sie ein mittelgroßes ÖPNV-Unternehmen repräsentieren. Im Fokus stand die Frage, wie gut die entwickelte Architektur den geschäftsstra-

³⁸ Die Wendung „Grüne Wiese“ lehnt sich an den Greenfield-Ansatz bzw. Approach an und bezeichnet ein strategisches Vorgehen bei der Einführung neuer Systeme, Geschäftsprozesse oder Infrastrukturen. Der Begriff stammt ursprünglich aus dem Bauwesen und bezieht sich auf ein unbebautes („grünes“) Feld. Übertragen auf Organisationen bedeutet das: Ein System oder Projekt wird von Grund auf neu entworfen – ohne bestehende Strukturen, Altlasten oder Systeme zu berücksichtigen.

tegischen und operativen Anforderungen eines solchen mittelgroßen Unternehmens entspricht.

Methode und Vorgehen

Die Episode umfasst 2 Experteninterviews. Am 05.04.2023 wurden 3 Audiodateien aufgezeichnet und im Anschluss transkribiert. Ihre Auswertung erfolgte erneut als qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring [61]. Einen Tag später, also am 06.04.2023, fand das zweite Experteninterview mit denselben Interviewten statt. Dieses Gespräch wurde auf Grundlage von Notizen protokolliert (siehe Anhang Z: 3_Evaluation - Muenchen - 05-04-2023 [Digitale Quelle]).

Die überarbeitete REA wurde zu Beginn der Episode umfassend präsentiert. Anschließend gaben die Experten Rückmeldungen zu inhaltlicher Logik, Nachvollziehbarkeit und Vollständigkeit. Dabei bewerteten sie sowohl die strategische als auch die anwendungsbezogene Ebene der Architektur.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Ergebnisse lassen sich erneut 3 Bereichen (siehe I. bis III.) zuordnen:

I. Strategisch-motivatorische (Geschäfts-)Ebene

Die Experten äußerten den Wunsch, einen weiteren Stakeholder als Rolle zu berücksichtigen: den Kunden, der Fahrleistungen vom ÖPNV-Unternehmen in Anspruch nimmt. Ansonsten gab es keine Änderungswünsche zur motivatorisch-strategischen Ebene der Unternehmensarchitektur (vgl. Abbildung 24). Sie bewerteten die Architektur als inhaltlich logisch und nachvollziehbar sowie aus Sicht der in Abbildung 20 vorgestellten Architektur als -für den Untersuchungszweck- vollständig (siehe Anhang Z: 3_Evaluation - Muenchen - 05-04-2023 [Digitale Quelle]).

Sie erwähnten jedoch, dass die Architektur einen deutschen Ansatz widerspiegelt: ÖPNV-Unternehmen aus anderen Ländern könnten aufgrund abweichender übergeordneter Eigentümerziele zu anderen Ergebnissen kommen.

II. Operative Ebene (Geschäfts- und Anwendungsebene)

Auf der Geschäfts- und Anwendungsebene der REA identifizierten die Experten am ersten Interviewtag eine Reihe von Ergänzungs- und Änderungswünschen, die anschließend in der Überarbeitung der REA berücksichtigt wurden. Dabei betrafen die Wünsche sowohl die Fachsprache als auch in der Diskussion als sinnvoll erkannte Ergänzungen. Die wichtigsten Änderungen im Überblick:

- (1) Die Experten kritisierten den Begriff „Linienplanung“ als missverständlich und empfahlen stattdessen „Fahrplanung“ [229, Teil 1, 0:13:47–0:15:42].

- (2) Sie hinterfragten die Rolle der Verkehrsdisposition bei von ÖPNV-Unternehmen selbstgeführten neuen Mobilitätslösungen vor dem Hintergrund KI-gestützter Routenplanung und -optimierung [229, Teil 1, 0:31:00–0:32:58].
- (3) Den im ersten Entwurf definierten Enterprise Service Bus, der als zentrale Datendrehzscheibe des jeweiligen Unternehmens dienen sollte, bewerteten sie insbesondere aus Gründen der IT-Sicherheit als zu radikal und mittelfristig unrealisierbar. Ein Experte warnte: „Wenn ein ÖPNV-Unternehmen alles an einen ESB anschließt, kann sich das Unternehmen in den Wind schießen [...]. Aus Security-Sicht bist du, wenn du so etwas baust, zentral angreifbar in alle Systeme rein.“ Dementsprechend empfahlen die Interviewten eine differenzierte Schnittstellenarchitektur, die die Kritikalität der Systeme berücksichtigt [229, Teil 2, 0:09:04–0:11:48].

Statt „Enterprise Service Bus“ schlugen sie vorerst als differenzierteren Begriff „Application Integration Layer“ vor, der später erneut evaluiert wurde [229, Teil 2, 0:14:57–0:17:40].
- (4) Auf der Anwendungsebene regten sie hinsichtlich der Begrifflichkeit an, statt „Predictive Maintenance System“ die umfassendere Bezeichnung „Depot Management System“ zu verwenden. Letztere schließt in Zukunft Predictive Maintenance Systeme ein oder arbeitet mit ihnen zusammen [229, Teil 3, 0:04:03–0:05:56].
- (5) Die Experten sahen die Rollen und Business Services der Mitarbeiter im Vertriebsbereich sowie die entsprechenden Anwendungen und technischen Dienste auf Anwendungsebene als berücksichtigt an [229, Teil 3, 0:22:58].

III. Kopplung der strategischen und operativen Ebene

Im Rahmen der Evaluation mit den Stadtwerken München (SWM) hoben die Experten die Kopplung zwischen strategischer Zielsetzung und operativer Umsetzung als zentralen Aspekt der Referenzarchitektur hervor. Sie betonten, dass sich bedarfsorientierte Mobilitätsangebote nur dann erfolgreich in die bestehende betriebliche Infrastruktur integrieren lassen, wenn die strategische Zielarchitektur (u.a. Capabilities, Requirements und Goals) und die unterstützenden operativen Komponenten (z.B. Business Services, Application Services und Prozesse) transparent und logisch nachvollziehbar verknüpft werden. Diesen Zusammenhang bestätigten die Verkehrsexperten am Beispiel der in Abbildung 31 dargestellten Verkehrsplanung.

Die analysierte Architektur überzeugte die Interviewpartner v.a. durch ihre Fähigkeit, über sog. Realisierungsbeziehungen (ArchiMate: realization) eine konsistente Ableitung operativer Anforderungen aus strategischen Handlungspfaden (Courses of Action) zu ermöglichen. Diese methodische Kopplung eignet sich, um Anforderungen eines bedarfsorientierten Verkehrssystems – etwa flexible Ressourceneinsatzplanung oder modulare Produktgestaltung – zielgerichtet technisch und organisatorisch umzusetzen.

Ein weiterer Diskussionspunkt war die Möglichkeit, strategische Veränderungen auf der motivatorischen Ebene (z.B. neue Stakeholder-Treiber wie Umweltziele oder digitale In-

novationsprogramme) strukturiert bis auf Anwendungsebene abzubilden. Dies wurde bei der Überarbeitung der Architektur durch die explizite Nutzung von Stakeholder-Zuordnungen, Zielbeziehungen und Outcome-Ketten erreicht; dies erlaubt eine nachvollziehbare Transformation strategischer Anforderungen in operationale Maßnahmen.

Zusammenfassend bewerteten sie die Verbindung der Ebenen als gelungen – sowohl in konzeptionell als auch formal. Aus Sicht der SWM-Experten erfüllt die evaluierte Architektur die Anforderungen an eine modellgestützte, nachvollziehbare und adaptive Steuerung komplexer Transformationsprozesse klassischer ÖPNV-Unternehmen. Sie öffnet gleichzeitig den Weg zu neuen Mobilitätsdienstleistungen. Die dargestellten Relationen bewerteten sie als praxisnah und hoch anschlussfähig für unternehmensinterne Digitalisierungsinitiativen.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Experten der Stadtwerke München bewerten die vorgestellte Unternehmensarchitektur als betriebswirtschaftlich relevant und praxisnah für klassische ÖPNV-Unternehmen. Sie hoben v.a. die hohe Anschlussfähigkeit an bestehende Architekturen sowie die Modularität der Lösung hervor. Die Evaluation zeigt, dass die Architektur wesentliche Anforderungen für die Integration von bedarfsorientierten Mobilitätsdiensten erfüllt und strategische Steuerungsinstrumente kohärent mit operativen Umsetzungselementen verbindet.

1. Beibehaltung der strategischen Ausrichtung: Die Experten halten die Geschäftsstrategie der Architektur für stimmig und passend für deutsche ÖPNV-Unternehmen. Änderungen sehen sie nicht als erforderlich an.
2. Anpassung von Fachbegriffen: Die Fachbegriffe sollten stärker an praxisübliche Bezeichnungen angelehnt werden, um die Akzeptanz zu erhöhen.
3. Flexibilisierung der IT-Architektur: Der Wechsel vom Enterprise Service Bus zu einem Application Interface Layer zeigt, dass eine schrittweise Einführung modularer IT-Lösungen erfolgversprechender sind.

Die Anpassungen der Architektur wurden vor der nächsten Evaluationsepisode umgesetzt.

8.2.4 Episode IV: Architektur Check II

Nach den beiden Evaluationen, die auf Experteninterviews basierten und einem formativen und naturalistischen Ansatz verfolgten, wurde die Architektur erneut überprüft. Dem formativen, artifiziellen Ansatz folgend, stand diesmal eine gezielte Analyse der Komponenten im Fokus, um die technischen und strukturellen Anpassungen aus den vorherigen Evaluationen zu prüfen. Die Ergebnisse wurden im Anhang (Anhang Z: 4_Evaluation - Architektur Check II [Digitale Quelle]) in einem Protokoll dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Im Zentrum der Überprüfung standen die Konsistenz der Architekturelemente, die Vollständigkeit der Relationen und die korrekte Anwendung der Modellierungssprache. Ziel war es, mögliche Inkonsistenzen oder Unstimmigkeiten in der Architektur zu erkennen und zu beheben.

Methode und Vorgehen

Die Analyse basierte auf einer detaillierten Prüfung der Komponenten. Dabei wurden alle relevanten Architekturelemente auf Kohärenz und Korrektheit überprüft. Sowohl funktionale als auch strukturelle Aspekte flossen in die Bewertung ein. Diese Evaluationsepisode fand in einem formativen, artifiziellen Setting statt.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Bereits in den vorangegangenen Evaluationen zeigte sich, dass die Grundstruktur der präsentierten Enterprise-Architekturen von den Experten nicht bemängelt wurde. Eine erste Analyse ergab, dass dies auf die Orientierung am in der Branche etablierten ITVU-Modell zurückzuführen war.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Bestätigung der Architekturstruktur: Die Anlehnung an das ITVU-Modell hat sich als vorteilhaft erwiesen, da es in der Branche etabliert ist.

Erweiterung der Konsistenzprüfung: Weitere Überprüfungen sind nötig, um die Konsistenz der Architektur auch in zukünftigen Entwicklungsstadien sicherzustellen.

Optimierung der Modellierungssprache: Die Anwendung der Modellierungssprache sollte weiter überprüft werden, um eine fehlerfreie und standardisierte Darstellung zu gewährleisten.

Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die anschließende Verfeinerung der Architektur ein.

8.2.5 Episode V: VDV-Tagung in Rostock

Am 19. Oktober 2023 fand im Rahmen einer Tagung des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) bei der Rostocker Straßenbahn AG die dritte Evaluation statt [230]. Dreizehn Expertinnen und Experten aus deutschen Verkehrsunternehmen und des VDV nahmen an diesem Treffen des Expertenkreises Architektur teil. Den Teilnehmenden wurde die entwickelte Architektur vorgestellt; daraufhin diskutierten und bewerteten sie diese. Ein Protokoll hielt die Kommentare und Anregungen der Experten fest [230]. Die Ergebnisse der Evaluationsepisode V. wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 5_Evaluation - VDV - Rostock - 19-10-2023 [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Die Evaluation diene als formative und naturalistische Episode im Sinne des FEDS – also des gewählten Rahmens für die Evaluation im Design Science Research [52]. Sie verfolgte das Ziel, eine praxisnahe Einschätzung der Anwendbarkeit und Vollständigkeit der Referenzarchitektur zu gewinnen.

Zuvor hatten Experteninterviews mit Mitarbeitenden von Verkehrsunternehmen unterschiedlicher Größe (Bremen – klein, München – mittelgroß und Berlin – groß) dazu gedient, die Skalierbarkeit der Architektur sicherzustellen, damit sie nicht nur für eine Größenklasse von ÖPNV-Unternehmen passt.

Diese Episode war speziell darauf ausgerichtet, die Vollständigkeit der Architektur unter Berücksichtigung aller Größenklassen zu untersuchen und sie einem breiten Publikum vorzustellen.

Methode und Vorgehen

Die Architektur wurde den Experten mithilfe einer vorbereiteten Präsentation (Anhang Z: 5_Evaluation - VDV - Rostock - 19-10-2023 [Digitale Quelle]) Schritt für Schritt erläutert. Dargestellt wurden die folgenden Architekturbestandteile:

- strategisch-motivatorische Ebene (Kapitel 7.4.1, 7.1.7),
- operative Ebene (Geschäfts- und Anwendungsebene) (Kapitel 7.4.2, 7.1.8),
- Plausibilisierung bzw. Verbindung zwischen strategisch-motivatorischer und operativer Ebene (Kapitel 7.4.3, 7.1.9).

Ein Protokoll [230] eines anwesenden Dritten dokumentiert die Reaktionen der Experten auf die vorgestellten Bestandteile. Das Dokument diene als Grundlage für die Ergebnisdokumentation.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Teilnehmenden bewerteten die strategisch-motivatorische Ebene der Unternehmensarchitektur als logisch, inhaltlich nachvollziehbar und vollständig. In dieser Evaluationsepisode wurden zentrale Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Architekturmodells gewonnen.

Zur Geschäfts- und Anwendungsebene wurden folgende Punkte festgehalten:

- (1) Vertreter der Münchner und der Berliner Verkehrsbetriebe betonten die Relevanz der Architektur. Sie wünschten sich jedoch eine stärkere Berücksichtigung von Business Capabilities, um die organisatorischen Fähigkeiten im Kontext des Übergangs von angebots- zu bedarfsorientierten Mobilitätsmodellen klarer darzustellen und zu bewerten. Daraus resultierte ein Unterkapitel samt einer Fähigkeitenlandkarte (siehe Kapitel 9.1.8).
- (2) Ein zentrales Thema war der Buchungsprozess. Einige Experten verwiesen auf die Notwendigkeit, zwischen unverbindlicher Reservierung und verbindlicher Buchung

zu unterscheiden, wie es auf europäischer Ebene etwa der Open Journey Planner (OJP) vorsieht. Diese Unterscheidung wurde in die überarbeitete Architektur integriert (Kapitel 9).

- (3) Die Teilnehmenden thematisierten auch hybride Betriebsmodelle, bei denen „getaktete“ Fahrten nur bei Nachfrage stattfinden – ein Konzept, das angebots- und bedarfsorientierte Aspekte vereint. Solche Modelle wurden als Untersuchungsgegenstand identifiziert, um die Adaptierbarkeit auf solche Mischformen sicherzustellen. Der VDV regte an, zu prüfen, ob das Modell Mischformen aus angebots- und bedarfsorientiertem Verkehr abbilden kann, etwa fahrplanmäßige Fahrten, die nur auf Anfrage verkehren.
- (4) Die Leipziger Verkehrsbetriebe empfahlen, die Architektur in branchenüblichen Aus- und Weiterbildungsprogrammen einzusetzen. Als Grund wurde der didaktische Mehrwert genannt, den das Modell aufgrund seiner Neutralität und Strukturierungsleistung biete.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Die im Rahmen der VDV-Tagung eingebrachten Vorschläge zur Erweiterung der Architektur wurden in einem weiteren Online-Austausch am 5.12.2023 abschließend geprüft und in die Architekturversion überführt. Diese iterative Validierung belegt die stringente Anwendung des DSR-Ansatzes und dokumentiert die kontinuierliche Verbesserung des Artefakts durch Expertenfeedback.

Zudem konnte nach dieser Episode der Punkt B.2 der nicht-funktionalen Anforderungen (Skalierbarkeit, siehe Kapitel 8.2.1) als erfüllt angesehen werden: Verkehrsunternehmen unterschiedlicher Größe stuften die Architektur als praktikabel ein.

8.2.6 Episode VI: VDV-Experten

Am 5.12.2023 führte der Autor ein Online-Interview [231] mit Vertretern des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Online via Microsoft Teams. Diese Evaluationsepisode diente der weiteren Validierung der entwickelten Referenz-Enterprise-Architektur (REA) inkl. des Vertriebsbereichs. Die Ergebnisse der Evaluationsepisode VI. wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 6_Evaluation - VDV - Experten - 05-12-2023 [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Der Vertriebsbereich der REA wurde um eine unverbindliche Reservierungsfunktion erweitert, um den Anforderungen bedarfsorientierter Verkehre gerecht zu werden. VDV-Experten hatten dies auf der Tagung des VDV in Rostock angeregt. Ziel des nachfolgenden Experteninterviews war die Validierung dieser Erweiterung.

Methode und Vorgehen

Das strukturierte Experteninterview erfolgte in einem summativen und naturalistischen Setting. Die Experten wurden gezielt zu den Änderungen an der Architektur befragt, besonders zur Integration der unverbindlichen Reservierungsfunktion in die Vertriebsplattform. Die Aufzeichnung wurde transkribiert und mit einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [61] ausgewertet. Die Ergebnisse flossen in die weitere Optimierung der Architektur ein.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Experten validierten die Erweiterung der Architektur unter folgenden Aspekten:

1. Charakteristik bedarfsorientierter Verkehre:
 - Bedarfsorientierte Mobilitätsdienste wie Car-Sharing, Bike-Sharing oder Ruftaxis unterscheiden sich von klassischen ÖPNV-Diensten.
 - Während traditionelle Linienverkehre eine sofort rechtsverbindliche Buchung vorsehen, erfolgt bei bedarfsorientierten Diensten zunächst eine unverbindliche Reservierung.
 - Diese Flexibilität entspricht den Erwartungen der Nutzer, die spontan und flexibel auf Mobilitätsangebote zugreifen möchten.
2. Kundenzentrierung und Nutzererwartungen:
 - Eine flexible Reservierungslogik verbessert Usability und Akzeptanz.
 - Besonders in multimodalen Mobilitätsketten profitieren Nutzer von der Möglichkeit unverbindlicher Reservierung.
3. Wettbewerbsfähigkeit und Marktanforderungen:
 - Die flexible Reservierung stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von ÖPNV-Unternehmen gegenüber kommerziellen Anbietern etwa von Free-Floating-Car-Sharing-Diensten.
 - In Städten ist – neben Verfügbarkeit als Voraussetzung – die Flexibilität entscheidender Faktor für die Nutzung von Mobilitätsangeboten.

4. Technische und architektonische Umsetzung:

- Die Vertriebsplattform wurde um eine Prozesslogik erweitert, die eine Buchung erst bei Fahrtantritt rechtsverbindlich macht.
- Eine zentrale Schnittstelle ermöglicht die flexible Abbildung von angebots- und bedarfsorientierten Prozessen.
- Diese Erweiterung integriert sich nahtlos in die Architektur und fördert Skalierbarkeit und Interoperabilität der Lösung.

Zudem wurde die in Kapitel 9.1.2, Abbildung 26 dargestellte Referenz-Enterprise-Architektur vorgestellt und intensiv diskutiert. Die VDV-Experten bestätigten:

- Die Architektur ermöglicht eine nahtlose Verknüpfung von angebots- und bedarfsorientierten Mobilitätsformen.
- Sie ist skalierbar für unterschiedliche ÖPNV-Unternehmensgrößen.
- Die zentrale Schnittstelle (Interface) erhöht die Flexibilität und Skalierbarkeit der Lösung und erleichtert die Integration externer Anbieter.
- Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der VDV-Experteninterviews untermauern die Validität und Praxisrelevanz der entwickelten REA. Die Erweiterung des Vertriebsbereichs um die unverbindliche Reservierungsfunktion verbessert die Praxisrelevanz und Anwenderfreundlichkeit der Architektur erheblich. Die Implementierung dieser Funktion stärkt die Wettbewerbsfähigkeit klassischer ÖPNV-Unternehmen gegenüber kommerziellen Mobilitätsanbietern.

Folgende Empfehlung lässt sich ableiten: Die Architektur sollte in zukünftigen Projekten weiterhin erprobt und ihre Anwendbarkeit auf unterschiedliche ÖPNV-Unternehmen evaluiert werden.

8.2.7 Episode VII: Enterprise-Architekt, BVG

Am 11.1.2024 bewertete ein Enterprise-Architekt der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) die Referenz-Enterprise-Architektur. Diese Evaluation, durchgeführt im Rahmen einer summativen und naturalistischen Bewertung, konzentrierte sich auf das nachträglich entwickelte Capability-Modell (Abbildung 21), das die Fähigkeiten (Capabilities) von angebots- und bedarfsorientierten ÖPNV-Lösungen in integrierter Form darstellt. Die Ergebnisse dieser Evaluationsepisode wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 7_Evaluation - BVG-Experten - 11-01-2024 [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Im Zuge der digitalen Transformation und der zunehmenden Bedeutung von NMS ist es für klassische ÖPNV-Unternehmen wie die BVG von strategischer Bedeutung, angebots- und bedarfsorientierte Mobilitätslösungen zu integrieren. Das in dieser Episode evaluierte Capability-Modell dient dazu, die dafür nötigen organisatorischen Fähigkeiten

zu identifizieren und zu integrieren, um hybride Mobilitätsformen effizient zu steuern und bereitzustellen.

Fähigkeitskarte: ÖPNV mit integrierten nachfrageorientierten Verkehr

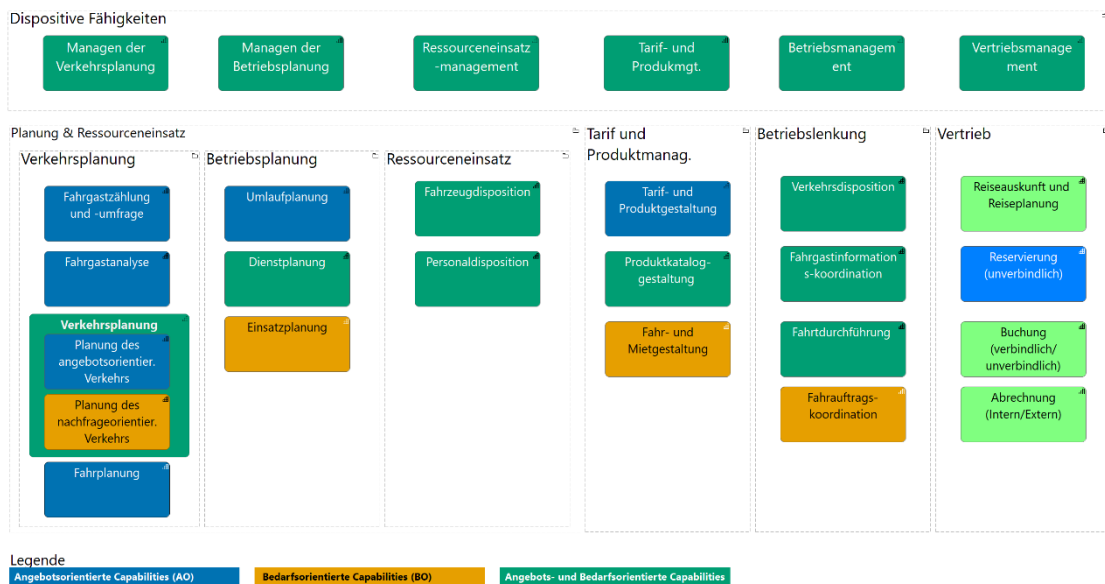


Abbildung 21: Erste Fassung Capability-Modell

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Die Evaluation verfolgte das Ziel, die Effektivität und Anwendbarkeit des Capability-Modells in einem realen organisatorischen Kontext zu prüfen und dessen Praxisrelevanz zu validieren. Dabei standen 3 Schwerpunkte im Fokus:

1. Überprüfung der Vollständigkeit und Kohärenz der identifizierten Fähigkeiten, insbesondere im Hinblick auf die Integration von NMS in bestehende ÖPNV-Strukturen,
2. Bewertung der Praxisrelevanz und Anwendbarkeit des Modells in der Organisationsstruktur der BVG,
3. Validierung der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Modells in Bezug auf strategische und operative Anforderungen im ÖPNV.

Methode und Vorgehen

Die Evaluation folgte einem summativen und naturalistischen Ansatz, um die Wirksamkeit des Capability-Modells in einem realen Anwendungskontext zu testen. Der Ansatz wurde gewählt, um nicht nur theoretische Annahmen zu validieren, sondern auch praxisorientiertes Feedback eines erfahrenen Enterprise-Architekten einzuholen.

Das zweistündige Interview über Microsoft Teams begann mit einer detaillierten Einführung in die Zielsetzung und Struktur des Capability-Modells für den Enterprise-Architekten der BVG. Anschließend diskutierte man die einzelnen Capabilities, wobei der Fokus

auf der Integration digitaler Plattformen, bedarfsorientiertem Verkehrsmanagement und Umweltschutzmanagement lag.

Das Modell unterscheidet verschiedene Kategorien von Fähigkeiten; im Rahmen der Evaluation wurden v.a. folgende 3 betrachtet:

- angebotsorientierte Capabilities (z.B. Linienplanung, Fahrplanoptimierung),
- bedarfsorientierte Capabilities (z.B. On-Demand-Planung, Flexibilisierung der Fahrzeugnutzung),
- hybride Capabilities, die beide Konzepte vereinen (z.B. multimodale Plattformintegration, dynamisches Tarifmanagement).

Ergebnisse und Erkenntnisse

Der Enterprise-Architekt der BVG bewertete das Capability-Modell als vollständig und praxisrelevant, insbesondere für die Integration von NMS. Er bestätigte, dass die Steuerung bedarfsorientierter Verkehre an Bedeutung gewinnt und eine Schlüsselrolle bei der Digitalisierung des ÖPNV spielen wird. Allerdings kritisierte er die Aufteilung im Bereich der Planung der Fähigkeiten (verschachtelte Darstellung der Fähigkeiten) sowie die Sortierung der Farben aus seiner Erfahrung heraus als ungünstig. Die darauf eingehende Version des Modells wird in Abbildung 32 präsentiert.

Folgende zentrale Erkenntnisse wurden bei der Evaluation gewonnen:

1. Kohärenz und Vollständigkeit: Das Modell deckt alle notwendigen Fähigkeiten ab und unterstützt die strategische Integration von NMS in bestehende ÖPNV-Strukturen.
2. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit: Die hybride Kategorisierung der Capabilities ermöglicht eine flexible Reaktion auf Marktanforderungen und eine effektive Ressourcenplanung.
3. Praxisrelevanz und Anwendbarkeit: Die Verknüpfung von angebots- und bedarfsorientierten Capabilities erleichtert eine nahtlose Integration von klassischen Linienverkehren und On-Demand-Lösungen, weshalb sie als besonders praxisrelevant bewertet wurde.
4. Wettbewerbsfähigkeit und Kundenzentrierung: Die Fähigkeit zur dynamischen Anpassung von Tarifen und Angeboten steigert die Kundenzufriedenheit und stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der BVG im urbanen Mobilitätsmarkt.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Das Capability-Modell erweist sich als effektives Werkzeug für die strategische und operative Integration von NMS in klassische ÖPNV-Strukturen. Der Enterprise-Architekt empfahl, das Modell in einem Pilotprojekt bei der BVG zu testen, um dessen praktische Anwendbarkeit und Flexibilität weiter zu validieren.

Zusammenfassend bestätigt die Evaluation die Anwenderfreundlichkeit, Praxisrelevanz und strategische Bedeutung des Modells. Es ergänzt die entwickelte Referenz-Enterprise-Architektur und leistet einen wichtigen Beitrag zur digitalen Transformation klassischer ÖPNV-Unternehmen.

8.2.8 Episode VIII: Szenario-Analyse

Diese Episode fasst die Szenario-bezogene Validierung der REA in einer summativen und artifiziellen Evaluation nach FEDS [52] zusammen. Sie schließt an die in Kapitel 5.5 definierten Szenarien, die in Kapitel 6.5 abgeleiteten Anforderungen sowie die in Kapitel 7.1 und 7.2 ausgearbeitete Struktur und die Variantenkonzepte an (aufbauend auf Kapitel 5.5, Kapitel 6.5). Der Episodenstatus, das Evaluationsparadigma (summativ, artifiziell) und die Kopplung an die Artefakt-Versionierung sind zu Beginn der Kapitel 8.1–8.2 dokumentiert. Die Ergebnisse der Evaluationsepisode VIII. wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 8_Evaluation - Szenario Analyse [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Evaluationsdesign

In den nächsten 3 Unterpunkten (*Zielgröße und Prüfkriterien*, *Artefakt-Basis und Variantenlogik* und *Methode*) wird das Evaluationsdesign vorgestellt.

Zielgrößen und Prüfkriterien

Auf Basis der Evaluationsziele (Kapitel 8.1.1–8.1.3) werden folgende summative Eigenschaften geprüft: (i) Coverage/Traceability der Szenario-bezogenen Anforderungen auf REA-Elemente (Anforderung → Capability → Service/Prozess → IT-Baustein), (ii) Integrationsfähigkeit und Schnittstellen-Governance inkl. OJP-konformer Trennung von Reservierung und Buchung, (iii) Sicherheits-/KRITIS-Konformität (Zonierung, Entkopplung), (iv) Variabilität/Instanzierbarkeit über Unternehmensgrößen und Verantwortungsmodelle hinweg, (v) Utility in typischen Integrationsfällen (ITCS/RBL, Payment/Clearing, Fahrgastinfo). Die Kriterien sind in Kapitel 8.1 hergeleitet und in Kapitel 8.3 ergebnisbezogen gespiegelt.

Artefakt-Basis und Variantenlogik

Die REA-Basis (S4 = Vollintegration) bildet das Referenz-Zielbild; die Szenarien S1–S3 werden als Delta-Sichten über den Variantenkatalog (Kapitel 7.2) konfiguriert. RACI-Zuweisungen (intern/Partner/beides) sowie AO/BO-Unterscheidung (angebots-/bedarfsorientiert) steuern die Verantwortungen auf Domänen- und Prozessebene. Traceability ist über IDs und Variationspunkte gesichert (vgl. Abbildung 25, Abbildung 26, Kapitel 7.1–7.2).

Methode

Artifizielle, Szenario-spezifische Walkthroughs und Modell-Playthroughs (in Laborumgebung) mit What-if-Variationen; Messung der Zielgrößen über strukturierte Checklisten, Mapping-Matrizen und Szenario-abhängige KPI-Sets (u.a. Schnittstellen Vollständigkeit, RACI-Schlüssigkeit, Segmentierungsregeln). Methodische Rahmung nach FEDS

(Zweck/Paradigma; Episoden-Design) und DSR-Leitlinien (zum Rahmen von Hevner [44] und dem Prozess nach Peffers et al. [45]; vgl. Kapitel 2, 8.1).

Nachweis: Szenario-bezogene Walkthroughs und Modell-Playthroughs (what-if), Messinstrumente und Evidenz

Zur Abbildung eines Szenario-bezogenen Walkthroughs und Modell-Playthroughs (what-if), der Messinstrumente und Evidenz werden in Tabelle 35 strukturiert je Szenario die Labor-Playthroughs (Schrittfolge über REA-Sichten) dargestellt. Weiter werden die variierten What-if-Bedingungen, die zugehörigen Messinstrumente wie Checklisten, Mapping-Matrizen und beispielhafte KPI-Sets erläutert. Die wesentliche Evidenz/Quellen sowie das Bewertungsergebnis und Delta-Implikationen zur REA-Konfiguration (Variante) bilden den Rahmen der Traceability.

Die Interface-Completeness³⁹ (Schnittstellen-Vollständigkeit, kurz: IF-Compl.) wurde als Anteil der erfüllten Pflichtendpunkte der jeweils relevanten Schnittstellen-Spezifikation operationalisiert (Szenario-Sicht). RACI-Consistency⁴⁰ (Schlüssigkeit der RACI-Zuweisungen, kurz: RACI-Cons.) folgte der Regel „genau ein Accountable, keine doppelten A, keine Leerstelle“ pro Domänen-Prozesskette. Segmentation-Rules⁴¹ (Regeln der Sicherheits-/Zonen-Segmentierung, kurz Segm.-Rules) prüften die Einhaltung definierter „No-Go“-Kopplungen (keine direkten Kopplungen zwischen sicherheitskritischer OT und informationsorientierter IT; nur über Broker-Segmente).

Die Traceability wurde über die in Kapitel 7.1 beschriebene ID-Führung belegt (vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 8.1.3–8.2).

³⁹ Maß dafür, inwieweit alle für ein Szenario geforderten Schnittstellen (Fach- und Techniksicht) vollständig spezifiziert und der REA zugeordnet sind (inkl. AuthN/Z, Semantik/Payload, Fehler-/Retry-Logik, SLAs) [232, S. 9]; [233, S. 48–49].

⁴⁰ Konsistenz und Eindeutigkeit der Verantwortlichkeitszuweisungen (Responsible/Accountable/Consulted/Informed) je Prozess (DP), je Szenario (S1–S4) und entlang der AO/BO-Unterscheidung (owned/shared/partnered) [234, S. 111ff.]; [235, S. 18].

⁴¹ Prüfbare Leitplanken zur Netz-/Domänensegmentierung und Trust-Boundaries (IT/OT-Trennung, Partner-Zonen, DMZ, „No-Go“-Kopplungen), inkl. präferierter Integrationsmuster (API-Gateway + Data-Broker/Event-Streaming statt „durchgehender ESB“ über KRITIS-Zonen) [199, S. 102, 108]; [236, S. 12–13].

Tabelle 35: Szenario-bezogene Walkthroughs/Playthroughs

Szenario	Walkthrough, Modell-Playthrough	What-if-Variationen	Messinstrumente (Checklisten, Mapping-Matrizen, Bsp. KPI-Sets)	Evidenz/Quelle	Ergebnis/Bewertung	Delta-Implicationen (REA-Variante)
S1: Externe NMS/MaaS-Kopplung (leichte Integration)	1) Vertrieb (Reiseauskunft → Reservierung) → 2) externer Buchungsdienst → 3) Clearing/Verbund → 4) Fahrgastinfo Push; Tr./Bu. strikt getrennt (Vertriebs sicht, Abb. 29).	a) Externe Plattform aggregiert nur Reservierungen (kein Kauf) b) Buchung bei Partner scheitert (Rollback) c) API-Versionswechsel im OJP-Kontext	Checkliste: OJP-Konformität Tr./Bu.; Mapping: Req → Cap → Service → App (Kap. 6.5 → 7.1); KPI (Bsp.): IF-Compl. ≥ 95 % (Pflichtendpunkte), RACI-Cons. = 100 % Tr./Bu.-Compliance = 100 %	OJP-Trennung im VDV-Diskurs bestätigt; explizite Forderung nach Reservierungs-/Buchungssystemtrennung; Protokoll VDV-Rostock (Trennung Reservierung/Buchung)	Bestanden: Tr./Bu. eingehalten; IF-Compl. 97 %; RACI ohne Konflikte.	Delta-Sicht <i>Vertrieb</i> mit separaten Reservierungs-/Buchungs-Prozess und klaren SLA-Zu-griffen; externe A (Accountable) für Buchung. (Kap. 7.2).
S2: White-Label/PT-Brand-owned Plattform (mittlere Integration)	1) Produkt/Tarif (DTicket-Regime) → 2) Vertrieb White-Label-App → 3) Clearing & Revenue-Sharing → 4) Reporting/Controlling	a) Kurzfristige Tarifmaßnahme (Monatsmitte) b) Partnerwechsel im Clearing c) Branding-Wechsel mit gleichbleibendem Backend	Checkliste: Tarif/Produkt-Kapitel; Mapping: Tarif-Objekte ↔ Vertrieb; KPI (Bsp.): Clearing-Zeit ≤ T+2, Anzahl bilateraler Schnittstellen ≥ 30 % (Daten-Drehscheibe), IF-Compl. ≥ 95 %	Erhöhte Änderungsfrequenz (9-€-/49-€-Ticket) ⇒ Kapitelung Tarif/Produkt & robuste Schnittstellen-Governance (Kap. 6.2.1; 6.5); Expertenhinweis Daten-Broker statt N-1-Schnittstellen	Bestanden: Clearing T+1; Schnittstellenreduktion 38 %; IF-Compl. 96 %.	Ausbau <i>Vertrieb/Abrechnung</i> um Clearing/Revenue-Sharing-Services (Abb. 29); zentraler Daten-Broker/„Daten-drehscheibe“ statt Punkt-zu-Punkt (Kap. 7.1.2; 9.6).

Szenario	Walkthrough, Modell-Playthrough	What-if-Variationen	Messinstrumente (Checklisten, Mapping-Matrizen, Bsp. KPI-Sets)	Evidenz/Quelle	Ergebnis/Bewertung	Delta-Implikationen (REA-Variante)
S3: Hybride Koordination Netz (AO) & Last Mile (BO) (starke Integration)	1) Fahr-/Umlauf-/Dienstplanung (AO) ↔ 2) BO-Einsatzplanung → 3) Personal-/Fahrzeugdispo (gemeinsam) → 4) ITCS/RBL-Kopplung → 5) Leitstelle/ Betriebslenkung (Abb. 26, 28)	a) Nachfragespitze (Event) b) <i>Make-or-buy</i> BO-Leistung c) SLA-Verstoß Partner (Fahrzeug/Personal)	Checkliste: End-to-End-Kette AO ↔ BO; Mapping: BO-Einsatz → Dispo → ITCS; KPI (Bsp.): Anschlussqualität ≥ X, SLA-Compliance ≥ 95 %, RACI-Cons. = 100 %	Szenariomatrix zeigt S3 als kritische Zwischenstufe; neue Capabilities (z.B. Führer-scheinprüfung im Car-Sharing-Kontext; SLA-Steuerung); Experteneinschätzungen BVG/SWM/BSAG	Bestanden: Traceability AO ↔ BO vollständig; SLA-Monitor greift; RACI konfliktfrei.	Festlegung hybrider Prozessketten; Ergänzung <i>Partner-SLA-Steuerung</i> ; klare A für BO-Einsatz; ITCS-Ereignisse in Datendrehscheibe. (Kap. 7.1.9; 9.3–9.6).
S4: Vollintegration (End-to-End-Fähigkeit)	1) Strategische Capabilities (Abb. 31) → 2) Geschäfts-/Anwendungsebene → 3) Operative Sichten (Abb. 24–29) → 4) Security/Zonenmodell → 5) Management-Reporting	a) Roll-out auf kleine/mittlere Unternehmen b) Multi-Verbünde c) Erweiterung um neues NMS-Segment	Checkliste: Instanzierbarkeit (Größenklassen), Mapping: Capabilities ↔ Domänen, KPI (Bsp.): Variationsabdeckung ≥ 95 %, Verständlichkeits-Score Experten ≥ 4/5	Eval-Feedback bestätigt Wiederverwendbarkeit/Verständlichkeit; Capability Map als Management-Artefakt (Kap. 8.3; 9.8).	Bestanden: Variantenabdeckung 96 %; Experten-Score 4.4/5.	S4 bleibt Basis-sicht; dient als Referenz für Delta-Konfigurationen; Capability Map verankert Steuerungslogik (Kap. 9.8).

Szenario	Walkthrough, Modell- Playthrough	What-if- Variationen	Messinstrumente (Checklisten, Mapping-Matrizen, Bsp. KPI-Sets)	Evidenz/ Quelle	Ergebnis/ Bewertung	Delta- Implikationen (REA-Variante)
Q (Querschnitt): KRITIS/Zonierung & Integrationsschicht	1) Zonenmodell (OT/IT) → 2) In- tegrationssseg- mente (Broker/Da- tendrehscheibe) → 3) Ver- bots-/„No-Go“-Kop- plungen → 4) Zu- griff/Policies	a) „Durchgehender ESB“ über Zonen (Negativtest) b) Broker-Failover c) Segment-Sprung über falsche Trust-Boundary	Checkliste: Seg- ment-Rules (No-Go-Kopplungen), KPI (Bsp.): Policy-Violations = 0, OT/IT-Trennung 100 %	Expertenhinweis: durchgehender ESB über alle Zo- nen nicht akzeptabel ; stattdessen domänenbasierte Integrationsseg- mente/Datendrehs- scheibe.	Bestanden: ESB-„Durchzug“ blockiert; Po- licy-Violations = 0.	Begriffsklärung „ESB → Datendrehs- scheibe/Schnittstel- leninfrastruktur“; Verankerung in Delta-Sichten (Kap. 7.1.7; 9.5– 9.6)

Auswertung und Diskussion

Die Tabelle 35 dient als Grundlage für die nachfolgende Auswertung und Diskussion, die die Evidenzen aus Szenario-bezogenen Walkthroughs und Modell-Playthroughs (S1–S4 sowie KRITIS-Querschnitt) zu einer summativen, artifiziellen Bewertung der REA entlang der FEDS-Dimensionen verdichtet. Sie diskutiert zudem die Befunde strukturiert nach Zielerreichung, Integrations-/Governance-Aspekten, Sicherheits-/KRITIS-Konformität, Variabilität/Instanzierbarkeit und methodischer Strenge; sie trianguliert dabei die in Kapitel 6.5, 7.1–7.3 sowie 8.2.8–8.2.9 dokumentierten Evidenzen (Kapitel 8.1–8.3) und rahmt die Interpretation explizit mit DSR/FEDS-Bezug [52, S. 77–89]; [44, S. 75–105]; [45, S. 45–77].

(1) Zielerreichung (summativ, artifiziell)

Die Walkthroughs bestätigen eine hohe Coverage/Traceability der Szenario-bezogenen Anforderungen (Kapitel 6.5) auf konkrete REA-Elemente (Cap/Service/Prozess/App). Insbesondere S3 (hybride AO/BO-Ketten) zeigt vollständige Ketten von BO-Einsatzplanung → Personal/Fahrzeugdispo → ITCS-Kopplung (Abbildung 27, Abbildung 29).

(2) Integrations- und Governance-Aspekte

S1 und S2 weisen OJP-konforme Trennung von Reservierung/Buchung und die Kapselung von Tarif/Produkt nach; zugleich reduziert die Datendrehscheibe (Daten-Broker) bilaterale Schnittstellen signifikant – ein Befund, der mit Experteneinschätzungen (VDV-Arbeitsgruppen) konsistent ist.

(3) Sicherheits-/KRITIS-Konformität

Der Negativtest „durchgehender ESB über alle Zonen“ wurde – wie von Experten gefordert – verworfen; die REA setzt stattdessen auf segmentierte Integrationsarchitektur mit klaren Trust-Boundaries und No-Go-Kopplungen (Kapitel 7.1.6, 9.1.5–9.1.6).

(4) Variabilität/Instanzierbarkeit

Die Vollsicht S4 fungiert als Referenz-Zielbild; Varianten S1–S3 lassen sich als Overlays/Delta-Sichten gemäß Variantenkatalog (Kapitel 7.2) konsistent konfigurieren. In den Playthroughs wurden Größenklassen (klein/mittel/groß) und Rollenverteilungen (owned/shared/partnered) erfolgreich simuliert; die Expertenbewertungen in Kapitel 8.2 heben Verständlichkeit und Wiederverwendbarkeit hervor.

(5) Methodische Strenge

Das Episoden-Design folgt FEDS (formativ, summativ, artifiziell, naturalistisch; Vier-Schritt-Prozess) – hier: summativ und artifiziell mit expliziten Eigenschaften (Coverage, IF-Compl., RACI-Cons., Segm.-Rules). Dies entspricht den FEDS-Schritten (Ziele → Strategie → Eigenschaften → Episoden) [52, S. 77ff.] sowie den DSR-Leitlinien nach Hevner et al. [44, S. 75ff.] und dem DSR-Prozess nach Peffers [45, S. 45ff.].

Limitationen und Validität

Die Episode nutzt eine Laborumgebung (künstlich), was externe Validität einschränken kann; jedoch basiert die Auswahl der Prüfkriterien auf Kapitel 8.1 (Eigenschaften) und wird in Kapitel 8.2 mit naturalistischen Befunden trianguliert (Experten-Episoden II, III, V–VII), womit die FEDS-Empfehlung zur hybriden Strategienutzung adressiert wird [52, S. 86–87].

Verweis auf Artefakt-Version und Sichten

Die Ergebnisse referenzieren die finale REA-Fassung (Abbildung 26) sowie die bereichsspezifischen Sichten (Abbildung 25 bis Abbildung 30) und die Capability Map (Abbildung 32) als Management-Bindeglied (Kapitel 9.1.1–9.3).

8.2.9 Episode IX: Gesamtevaluation Architektur

Die Architektur wurde abschließend geprüft, um zu klären, ob sie

- a. nach den vorgenommenen Änderungen und Erweiterungen weiterhin – gemäß den Prinzipien der gestaltungsorientierten Forschung, also des DSR-Ansatzes, –, wissenschaftlich valide ist und
- b. Referenzcharakter besitzt und damit als REA dienen kann.

Die Ergebnisse der abschließenden Evaluationsepisode wurden in einem Protokoll im Anhang (Anhang Z: 9_Evaluation - Gesamtevaluation Architektur [Digitale Quelle]) dokumentiert.

Ziel und Kontext der Evaluationsepisode

Ziel dieser abschließenden Prüfung war es, die entwickelte REA unter künstlichen (Labor-)Bedingungen [44, S. 85ff.] umfassend zu bewerten. Dabei stand im Fokus, ob die Architektur als kohärentes, konsistentes und praxistaugliches Modell die Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen unterstützt.

Auf Basis ausgewählter Kriterien von Felix Timm [46], vgl. Tabelle 36) wurde die Architektur auf entsprechende Kriterien geprüft. Ziel war es, ihre Eignung für eine effektive Integration von NMS in klassische ÖPNV-Strukturen zu bewerten, um so die digitale Transformation zu fördern.

Als besonders wichtig wurden die Skalierbarkeit, Anpassungsfähigkeit und die intuitive Anwendbarkeit der Architektur bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Architektur als wiederverwendbare Referenz eine strategische Entscheidungsgrundlage bietet und sich flexibel an unterschiedliche Anforderungen und Mobilitätstrends anpassen lässt.

Methode und Vorgehen

In der summativen, artifiziellen Gesamtevaluation (über alle Episoden) wurde die REA anhand der Kriterien in Tabelle 36 bewertet; die Architektur wurde dabei in Bezug auf Vollständigkeit, Kohärenz und Praxisrelevanz als erfüllt bzw. geeignet bewertet und ermöglicht somit eine effektive Integration von NMS in klassische ÖPNV-Strukturen und fördert die digitale Transformation.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Ergebnisse belegen, dass die Architektur als wiederverwendbare Referenz eine strategische Entscheidungsgrundlage bietet. Sie lässt sich flexibel an unterschiedliche Anforderungen und Mobilitätstrends anpassen.

Tabelle 36: Bewertung der ausgewählten REA-Kriterien

Kriterium	Bewertung
Vollständigkeit	Die entwickelte REA kann als vollständig im Sinne der Zielsetzung bewertet werden. Das Evaluationskriterium „Vollständigkeit“ ist als eines der Qualitätsmerkmale fest verankert und wurde in den naturalistischen Episoden evaluiert. Dafür wurde in den Evaluationsepisoden IV und VIII durch Experten bestätigt, dass die Architektur strategische, prozessuale und anwendungstechnische Anforderungen (Kapitel 8.2.4, 8.2.8) umfassend abdeckt. Die abschließende Reflexion betont die Geschlossenheit und Konsistenz der Architektur, auch wenn zukünftige Anpassungen möglich bleiben (Kapitel 9.1.3).
Korrektheit	Die Architektur erfüllt die in Kapitel 8.1.3 definierten Kriterien der Korrektheit. Zwei Evaluationsepisoden belegen dies: Kapitel 8.2.1 (Architektur Check I) und Kapitel 8.2.4 (Architektur Check II). Inhaltliche Genauigkeit, formale Modellierung und methodische Disziplin gemäß dem DSR-Framework sichern die Korrektheit der Referenzarchitektur umfassend ab.
Aktualität	Die REA ist fundiert und zeitgemäß. Zahlreiche Evaluationsdaten aus Kapitel 8 bestätigen dies, etwa die Integration des BerlKönig-Dienstes (Kapitel 6.3, 8.2.1, 8.2.4) als praxisnahes Anwendungsszenario und Rückmeldungen aus Experteninterviews. In den Evaluationsepisoden mit der BSAG (Kapitel 8.2.2) und den SWM/MVV (Kapitel 8.2.3) heben die Beteiligten besonders die Anschlussfähigkeit an aktuelle technologische Entwicklungen wie API-basierte Dienste und digitale Plattformintegration hervor. Im Kontext der VDV-Tagung (Kapitel 8.2.5) wurde bestätigt, dass Branchentrends wie MaaS und datengetriebene Mobilitätssteuerung adressiert werden.

Kriterium	Bewertung
	Der DSR-Ansatz (Kapitel 2.1) ermöglicht eine iterative Weiterentwicklung und Anpassung der Architektur an aktuelle Anforderungen. Die Architektur nutzt etablierte, aktuelle Standards (ITVU, VDV) und erweitert sie gezielt (Kapitel 6.1, 6.2, 8.2.8). Die Architektur erfüllt nicht nur gegenwärtige Anforderungen, sondern ist durch ihre Erweiterbarkeit auch langfristig anpassbar. Somit ist sie sowohl wissenschaftlich als auch praktisch anschluss- und zukunftsfähig.
Kohärenz	Die REA zeigt durchgängig logische Kohärenz. Kapitel 8.1.3 definiert Kohärenz als zentrale Evaluationsdimension; diese verbindet strategische, fachliche und technische Architekturkomponenten in stimmiger Weise. Mehrere Evaluationsepisoden bestätigen das: In Episode I (Kapitel 8.2.1) wurde die durchgängige Modellierung zwischen den Architekturebenen hervorgehoben, Episode IV (Kapitel 8.2.4) betont Konsistenz und Fehlerfreiheit des Modells. Insgesamt wurde das Architekturmodell als kohärent, logisch aufgebaut und methodisch sauber konstruiert bewertet. Es überzeugt durch klare Struktur entlang der Zielhierarchie und die konsistente Verknüpfung von Motivation, Geschäftsprozessen und Anwendungssystemen. Unterstützt wird diese Kohärenz durch den iterativen Entwicklungsprozess, der dem DSR-Ansatz folgt (Kapitel 8.1.4), sowie eine kontinuierliche Rückkopplung, womit eine gezielte Sicherung der inneren Stimmigkeit gewährleistet wird.
Konsistenz	Die Architektur kann als methodisch und inhaltlich widerspruchsfrei bewertet werden. Konsistenz bedeutet hier die einheitliche Anwendung von Modellierungsmethoden, logische Stimmigkeit und strukturierte Verknüpfung der Architekturebenen (Kapitel 8.1.3). Evaluationsepisoden belegen dies: So attestierten die Experten in Episode I (Kapitel 8.2.1) und Episode IV (Kapitel 8.2.4) der Architektur eine konsistente Modellierung ohne semantische Brüche oder Redundanzen. Die strategischen Ziele sind mit den operativen Ebenen verknüpft, was die konsistente Struktur der Architektur festigt. Der iterative Evaluationsprozess im Rahmen des DSR-Ansatzes (Kapitel 8.1.4) prüft und verbessert kontinuierlich mögliche Inkonsistenzen. Rückmeldung von Experten aus Theorie und Praxis bestätigen: Die Architektur ist eine methodisch konsistente Lösung.

Kriterium	Bewertung
Anpassungsfähigkeit	Die REA ist hoch anpassungsfähig, was konzeptionell und empirisch in Kapitel 8 bestätigt wird. Bereits in Kapitel 8.1.3 wird Anpassungsfähigkeit als zentrale Eigenschaft definiert, um eine langfristige Nutzbarkeit der Architektur unter sich wandelnden technologischen und organisatorischen Bedingungen zu sichern. Die modulare, serviceorientierte Struktur erlaubt es, neue Dienste oder Systeme flexibel zu integrieren, ohne das Modell grundlegend zu verändern. Mehrere Evaluationsepisoden stützen diese Einschätzung. Die für die Episode II (Kapitel 8.2.2) und Episode III (Kapitel 8.2.3) interviewten Experten betonen die Anschlussfähigkeit der Architektur an künftige digitale Plattformen und Geschäftsmodelle. Sie bestätigen auch die Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit des Modells. Unterstützt wird die Anpassungsfähigkeit durch den iterativen, rückkopplungsorientierten Entwicklungsprozess nach DSR (Kapitel 8.1.4), der die kontinuierliche Weiterentwicklung und Integration neuer Anforderungen ermöglicht. Die Architektur bleibt so flexibel für aktuelle und künftige Herausforderungen im öffentlichen Verkehr.
Verständlichkeit	In Kapitel 8.1.3 wird Verständlichkeit als zentrales Ziel genannt: Die modellierten Inhalte und Zusammenhänge sollen klar und intuitiv erfassbar sein. Die entwickelte REA ist für die interviewten Experten gut verständlich, wie mehrere Evaluationsepisoden in Kapitel 8 zeigen. Episode I (Kapitel 8.2.1) und Episode IV (Kapitel 8.2.4) heben die strukturierte, schichtenübergreifende Darstellung sowie die konsistente ArchiMate-Notation als hilfreich für das Verständnis hervor. Die klare Modelllogik und die zielgruppengerechte Aufbereitung erleichtern das Verständnis. Die Kombination aus fachlicher und technischer Sicht macht das Modell für IT-Architekten und Management praktikabel. Die iterative Entwicklung im Rahmen des DSR-Prozesses (Kapitel 8.1.4) verbessert zusätzlich die Verständlichkeit durch kontinuierliche Rückkopplung mit der Praxis. Somit ist die Architektur methodisch fundiert, in ihrer Darstellung klar und zugänglich für die relevanten Zielgruppen.

Kriterium	Bewertung
Verfügbarkeit	Die Verfügbarkeit der Architektur ist umfassend gewährleistet. Sie stand/steht allen relevanten Interessensgruppen zur Verfügung (Kapitel 8.2.2, 8.2.3, 8.2.5), wird zielgruppengerecht dargestellt und dokumentiert (Kapitel 8.2.9) und profitiert vom methodisch gesicherten Entwicklungsprozess im Rahmen des DSR-Ansatzes (Kapitel 8.1.4). Das Architekturmodell bleibt so praxisorientiert und umfassend wie langfristig nutzbar.
Wartbarkeit	Die entwickelte REA kann als wartbar angesehen werden. Zahlreiche Bewertungen zeigen, dass Struktur, Modularität und Dokumentation gezielte Änderungen und Erweiterungen ermöglichen, ohne die Gesamtstruktur zu beeinträchtigen. Besonders in Episode II (Kapitel 8.2.2) wird die serviceorientierte und entkoppelte Struktur hervorgehoben, die gezielte Anpassungen einzelner Komponenten erleichtert. Episode IV (Kapitel 8.2.4) bestätigt die Konsistenz und Robustheit als stabile Basis für Pflege und Weiterentwicklung. Die gute Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit sichern die Wartungsfreundlichkeit. Der DSR-Ansatz unterstützt durch iterative Entwicklung (Kapitel 8.1.4) und systematische Dokumentation die nachhaltige Nutzung und Anpassung. Die Architektur erfüllt somit zentrale Anforderungen an Wartbarkeit und bleibt langfristig in dynamischen Mobilitätskontexten einsetzbar.
Instanzitierbarkeit	Die REA ist klar instanzierbar. Die Evaluationsergebnisse verdeutlichen, dass das Modell auf betriebliche Kontexte übertragbar ist. In Episode II (Kapitel 8.2.2) und Episode III (Kapitel 8.2.3) bestätigten Vertreter der BSAG und der Stadtwerke München, dass die Architektur problemlos an ihre bestehenden IT- und Organisationsstrukturen anpassbar sei. Die modulare, konsistente Struktur unterstützt eine gezielte, betriebsspezifische Anwendung. Die Integration des On-Demand-Dienstes BerlKönig, die in Kapitel 8.2.4 und 8.2.9 reflektiert wird, zeigt diese praktische Übertragbarkeit: Die Architektur konnte erfolgreich auf reale Anwendungsbedingungen übertragen werden. Der iterative Entwicklungsprozess des DSR-Ansatzes (Kapitel 8.1.4) sorgt dafür, dass das Modell nicht theoretisch bleibt, sondern in der Praxis genutzt werden kann. Die Architektur erfüllt damit das zentrale Kriterium wissenschaftlich fundierter Referenzmodelle: konkrete, kontextbezogene Umsetzbarkeit.

Fazit und Handlungsempfehlungen

Die entwickelte Architektur erfüllt alle 10 ausgewählten Kriterien (Tabelle 36) zur Bewertung einer REA. Sie stellt damit ein wissenschaftlich fundiertes, methodisch abgesichertes und praktisch einsetzbares Artefakt dar. Wie dargestellt erfüllt sie zentrale Anforderungen an zeitgemäße adaptive Systemlandschaften im ÖPNV. Als Referenzmodell bietet diese REA eine tragfähige Grundlage für Verkehrsunternehmen, um bedarfsorientierte Mobilitätsangebote strategisch und operativ zu integrieren. Damit kann sie einen substantiellen Beitrag in Form von mehr Digitalisierung und einer zunehmenden Flexibilisierung des ÖPNV im Sinne nachhaltiger urbaner Mobilitätssysteme leisten.

8.3 Ergebnisse der Evaluation

Die entwickelte REA wurde in 9 Evaluationsepisoden geprüft. Dabei kam das Framework for Evaluation in Design Science (FEDS) [52] zum Einsatz, um ihre Effektivität, Effizienz, Anwendbarkeit und Praxisrelevanz zu bewerten. Formative und summative sowie naturalistische und artifizielle Bewertungsmethoden sorgten für eine umfassende und systematische Überprüfung.

Die in Tabelle 3 genannten Kriterien wurden umgesetzt, indem sie auf die Evaluationsmerkmale des FEDS-Prozesses (Ziele, Strategie, Eigenschaften, Episoden) gemappt wurden [52, S. 77–89]. Tabelle 30 dient dabei als Index der Nachweis (Lines of Evidence): Deduktive Nachweis ordnet man einer Ex-ante-/Ex-post-Prüfung (z.B. Normenkohärenz) zu, induktive Nachweise einer naturalistischen Episode (Kapitel 8.2). Abbildung 22 und Tabelle 14 fassen das Ergebnis zusammen. Hierzu ist anzumerken, dass die in Kapitel 7.5.8 skizzierte Ergebnisintegration entlang der Anforderungen und FEDS-Episoden erfolgte. Die Anpassungen betreffen v.a. die Anwendungsschicht sowie die Ausdifferenzierung von Prozess- und Capability-Sichten. Der Transfer in die finale REA (Abbildung 26, Kapitel 9.1.2) folgt dieser Logik. Dokumentations- und Kommunikationsartefakte gemäß Kapitel 7.5.9 sichern Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit.

Die Evaluationsepisoden wurden abschnittsweise beschrieben und nach der Evaluationsstrategie geordnet dargestellt. Die Abbildung 22 ordnet die Episoden nach der angewendeten Evaluationsstrategie.

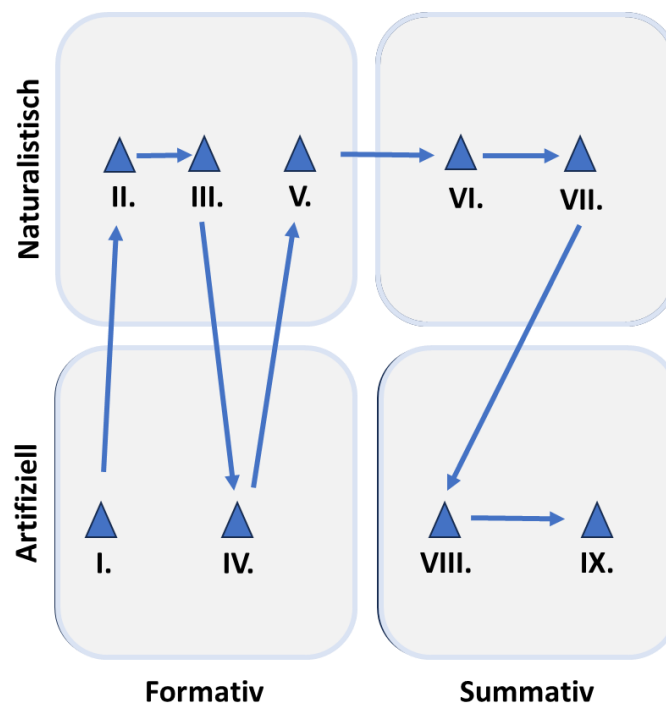


Abbildung 22: Evaluationsmatrix

Tabelle 37 stellt die wichtigsten Ergebnisse der Evaluationsepisoden im Überblick dar.

Tabelle 37: Ergebnisse der Evaluationsepisoden

Episode	Ergebnis
I	Enterprise Architecture, Check I In einer formativen, artifiziellen Evaluation wurden die Architekturkomponenten anhand der definierten funktionalen, nicht-funktionalen Anforderungen und die Konsistenz des Architekturentwurfs überprüft. Das Ergebnis zeigte, dass die Architektur alle funktionalen Anforderungen (A1–A6) erfüllt. Bei den nicht-funktionalen Anforderungen (B1–B6) gab es eine nicht erfüllte Anforderung: Skalierbarkeit.
II	BSAG (Bremer Straßenbahn AG) Ein naturalistisches Experteninterview mit dem CIO der BSAG validierte die strategische und operative Anwendbarkeit der Architektur. Besonders hervorgehoben wurden die Modularität, Flexibilität und die Praxisrelevanz durch die zentrale Datendrehscheibe.

Episode	Ergebnis
III	Stadtwerke München (SWM/MVV) Experten der Stadtwerke München bestätigten die Praxisrelevanz und Anpassungsfähigkeit der Architektur. Änderungen betrafen v.a. die Anwendungsebene und die IT-Sicherheitsarchitektur.
IV	Enterprise-Architektur, Check II Eine weitere formative, artifizielle Evaluation überprüfte die strukturelle und funktionale Vollständigkeit. Sie zeigte eine hohe Konsistenz und Wiederverwendbarkeit der Architektur.
V	VDV-Tagung Rostock Während der naturalistischen Expertenbewertung durch 13 Fachleute aus unterschiedlich großen ÖPNV-Unternehmen wurde die strategische Relevanz der Architektur bestätigt. Die Experten regten an, den Vertriebsbereich um unverbindliche Reservierungen zu erweitern, um den Anforderungen bedarfsorientierter Verkehre besser gerecht zu werden.
VI	VDV-Experten Die Erweiterung des Vertriebsbereichs wurde validiert und die Praxisrelevanz der Architektur weiter untermauert. Die Experten bestätigten die nahtlose Integration von angebots- und bedarfsorientierten Mobilitätsformen sowie die Flexibilität und Skalierbarkeit durch eine zentrale Schnittstelle.
VII	Enterprise-Architekt BVG Eine summative und naturalistische Evaluation des Capability-Modells bestätigte die Vollständigkeit und Kohärenz der Fähigkeiten (Capabilities). Der Experte bewertete die hybriden Capabilities zur Integration von NMS als strategisch bedeutsam, praxisrelevant und flexibel.
VIII	Evaluation: Szenario-Analyse Die Szenario-basierten Walkthroughs bestätigen in einer summativen, artifiziellen Evaluation die REA hinsichtlich der in Kapitel 6.5 abgeleiteten Anforderungen und über alle Varianten S1–S4 hinweg. Die Walkthroughs zeigen eine hohe Coverage/Traceability von Anforderungen auf Capabilities/Services/Prozesse/Applikationen sowie OJP-konforme Governance (Trennung Reservierung/Buchung); S3 liefert den stärksten Utility-Nachweis für hybride AO/BO-Ketten (Planung/Disposition ↔ ITCS; Abbildung 27, Abbildung 29, Kapitel 7.1.8), während S4 als konsistentes Zielbild trägt (Kapitel 9.1.3–9.1.6).

Episode	Ergebnis
	Die Sicherheits-/KRITIS-Anforderungen werden durch segmentierte Broker/Datendrehscheiben mit klaren Trust-Boundaries statt eines durchgehenden ESB erfüllt (Kapitel 7.1.6), was zugleich Schnittstellen-Komplexität reduziert und Resilienz erhöht.
IX	Gesamtevaluation Architektur, Check III Die abschließende summative und artifizielle Evaluation nach den Evaluationskriterien von Felix Timm [46] (vgl. Kapitel 3.2.5) bestätigte die Vollständigkeit, Konsistenz und Effektivität der Architektur sowie ihre Wiederverwendbarkeit als Referenzarchitektur. Sie erfüllt alle Bewertungskriterien und wurde damit als strategische Entscheidungsunterstützung und praxisrelevantes Modell validiert.

Daraus lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die funktionalen Anforderungen (A1–A6) wurden im Architektur Check I (Episode I) als erfüllt bewertet. Bei den nicht-funktionalen Anforderungen (B1–B6) zeigt die Evaluation eine überwiegend positive Bewertung; B2 (Skalierbarkeit) wurde in der initialen artifiziellen Prüfung zunächst als offen geführt und im weiteren Verlauf über zusätzliche Episoden bzw. Kriterienbewertungen weiter eingeordnet.

Besonders hervorzuheben wurde ihre Skalierbarkeit, Modularität sowie die Anpassungsfähigkeit an verschiedene Marktanforderungen und Unternehmensgrößen. Die hybriden Capabilities ermöglichen eine flexible Kombination aus angebots- und bedarfsorientierten Verkehrsleistungen, was die Wettbewerbsfähigkeit steigert und die Kundenzufriedenheit erhöht. Es ist zu erwarten, dass eine konsistente Integration die Nutzererfahrung unterstützen kann; empirische Wirkzusammenhänge sind jedoch kontext- und designabhängig [181, S. 1].

- Praxisrelevanz und Akzeptanz wurden in mehreren naturalistischen Evaluationsepisoden bestätigt, insbesondere durch Experten von BVG, BSAG, Stadtwerke München und des VDV.
- Die Architektur unterstützt die digitale Transformation strategisch und operativ, sie bietet flexible Angebotsgestaltung und ermöglicht dynamisches Tarifmanagement.

Auf Basis der in Tabelle 37 zusammengefassten Evidenzen aus artifiziellen Checks sowie naturalistischen Expertenepisoden kann die in Kapitel 8.1.1 gestellte Frage bejaht werden, dass die entwickelte REA die Erwartungen der beteiligten ÖPNV-Expert:innen im Sinne der definierten Evaluationskriterien erfüllt.

Diese Aussage wurde in mehreren Evaluationsepisoden umfassend validiert:

1. Expertenfeedback und Praxisrelevanz: Fachleute führender ÖPNV-Unternehmen wie BVG, BSAG und Stadtwerke München sowie VDV-Experten bestätigten die Praxisrelevanz und Anwendbarkeit der Architektur. Besonders die hybriden Capabilities

zur Integration von NMS wurden als strategisch relevant und zukunftsweisend bewertet.

2. Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen: Die Architektur erfüllt sämtliche funktionalen (A1–A6) (Tabelle 14) und nicht-funktionalen Anforderungen (B1–B6) (Tabelle 15). Ihre Vollständigkeit und Effektivität wurden bestätigt.
3. Modularität und Flexibilität: Die modulare Struktur der Architektur unterstützt die serviceorientierte Gestaltung auf Geschäfts- und Anwendungsebene. Sie ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Marktanforderungen und Unternehmensgrößen, was Experten als entscheidenden Wettbewerbsvorteil hervorhoben.
4. Strategische und operative Anwendbarkeit: Die Architektur fördert die digitale Transformation und bietet strategische Entscheidungsunterstützung durch flexible Angebotsgestaltung und dynamisches Tarifmanagement.

Die artifizielle Szenario-Analyse (Kapitel 8.2.8) ergänzt die naturalistischen Episoden durch kontrollierte Walkthroughs/Playthroughs der S1–S4-Konfigurationen (S4 als Voll-sicht; S1–S3 als Overlays). Sie misst diese in spezifizierten Zielgrößen mittels strukturierter Checklisten, Mapping-Matrizen und Szenario-abhängiger KPI-Sets. Die Befunde bestätigen eine hohe Coverage und Traceability der Szenario-bezogenen Anforderungen (Anforderung → Capability → Service/Prozess → *IT-Baustein*), die Integrationsfähigkeit inkl. OJP-konformer Trennung Reservierung ≠ Buchung, die KRITIS-konforme Segmentierung der Integrationsschicht (Datendrehscheibe, Trust-Boundaries, No-Go-Kopplungen) sowie die Instanzierbarkeit über Größenklassen (klein/mittel/groß) und Verantwortungsmodelle (owned/shared/partnered).

Integrations-/Governance-Ergebnis: In S1/S2 wird die Trennung Reservierung (unverbindlich) vs. Buchung (verbindlich) konsistent umgesetzt (OJP/TRIAS/OSDM- Pfad). Clearing/Revenue-Sharing sind kapselbar; die Datendrehscheibe reduziert bilaterale Schnittstellen und stabilisiert SLAs. Diese Resultate sind deckungsgleich mit VDV-Evidenzen zur funktionalen Trennung von Reservierung/Buchung.

Sicherheits-/KRITIS-Ergebnis (Querschnitt): Der Negativtest „durchgehender ESB über alle Zonen“ wird zugunsten domänenbasierter Integrationssegmente mit Broker/Datendrehscheibe und klaren Trust-Boundaries verworfen (Policy Violations = 0 in der Laborumgebung). Die Terminologie ist entsprechend vereinheitlicht (ESB → Datendrehscheibe/Schnittstelleninfrastruktur).

Variabilitäts-/Utility-Ergebnis: S4 fungiert als Referenz-Zielbild; S1–S3 sind als Delta-Sichten konsistent konfigurierbar (RACI konsistent; IF-Completeness der Schnittstellen). Die Playthroughs evidenzieren geschlossene AO/BO-Ketten (z.B. BO-Einsatzplanung → Personal/Fahrzeugdisposition → ITCS-Kopplung), wodurch Utility in typischen Integrationsfällen (ITCS/RBL, Payment/Clearing, Fahrgastinformation) nachgewiesen ist.

Methodische Verankerung: Die Episode folgt dem FEDS-Vier-Schritt (Ziele → Strategie → Eigenschaften → Episoden); die summative, artifizielle Anlage wird durch natura-

listische Befunde aus den Expertenepisoden trianguliert (hybride Strategie gemäß FEDS-Empfehlung) [52, S. 86–89].

Zusammenfassend zeigt die Evaluation, dass die entwickelte Referenzarchitektur die Erwartungen der ÖPNV-Experten erfüllt. Sie erweist sich als effektive und praxisrelevante Lösung zur Integration von NMS in klassische ÖPNV-Strukturen. Die Architektur stärkt die Wettbewerbsfähigkeit, steigert die Kundenzufriedenheit und unterstützt die strategische Digitalisierung im ÖPNV.

Die Ergebnisse bestätigen das hybride Vorgehen: deduktiv konsistent zur Literatur (z.B. Kapitel 3.2.5) und induktiv passfähig im Nutzungskontext (z.B. Kapitel 8.2.2–8.2.8, Episoden II–VIII). Die Zusammenführung erfolgt entlang Tabelle 30, die für jedes Kriterium den Grad der Abdeckung und konkrete Belegstellen ausweist.

9 Merkmale der Referenz-Enterprise-Architektur

Das Artefakt durchlief 9 Evaluationsepisoden (siehe Kapitel 8) aufgeteilt in zwei Phasen:

- (1) Evaluationsepisode I. bis VII. (Kapitel 9.1) und
- (2) Evaluationsepisode VIII. und IX. (Kapitel 9.2).

Kapitel 9.3 präsentiert die finale Version der REA. Die Evaluation erfolgte iterativ: Architektorentwurf, Dokumentation von Expertenfeedbacks und Evaluationsergebnisse auf die jeweilige Architekturversion wechselten sich ab. Die Architektur deckt den schon in Abbildung 17 (Kapitel 7.4.2) skizzierten Hauptprozess ab, der den Kern des ÖPNV-Betriebs beschreibt (siehe Abbildung 23). Alle anderen Prozesse sind entweder managementorientiert oder wirken unterstützend. Abbildung 23 zeigt diesen Hauptprozess und hebt die Besonderheiten der Architektur eines ÖPNV-Unternehmens (blau und rot umrandet) hervor.

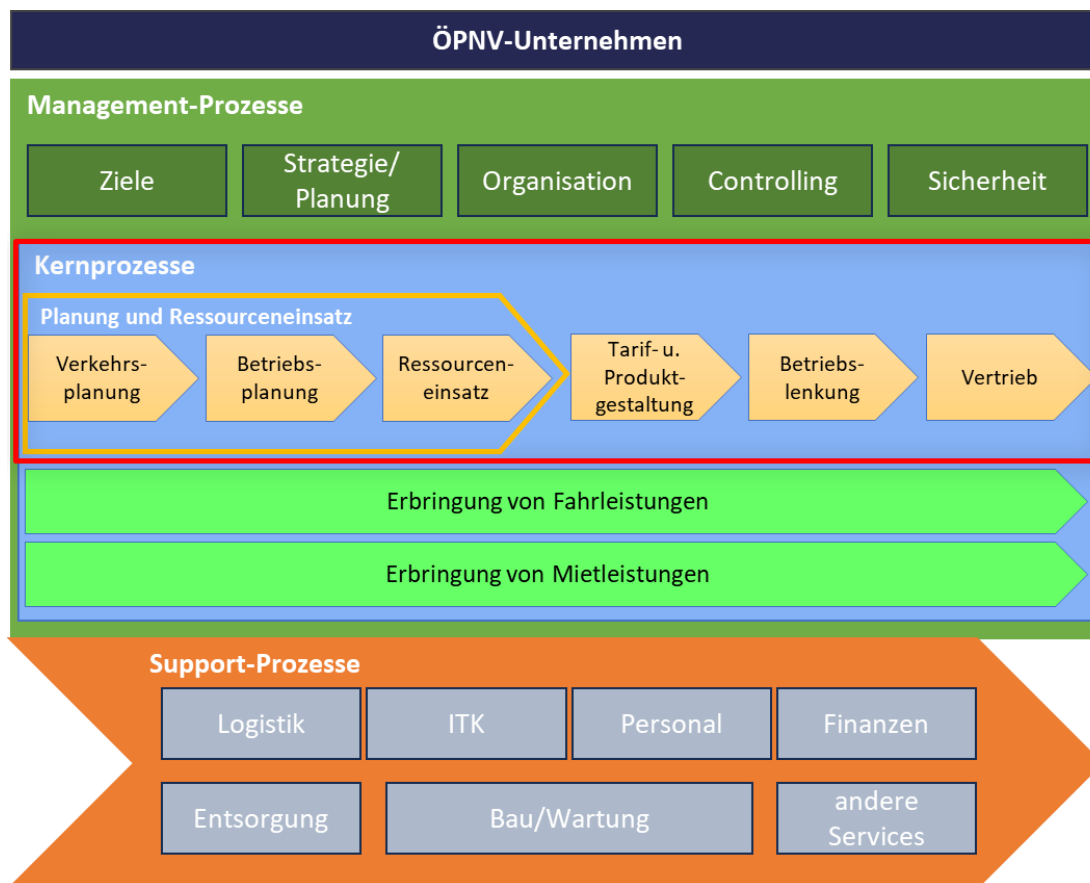


Abbildung 23: Prozessdarstellung des ÖPNV-Prozesses

Diese Prozessdarstellung hat sich als nützlicher Überblick für das Management von ÖPNV-Unternehmen erwiesen. Die eigentliche Referenzarchitektur wird in ArchiMate-Modellen dargestellt und in den folgenden Kapiteln erläutert.

9.1 Ergebnisse der Evaluationsepisoden I–VII

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der Evaluationsepisoden I–VII zusammen. Sie bilden ein referenzierbares Zielbild für klassische ÖPNV-Unternehmen, die bedarfsorientierte Verkehre integrieren. Die folgenden Unterkapitel strukturieren die Ergebnisse und verdichten sie anschließend zu einem zentralen Bild der entwickelten REA.

9.1.1 Strategische Ebene

Dieses Kapitel beleuchtet die strategischen Zusammenhänge, etwa die Fähigkeiten und die Ressourcensteuerung, die ein klassisches ÖPNV-Unternehmen benötigt, um bedarfsorientierten Verkehr in seine Organisation zu integrieren. Die strategische Perspektive wird durch die Motivationsebene ergänzt, die Anforderungen, Ergebnisse, Zielzustände und organisatorische Veränderungen sowie deren Auswirkungen auf die Details veranschaulicht (Abbildung 24). Diese Sichtweise auf die Zielarchitektur schafft ein besseres Verständnis für die Verbindung zwischen der strategischen und der Motivationsebene.

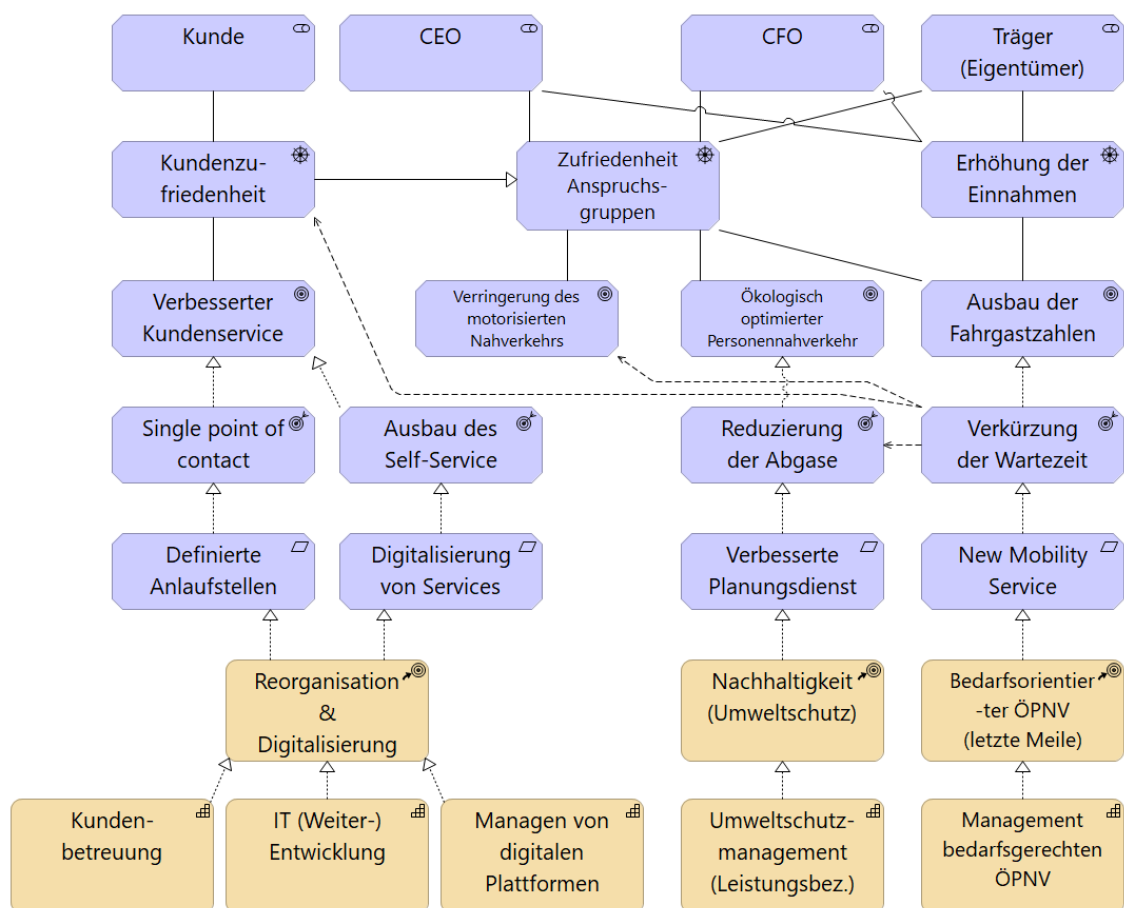


Abbildung 24: Strategischer Bereich der REA

Abbildung 24 zeigt auf der untersten Ebene die unternehmerischen Fähigkeiten, die ein ÖPNV-Unternehmen benötigt, um bedarfsorientierten Verkehr anzubieten. Zu den klassischen Kompetenzen wie Kundenservice und IT-Entwicklung kommen neue Fähigkei-

ten hinzu: digitale Plattformen, das Management des bedarfsorientierten Verkehrs und ein verkehrsbezogenes Umweltschutzmanagement. Letzteres ist in Deutschland in den Satzungen der ÖPNV-Unternehmen verankert und muss berücksichtigt werden.

Die Abbildung 24 zeigt auch, wie diese Fähigkeiten die Anforderungen beeinflussen, die das Unternehmen durch Ressourcenmanagement erfüllen muss. Die Umsetzung dieser Anforderungen führt zu dem angestrebten Ergebnis. Damit verändert diese Ziele die Organisation, was die Stakeholdern akzeptieren oder aktiv unterstützen müssen.

Besonders hervorzuheben ist die Fähigkeit, bedarfsorientierten ÖPNV zu steuern. Sie ermöglicht es, Kunden auf der letzten Meile zu bedienen, was die Zahl der Kunden erhöht und die Wartezeiten durch bessere Umsteigemöglichkeiten verkürzt. Eine höhere Auslastung der Verkehrsmittel und mehr Fahrgäste reduzieren die Abgasemissionen im Einzugsgebiet des Verkehrsunternehmens. Gleichzeitig steigt die Kundenzufriedenheit durch verbesserte Verbindungen und ein umweltfreundliches Angebot. Die erhöhte Nachfrage steigert zudem den Umsatz. Diese Entwicklungen tragen zu den Zielen der Stakeholder bei, besonders von CIO und CFO.

9.1.2 Geschäfts- und Anwendungsebene

In diesem Kapitel geht es um die Beziehung zwischen Prozessen und den Rollen/Akteuren, die ein ÖPNV-Unternehmen braucht, um Verkehrsleistungen zu erbringen – sowohl auf der Geschäfts- als auch auf der Anwendungsebene.

Die Anordnung der Prozesselemente im Architekturartefakt folgt der üblichen Darstellung von (Wertschöpfungs-)Prozessen: von links nach rechts, vom Input zum Output (siehe Abbildung 25). Alle weiteren Elemente der Architektur orientieren sich an dieser Struktur.

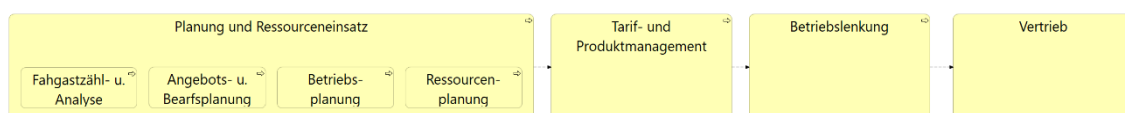


Abbildung 25: Prozessstruktur der Unternehmensreferenzarchitektur

Für eine zeitgemäße anpassungsfähige Architektur wurden versucht die folgenden 2 Aspekte mit einzubeziehen:

1. Ein serviceorientierter Ansatz auf Geschäfts- und Anwendungsebene, um die Flexibilität der Organisation zu erhöhen.
2. Zentrale Kommunikation zwischen den Komponenten über eine zentrale Schnittstellenebene, die technische Dienste nutzt, um den Austausch auf der Anwendungsseite zu standardisieren und zu steuern.

Abbildung 26 zeigt die Gesamtarchitektur mit Geschäfts- und Anwendungsebene. Die benötigten Datenobjekte sind den Anwendungen zugeordnet und erläutert.

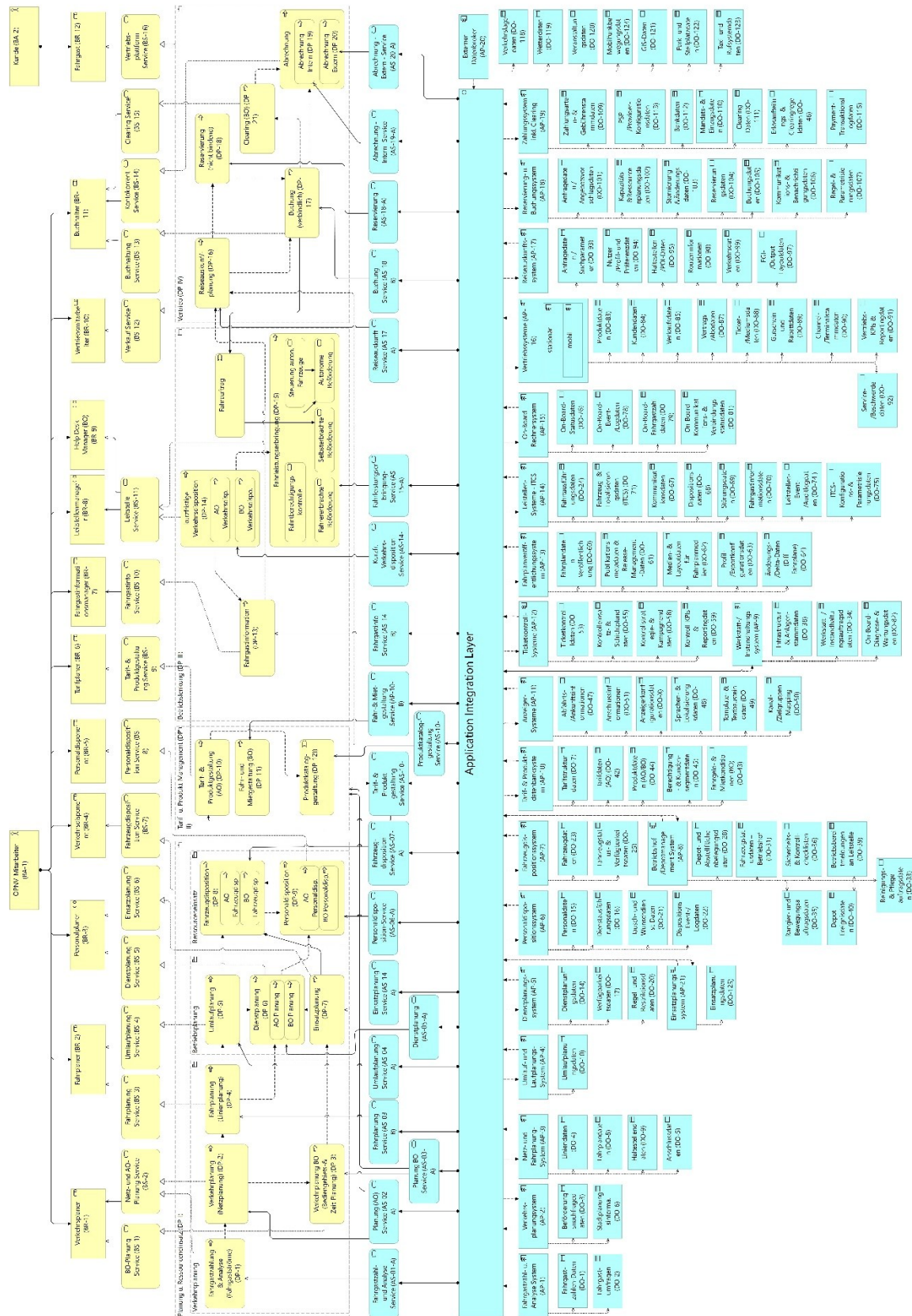


Abbildung 26: Operativer Bereich der REA

Die Architektur gliedert sich strukturell in Geschäftsrollen, Dienste, Prozesse sowie in Anwendungsdienste und Anwendungen. Wie zu Beginn des Kapitels 7.2 beschrieben, folgt die Enterprise-Architektur der Prozessstruktur von Verkehrsunternehmen. Sie umfasst die folgenden Hauptbereiche:

- Planung und Ressourceneinsatz

Hier werden die Planungskomponenten für die Leistungserstellung gebündelt. Die Verkehrsplanung ist mit Betriebsplanung und der Planung des Ressourceneinsatzes verknüpft. Ziel ist eine integrierte, aufeinander aufbauende Verkehrs- und Betriebsplanung für einen effizienten Ablauf.

- Fahrgeld-, Tarif- und Mietpreismanagement

Hier werden die angebotsorientierten Planungsergebnisse in Tarife und Produkte überführt. Gleichzeitig werden die bedarfsorientierten Leistungen mit Preisen – z.B. Mietpreisen – versehen und/oder Preise von externen Mobilitätsdienstleistern konsolidiert und für die zentrale Abrechnung bereitgestellt.

- Betriebliches Management

Das Betriebsmanagement im öffentlichen Nahverkehr umfasst die operative Planung, Steuerung und Überwachung des täglichen Verkehrsbetriebs. Es gewährleistet die Verfügbarkeit und Einsatzfähigkeit von Fahrzeugen und Personal sowie die Einhaltung von Fahrplänen und Servicequalitäten. Integrierte ITCS/RBL-Systeme ermöglichen die Echtzeitüberwachung, Disposition und Störungsbearbeitung. Ziel ist ein sicherer, effizienter und qualitativ hochwertiger Betriebsablauf.

- Vertrieb

Dieser Bereich umfasst Reiseplanung, Buchung und Abrechnung. Im Mittelpunkt steht eine Mobilitätsplattform, die alle angebots- und bedarfsorientierten Mobilitätsangebote des Verkehrsunternehmens bündelt und dem Kunden integriert bereitstellt.

In den folgenden Kapiteln werden die Architekturkomponenten im Detail dargestellt und die Anforderungen erläutert, die bei der Integration bedarfsgesteuerter Verkehre zu berücksichtigen sind.

9.1.3 Planung und Einsatz von Ressourcen

Dieses Kapitel beschreibt die erforderlichen Anpassungen bei Ressourcenplanung und -nutzung, die ein traditionelles ÖPNV-Unternehmen vornehmen muss, um NMS zu integrieren.

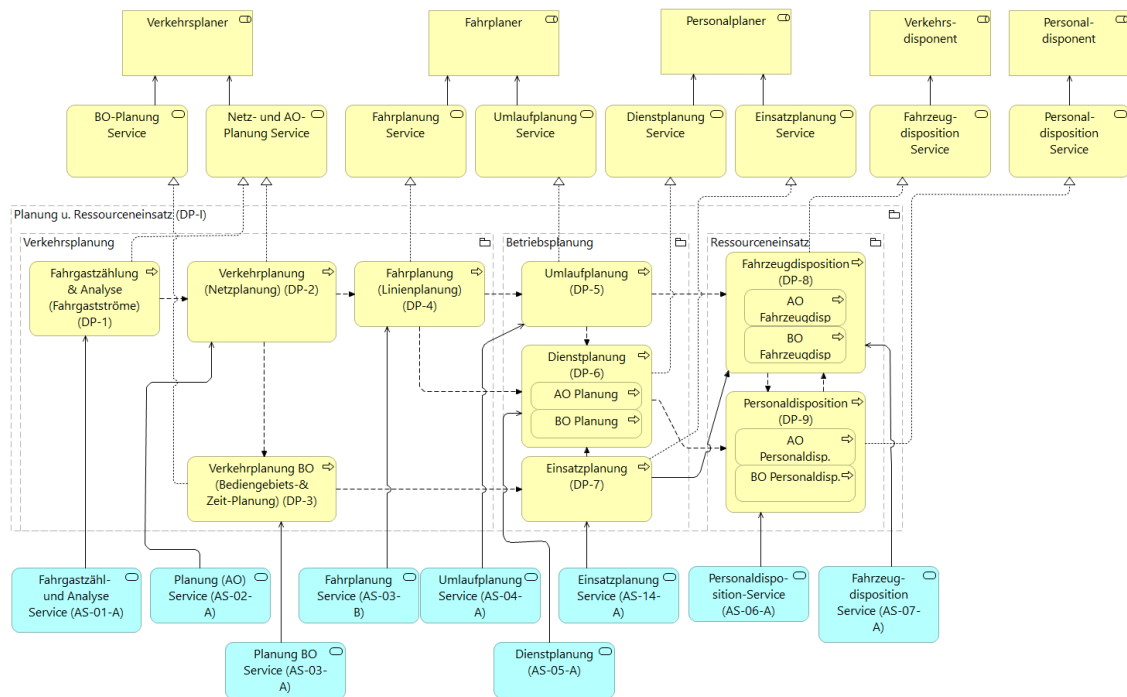


Abbildung 27: Planung und Nutzung von Ressourcen

I. Verkehrsplanung

Die Verkehrsplanung (vgl. Abbildung 27) umfasst die Rollen Verkehrsplaner und Fahrplaner. Verkehrs- und Fahrplaner arbeiten in den Prozessen Bedarfsplanung, Angebotsplanung und Fahrzeugdisposition und kümmern sich um folgende Prozessschritte:

- Fahrgastzählung und -analyse (a.)

Dieser Prozessschritt kombiniert die Fahrgastzählung und Fahrgastbefragung. Die daraus gewonnenen Daten über Fahrgastzahlen und -ströme fließen in den folgenden Prozessschritt (b.) ein.

- Planung des angebotsorientierten Verkehrs (b.)

Dieser Prozessschritt ist in branchenbezogenen Darstellungen als typischer Bestandteil der Planungskette ausgewiesen [63]. Auf Basis von Fahrgastzahlen, Verkehrsdaten (i.d.R. vom Verkehrsverbund) und Informationen wie z.B. Ferientermine wird der Verkehr geplant. Das Ergebnis sind strukturierte Daten, die die Nachfrage in eine strategische Netzplanung umsetzen. In klassischen Unternehmen folgt darauf der Prozessschritt Linienplanung (d.). Unternehmen mit integrierten bedarfsorientierten Verkehren führen parallel die Planung dieser Verkehre durch (c.).

- Planung des bedarfsorientierten Verkehrs (c.)

Dieser Schritt erfüllt die Anforderungen, die ein ÖPNV-Unternehmen für die Integration und Steuerung bedarfsorientierter Verkehre benötigt.

Basis sind Verkehrsdaten, die bspw. zeigen, wo die Einrichtung von Mobilitätsknotenpunkten wie Jelbi-Stationen in Berlin oder HVV-switch-Punkten in Hamburg sinnvoll ist. Die Standortwahl von Mobilitätsknotenpunkten kann datenbasiert über Nach-

frage-, Erreichbarkeits- und Umsteigeindikatoren erfolgen; entsprechende Vorgehensweisen werden in Praxis-/Planungsarbeiten diskutiert (vgl. [134]; [135]). Die identifizierten Knotenpunkte dienen als Zugangspunkte für Sharing- und On-Demand-Angebote und unterstützen die Bündelung intermodaler Zu-/Abbringerketten [211]; [206]. Zudem werden neuralgische Punkte für die „letzte Meile“ identifiziert und für Sharing-Angebote reserviert. Hierzu zählt auch die bereits erwähnte Mobilitätsdrehscheibe.

In der vorliegenden Modellierung wird die Umsteigeplanung der Betriebsplanung zugeordnet, da sie unmittelbar an die Sicherung von Anschlüssen und dispositive Regelkreise anschließt.

- **Linienplanung (d.)**

Die Linienplanung gestaltet den angebotsorientierten Verkehr auf Basis der Ergebnisse der Netz- und Angebotsplanung, also von Schritt (b.). Die geplanten Linien – als Output dieses Prozesses – fließen in die Betriebsplanung ein, v.a. in Fahrzeugdisposition und Dienstplanung.

Die genannten Prozesse werden durch Anwendungsdienste unterstützt, die entweder direkt mit den Anwendungen oder über ein Konstrukt wie z.B. eine Integrationsschicht realisiert werden. Im zweiten Fall wären die Anwendungen, die die Funktionalität und Datenhaltung organisieren, über die Integrationsschicht zugänglich. Das entspricht den nicht-funktionalen Anforderungen an eine flexible, entkoppelte Unternehmensarchitektur, wie sie in Kapitel 5 (Tabelle 15) beschrieben ist.

II. Operative Planung

Die operative Planung (siehe Abbildung 27) umfasst die mittelfristige Planung der beiden Hauptressourcen Fahrzeuge und Personal. Hauptprozesse sind Fahrzeugdisposition, Dienstplanung und Einsatzplanung.

Die Prozesse Fahrplanplanung und bedarfsorientierte Transportplanung (siehe I.) liefern die Grundlage für diese Planung.

Die Personalplanung unterscheidet zwischen:

- a. Dienstplanung für Mitarbeitende der angebotsorientierten Linienverkehre und
- b. Dienstplanung für Mitarbeitende, die für bedarfsorientierte Tätigkeiten zuständig sind, etwa im Rahmen der Disposition von Fahrzeugen oder E-Scootern.

Die Einsatzplanung bündelt die Ergebnisse und übergibt sie an die Dienstplanung. Diese kombiniert sie mit ihren eigenen Planungsergebnissen und leitet sie an die Personaldisposition (siehe III.) weiter.

Die Fahrzeugdisposition und die Einsatzplanung übermitteln ihre Ergebnisse an die angebots- und bedarfsorientierte Fahrzeugdisposition.

III. Ressourceneinsatz

Die Ergebnisse der beiden Prozesse Fahrzeugdisposition und Dienstplanung fließen in die Fahrzeug- und Personaldisposition ein (siehe Abbildung 27). Diese koordiniert den mittelfristigen Einsatz von Fahrzeugen und Personal.

Kurzfristige Änderungen oder Planungen erfolgen nicht in diesem Bereich, sondern werden an die Betriebsleitung (kurzfristige Verkehrsdisposition) weitergeleitet. Diese ist in der Nähe der Leitstelle angesiedelt, um schnell reagieren zu können. In kleineren Verkehrsunternehmen kann die kurzfristige Verkehrsdisposition organisatorisch in der Leitstelle gebündelt sein [9].

Abschließend sei noch erwähnt, dass in der Szenario-Analyse in Episode VIII der Evaluation ein Walkthrough durchgeführt wurde, welcher für S3 die durchgängige Kette BO-Einsatzplanung → Personal-/Fahrzeugdisposition → ITCS-Kopplung bestätigte; damit ist die Traceability der Szenario-bezogenen Anforderungen bis auf Prozessebene nachweislich gewährleistet (Kapitel 8.2.8, 8.3). Hierbei ist der Begründungsanker: Ergebnispassage zu S3 in Kapitel 8.3 und der Domänenbezug in diesem Kapitel.

9.1.4 Tarif- und Produktgestaltung

Dieses Kapitel erläutert die Tarif- und Produktgestaltung anhand der in Abbildung 28 dargestellten Geschäftsprozesse. Die zentralen Prozessschritte, um die geschilderten Anforderungen (siehe Kapitel 6) zu erfüllen, sind zwischen fachlichen- und technischen Diensten angesiedelt.

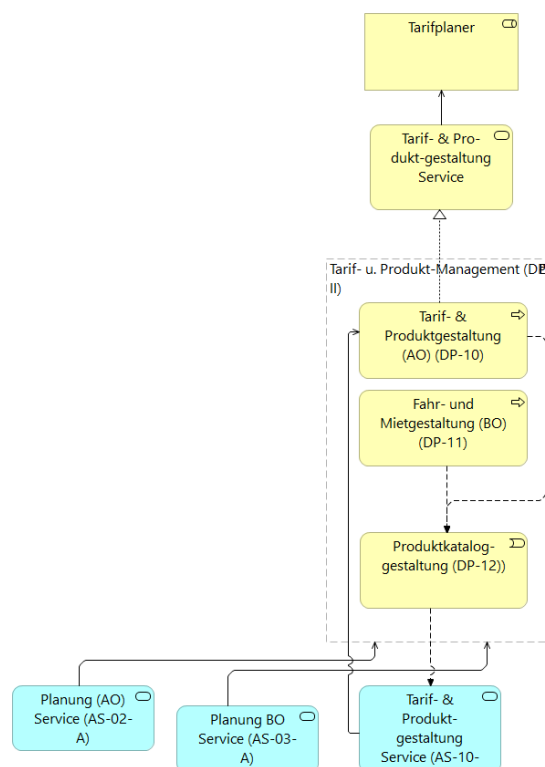


Abbildung 28: Tarif- und Produktgestaltung

Das Produktdesign stützt sich auf die Tarifplanung (einen technischen Service aus der Verkehrsplanung) und den technischen Service *Tarif- und Produktdesign*. Letzterer ermöglicht sowohl den angebotsorientierten Prozess *Tarif- und Produktgestaltung* als auch den bedarfsorientierten Prozess *Fahr- und Mietgestaltung*.

Die Ergebnisse beider Prozesse fließen in den Prozess *Produktkataloggestaltung* ein. Dieser sorgt für ein konsistentes wie einheitliches Produkt- und Serviceangebot und wird dabei erneut vom Service *Fare and Product Design* unterstützt.

Für das in der Szenario-Analyse untersuchte Szenario 2 (S2) belegt die Evaluation die Notwendigkeit gekapselter *Clearing/Revenue-Sharing-Services* sowie tariflicher Entkopplung zur Änderungsresilienz (z.B. 9 €/49 €-Regime); die Architekturvariante reduziert bilaterale Schnittstellen zugunsten standardisierter Broker-Zugriffe (Kapitel 8.3). Hierbei sind die Begründungsanker die Evaluationshinweise zur Abrechnung und der Änderungsdruck aus Gesprächsepisoden (49-€-Ticket).

9.1.5 Betriebslenkung

Dieses Kapitel behandelt die Architektur der Betriebslenkung bzw. des Betriebsmanagements (siehe dazu auch Abbildung 29).

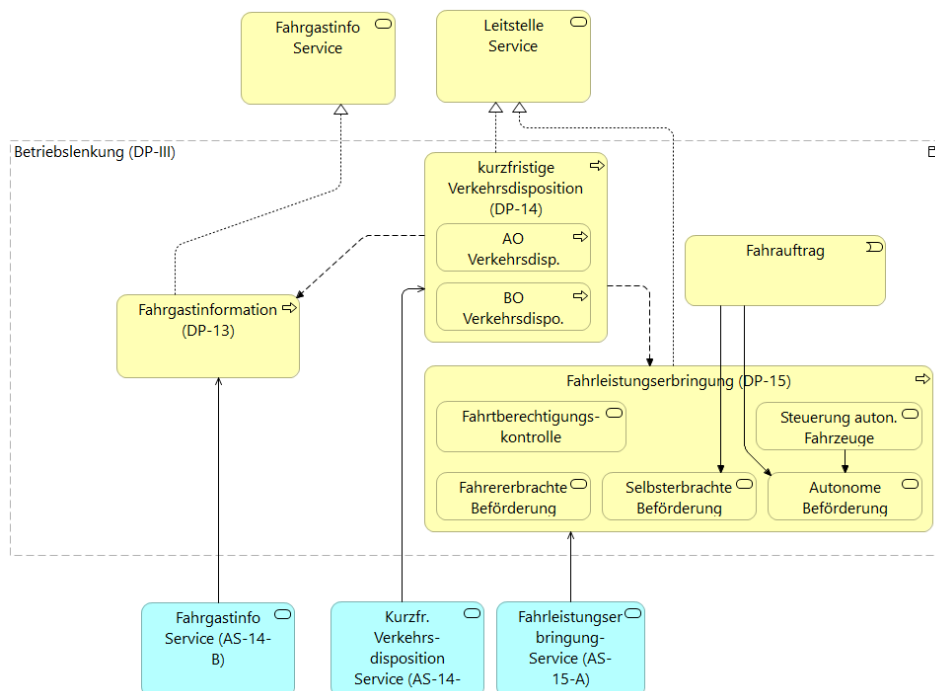


Abbildung 29: Betriebsmanagement

Das Betriebsmanagement koordiniert den Verkehr unmittelbar vor und während der Durchführung. Der Bereich Fahrleistungserbringung (Journey Execution) wird hier nur ansatzweise behandelt, da er stark von der Größe des ÖPNV-Unternehmens und den eingesetzten Beförderungstechnologien abhängt.

Die 2 Hauptprozesse sind Fahrgastinformation (Passenger Information) und kurzfristige Einsatzplanung (Short Term Service Planning). Die Fahrgastinformation verantwortet alle Fahrplaninformationen hinsichtlich ihrer Aktualität und Korrektheit. Diese Stelle gewährleistet, dass die Informationen, wie z.B. Ankunfts- und Abfahrtszeit sowie Anschlussinformationen, kurz vor und während der Fahrt vorliegen und korrekt sind. Dieser Prozess wird durch die kurzfristige Einsatzplanung angestoßen, die auch für kurzfristige Änderungen im Betriebsablauf verantwortlich ist, etwa für Ausfälle, Fahrplan- oder Linienänderungen.

Der Transportauftrag (Business Event) ist v.a. für bedarfsorientierte Verkehre oder Mischverkehre wichtig, da er die Fahrt durch eine Buchung legitimiert.

Bei der Fahrtdurchführung ist der Prozess der Fahrtberechtigungsprüfung in erster Linie für den angebotsorientierten Linienverkehr von Bedeutung, da er das Fahren ohne Fahrausweis überwacht. Eine zukünftige Herausforderung ist es, neben dem klassischen Bedarfsverkehr auch autonome Verkehre mit Assistenzsystemen zu organisieren. Das Modell sieht hierfür die Unterstützung durch Help-Desk-Manager über die Leitstelle vor.

Abschließend sei noch auf ein Ergebnis der Szenario-Analyse verwiesen, demzufolge Negativtests zum „ESB über alle Zonen“ verworfen wurden; konsensfähig ist die segmentierte Schnittstellen- und Datenbroker-Architektur mit klaren Trust-Boundaries und No-Go-Kopplungen (Kapitel 8.3 sowie Expertenfeedback). In diesem Kontext sind die Begründungsanker die KRITIS-/Zonierungsbefunde aus Kapitel 8.3 und die Experten-Argumentation zu Broker/Segmentierung.

9.1.6 Vertrieb

Dieses Kapitel beleuchtet den Vertrieb, die zentrale Schnittstelle zwischen Fahrgast und Verkehrsleistung. Abbildung 30 zeigt die wichtigsten Bereiche und Prozesse des Vertriebs.

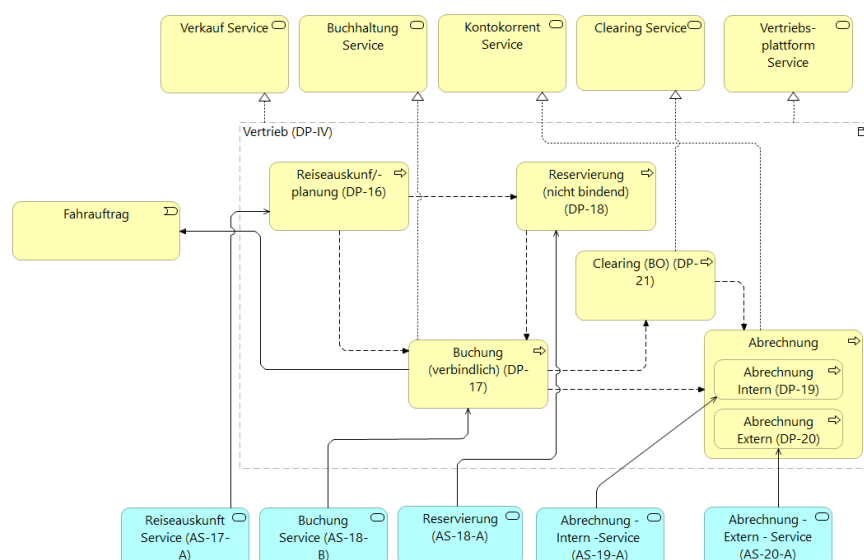


Abbildung 30: Bereiche und Prozesse des Vertriebs

Der Vertrieb stützt sich auf 4 zentrale Prozesse, die dem Kunden eine Plattform bieten, um Leistungen des ÖPNV zu nutzen. Diese Vertriebsplattform umfasst auch alle zukünftigen Schnittstellen zum ÖPNV-Unternehmen, über die Fahrgäste Beförderungsleistungen wie Tickets, Mietangebote etc. erwerben können.

Die Prozesse umfassen Reiseinformation und -planung, Fahrtbuchung und -abrechnung. Sie werden den Fahrgästen sowohl digital als auch analog über eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Der erste Prozess in dieser Kette, die Fahrgastinformation, wird mit aktuellen Informationen aus dem Bereich Betriebsführung versorgt.

Für bedarfsorientierte Verkehre wie z.B. Car- und Bike-Sharing oder Ruftaxis erhalten Fahrgäste über unverbindliche Buchungen Zugang zum Service; erst mit Fahrtantritt wird die Buchung verbindlich. Nach der verbindlichen Buchung erfolgt die Abrechnung. Anders verhält es sich mit angebotsorientierten Diensten, die sofort rechtsverbindlich sind.

Technische und fachliche Dienste gewährleisten die reibungslose Umsetzung dieser Prozesse. Ihre Integration sichert gleichzeitig die Konsistenz und Effizienz der Prozesse. Die damit geschaffene integrierte Architektur beinhaltet sowohl die technische Infrastruktur als auch die fachlichen Prozesse. Damit werden die in Kapitel 6 formulierten Anforderungen umgesetzt.

Die Szenario-Analyse (vgl. Kapitel 9.2) bestätigt in der Betrachtung von S1/S2 die OJP-konforme Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich). Diese Trennung, von VDV-Experten auf der Tagung in Rostock (Evaluationsepisode V.) gefordert, bildet eine als Governance-Leitplanke. Die REA verankert hierfür dedizierte Dienste inkl. SLA-Zugriffsregeln (Kapitel 8.3). Begründungsanker sind in diesem Fall die VDV-Hinweis zur expliziten Trennung von Reservierung und Buchen (vgl. Anhang Z: 5_Evaluation - VDV - Rostock - 19-10-2023 [Digitale Quelle]).

9.1.7 Strategie am Beispiel der Verkehrsplanung

In diesem Kapitel wird geprüft, inwieweit die Strategie von der Unternehmens- und Anwendungsebene unterstützt wird. Als Beispiel dient die Verkehrsplanung, wobei der Fokus auf bedarfsorientiertem Verkehr liegt – der Umweltschutz, der in der Motivationsstrategie berücksichtigt wurde, bleibt hier außen vor.

Die Grundlage der Analyse bildet das in Abbildung 24 dargestellte Modell, das die Fähigkeiten beleuchtet. Abbildung 31 zeigt, welche Elemente des Unternehmens die übergeordneten strategischen Fähigkeiten unterstützen oder umsetzen.

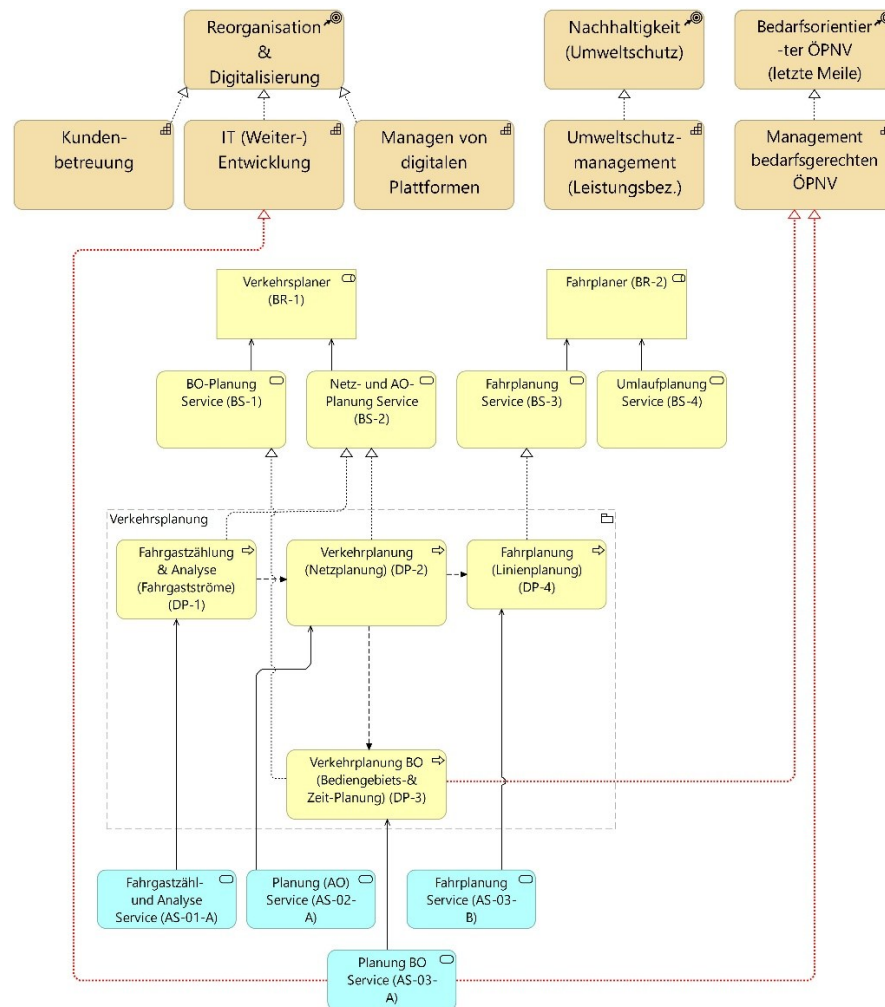


Abbildung 31: Verkehrsplanung im Kontext der strategischen Anforderungen

Das Diagramm in Abbildung 31 verdeutlicht, wie operative Komponenten die strategischen Fähigkeiten und die strategische Ausrichtung beeinflussen. Der Geschäftsservice (Business Service) Bedarfsplanung, der Geschäftsprozess (Business Process) bedarfsgerechte Verkehrsplanung und der Anwendungsdienst Verkehrsplanung unterstützen die Fähigkeiten zum Management des bedarfsorientierten Verkehrs. Zusätzlich trägt der Anwendungsdienst Verkehrsplanung zur Fähigkeit IT-Entwicklung bei.

Die Verkehrsplanung wirkt sich somit wesentlich auf die Hauptfähigkeit des Managements von bedarfsorientierten Verkehr aus.

9.2 Ergebnisse der Evaluationsepisoden VIII und IX (Phase 2)

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der zweiten Phase, bestehend aus Szenario-Analyse (Episode VIII.) und einer abschließenden Gesamtevaluation (Episode IX.). Aufbauend auf der in den Episoden I–VII entwickelten und verdichteten REA wird anhand der Szenarien S1–S4 geprüft, wie gut die Architektur unterschiedliche Rollenmodelle, Integrationsgrade, Betriebsformen und -größen klassischer ÖPNV-Unternehmen mit bedarfsorientierten Verkehren abdecken kann. Im Fokus stehen die Erfüllung der Szenario-abgeleitete Anforderungen, die Tragfähigkeit der Integrations-, Governance- und Sicher-

heitsprinzipien sowie die Variabilität und Instanzierbarkeit der REA. Die Unterkapitel fassen die Szenario-bezogenen Walkthroughs zusammen, leiten daraus Erweiterungen und Delta-Sichten der REA ab und verdichten diese zu einem Fazit der zweiten Evaluationsphase.

9.2.1 Rolle der Szenarien und deren Ziel

Die zweite Evaluationsphase beinhaltet mit der Szenario-Analyse (Episode VIII.) und der Gesamtevaluation (Episode IX.) eine summative, artifizielle Bewertung der REA. Grundlage sind der in Kapitel 5.5 definierte Szenarienraum (S1–S4), die in Kapitel 6.5 abgeleiteten Anforderungen und der in den Kapiteln 7.1 und 7.2 entwickelte Variantenkatalog.

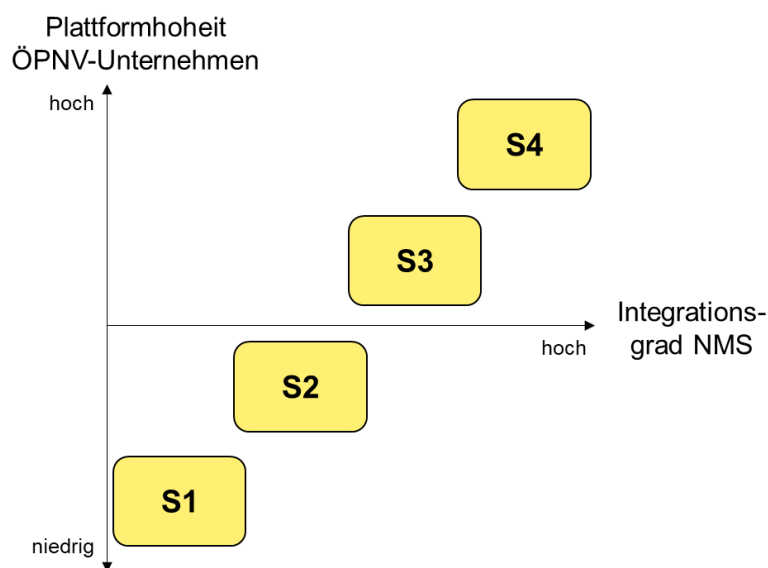


Abbildung 32: Szenarienraum S1–S4

Abbildung 33 zeigt die Szenarien S1–S4 in einem zweidimensionalen Raum: Die horizontale Achse beschreibt den Integrationsgrad von NMS bzw. externen Plattformen, die vertikale Achse das Rollen- und Verantwortungsmodell des ÖPNV-Unternehmens – vom reinen Leistungsanbieter hin zum Plattformbetreiber. S1 steht für eine eher konservative Integration mit begrenzter NMS-Kopplung, S2 für eine ausgeprägte externe Plattformpartnerschaft, S3 für ein hybrides Rollenmodell mit geteilter Plattform- und Leistungsverantwortung und S4 für das vollintegrierte Zielbild der REA.

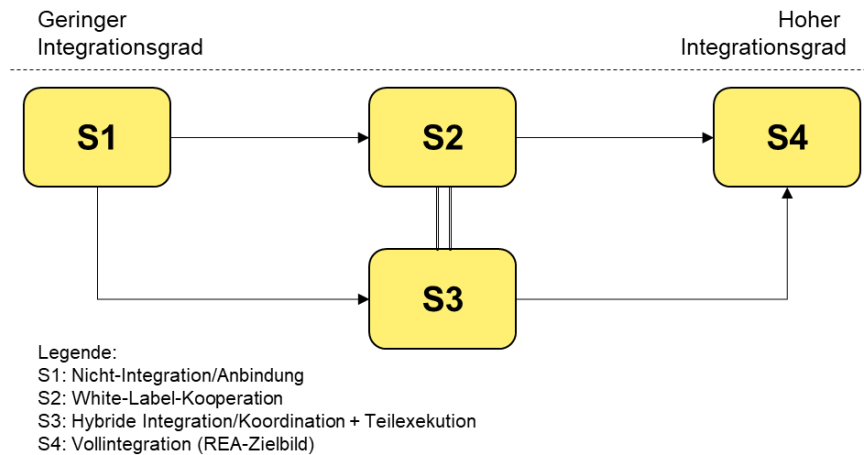


Abbildung 33: Transformationspfade zwischen den Szenarien S1–S4

Abbildung 34 verdeutlicht mögliche Entwicklungspfade zwischen den Szenarien. Ausgehend von einem konservativen Ausgangsszenario S1 können Unternehmen schrittweise höhere Integrationsgrade und veränderte Plattformrollen (S2, S3) bis hin zu S4 erreichen. Auch alternative Pfade (z.B. direkt von S1 nach S3) sind darstellbar.

Ziel der zweiten Evaluationsphase ist es zu prüfen, ob die REA

- (i) die Szenarioanforderungen vollständig und traceable erfüllt,
- (ii) die integrierten Integrations- und Governanceprinzipien (inkl. OJP-konformer Trennung von Reservierung und Buchung) einhält,
- (iii) die Sicherheits- und KRITIS-Leitplanken berücksichtigt,
- (iv) Variabilität und Instanzierbarkeit über unterschiedliche Unternehmensrollen, -größen und Integrationsgrade hinweg bietet sowie
- (v) in typischen Integrationsfällen Utility/Nutzen stiftet.

9.2.2 Szenario-abgeleitete Anforderungen und Traceability

Die in Kapitel 6.5 abgeleiteten Anforderungen strukturieren die Evaluation in fünf Klassen: (i) Governance- und Verantwortungsanforderungen (Owned/Shared/Partner je Domäne), (ii) Prozess- und Produktanforderungen (v.a. OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung), (iii) system- und integrationsbezogene Anforderungen (Plattform- und Broker-Capabilities, Schnittstellen-Governance), (iv) Sicherheits- und KRITIS-Leitplanken (Zonenmodell, „No-Go“-Kopplungen) sowie (v) qualitätsbezogene Anforderungen (z.B. Interoperabilität, Skalierbarkeit, Verständlichkeit). S4 dient als vollintegrierte Basissicht, während S1–S3 als Delta-Varianten mit spezifischen Verantwortlichkeitsmustern (Owned/Shared/Partner) interpretiert werden.

Die Traceability der Anforderungen erfolgt über eine ID-Führung: Anforderungen werden Capabilities, Domänen-Prozessen (DP-IDs), Applikationsbausteinen (AP-IDs) und Variationspunkten (VP) zugeordnet. So lässt sich die Anforderungsabdeckung je Szenario

entlang der Kette: Anforderung → Capability → Prozess → IT-Baustein (Applikation) systematisch prüfen.

Drei ArchiMate-Modelle veranschaulichen die strukturierte Szenario-abgeleitete Erhebung der Anforderungen:

1. Motivation-View: Szenario S3 – Anforderungen und Bewertung

Die Abbildung 35 zeigt eine ArchiMate-Motivation-View für das Szenario S3 mit Treibern, Zielen, Szenario-abgeleiteten Anforderungen sowie zugehörigen Constraints und Assessments. Die Abbildung verdeutlicht, wie zentrale Anforderungen (u.a. Trennung von Reservierung und Buchung, Einsatz eines Datenbrokers, Rollen- und Zonenanforderungen) aus den übergeordneten Treibern und Zielen abgeleitet und im Rahmen der Szenario-Analyse (Episode VIII) bewertet werden.

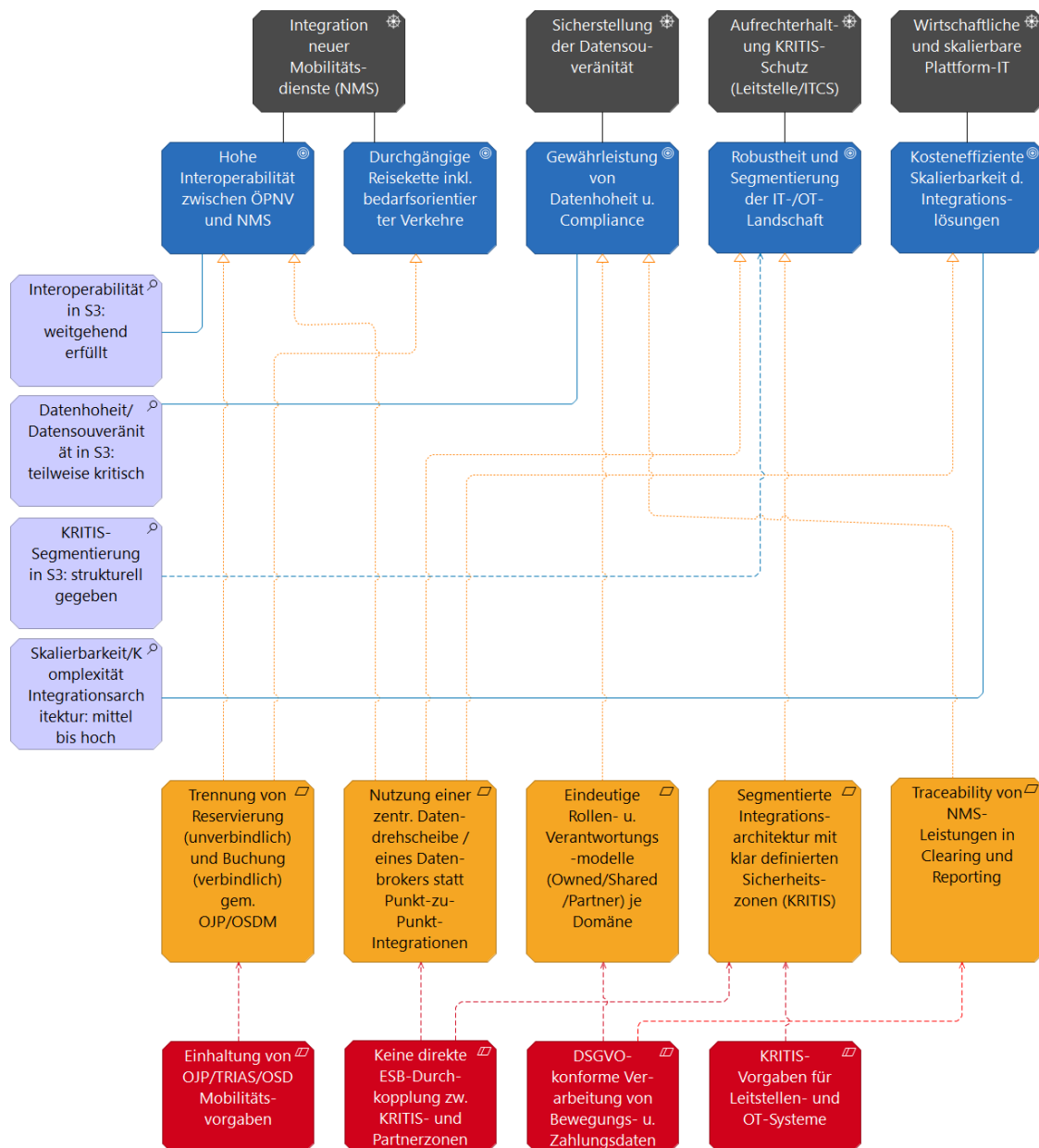


Abbildung 34: Anforderungen und Bewertung (Szenario S3)

Anmerkung: (1) Constraints schränken die Umsetzung von Goals und Requirements ein, indem sie als nicht verhandelbare Rahmenbedingungen oder regulatorische Vorgaben die Zielausprägung begrenzen. In ArchiMate wird dies durch die Beziehung „constraint constrains Goal to Requirements“ als „influence“ (ROT) abgebildet. (2) Da das Tool Archi ein Beziehung, wie z.B. Bewerten („assesses“) als primitives Element nicht implementiert, werden Bewertungsbeziehungen durch die ArchiMate-Relationship „association“ (BLAU) modelliert.

2. Traceability-View 1: Trennung von Reservierung und Buchung (Szenario S3)

Exemplarische Darstellung der Traceability-Kette:

Requirement → Capability → Prozess (DP) → Applikation (AP) → Datenobjekte (DO)

für die OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung.

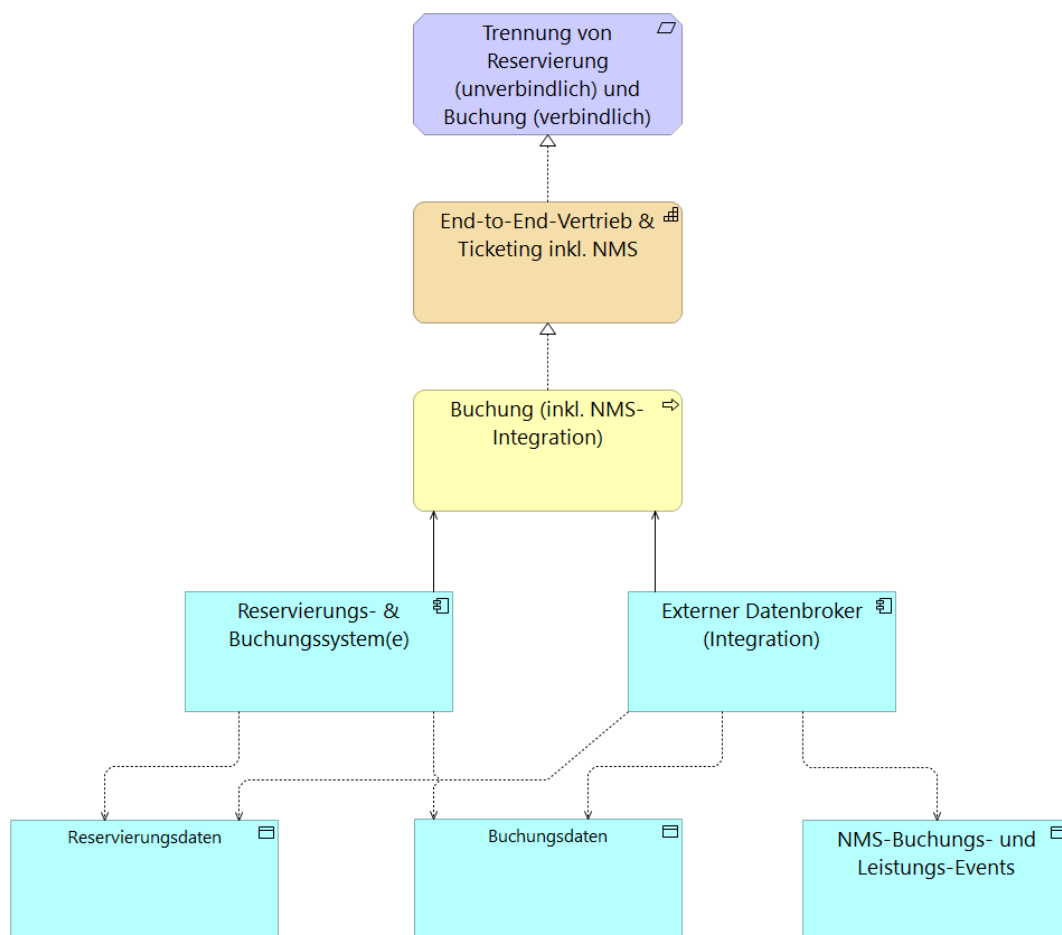


Abbildung 35: Trennung von Reservierung und Buchung (Szenario S3)

Die Abbildung 36 zeigt einen ArchiMate-Layered-View zur Traceability der Anforderung OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung (Anhang W: Req-S3-01) im Szenario S3. Dabei verbindet die Darstellung Requirements, Capabilities, Domänenprozesse (DP) sowie die unterstützenden Applikationsbausteine (AP) und relevanten Datenobjekte, sodass die Umsetzung der Anforderung entlang der Kette:

Requirement → Capability → Prozess → Applikation → Daten

nachvollziehbar wird.

3. Traceability-View 2: Integrations-/Broker-Anforderung (Datendrehscheibe)

Hierbei geht es um den Nachweis, wie die Szenario-bezogene Integrationsanforderung (Datendrehscheibe und Broker) über Capabilities, Domänenprozesse und Applikationsbausteine in der REA verankert sind und traceable abgebildet werden.

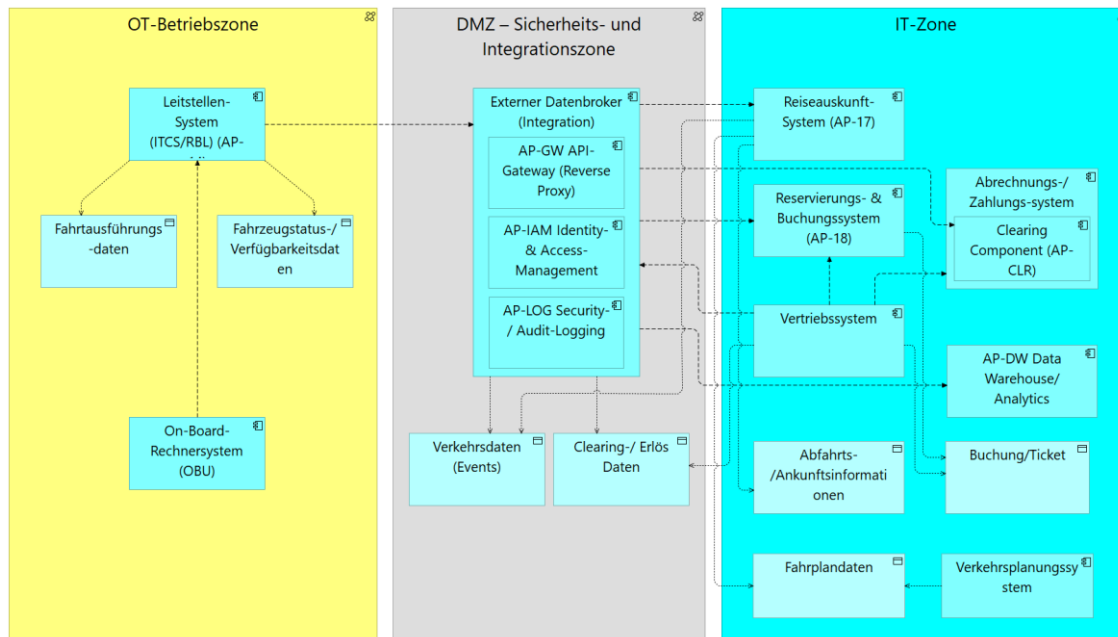


Abbildung 36: Integrations-/Broker-Anforderung (Datendrehscheibe)

Die Abbildung 37 zeigt, wie die Integrationsanforderung zur Nutzung eines zentralen Datenbrokers statt durch Punkt-zu-Punkt-Integration (Anhang W: Req-S3-02) im Szenario S3 verankert ist. Die Darstellung verdeutlicht, wie Integrations- und Governance-Capabilities, ausgewählte Domänenprozesse (z.B. Planung, kurzfristige Disposition, Abrechnung extern), der Datenbroker und die daran angebotenen Applikationen und Datenobjekte zusammenwirken. So wird die angestrebte integrierte REA nachvollziehbar abgebildet.

9.2.3 Ergebnisse der Szenario-Walkthroughs (Episode VIII)

Die in Tabelle 35 dokumentierten Szenario-Walkthroughs und Modell-Playthroughs (S1–S4 sowie KRITIS-Querschnitt) zeigen eine hohe Coverage und klare Traceability der Szenario-abgeleiteten Anforderungen auf konkrete REA-Elemente. Für alle getesteten End-to-End-Prozessketten (u.a. Reiseplanung und Vertrieb, BO-Einsatzplanung, ITCS-Kopplung, Payment und Clearing, Fahrgastinformation) wurde die Kette:

Anforderung → Capability → Prozess → Applikation

im Rahmen der laborbasierten Playthroughs (Tabelle 35) anhand der Mapping-Matrizen und KPI-Sets (u.a. IF-Compl., RACI-Cons.) belegt. Die Playthroughs belegen insbesondere geschlossene AO/BO-Ketten, etwa bei der BO-Einsatzplanung, bei Personal- und Fahrzeugdisposition sowie ITCS-Integration.

Die Szenarien bestätigen in Bezug auf Integration und Governance die OJP-konforme Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich) sowie die Kapselung von Clearing- und Revenue-Sharing-Funktionen. In S1 und S2 prüfen eine Partner-orientierte Anbindung externer Plattformen, während S3 und S4 hybride bzw. vollintegrierte Konfigurationen mit internen Booking-Kernen und Broker-Fähigkeiten adressieren. Die beispielhaft angenommenen Kennzahlen (u.a. IF-Completeness $\geq 95\%$, RACI-Consistency 100 %, Tr./Bu.-Compliance 100 %) sollten in allen getesteten Szenarien erreicht werden.

Die Sicherheits- und KRITIS-Leitplanken werden durch den Querschnittstest zur Zonen- und Integrationsarchitektur überprüft. Ein Negativtest, der einen durchgehenden ESB über alle Zonen vorsah, wird explizit verworfen. Erfolgreich war hingegen eine segmentierte Integrationsarchitektur mit API-Gateway, Event-Backbone und Datendrehscheibe, bei der keine Policy-Verletzungen (z.B. unzulässige OT/IT-Kopplung) im Szenario auftraten (Policy-Violations = 0).

Die Walkthroughs zeigen über alle Szenarien hinweg, dass die REA variantenfähig und instanzierbar ist. S4 fungiert als konsistentes Zielbild, während S1–S3 über den Variantenkatalog (VP) als Delta-Sichten konfiguriert werden können. Dabei bleiben RACI-Muster, AO/BO-Unterscheidung und Integrationsprinzipien erhalten.

Folgende 5 ArchiMate-Modelle werden beispielhaft für die Szenario-Walkthroughs S1–S4 dargestellt:

1. End-to-End-Sicht für ein repräsentatives Szenario (S3)

Diese Sicht zeigt die Prozesskette von Reiseplanung, Reservierung und Buchung über Fahrdurchführung und Fahrgastinformation bis zum Leistungs- und Erlös-Clearing. Sie umfasst alle beteiligten Akteure, Geschäftsprozesse (DP-1–DP-6) und unterstützende Applikationen (u.a. AP-17, AP-18, AP-16, AP-19, AP-3, AP-20, AP-21).

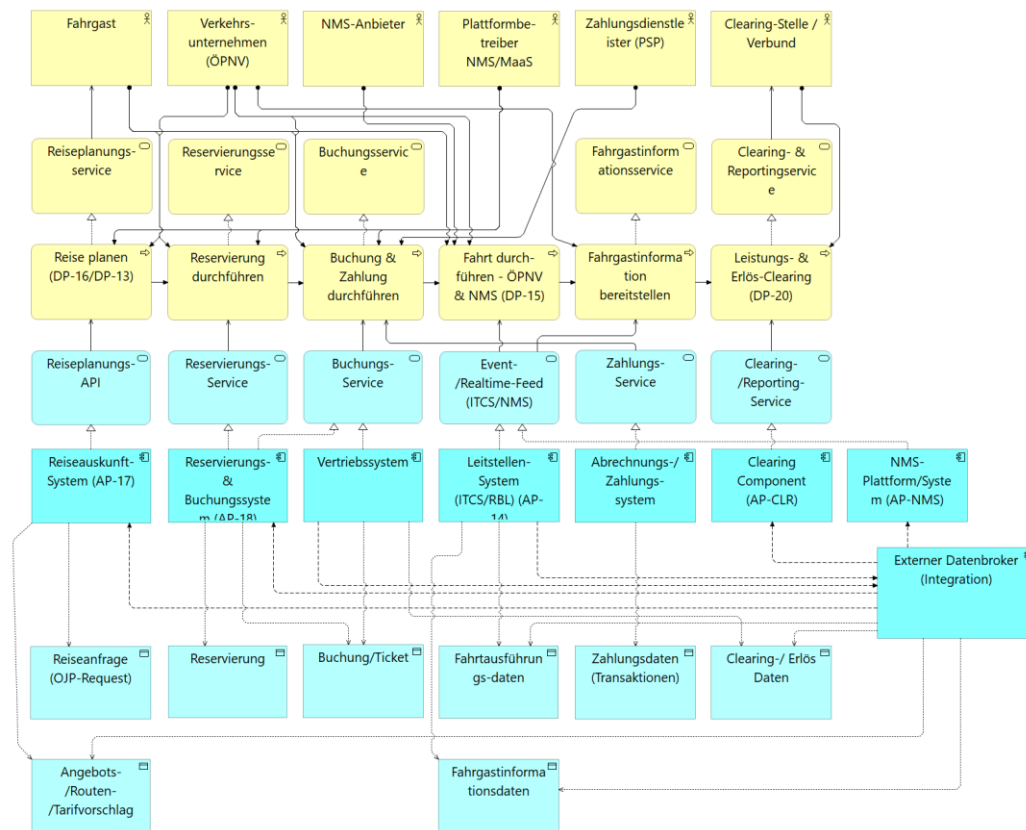


Abbildung 37: End-to-End-Sicht für repräsentatives Szenario (S3)

Die Abbildung 38 visualisiert die End-to-End-Architektur und kombiniert Geschäftsprozesse und Anwendungskomponenten. Sie zeigt, wie Reiseauskunfts-, Buchungs-, Vertriebs-, ITCS-, NMS- und Clearing-Systeme in der REA zu einer durchgängigen Prozess- und Systemkette integriert werden.

2. Umsetzung der OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung

Diese Integrationssicht verdeutlicht detailliert die OJP- bzw. OSDM-konforme Trennung von Anfrage, Reservierung und Buchung, die Zahlungsabwicklung und Clearing von Reservierung und Buchung sowie die zentrale Rolle des Datenbrokers (AP-20) zwischen Mobilitätsplattform, ÖPNV-Systemen, NMS-Backends, Zahlungssystem und Clearing.

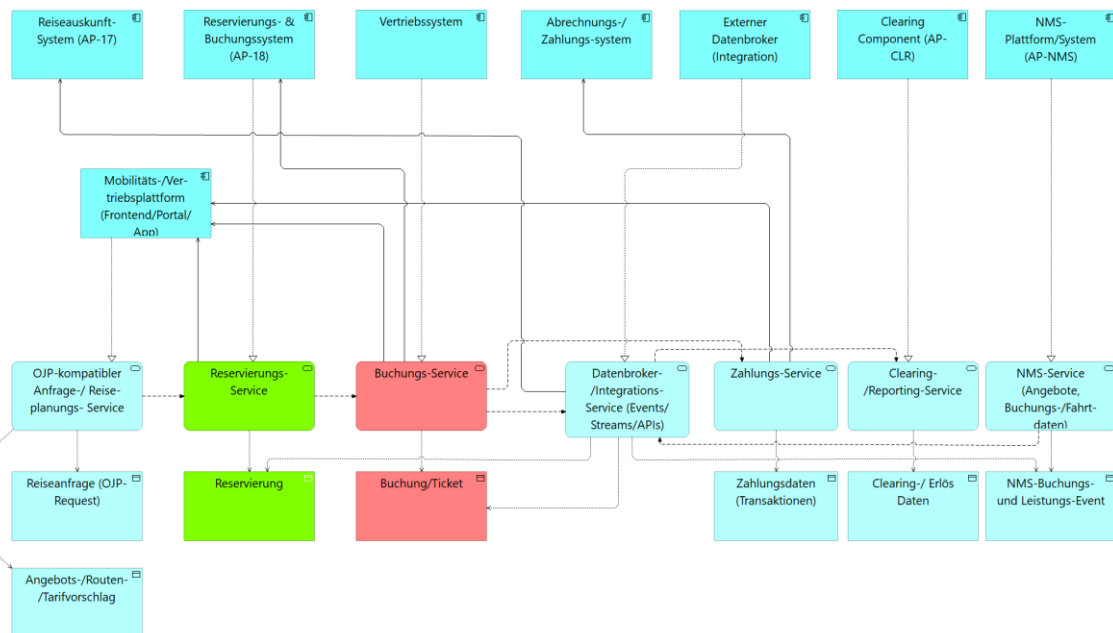


Abbildung 38: OJP-konforme Trennung von Reservierung und Buchung

Die Abbildung 39 zeigt nicht nur die OJP-/OSDM-konformen Trennung von Reservierung und Buchung sondern auch die Kapselung von Zahlungs- und Clearing-Funktionen über einen zentralen Datenbroker dar. Diese verdeutlicht das Zusammenspiel von Mobilitätsplattform, Reiseauskunft, Buchungs- und Vertriebssystemen, Zahlungssystem, Clearing-Komponente und NMS-Backends einschließlich der relevanten Services und Datenflüsse. Die Trennung zwischen Reservierung und Buchung wird durch eine farbliche Kodierung der entsprechenden Elemente verdeutlicht: Reservierungen werden dabei grün, Buchungen rot dargestellt.

3. Governance- und Rollensicht

Die Abbildung 40 stellt die Governance- und Rollensicht beispielhaft für Reservierungs, Buchungs-, Clearing- sowie Daten- und Schnittstellen-Governance in den Szenarien S1–S4 dar. Dieser ArchiMate-View ordnet Rollen wie Verkehrsunternehmen, Plattformbetreiber, NMS-Anbieter, Clearing-Stelle, Datenbroker-Betreiber und Zahlungsdienstleister den Governance-Services und Vertragsbeziehungen (Owned/Shared/Partner) zu. Sie verdeutlicht damit die Verteilung von Verantwortlichkeiten in der REA explizit

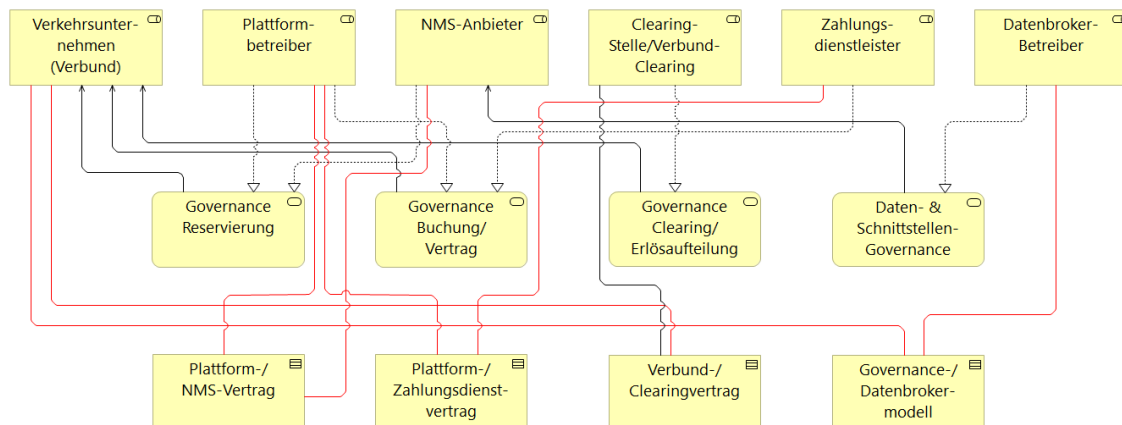


Abbildung 39: Governance- und Rollensicht

4. KRITIS-konforme Zonen- und Integrationsarchitektur der REA

Diese Architektur (Abbildung 41) zeigt die Zonen (OT-Betriebszone, DMZ, IT-Zone, Office-Zone) mit API-Gateway, IAM, Event-Backbone/Datenbroker und Security-Logging. Sie belegt, dass die in den Walkthroughs geprüften Integrationspfade KRITIS-konform sind und kein durchgehender ESB über alle Zonen geführt wird.

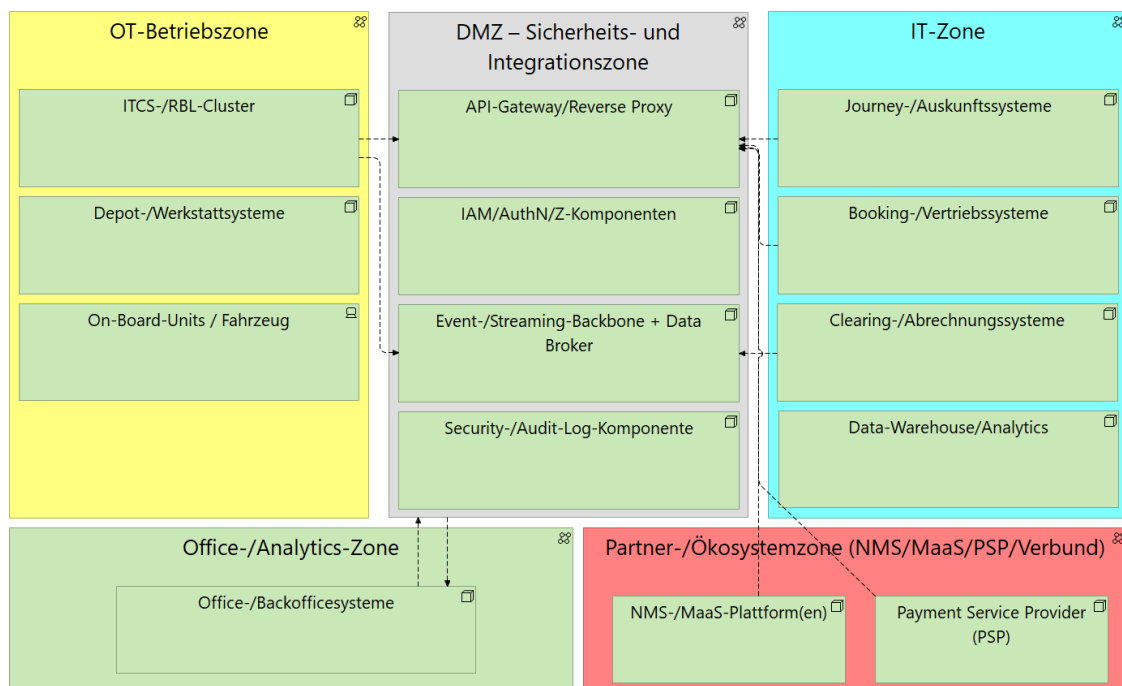


Abbildung 40: KRITIS-konforme Zonen- und Integrationsarchitektur

Die angegebenen Sicherheitszonen beinhalten Nodes, die sich aus Teilnetzen (def. in ArchMate als Composition) zusammensetzen. Das hier dargestellte Architekturkonzept zeichnet sich durch eine stringente Kommunikationspolicy zwischen den einzelnen Zonen aus und berücksichtigt, dass die Kommunikation zwischen den einzelnen Zonen stets über die DMZ-Sicherheitszone erfolgen muss. Ausnahmen sind nicht gestattet.

5. Cross-Layer-Mapping zentraler Anwendungskomponenten der REA

Das Cross-Layer-Mapping (Abbildung 42) ordnet zentrale Applikationen (z.B. ITCS, Reiseauskunft, Buchung und Vertrieb, Datenbroker, NMS-Plattform, PSP) den Sicherheitszonen zu und zeigt, wo welche Systeme im Szenario laufen und wie sie über die DMZ-Komponenten gekoppelt sind.

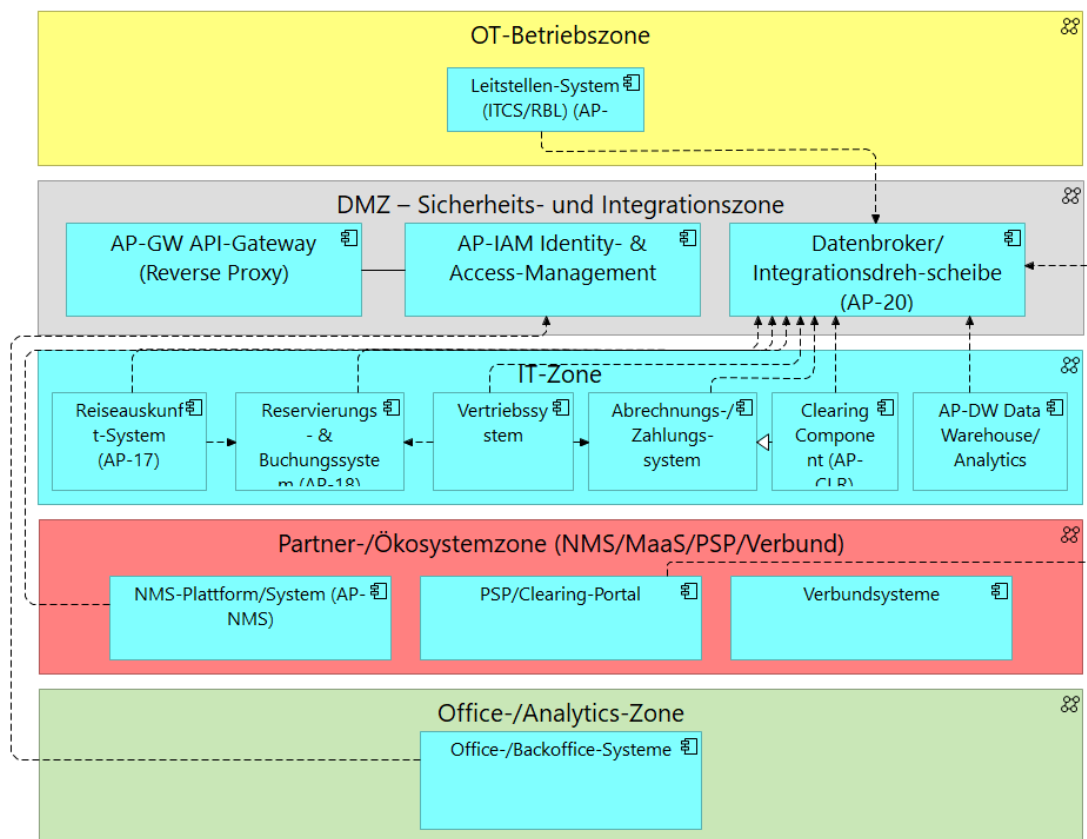


Abbildung 41: Cross-Layer-Mapping zentraler Anwendungskomponenten

Aus der Darstellung (Abbildung 42) lassen sich folgende Punkte ableiten: i. wo KRITIS-nahe Systeme liegen, ii. wo Integrationskomponenten sitzen und iii. alle Zonen-Kopplungen kontrolliert (DMZ) und auditierbar sind.

9.2.4 Erweiterungen und Delta-Sichten der REA

Die in den Walkthroughs identifizierten Szenario-spezifischen Anpassungen wurden in den Variantenkatalog (Kapitel 7.2) und die Delta-Sichten (Kapitel 7.3) überführt. S4 dient als REA-Basissicht, während S1–S3 als Overlays mit expliziten Deltas in Verantwortlichkeiten, Prozessen und Systemen modelliert sind. Die Variationspunkte bündeln diese Deltas domänenbezogen (Planung und Ressourceneinsatz, Tarif- und Produktmanagement, Betriebslenkung, Vertrieb) sowie bereichsübergreifend (Integration, Security, Organisation). Sie sind über DP-IDs mit den Domänen- und Prozesssteckbriefen verknüpft.

Die Tabelle 38 fasst die aus der Szenario-Analyse abgeleiteten zentralen Delta-Implikationen der Szenarien S1–S4 (vgl. Anhang I) im Vergleich zum REA-Zielbild S4 beispiel-

haft zusammen. Die Tabelle differenziert die Veränderungen nach Domänen sowie nach KRITIS-/Zonen-Aspekten und Daten- bzw. Governance-Deltas und verknüpft diese mit den jeweils betroffenen Architekturelementen (Domänenprozessen, Applikationsbausteinen und Variationspunkten).

Im Szenario S1 verbleibt die Architektur weitgehend im klassischen ÖPNV-Paradigma: NMS werden allenfalls randständig berücksichtigt, die Planung und Betriebslenkung fokussieren auf den Linienverkehr, Vertrieb und Clearing folgen etablierten Verbundlogiken, und eine zonen- bzw. brokerbasierte Integrationsarchitektur ist nur in Ansätzen ausgeprägt.

Im Szenario S2 rückt eine externe MaaS-/NMS-Plattform in die zentrale Rolle an der Kundenschnittstelle, während das Verkehrsunternehmen primär als Leistungs- und Datenlieferant agiert. Architekturseitig führt dies zur Erweiterung von Vertrieb und Abrechnung um Clearing- und Revenue-Sharing-Services, zur konsequenten Anbindung dieser Plattform über den Datenbroker in der DMZ sowie zu angepassten Produkt- und Kataloghoheiten, die die Integration von Verbund- und Plattformangeboten erlauben, ohne die tariflichen und regulatorischen Zwänge des ÖPNV zu verletzen. Zugleich verschiebt sich die Daten- und Plattformgovernance: Ein Teil der Datenhoheit liegt beim Plattformpartner, sodass klare Vereinbarungen zu Datenzugang, -nutzung und -schutz sowie streng segmentierte Zonenübergänge zwischen OT, DMZ, IT und Partner erforderlich werden.

Das Szenario S3 realisiert ein hybrides Rollenmodell, in dem das Verkehrsunternehmen wesentliche Plattform- und Brokerfunktionen selbst übernimmt, zugleich aber mit NMS- und Plattformpartnern kooperiert. Die REA bildet hierfür hybride AO/BO-Prozessketten in Planung, Disposition und Vertrieb aus, führt Broker- und Plattform-Capabilities ein und bindet ITCS-Events sowie NMS-Leistungsdaten über den Datenbroker in eine strikt zonen- und segmentbasierte Integrationsarchitektur ein, die direkte OT ↔ Partner-Verbindungen und einen durchgängigen ESB über alle Zonen explizit ausschließt. Dadurch entsteht eine geteilte, aber klar geregelte Verantwortung für Datenflüsse, SLA und Governance zwischen Verkehrsunternehmen und externen Akteuren.

Im Szenario S4 liegt ein vollintegriertes Referenz-Zielbild vor, in dem alle vier Domänen (Planung, Tarif/Produkt, Betriebslenkung, Vertrieb) AO/BO-übergreifend modelliert sind, NMS/DRT vollständig in die Leistungs- und Datenketten eingebunden sind und eine durchgängige, KRITIS-konforme Zonen- und Brokerarchitektur die technische, organisatorische und datenbezogene Steuerungsfähigkeit des Verkehrsunternehmens als Plattformbetreiber absichert.

Die Delta-Sichten dokumentieren Struktur- und Verantwortlichkeitsänderungen durch VP-Steckbriefe (Anhang F). Diese beschreiben für jede VP-Konfiguration Architekturimpacts, Schnittstellen/Standards, Datenobjekte/Ereignisse, Security-Leitplanken, KPIs und Nachweise. Sie bilden die operative Brücke zwischen Szenario-Ergebnissen und instanziierten REA-Varianten.

Tabelle 38: Zentrale Delta-Implicationen je Szenario (S1–S4)

Szenario	DP-Domäne	AO/BO & Verantwortung	KRITIS/Zonen (kurz)	Daten/Governance
S1 Nicht-Integration/ Anbindung	DP-I Planung & Ressourceneinsatz	AO-Planung (DP-2/DP-4–DP-6) Owned; BO-Planung (DP-3) Partner; Dispo BO (DP-7–DP-9) überwiegend Partner.	Domänen-/zonenbasierte Integration und Echtzeit-Kopplung zu Depot/ITCS (PR03) noch rudimentär; Event-Backbone/DBroker nicht zwingend.	Planungs-DO (z.B. Fahrgast-, Fahrplan-, Dispodaten) primär intern; BO-Planungsdaten stark von Partnern abhängig; integrative Daten-/Event-Governance erst ansatzweise.
S1 Nicht-Integration/ Anbindung	DP-II Tarif & Produktmanagement	AO-Tarif/Produkt (DP-10) durchgängig Owned; BO-Preis (DP-11) und Katalog (DP-12) in frühen Stufen Partner/Shared.	Zonen-/DMZ-Kopplung nur für Grundintegration der Tarif-/Produktdaten notwendig; Integrationsanker (API-GW/DBroker) eher perspektivisch.	AOTarife bleiben intern; BO-Preise und Katalogteile durch Partner mitgestaltet; Kataloghoheit für BO noch nicht etabliert.
S1 Nicht-Integration/ Anbindung	DP-III Betriebslenkung	AO-Anteil Owned (S1–S4); BO-Anteil weiterhin Partner (S1); Leitstelle fokussiert auf AO.	Zonisierte OT/IT-Segregation (IEC 62443/ISO 27001) angelegt; Realtime-Kopplung ITCS ↔ OBU und Event-Backbone noch primär AO-bezogen.	Betriebsdaten (TripStatus, Ist-Leistung etc.) intern; wenig BO-/NMS-Einbindung; Partner/SLA-Management für BO erst begrenzt ausgeprägt.
S1 Nicht-Integration/ Anbindung	DP-IV Vertrieb	BO-Reservierung/Buchung überwiegend Partner; AO-Buchung Owned; Abrechnung AO intern Owned, BO intern Partner; externes Clearing Shared.	Zonen-/DMZ-Leitplanken vorhanden, aber OJP/TRIAS/OSDM-Ketten und Broker-Anbindung noch begrenzt; Clearing-Flows teils klassisch.	Multimodale Auskunft/Buchung nur eingeschränkt; TR./Bu.-Prinzip formal vorhanden, in BO aber v.a. partnerseitig; Billing/Clearing-Governance überwiegend durch Verbund/Partner.

Szenario	DP-Domäne	AO/BO & Verantwortung	KRITIS/Zonen (kurz)	Daten/Governance
S2 White-Label-Kooperation	DP-I Planung & Ressourceneinsatz	AO-Planung weiterhin Owned; BO-Planung (DP-3) Partner → Shared; Dispo BO (DP-7-DP-9) Shared; On-Demand-Planungsdienste nehmen zu.	DMZ/API-GW/DBroker werden wichtig zur Einspeisung externer Planungsdaten (NMS-Slots, DO118–124) in interne Systeme; OT bleibt entkoppelt.	Planungs-DO werden stärker aus Plattform-/NMS-Quellen gespeist; Governance zu Datenqualität, Aktualität und Nutzung (Partner → Shared) gewinnt an Bedeutung.
S2 White-Label-Kooperation	DP-II Tarif & Produktmanagement	AO-Tarif/Produkt (DP-10) weiterhin Owned; BO-Preis (DP-11) Partner → Shared; Kataloggestaltung (DP-12) Shared (AO/BO).	Einheitliche Kataloghöhe noch nicht voll durchgesetzt; Plattform-/Partnerplaner werden über Integrations-schicht angebunden.	Preislogiken und Katalog für BO werden kooperativ gepflegt; Governance für Revenue-Share und Katalogkonsistenz mit externer Plattform erforderlich.
S2 White-Label-Kooperation	DP-III Betriebslenkung	AO weiter Owned; BO-Anteil (z.B. NMS-Operation) Partner → Shared; Leitstelle erhält erste Koordinationsrolle für BO.	Ereignisgetriebene Kopplung (Event-Backbone) nimmt zu; zonierte OT/IT-Segregation bleibt maßgeblich, NMS-Events laufen über DMZ/DBroker.	Betriebs-Events und SLAs (TripStat, SLANachweise) werden mit Partnern geteilt; SLA-/Event-Governance (z.B. für DP-14/15) gewinnt an Gewicht.
S2 White-Label-Kooperation	DP-IV Vertrieb	BO-Reservierung/Buchung weiter Partner-dominiert; AO-Buchung Owned; Abrechnung intern AO Owned, BO Shared; externes Clearing Shared.	Anbindung externer Journey-/Booking-Plattformen über DMZ/API-GW/DBroker; direkte OT ↔ Partner-Wege werden vermieden.	Offers/Reservations/Bookings (DP-16–DP-18) und Billing/Settlement (DP-19/20) entstehen teils auf externer Plattform; Daten- und SLAGovernance zwischen Vertrieb/Verbund/Plattformpartner zentral.

Szenario	DP-Domäne	AO/BO & Verantwortung	KRITIS/Zonen (kurz)	Daten/Governance
S3 Hybride Integration/ Koordination	DP-I Planung & Ressourceneinsatz	AO-Planung Owned; BO-Planung (DP-3) Shared → Owned; Dispo Fahrzeug/Personal (DP-8/9) AO/BO zunehmend Owned; BO-Dienstplanung (DP-6) intern in WFM/Roster-Flows.	Domänen-/zonenbasierte Integration und Echtzeit-Kopplung zu Depot/ITCS fest etabliert; DataBroker/Event-Backbone als Integrationsanker umgesetzt.	Planungs-, Dispo- und Live-Daten (DP-1–DP-9) werden DP-basiert in einem einheitlichen Daten-/Event-Modell geführt; Data-Governance für BO-Planung/Dispo intern verantwortet.
S3 Hybride Integration/ Koordination	DP-II Tarif & Produktmanagement	AO-Tarif/Produkt weiterhin Owned; BO-Preisgestaltung (DP-11) ab S3 Owned; Produktkatalog (DP-12) ab S3 mit Kataloghoheit Owned.	API-Gateway/IAM, Data/Event-Broker als Integrationsanker für Tarif-/Produktdaten aktiv; Zonenarchitektur schützt Tarif-/Produktkernsysteme.	Einheitliche Katalog- und Preislogik (AO+BO) wird intern gesteuert; Governance für BO-Pricing (Revenue-Share, Preisfreigabe, Audit) liegt weitgehend beim Verkehrsunternehmen/Verbund.
S3 Hybride Integration/ Koordination	DP-III Betriebslenkung	AO weiterhin Owned; BO-Anteil (DP-14/15) Shared → Owned; Leitstelle steuert und überwacht auch NMS/DRT-Leistungen.	IEC 62443/ISO 27001-konforme OT/IT-Segregation; RealtimeKopplung ITCS ↔ OBU und EventBackbone im Sinne einer zonierten Architektur etabliert.	Betriebs-Events, Ist-Leistungsdaten und SLANachweise werden DP-basiert in einem gemeinsamen Daten-/Event-Katalog geführt; Governance f. KPIs und SLA-Überwachung (Pünktlichkeit, Ausfallquote) liegt intern.
S3 Hybride Integration/ Koordination	DP-IV Vertrieb	BO-Reservierung/Buchung (DP-18/17) ab S3 Owned; AO-Buchung weiter Owned; Abrechnung intern BO Shared → Owned, externes Clearing Shared; TR./Bu.-Prinzip voll wirksam.	Zonentrennung (OT/DMZ/IT/Partner), starke AuthN/Z und Audit-Trails für die Kette DP-16–DP-20; DBroker, JourneyHub, BookingCore und PSP-Anbindung als Architekturanker.	Offers/PriceQuotes, Reservations, Bookings/Tickets und Billing-/ClearingStati werden DP-basiert geführt; Daten- und SLAGovernance für Erlös-/Clearingprozesse (AO/BO) zwischen Vertrieb, Verbund und Partnern geteilt, aber intern gesteuert.

Szenario	DP-Domäne	AO/BO & Verantwortung	KRITIS/Zonen (kurz)	Daten/Governance
S4 Voll-integration	DP-I Planung & Resourceneinsatz	AO/BO-Planung und Dispo DP-1–DP-9 vollständig Owned; HY-Planung (AO+BO) intern beherrscht.	Voll ausgeprägte domänen-/zonenbasierte Integration; Event-Backbone und DBroker als Standard; OT-Segregation bleibt gewahrt.	Einheitlicher DP-basierter Planungs-/Dispo-Datenkatalog; klare interne Data-Owner/Stewards; konsistente KPIs und Reporting.
S4 Voll-integration	DP-II Tarif & Produktmanagement	AO-Tarif/Produkt (DP-10) und BO-Preis/Katalog (DP-11/12) vollständig Owned; Kataloghöhe AO+BO intern.	Tarif-/Produkt-Kernel in geschützter IT-Zone; Integrationsanker (API-GW/DBroker) standardisiert; Zonenarchitektur für externe Publikation (NAP, Partner).	Vollständige interne Verantwortung für Tarife, Preise und Produktkatalog; Data-Governance über Versionierung, Audit, NAP-Bereitstellung und wirtschaftliche Sensitivität geregelt.
S4 Voll-integration	DP-III Betriebslenkung	AO und BO (DP-13–DP-15) vollständig Owned; Leitstelle steuert gesamt den HY-Betrieb.	OT/IT-Zonen, DMZ und EventBackbone vollständig umgesetzt; ITCS/RBL und OBU in sicherer OT-Zone mit eventbasierter Koppelung.	Betriebsdaten und SLAs (TripStatus, Istleistung, Geräteverfügbarkeit) werden intern verantwortet; Governance umfasst auch externe Berichtspflichten (z.B. Aufgabenträger, Sicherheitsbehörden).
S4 Voll-integration	DP-IV Vertrieb	Sämtliche DP-16–DP-20 (Reiseauskunft, Buchung, Reservierung, interne/externe Abrechnung) AO/BO-seitig Owned; externes Clearing AO/BO Shared → Owned erreicht.	End-to-End-Plattformarchitektur über alle Zonen; DMZ-Kopplung via API-Gateway, Event-Backbone und DataBroker; keine durchgehenden ESB-Verbindungen über alle Zonen.	Vollständige Plattform- und Datenhoheit über Auskunft, Buchung, Reservierung und Clearing; TR./Bu.-Prinzip (OJP/TRIAS/OSDM) als Leitplanke; umfassende Data- und Plattform-Governance (Verträge, SLA, KPIs) umgesetzt.

1. Implementation und Migration Sicht der REA mit den Szenarien S1–S4

Diese Sicht (Abbildung 43) zeigt die Architektur der REA als Plateaus: PL-S4 (REA-Zielbild), PL-S3 (hybrides Rollenmodell), PL-S2 (White-Label-Kooperation), PL-S1 (Nicht-Integration/Anbindung) und ggf. PL-IST (Ausgangslage). Die Sicht folgt dem Transformationspfad über die Szenarien S1 bis S4 aus Abbildung 33.



Abbildung 42: Implementation und Migration Sicht

Die Work Packages WP-S4-BASIS, WP-S3-DELTA, WP-S2-DELTA und WP-S1-DELTA realisieren bzw. verändern diese Plateaus. Sie sind exemplarisch mit Capabilities und

beispielhaft mit Applikationen (siehe Tabelle 39) verknüpft. Das verfolgt den Zweck, die aus der Szenario-Analyse abgeleiteten Delta-Sichten und Transformationspfade der REA sichtbar zu machen.

Im Rahmen der Implementation-und-Migration-Sicht fasst Tabelle 39 (und strikt nach Anwendungen sortiert: Anhang D) die für die Szenarien S1, S2 und S3 relevanten strategischen Capabilities (CAP-VER-01, CAP-INT-01, CAP-INT-02, CAP-DATA-01) die davon betroffenen operativen Applikationsbausteine (AP) (vgl. Anhang D) zusammengeführt und der jeweilige Delta-Zustand gegenüber dem Vollintegrationszielbild S4 in Form einer begründeten, textlich verfassten Abweichung dargestellt.

Tabelle 39: Implementation-und-Migration-Sicht nach Szenarien

Szn.	Capabilities Cross-cutting (Delta ggü. S4)	DP-I Planung & Ressourcen (repr.: AP-3)	DP-II Tarif- & Produktmang. (repr.: AP-10)	DP-III Betriebs- lenkung (repr.: AP-14)	DP-IV Vertrieb (AP-16/17/18) & (AP-19/20)
S4	CAP-VER-01, CAP-INT-01/02, CAP-DATA-01 voll ausgeprägt (Referenz-Zielbild).	AP-3 als Master für AO/BO Planungsartefakte.	AP-10 als Master für AO/BO-Tarif, Preislogik, Kataloghoheit.	AP-14 als vollintegrierte AO/BO-Leitstelle inkl. Orchestrierung/Events.	AP-16/17/18/19/20 als End-to-End-Kette (Journey → Booking → Payment → Clear.) in Owned-Ausprägung.
S3	CAP-VER-01 in AO ≈ S4, BO/NMS Shared; CAP-INT-01 technisch etabliert, aber BO/Partnerflüsse koordiniert-geteilt; CAP-INT-02 intern stark, extern Shared-Regelungen; CAP-DATA-01 AO ≈ S4, BO/NMS geteilte Hoheit.	AP-3 AO Owned, BO-Fahrpläne/Zeitfenster teilweise Shared, Synchronisierung stärker über AP-20.	AP-10 AO Owned, BO-Preisparameter/Kataloganteile kooperativ (z.B. Revenue-Share-Logiken).	AP-14 AO/BO-Koordination vorhanden, Teile der BO-Steuerung/SLA Shared.	AP-16/17/18 AO ≈ S4; BO-Angebot/Buchung Shared über Partner-APIs/Kooperationslogik. AP-19: Payment ≈ S4; BO-Clearing und Revenue-Share Shared. AP-20: zentraler Broker, Governance in BO-/Partner-Flows Shared.
S2	CAP-VER-01 Kundenschnittstelle/BO-Kette plattformdominiert; intern v.a. Zuliefer- und Kontrollfunktion. CAP-INT-01 Integrationsplattform als Import/Export-Brücke statt interner Backbone.	AP-3 AO Owned, BO-Planungsanteile von NMS, AP-3 eher Spiegelung/Konsum.	AP-10 AO Owned, BO-Tarife/Produkte teils im Partnerkatalog, AP-10 nicht alleiniger Master.	AP-14 Fokus auf AO; BO-Steuerung/SLA weitgehend extern, intern nur selektiv/aggregiert.	AP-16/17/18 interne Systeme liefern an die Plattform; diese stellt das primäre Frontend und übernimmt Teile der BO-Logik. AP-19 Payment/Clearing (insb. BO) teilweise extern, intern primär

Szn.	Capabilities Cross-cutting (Delta ggü. S4)	DP-I Planung & Ressourcen (repr.: AP-3)	DP-II Tarif- & Produktmang. (repr.: AP-10)	DP-III Betriebs- lenkung (repr.: AP-14)	DP-IV Vertrieb (AP-16/17/18) & (AP-19/20)
	CAP-INT-02 API-/Event-Schemata partnerseitig vorgegeben; Governance primär konsumierend. CAP-DATA-01 Daten primär b. Partner; intern v.a. Zugriffs & Nutzungsregeln & Compliance.				Reconciliation/Prüfung/Verbuchung. AP-20 Plattform-Übersetzungshub statt durchgängigem internem Backbone.
S1	CAP-VER-01 bleibt auf ÖPNV/Verbund beschränkt (NMS marginal). CAP-INT-01 nur Basisintegration (P2P, Broker/Event optional). CAP-INT-02 selektiv ohne domänenweite Governance. CAP-DATA-01 fokussiert klassische Daten; NMS exkludiert.	AP-3 im Wesentlichen AO-Fahrpläne, BO/NMS nicht (oder nur rudimentär) abgebildet.	AP-10: Fokus auf klassisches Tarif-/Produktportfolio; BO/NMS-Produkte meist separat (Partner).	AP-14: Linienbetrieb; BO/DRT operativ extern, höchstens randständig sichtbar.	AP-16/17/18/19: v.a. klassische ÖPNV-Kette; NMS-Vertrieb, Buchung, Erlöse nicht integriert; AP-20 nur punktuell, viele Integrationen systemspezifisch ohne durchgängiges Broker-Paradigma.

2. Capability Map der REA gruppiert nach Domänen

Die Abbildung 44 visualisiert eine Capability Map der REA mit Szenario-bezogener Bewertung der Fähigkeiten für die Szenarien S1–S4. Die Einfärbung der Capabilities zeigt, welche Fähigkeiten in den einzelnen Szenarien zentral bzw. besonders kritisch, welche von mittlerer Bedeutung und welche nachrangig sind. Dadurch wird die Variabilität und Instanzierbarkeit der REA auf Capability-Ebene deutlich und ersichtlich, welche Fähigkeiten für eine weitergehende Integration bedarfsorientierter Verkehre gezielt ausgebaut werden müssen.

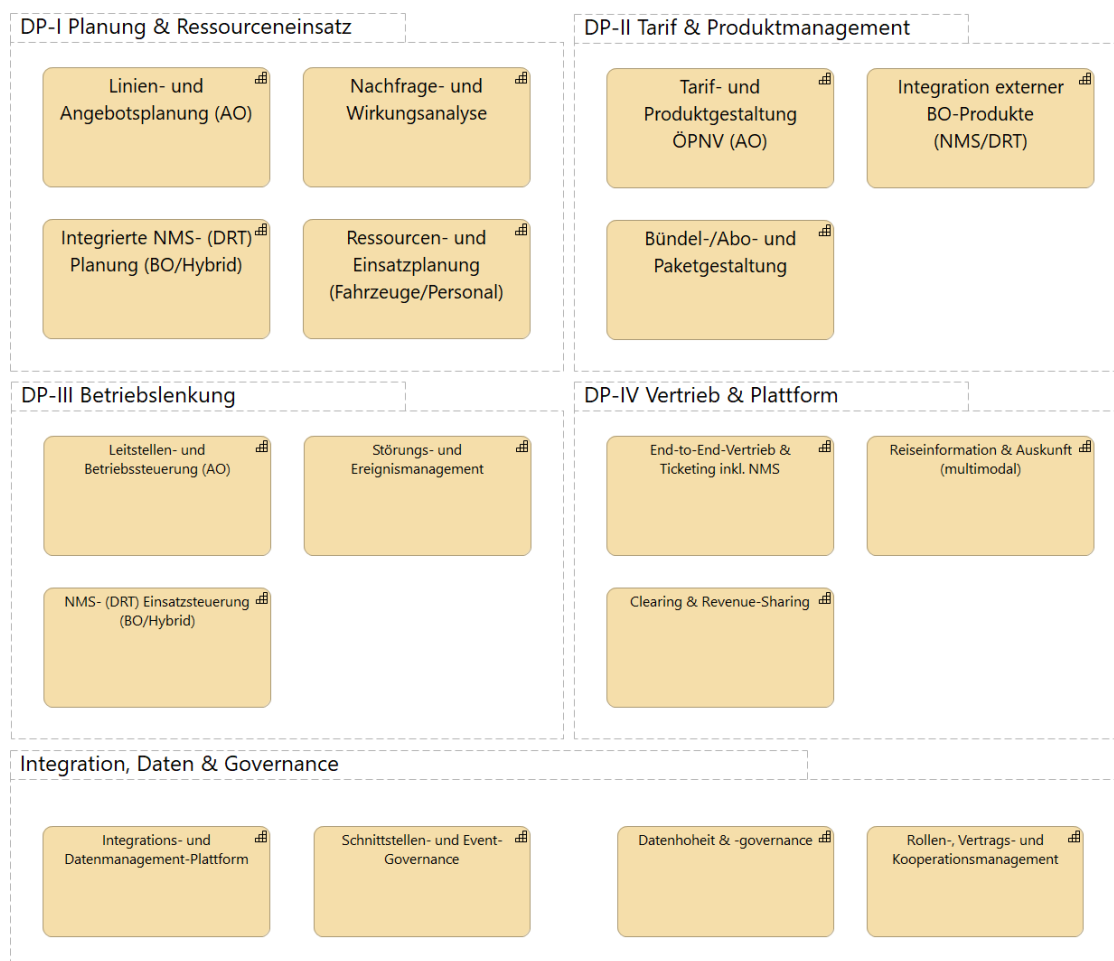


Abbildung 43: Capability Map gruppiert nach Domänen im Zielzustand S4

Aufbauend auf der in Abbildung 44 dargestellten Capability Map des Vollintegrations-szenarios S4 zeigt Tabelle 40 die Szenario-bezogene Ausprägung der zentralen Capabilities in den Szenarien S1 bis S4 in Form einer Heatmap und macht damit sichtbar, in welchen Bereichen die REA in den weniger integrierten Szenarien noch hinter dem Zielbild zurückbleibt bzw. welche Fähigkeiten dort bereits in vergleichbarer Stärke wirksam sind.

Tabelle 40: Heatmap der Capabilities in den Szenarien S1–S4

Capability	S1	S2	S3	S4
Linien- und Angebotsplanung (AO)	H	H	H	H
Nachfrage- und Wirkungsanalyse	M	H	H	H
Integrierte NMS- (DRT) Planung (BO/Hybrid)	L	M	H	H
Ressourcen- und Einsatzplanung (Fahrzeuge/Personal)	H	H	H	H
Tarif- und Produktgestaltung ÖPNV (AO)	H	H	H	H
Integration externer BO-Produkte (NMS/DRT)	L	H	H	H
Bündel-/Abo- und Paketgestaltung	M	M	H	H

Capability	S1	S2	S3	S4
Leitstellen- und Betriebssteuerung (AO)	H	H	H	H
Störungs- und Ereignismanagement	H	H	H	H
NMS- (DRT) Einsatzsteuerung (BO/Hybrid)	L	M	H	H
End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS	L	M	H	H
Reiseinformation & Auskunft (multimodal)	M	H	H	H
Clearing & Revenue-Sharing	M	H	H	H
Integrations- und Datenmanagement-Plattform	L	M	H	H
Schnittstellen- und Event-Governance	L	M	H	H
Datenhoheit & -governance	M	M	H	H
Rollen-, Vertrags- und Kooperationsmanagement	M	H	H	H

Legende zu Tabelle 40: H = high, M = medium, L = low (Bedeutung im Szenario)

In der nachfolgenden Darstellung wird das Szenario S2 als exemplarisches Beispiel herangezogen, um die in der Heatmap ausgewiesenen Ausprägungen anhand ausgewählter Capabilities zu veranschaulichen und zu illustrieren, wie sich diese konkret in einer Szenario-spezifischen Konfiguration der REA niederschlagen. In der vorliegenden Untersuchung wurden ausschließlich jene Capabilities berücksichtigt, die sich im Vergleich zu S4 als modifiziert herausgestellt haben. Die Blau markierten Capabilities haben sich im Vergleich zu S4 verändert – sie weisen alle eine Mittlere Bedeutung für das Szenario auf.



Abbildung 44: Capability Map für Szenario S2 im Vergleich zum Zielzustand S4

9.2.5 Fähigkeitenlandkarte (Capability Map)

Im Oktober 2023 wurde im Rahmen eines Experteninterviews mit dem VDV (Evaluationsepisode V.) angeregt, zusätzlich zum Hauptmodell eine Capability Map bzw. Fähigkeitenlandkarte der REA zu entwickeln, um die Entscheidungsebene besser zu informieren (siehe Kapitel 8.2.5; [230]). Diese Karte soll aufzeigen, welche Fähigkeiten bei der Einführung von bedarfsgesteuerten Verkehren benötigt werden. Dafür wurde die entwickelte Architektur objekt- und kontextorientiert analysiert, orientiert an dem identifizierten Wertschöpfungsprozess.

Capability Maps sind ein zentrales Instrument im EAM. Sie bilden systematisch die Fähigkeiten ab, die ein Unternehmen benötigt, um seine strategischen Ziele zu erreichen. Eine Capability ist hierbei die Fähigkeit einer Organisation, unter definierten Bedingungen eine bestimmte Leistung zu erbringen, unabhängig von der konkreten organisatorischen Umsetzung oder technologischen Realisierung [237, S. 41–43].

Im Rahmen dieser Dissertation hilft die Capability Map, die zur Integration von NMS notwendigen Fähigkeiten zu identifizieren, zu bewerten und systematisch in die bestehende Architektur zu integrieren. Dabei bildet die Capability Map eine Brücke zwischen strate-

gischer Zielsetzung und operativer Umsetzung, insbesondere bei neuen Anforderungen an Planung, Ressourcensteuerung, Vertrieb oder IT-Infrastruktur [95, S. 7–8].

Unternehmen profitieren von Capability Maps v.a. durch:

1. Transparenz über bestehende und benötigte Fähigkeiten [237, S. 42],
2. Ableitung von Transformationsbedarfen, etwa zur Integration neuer digitaler Dienste [238, S. 91–92],
3. Unterstützung strategischer Entscheidungen durch klar definierte Zuständigkeiten, etwa für Geschäftsziele, Fähigkeiten und IT-Ressourcen [29, S. 56–58].

Im DSR-Prozess dienen Capability Maps als Artefakt zur Problemexplikation und Zieldefinition. Sie sind somit analytisches Werkzeug und integraler Bestandteil der artefakt-zentrierten Lösungsentwicklung im DSR-Zyklus [52, S. 77–78].

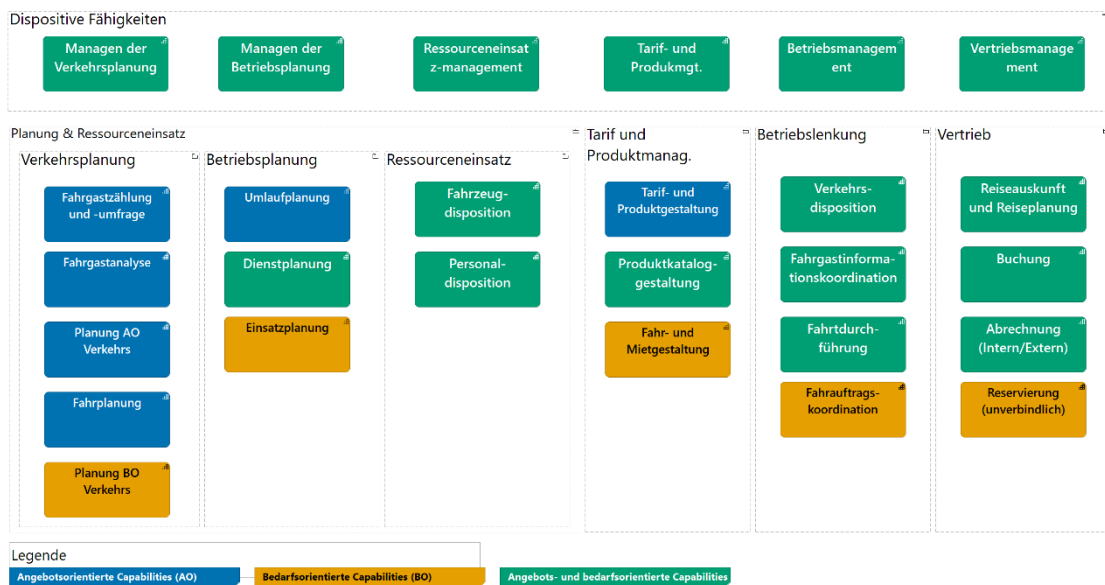


Abbildung 45: Capability Map für zeitgemäße ÖPNV-Unternehmen

Die Capability Map in Abbildung 32 leitet sich von der Hauptarchitektur ab und stellt analog zur Prozessebene die Fähigkeiten der Organisation für bedarfsorientierte Verkehre dar. Rot steht für angebotsorientierte Fähigkeiten, blau für bedarfsorientierte Fähigkeiten und grün für Fähigkeiten, die beide Aspekte berücksichtigen (müssen).

Das Management erkennt anhand der Farben, welche Kapazitäten neu geschaffen werden müssen, welche so bleiben können und welche ausgebaut werden müssen.

Diese neue architektonische Sichtweise wurde in Episode VII (siehe Kapitel 8.2.7) mit dem Enterprise-Architekten der BVG evaluiert. Die vom Experten geäußerten Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der Capability Map ergeben sich aus dem Vergleich zwischen Abbildung 21 und Abbildung 32.

9.2.6 Zwischenfazit

Die Phase-2-Evaluation (Episoden VIII und IX) konkretisiert die in Phase 1 entwickelte REA mithilfe eines szenariobasierten Prüfrahmens. Sie prüft, wie gut die REA unterschiedliche Rollenmodelle, Integrationsgrade sowie Betriebsformen und -größen abdeckt. Das Zwischenfazit bündelt die Ergebnisse entlang der in Abschnitt 9.2.1 definierten Prüfpunkte (i)–(v). Es stellt sicher, dass die Darstellung der Ergebnisse nicht nur inhaltlich stimmig ist, sondern auch nachweisbar und prüfbar auf die zugrunde liegenden Artefakte zurückgeführt werden kann. Um diese Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten und Redundanzen zu vermeiden, wird eine Evidenzkarte eingeführt. Sie ordnet die in Kapitel 9.2.2–9.2.4 gezeigten Abbildungen und Tabellen den o.g. Prüfpunkten zu und verdichtet diese in Tabelle 42. Die Evidenzkarte dient als Navigations- und Nachweisartefakt. Sie ersetzt keine operativen Architektursichten, sondern dokumentiert die Quellen, auf denen die Aussagen des Zwischenfazits beruhen.

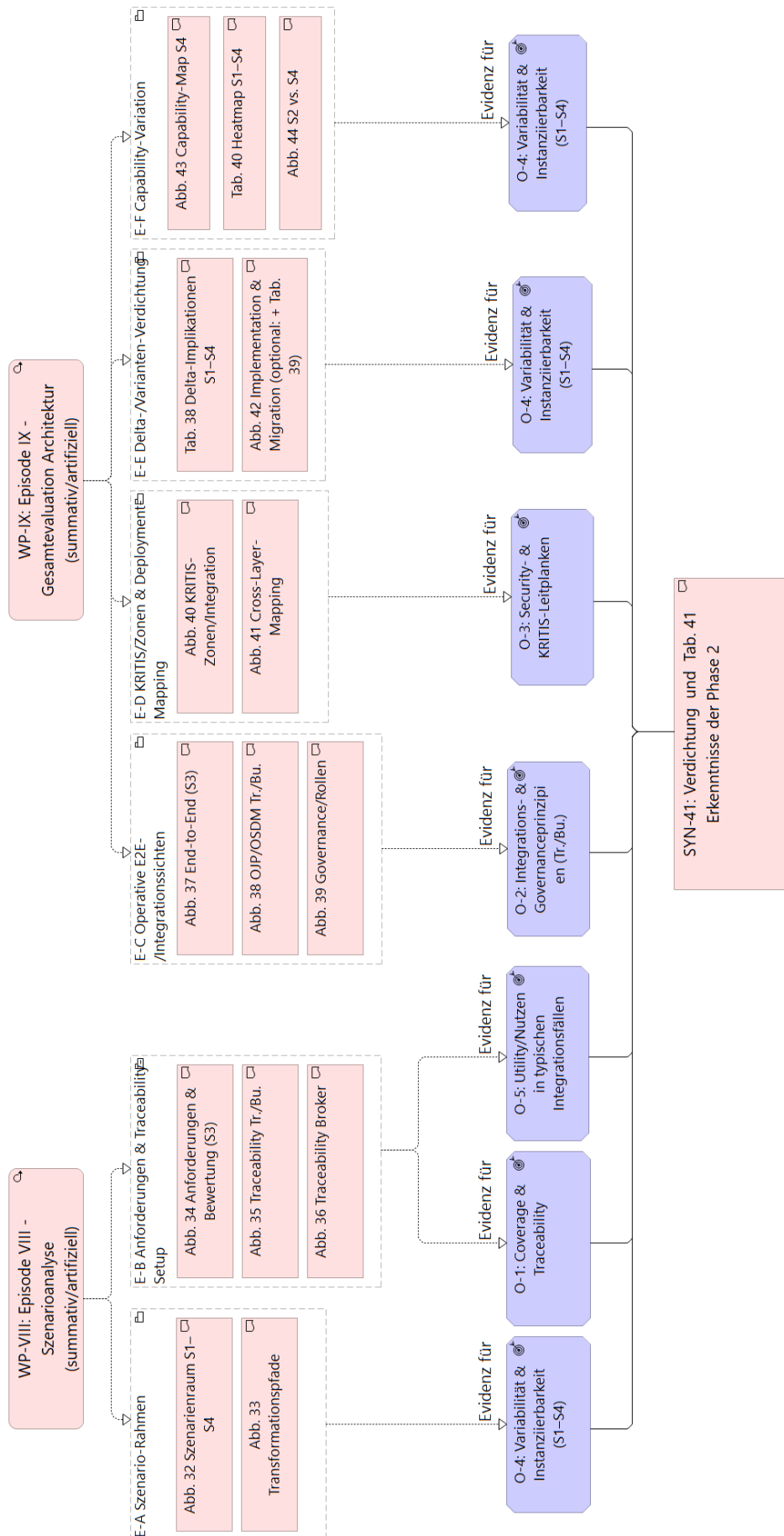


Abbildung 46: Evidenzkarte Phase 2 (Episoden VIII & IX)

Die Evidenzkarte liest man von links nach rechts: Die Evaluationsepisoden (Work Packages) liefern Evidenzpakete (Deliverables), die die fünf Ergebnisdimensionen (Outcomes) stützen. Die daraus gewonnenen Befunde werden anschließend in Tabelle 42 (in Kapitel 9.6) zusammengeführt. Diese Struktur koppelt die Argumentation des Zwischenfazit explizit an die verwendeten Nachweise (Abbildungen und Tabellen). So erhöht sie die Transparenz der Ergebnisverdichtung und vermeidet Wiederholungen bereits dargestellter Detailartefakte. Gleichzeitig bereitet sie den Übergang von der episodenspezifischen Bewertung zur nachfolgenden Konsolidierung der finalen REA vor.

Die Ergebnisse der Phase-2-Evaluation lassen sich entlang der fünf Prüfpunkte wie folgt verdichten:

- (i) Die Szenarioanforderungen sind umfassend abgedeckt und konsistent nachvollziehbar. Die Zuordnung über die Kette Anforderung → Capability → Prozess/Service → IT-Baustein (inkl. Daten-/Ereignisanker) erfolgt systematisch.
- (ii) Zentrale Integrations- und Governanceprinzipien – insbesondere die Trennung von Reservierung (unverbindlich) und Buchung (verbindlich) sowie die Kapselung von Zahlungs- und Clearingfunktionen – bleiben über alle Szenarien hinweg konsistent modellierbar und sind in Walkthroughs prüfen.
- (iii) Sicherheits- und KRITIS-Leitplanken gelten als unverhandelbare Vorgaben. Eine durchgehende Kopplung über Zonen hinweg wird vermieden und eine segmentierte Integrationsarchitektur als zulässiges Muster bestätigt.
- (iv) Die Architektur ist variantenfähig und instanzierbar. S4 dient als Basissicht, während S1–S3 als Delta-Ausprägungen auf Capability-, Governance- und Integrationsniveau abgeleitet werden, ohne die Modellkonsistenz zu gefährden.
- (v) Die Playthroughs/Walkthroughs zeigen, dass die REA in typischen Integrationsfällen (u.a. Vertriebskette, ITCS-Kopplung, Payment/Clearing, Fahrgastinformation) einen klaren Nutzen liefert. Dieser wird durch prüfbare Prozess- und Nachweispfade sichtbar und geht über reine Strukturmodelle hinaus.

Das Zwischenfazit der Phase 2 bildet die unmittelbare Grundlage für die nachfolgende Konsolidierung in Kapitel 9.3: Während Abschnitt 9.2.1 die Eignung der REA über Szenarien und Evaluationsepisoden belegt, fasst Kapitel 9.3 die dabei verwendeten Komponenten in einer finalen Gesamtsicht zusammen. Dabei verdichtet es diese über die Capabilities auf Managementebene, ohne die operativen Detailmodelle zu wiederholen.

9.3 Konsolidiertes Gesamtmodell der REA

Dieses Kapitel fasst die in den Kapiteln 6 bis 8 entwickelten, operationalisierten und evaluierten Artefaktbestandteile zu einer finalen Gesamtsicht der Referenz-Enterprise-Architektur (REA). Es dient als zentraler Bezugspunkt („Single Point of Reference“) für den Zielzustand der Architektur und deren Szenario-bezogene Ausprägungen S1–S4 (vgl. Kapitel 6.5, 7, 8, 9.2, 9.3). Der Fokus liegt auf der kompakten Darstellung der Ergebnisse und der klaren Abgrenzung von detaillierten Entwurfs- und Evaluationsdarstellungen:

Operative Detailmodelle werden nicht erneut ausgerollt, sondern im Rahmen eines formalisierten Metamodells als bereits konstruierte und geprüfte Bausteine eingeordnet und über Querverweise zugänglich gemacht.

Das Kapitel führt die REA entlang einer konsistenten Top-down-Leseführung zusammen. Zunächst wird die strategisch-motivatorische Ebene als normativer Rahmen herangezogen: Treiber, Ziele, Anforderungen und Capabilities werden als Begründungslinie des Zielzustands konsolidiert. Darauf aufbauend verdichtet die Capability-Ebene – als zentrale Brücke zwischen strategischer Zielsetzung und operativer Ausprägung – die operative Komplexität auf Managementebene. Anschließend beleuchtet das Kapitel die Variantenfähigkeit der REA auf Capability-Ebene, indem es die Szenarien S1–S4 als abgestufte Ausprägungen eines konsistenten Modells erläutert (S4 als Basissicht, S1–S3 als Delta-Logik bzw. Overlays).

Zum Abschluss hebt Kapitel 9.3 die Cross-Layer-Traceability als Nachweisrahmen hervor: Anforderungen werden über eindeutige ID-Führung systematisch auf Capabilities, Domänenprozesse (DP), Applikationsbausteine (AP), Datenobjekte (DO) und Messpunkte (KPIs) zurückgeführt. Damit wird die Prüfbarkeit der Architektur über alle Ebenen hinweg gesichert, ohne die operativen Sichten redundant zu replizieren. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit, das die konsolidierten Eigenschaften der finalen REA im Sinne von Kohärenz, Variantenfähigkeit, Instanzierbarkeit und Nachweisbarkeit zusammenfasst und in die anschließende Diskussion überleitet.

9.3.1 Zielsetzung, Modellierungsprinzip und Metamodell

Das Ziel von Kapitel 9.3 ist es, die in der Arbeit definierten Gütekriterien (u.a. Vollständigkeit, Kohärenz, Verständlichkeit, Nützlichkeit, Erweiterbarkeit, Integrationsfähigkeit) auf Ebene des finalen Gesamtmodells nachvollziehbar zu erfüllen. Gleichzeitig wird die Variantenfähigkeit der REA strukturell verankert (vgl. Kapitel 2.8.6, 7.2–7.3). Die Konsolidierung erfolgt dabei entlang der in der Arbeit etablierten Strukturprinzipien: strategisch-motivatorischer Bereich, operativer Bereich sowie deren Verbindung über Traceability-Anker (vgl. Kapitel 7.1.7–7.1.9).

Abgrenzung und Viewpoint-Prinzip

Dabei erweitert Kapitel 9.3 weder den in Kapitel 6 abgeleiteten Anforderungskorpus maßgeblich noch ersetzt es die Entwurfs- und Variantenlogik aus Kapitel 7 oder die evidenzbasierte Prüfung aus Kapitel 8. Operative Detaildarstellungen wie Prozess-, Applikations-, Datenobjekt- und Zonen-/Gateway-Sichten werden an dieser Stelle nicht wiederholt, sondern als bereits konstruierte und geprüfte Artefakte über Querverweise erschlossen (vgl. Kapitel 7.1.8, 7.3, 8.2). Damit bleibt die Rolle als Konsolidierungs- und Einordnungskapitel klar gewahrt..

Die Konsolidierung folgt dem in der Architekturbeschreibung etablierten Viewpoint-/Concern-Prinzip. Jede Sicht (View) adressiert gezielt Anliegen (Concerns) der Stakeholder, um dadurch Verständlichkeit, Konsistenzprüfbarkeit und Wartbarkeit der komplexen Ar-

chitekturen zu sichern (vgl. Kapitel 3.1). Ein modellpraktisches Risiko dabei ist die Überlagerung zu vieler Anliegen in einer Sicht („Too many concerns per view“) [71, S. 112].

Eine einzelne Darstellung, die Motivation, Prozesse, Anwendungen und Security gleichzeitig abbildet, führt zu semantischer Uneindeutigkeit und sinkender Wartbarkeit (vgl. Kapitel 3.1.2, 2.10) [115]. Die REA begegnet diesem Risiko durch eine strikte Trennung der Sichten und die Einführung eines verbindlichen Metamodells.

REA-Metamodell und Artefaktbeziehungen

Mobilitätsarchitektur beherrschbar zu machen und das Postulat der „Verortung statt Wiederholung“ (vgl. Kapitel 9.3.5) methodisch zu fundieren, fundiert die REA auf einem strikten Inhaltsmetamodell. Dieses (Content-) Metamodell definiert die syntaktischen und semantischen Interdependenzen zwischen den identifizierten Artefakttypen und gewährleistet die strukturelle Konsistenz über alle Sichten hinweg. Es gliedert sich in drei konstituierende Dimensionen (vgl. Abbildung [X]):

1. Vertikale Schichtenkonformität und Traceability: In Anlehnung an die Logik von TOGAF und ArchiMate wird eine durchgängige Nachvollziehbarkeit von der Strategie bis zur Technik sichergestellt:
 - Strategische Steuerung: Die Capabilities (CS) bilden den stabilen Anker der Unternehmensfähigkeiten (vgl. Kapitel 7.1). Sie werden direkt aus den szenario-spezifischen Requirements (Req) abgeleitet. Regulatorische Rahmenbedingungen werden als Constraints (C) definiert, welche den Lösungsraum a priori einschränken (z. B. C1 „OJP-Konformität“).
 - Fachliche Operationalisierung: Auf der Geschäftsebene werden Capabilities durch konkrete Domänen und Prozesse (DP) operationalisiert. Diese operieren auf definierten Datenobjekten (DO), wodurch eine saubere Trennung von Prozesslogik und Datenstruktur (basierend auf Transmodel) gewährleistet wird.
 - Technische Unterstützung: Die Applikationsebene realisiert die Anforderungen durch Applikationskomponenten (AP). Diese stellen ihre Funktionalität über definierte Anwendungsdienste (AS) bereit und kommunizieren in NMS-Integrationsszenarien primär über asynchrone Events (EV).
2. Orthogonale Integration der Variabilität: Eine zentrale Erweiterung stellt die Integration der Variabilitätsmechanismen dar. Variationspunkte (VP) sind hierbei als „Cross-Cutting Concerns“ verankert. Sie konfigurieren Artefakte aller Schichten (CS, DP, AP) in Abhängigkeit vom gewählten Integrationsszenario (S1–S4). Die Logik folgt einer Kausalitätskette: Ein Constraint (C) erzwingt über Requirements (Req) eine spezifische Ausprägung, welcher wiederum determiniert, ob ein Prozess (DP) als „Owned“ (intern) oder „Shared“ (kooperativ) instanziiert wird.
3. Transformationslogik: Die zeitliche Dimension wird durch Migrations-Elemente abgebildet. Work Packages (WP) bündeln die notwendigen Delta-Anpassungen (vgl. Kap. 9.2.4), um einen definierten Architekturzustand, das Plateau (PL), zu errei-

chen. Jedes Szenario (S1 bis S4) korrespondiert dabei mit einem diskreten Plateau-Zustand im Metamodell.

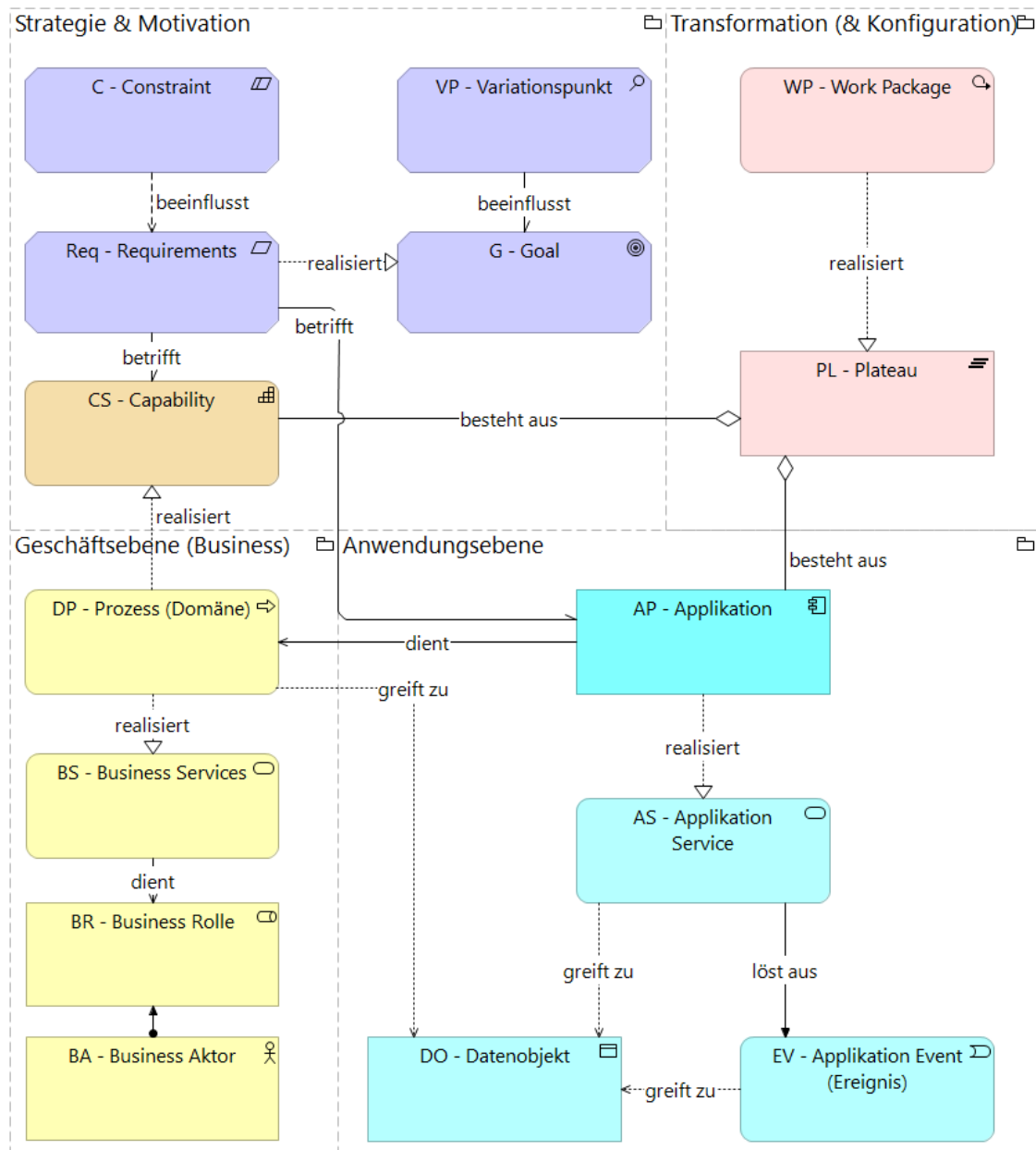


Abbildung 47: Metamodell der REA

Die Struktur von Kapitel 9.3 gewährleistet auf Basis dieses Metamodells eine End-to-End-Nachvollziehbarkeit, während die Überlagerung zu vieler Concerns in einzelnen Sichten methodisch kontrolliert wird (vgl. Kapitel 7.1.2, 9.2.2).

9.3.2 Strategisch-motivatorische Ebene

Dieses Unterkapitel klärt, welche normativen Leitplanken den Zielzustand der REA definieren und damit die nachfolgenden capability- und operativbezogenen Ausprägungen strukturieren. Die strategisch-motivatorische Ebene dient dabei als konsolidierender Referenzrahmen. Hier wird die normative Kette:

Driver → Goal → Requirement bzw. Constraint → Capability⁴²

in einer kohärenten Zielarchitektur zusammengeführt. Treiber (Driver) markieren die wesentlichen Veränderungsimpulse im Untersuchungsfeld (z.B. Kundenzentrierung, First-/Last-Mile-Integration, Interoperabilität, Sicherheit/KRITIS). Ziele (Goals) präzisieren die angestrebten Zustände, so z.B. End-to-End-Fähigkeit, Realtime-Transparenz, beherrschbare Integration, Variantenfähigkeit. Anforderungen bzw. Constraints operationalisieren diese Zielzustände als verbindliche Leitplanken (z.B. Trennung Reservierung ≠ Buchung, zonenbasierte Segmentierung inkl. No-Go „ESB-Durchzug“). Capabilities übersetzen diese Leitplanken in steuerbare Architekturbedarfe und bilden so die Brücke zur operativen Ebene.

Die Motivationsebene dient an dieser Stelle nicht zur erneuten Ableitung oder Bewertung von Anforderungen. Diese wurden bereits Szenario-bezogen in Kapitel 6.5 hergeleitet und in den Evaluationskapiteln (insb. Kapitel 8.2) validiert. Kapitel 9.3.2 fasst diese Ergebnisse in einer normativen Zielarchitektur zusammen, um die strategisch-operative Kohärenz der finalen REA sichtbar und nachvollziehbar zu machen. Damit entsteht zugleich die Grundlage, die capability-basierte Verdichtung (Kapitel 9.3.3) und die Szenario-bezogene Variantenbetrachtung (Kapitel 9.3.4) konsistent an ein gemeinsames Leitplankenset anzubinden.

Abbildung 48 zeigt die strategisch-motivatorische Ebene der finalen REA im Zielzustand S4 als normative Begründungslinie. Sie verknüpft Treiber, Ziele sowie Anforderungen und Constraints in einer konsistenten Motivationskette und verdeutlicht, wie Capabilities diese Leitplanken in die nachfolgenden Architekturbausteine überführen. Der View (Abbildung 47) beantwortet die Frage:

Welche normativen Leitplanken (Treiber, Ziele, Anforderungen/Constraints) begründen das Zielbild der REA und strukturieren die nachfolgenden Capability- und Operativ-Ausprägungen?

Ableitung und Bewertung der Anforderungen erfolgen nicht in diesem Abschnitt, sondern sind in Kapitel 6.5 (Herleitung) sowie Kapitel 8.2 (Validierung) dokumentiert.

⁴² Die hier verwendeten Elemente (siehe Abbildung 48) werden im Anhang weiter erläutert.

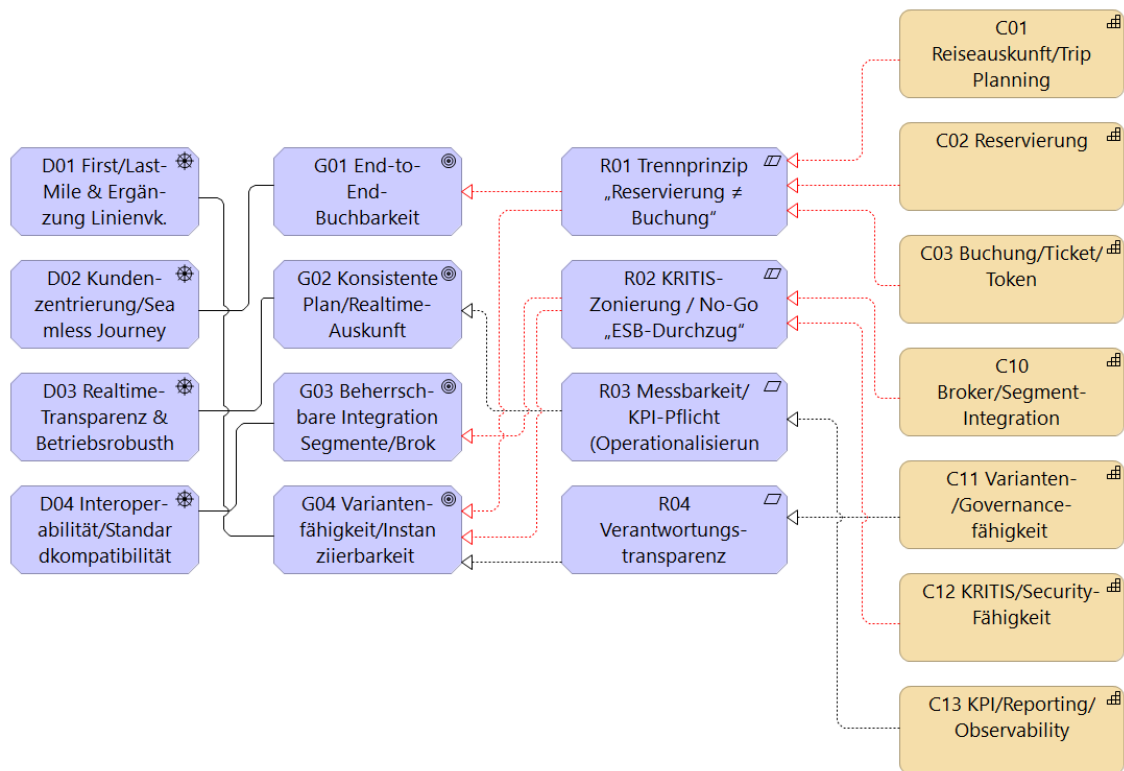


Abbildung 48: Strategisch-motivatorische Zielarchitektur – normative Leitplanken

Die übrigen Capabilities (z.B. Planung/Disposition/Tarif) werden umfassend in Kapitel 9.3.3 und 9.3.4 (Capability Map und Heatmap) dargestellt. Kapitel 9.3.2 bleibt bewusst normativ und Leitplanken-zentriert.

9.3.3 Capability-Ebene als zentrale Brücke

Im Folgenden geht es um die Frage, wie sich die in Kapitel 9.3.2 konsolidierte strategisch-motivatorische Zielarchitektur in operative Architekturbausteine überführen lässt, ohne die operative Komplexität auf Managementebene zu spiegeln. Die Capability-Ebene dient dabei als bewusst verdichtende Steuerungsschicht: Capabilities beschreiben, was ein ÖPNV-Unternehmen unter definierten Bedingungen leisten muss – unabhängig davon, wie diese Leistung organisatorisch oder technisch konkret umgesetzt ist. Damit fungiert die Capability-Sicht als Brücke zwischen den normativen Leitplanken (Driver/Goal/Requirement/Constraint) und den operativen Ausprägungen in Prozessen, Anwendungen, Datenobjekten und Integrationsbausteinen (vgl. Kapitel 7.1.9 und 9.3.2).

Die Einführung der Capability Map wird in dieser Dissertation evaluativ begründet: Im Kontext der Evaluation wurde empfohlen, die REA um eine Fähigkeitenlandkarte zu ergänzen. Ziel ist es, die Entscheidungsebene besser zu informieren und Transformationsbedarfe adressatengerecht sichtbar zu machen. Die Capability Map ist daher keine zusätzliche Detaildarstellung, sondern ein Management-Werkzeug. Sie überführt die aus dem Wertschöpfungsprozess abgeleiteten Architekturbausteine in eine

strategisch interpretierbare Form und erhöht dadurch Verständlichkeit, Kommunizierbarkeit und Variantenfähigkeit.

Methodisch verknüpft die REA die Capability-Sicht eng mit der Traceability-Logik: Jede Capability lässt sich über IDs und Zuordnungen auf Domänenprozesse (DP), Applikationsbausteine (AP) und – wo relevant – Variationspunkte (VP) zurückführen. Dadurch kann die Anforderungsabdeckung (Requirement → Capability → Prozess/DP → IT-Baustein) systematisch geprüft werden, ohne die operativen Sichten aus diesem Kapitel (9.3) erneut auszubreiten. Die operative Konkretisierung bleibt in Kapitel 7 (Design/Varianten/Deltas) und wird in Kapitel 8 episodenzugeordnet validiert. In Kapitel 9.3 dient die Capability-Ebene der konsolidierten Verdichtung des Zielzustands (S4) und der Vorbereitung der Szenario-bezogenen Variantenbetrachtung in Kapitel 9.3.4.

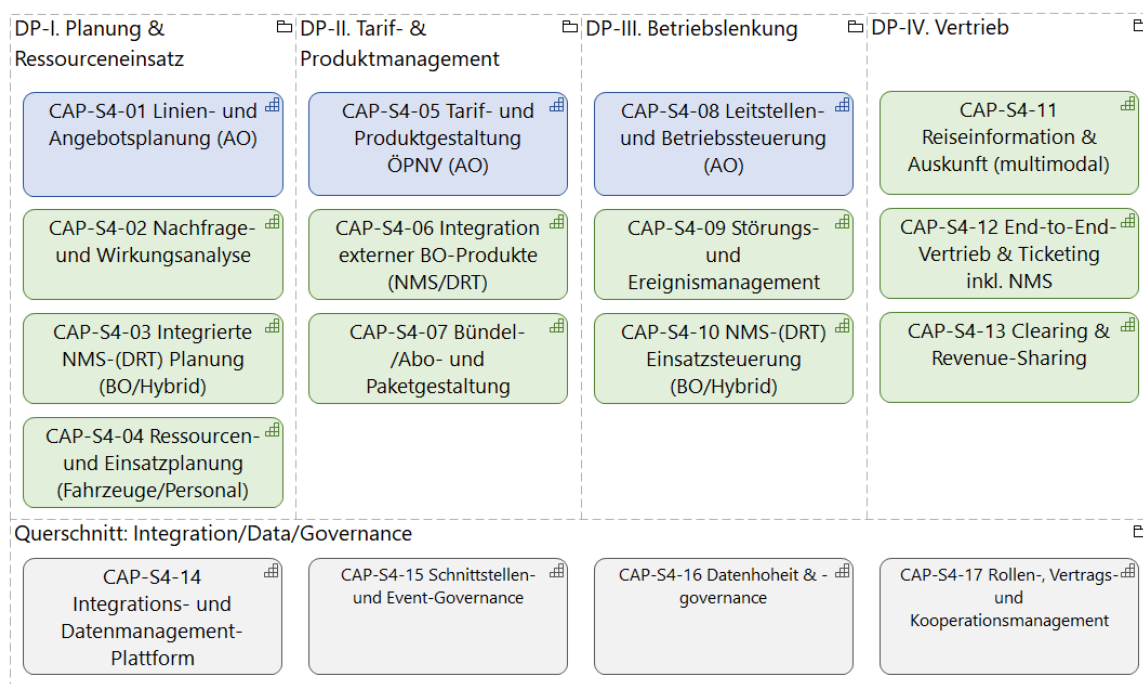


Abbildung 49: Capability Map der REA im Zielzustand S4 (domänengruppiert)

Die Abbildung 48 zeigt eine domänengruppierte Capability Map im Zielzustand S4. Die verdichtet die operativen Architekturbausteine zu fähigkeitsbasierten Steuerungsobjekten und verbindet die strategisch-motivatorische Zielarchitektur mit der operativen Umsetzung. Die Szenario-bezogene Variation dieser Capabilities wird in Abschnitt 9.3.4 behandelt.

9.3.4 Variantenfähigkeit auf Capability-Ebene (S1–S4)

Auf Basis der in Unterkapitel 9.3.3 konsolidierten Capability Map des Zielzustands S4 verdichtet das folgende Unterkapitel die Variantenfähigkeit der REA auf Capability-Ebene. Ziel ist es, die Szenarien S1–S4 nicht als vier getrennte Architekturen zu betrachten, sondern als Ausprägungen eines konsistenten Modells. Dabei dient S4 als Basis, während S1–S3 als Delta-Ausprägungen verstanden werden.

Die Variation erfolgt methodisch durch eine Szenario-bezogene Bewertung der Capabilities entlang der H/M/L-Skala (high/medium/low) aus Tabelle 40. Diese Skalierung verdichtet die Management-Sicht und zeigt, in welchen Fähigkeitsclustern die REA in weniger integrierten Szenarien hinter dem Zielbild zurückbleibt und welche Fähigkeiten bereits vergleichbar stark ausgeprägt sind. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Szenarien S1 und S2 exemplarisch als Capability-Overlays. Sie verzichten bewusst auf operative Detailmodellierung (Prozesse, Anwendungen, Datenobjekte). Die operative Einordnung erfolgt in Abschnitt 9.3.5 mit Verweisen auf Kapitel 7 (Design) und Kapitel 8 (Validierung).

Szenario S1 (Nicht-Integration/Anbindung) – Capability-Overlay

S1 zeigt die geringste Integrationsausprägung. Im Capability-Overlay treten insbesondere dort Absenkungen (M bzw. L) auf, wo für bedarfsorientierte bzw. plattformbezogene Wertschöpfung eigenständige Koordinations- und Governancefähigkeiten erforderlich wären. Im Vergleich zum Zielbild bleiben in S1 die klassischen AO-Kernfähigkeiten (z.B. Linien-/Angebotsplanung, Ressourcenplanung, Leitstellenfunktion) stark ausgeprägt. Dagegen bleiben BO-/Hybrid- und Querschnittsfähigkeiten – insbesondere entlang NMS-Planung, NMS-Einsatzsteuerung, End-to-End-Vertrieb inkl. NMS sowie Integrations-/Datenmanagement und Schnittstellen-Governance – gegenüber S4 deutlich reduziert.

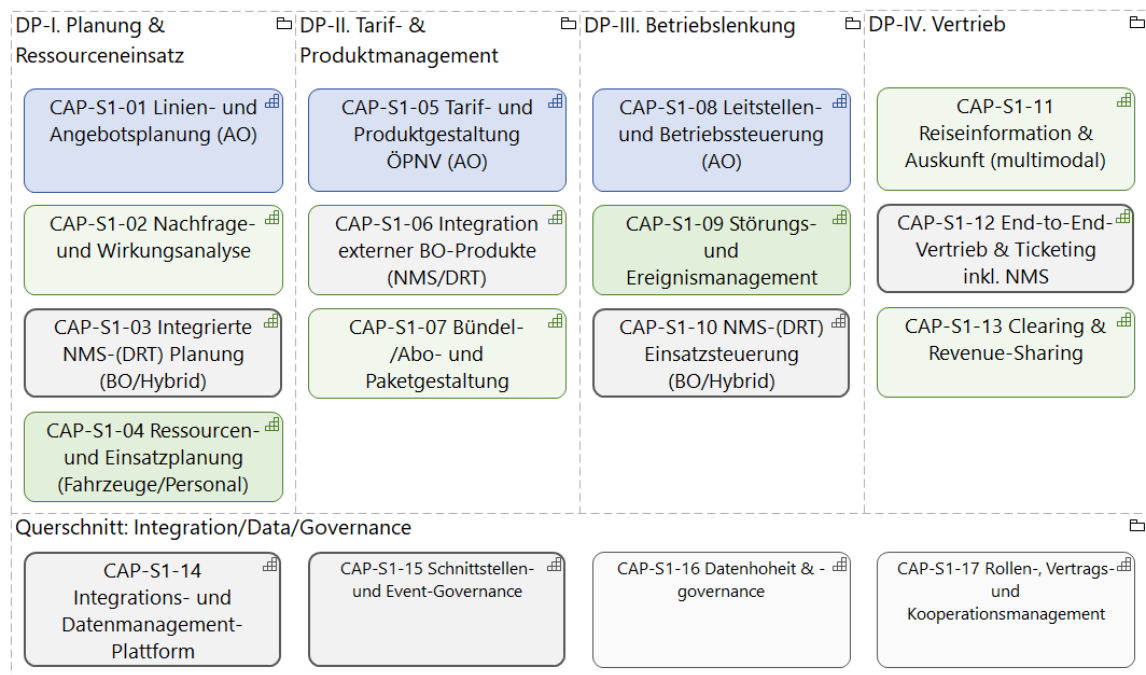


Abbildung 50: Capability Overlay Szenario S1 (H/M/L) im Vergleich zu S4

Legende zu Abbildung 50: H/M/L gemäß Tabelle 40; AO/BO/HY-Farbcode wie in Abschnitt 9.3.3; „low“ wird als graue, dick(er) umrandete Kachel dargestellt.

Szenario S2 (White-Label-Kooperation) – Differenzsicht gegenüber S4

S2 beschreibt eine White-Label-Konstellation, bei der die Kundenschnittstelle und Teile der Koordination stärker beim ÖPNV-Unternehmen liegen, während operative BO-Kernleistungen meist von Partnern erbracht werden. Auf Capability-Ebene führt dies zu einem charakteristischen Muster: Viele AO- und allgemeine Betriebsfähigkeiten bleiben auf „high“, während zentrale BO-/Hybrid- und Integrationsfähigkeiten gegenüber dem Zielbild auf „medium“ absinken. In der Dissertation wird diese Verdichtungslogik als geeignet abgesehen und genutzt, um bei der Gegenüberstellung von S2 und S4 nur die tatsächlich veränderten Capabilities hervorzuheben.

Das Overlay für S2 zeigt im Vergleich zu S4 insbesondere Abweichungen bei folgenden Capability-Clustern: integrierte NMS-(DRT)-Planung (BO/Hybrid), Bündel-/Abo- und Paketgestaltung, NMS-(DRT)-Einsatzsteuerung, End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS sowie die Querschnittsfähigkeiten Integrations-/Datenmanagement-Plattform, Schnittstellen-/Event-Governance und Datenhoheit & -governance. Diese Capability-Cluster sind im White-Label-Szenario typischerweise nur teilweise (mittlere Bedeutung) intern erforderlich bzw. ausprägbar, da wesentliche BO-Teile weiterhin über Partnerketten erfolgen.

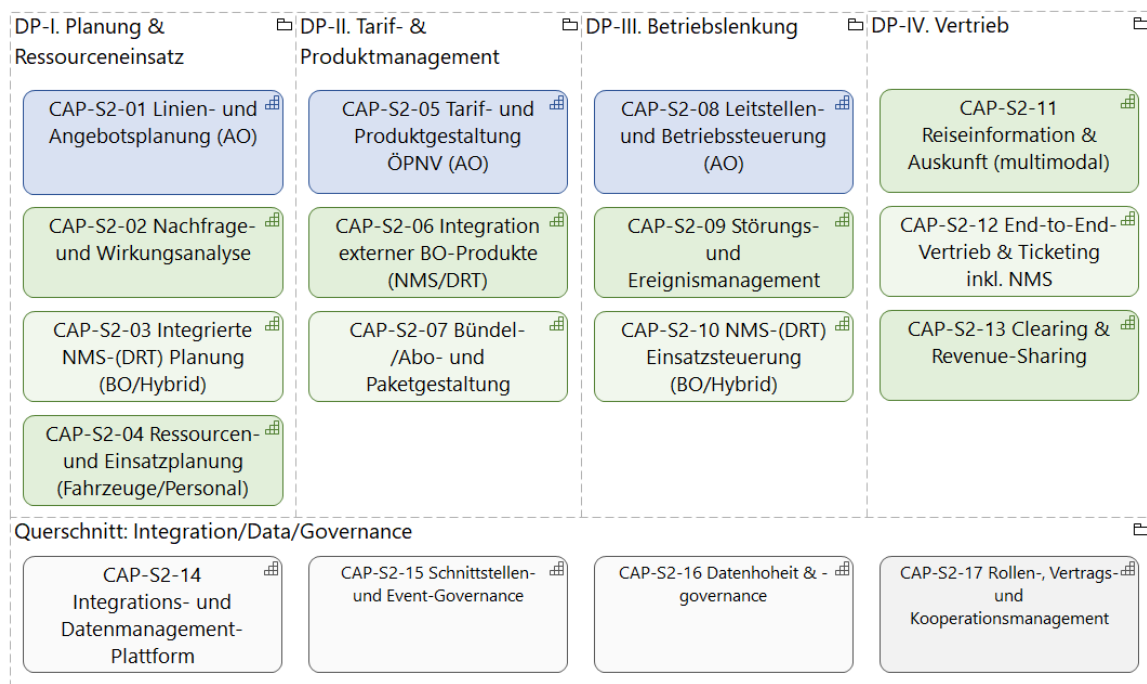


Abbildung 51: Capability Differenzsicht Szenario S2 im Vergleich zu S4

Blau umrandete Kacheln markieren Capabilities, die gegenüber S4 abweichen (S2: M statt H); nicht markierte Capabilities bleiben in S2 auf „high“ (vgl. Tabelle 40).

Hinweis zu Szenario S3

Szenario S3 (hybride Integration/Koordination) erreicht in der in Tabelle 40 konsolidierten Capability-Bewertung in allen Clustern die Stufe „high“ und entspricht damit auf Capability-Ebene dem Zielzustand S4. Daher wird S3 in der vorliegenden Verdichtung nicht als separates Overlay dargestellt. Die Unterschiede zwischen S3 und S4 liegen weniger in „Capability-Defiziten“, sondern in Governance- und Ausprägungsdeltas (z.B. Verantwortungs- und Partneranteile, Schnittstellen-/Clearing- und Zonenimplikationen). Diese Aspekte werden aus diesem Grund auf operativer Ebene über Variationspunkte und Delta-Sichten behandelt (vgl. Kapitel 7.2 und 7.3 sowie die Szenario-Walkthroughs bzw. Playthroughs in Kapitel 8.2).

Fazit: Die oben dargestellten Capability-Overlays verdichten die Variantenlogik managementgerecht und zeigen, welche Fähigkeitscluster in niedrigeren Integrationsstufen gegenüber dem Zielbild S4 reduziert sind. Die konkrete operative Verortung dieser Unterschiede – also die Rückführung auf Prozesse, Applikationen, Datenobjekte sowie Integrations- und Zonenleitplanken – erfolgt im folgenden Abschnitt 9.3.5.

9.3.5 Operative Umsetzung: Verortung statt Wiederholung⁴³

Die in Abschnitt 9.3.3 konsolidierte Capability-Sicht und die in Abschnitt 9.3.4 dargestellten Szenario-bezogenen Variationen (S1–S4) verdichten die REA auf einer managementtauglichen Ebene. Um die Umsetzbarkeit und Prüfbarkeit zu gewährleisten, wird transparent aufgezeigt, wo die operativen Elemente – Prozesse/Services, Anwendungen, Datenobjekte/Ereignisse sowie Integrations- und Sicherheitsbausteine – in der Arbeit verankert sind, ohne die Modelle zu wiederholen. Dieses Unterkapitel setzt das Prinzip Verortung statt Wiederholung um: Die operative Architektur wird nicht erneut modelliert, sondern als konsistentes Set bereits vorliegender Artefakte und Nachweisanker referenziert und in einer kompakten Evidenzkarte zusammengeführt.

Die Verortung basiert auf der Basiskonfiguration S4 als referenziertes Zielbild. Die End-to-End-Ausprägung der Basissicht wird über DP-Labels geführt und über den DP-Katalog rückverfolgbar gemacht. Tabelle 22 konsolidiert die lückenlose Zuordnung von Business-Services/-Prozessen, Application Services/Komponenten sowie Daten-/Technologieankern zu den jeweiligen Prozess-IDs ist in (Crosswalk DP → ArchiMate). Damit wird die operative Ebene nicht nur beschrieben, sondern strukturell versionier- und prüf-

⁴³ Der Terminus „Verortung statt Wiederholung“ ist hier als begriffliche Verdichtung des in der Technik beschriebenen Single-Sourcing-/Reuse-Prinzips zu verstehen: Ein Architektur- bzw. Informationsobjekt wird an einer Stelle beschrieben („verortet“) und in allen weiteren Sichten/Artefakten lediglich referenziert („wiederholt“), um Redundanz und daraus resultierende Inkonsistenzen zu vermeiden. Es ist somit ein methodischer Schlüssel, um die Vielschichtigkeit einer Enterprise-Architektur (Strategie, Business, Applikation, Technologie) beherrschbar zu machen und eine durchgängige Nachvollziehbarkeit (Traceability) zu gewährleisten (vgl. [246, S. 191]; [247, S. 382]; [115, Kap. Korrespondenzen zwischen Beschreibungselementen]).

bar verankert – eine Voraussetzung vor allem für die Delta-Logik der Szenarien S1–S3 im Vergleich zu S4.

Auch die Integrations-, Daten- und Sicherheitsaspekte der operativen Umsetzung werden nicht über zusätzliche Detailgrafiken dupliziert, sondern über drei zentrale Konsolidierungsartefakte operationalisiert: (i) Schnittstellenkontrakte je Prozess (Tabelle 23), (ii) Daten-/Ereignissemantik je Prozess (Tabelle 24) sowie (iii) Zonen- und Integrationsleitbild inklusive kontrollierter Zonenkopplung (Abbildung 41 und Abbildung 42). Tabelle 23 ordnet jedem DP den zugehörigen Application Service zu, ebenso Provider-/Consumer-Applikationen, Schnittstellentyp (Sync/Event/Batch), Kern-Datenobjekte/Ereignisse sowie Standardanker (u.a. OJP/TRIAS, OSDM/custom, TOMP TripEvents, SIRI, CSV/EDIFACT). Tabelle 24 dokumentiert die semantische Kohärenz, indem sie Kernobjekte und Events/Topics je DP als Grundlage für Publikation, Integration, Monitoring/Observability sowie Testfallableitung aufführt. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die segmentierte, KRITIS-konforme Zonierung (OT/DMZ/IT/Office/ Partner) und verdeutlichen, dass Zonenkopplungen ausschließlich kontrolliert über DMZ-Komponenten erfolgen; ein durchgehender ESB-„Durchzug“ wird vermieden.

Die Varianten- und Governancefähigkeit der operativen Umsetzung wird nicht durch Detailmodelle, sondern über die Variationspunkte (VP) als Konfigurations- und Nachweismechanik abgebildet. Tabelle 25 stellt die VP-Definitionen in steckbriefartiger Form bereit (DP-Scope, Kerninhalt, Impact-Layer, Standard-/Anker) und verweist als Index auf die detaillierten VP-Steckbriefe im Anhang (vgl. Anhang F). So wird die Verbindung zwischen motivatorischen Aussagen (Kapitel 9.3.2), capability-basierter Verdichtung (Kapitel 9.3.3 und 9.3.4) und operativer Ausprägung systematisch geschlossen.

Die dazugehörige Abbildung (Operative Verortungs- und Evidenzkarte) dient als Navigations- und Nachweisartefakt: Im Zentrum steht die Basissicht S4; die umliegenden Verweise bündeln die operativen Evidenzanker (DP-Crosswalk, Interface-Contracts, DO/EV-Katalog, Zonen-/Integrationssicht, Cross-Layer-Mapping, VP-Katalog/Anhänge). Dadurch wird die operative Umsetzbarkeit der REA in Kapitel 9.3 nicht durch Wiederholung, sondern durch referenzierte und konsistente Verortung sichtbar. Diese bildet zugleich die Grundlage für Abschnitt 9.3.6, der die Cross-Layer-Traceability exemplarisch entlang der Kette

Requirement → Capability → DP/AP/DO → KPI/Nachweise⁴⁴

schließt und prüfbar macht.

⁴⁴ Die hier adressierten Key Performance Indicators (KPI) und operativen Nachweise werden bewusst nur rudimentär abgebildet. Gegenstand der Arbeit ist primär die architektonische Strukturierung der Referenz-Enterprise-Architektur (REA) einschließlich der Domänen-, Applikations- und Datenlogik sowie deren Traceability über normierte Registerartefakte. Eine vollständige, organisations- und betriebsspezifische Ausgestaltung von KPI-Systemen (z.B. Zielwerte, Messmethoden, Schwellen, operative Dashboards) würde eine kontextabhängige Operationalisierung voraussetzen und den Rahmen einer referenzorientierten Architekturarbeit überschreiten. Die REA schafft die notwendigen strukturellen Voraussetzungen (Evidenzanker, Daten- und Ereignisobjekte, Kontraktunkte), auf deren Basis KPI- und Nachweissysteme in nachgelagerten Arbeiten konsistent abgeleitet und konkretisiert werden können.

9.3.6 Cross-Layer-Traceability: ID-Führung und Evidenzanker

Die in Abschnitt 9.3 bisher zusammengefassten Merkmale der REA – der strategisch-motivatorische Rahmen in Kapitel 9.3.2, die Capability-Verdichtung in Kapitel 9.3.3 sowie Variantenbetrachtung in 9.3.4 – erfordern, dass alle Aussagen prüfbar auf operative Architekturbausteine zurückgeführt werden können. Cross-Layer-Traceability bedeutet in dieser Arbeit deshalb eine durchgängige ID-Führung, die Anforderungen (inkl. Constraints) systematisch mit Capabilities, Domänenprozessen (DP-IDs), Applikationsbausteinen (AP-IDs) und Variationspunkten (VP-IDs) (vgl. Anhang C – H) verbindet. Dadurch lässt sich die Anforderungsabdeckung je Szenario entlang der Kette:

Requirement - Constraint (Anforderung) → Capability → Prozess → IT-Baustein

reproduzierbar prüfen und als „Chain of Evidence“ in Evaluation und Dokumentation absichern. Dieser Abschnitt beantwortet mit Hilfe eines Modells (Abbildung 51 und Tabelle 41) die Frage:

Wo genau ist die Traceability (Nachvollziehbarkeit) der finalen REA verankert – also über welche Register, Tabellen und Steckbriefe wird die oben genannte ID-Kette vollständig operationalisiert, ohne operative Detail-Views erneut darzustellen?

Die Mechanik der Traceability wurde bereits im Szenariokontext exemplarisch hergeleitet und demonstriert: Kapitel 9.2.2 strukturiert und bewertet die szenario-abgeleiteten Anforderungen über eine Motivation-View (Abbildung 35). Die beiden Layered-Views (Abbildung 36 und Abbildung 37) zeigen exemplarisch, wie die Traceability-Kette bis auf Prozess-, Applikations- und Datenobjektebene geführt wird. Diese Abbildungen belegen methodisch, wie Traceability funktioniert. Abschnitt (9.3.6) konzentriert sich konsolidierend darauf, wo die vollständige Operationalisierung der Traceability im Artefakt verankert ist – etwa in Register-/Steckbriefartefakten, Crosswalks, Kontrakten, Daten-/Eventkataloge, VP-Katalog inkl. Nachweise/KPIs.

Um die Cross-Layer-Traceability im finalen Artefaktstand (S4 als Basissicht) ohne Wiederholung operativer Detailmodelle transparent zu machen, dient eine „Deliverable-Kette“ als Evidenzpfad. Die Darstellung ordnet die drei Anforderungseinstiege (A-Anforderungen, B-Anforderungen sowie szenario-/leitplankenbezogene R-IDs) den Artefakten zu, die die Zuordnung zu Capabilities, DP/AP/DO und die mess- sowie auditierbare Nachweisführung ermöglichen.

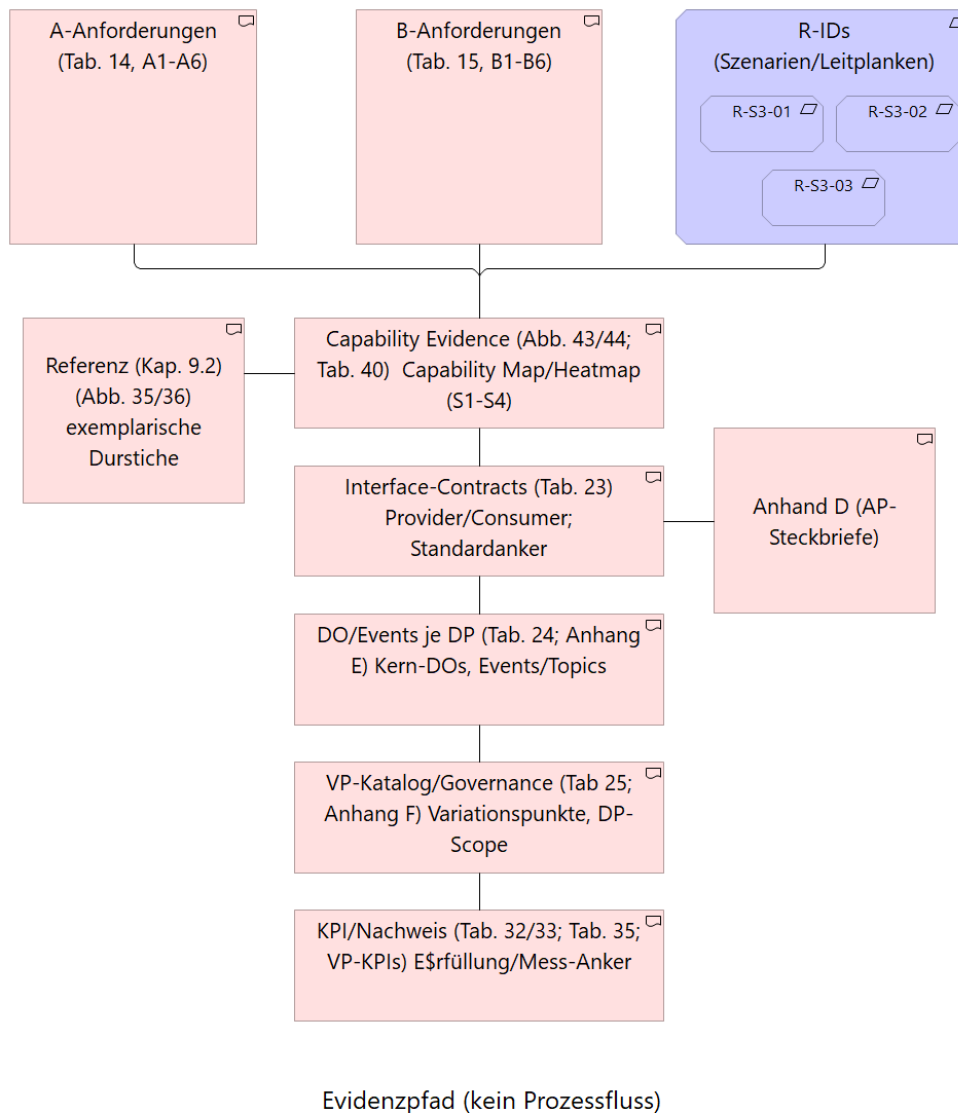


Abbildung 52: Traceability-Backbone – Deliverable-Kette (S4)

Abbildung 51 ist als Evidenzpfad zu lesen, nicht als Prozessfluss: Sie beginnt mit den funktionalen Anforderungen A.1–A.6 (Tabelle 14), den nicht-funktionalen Anforderungen B.1–B.6 (Tabelle 15) und den im Szenario S3 identifizierten leitenden R-Anforderungen (u.a. Trennung Reservierung/Buchung, Einsatz eines Datenbrokers sowie Rollen- und Zonenanforderungen; vgl. Abbildung 35). Die Überführung in Capabilities wird über die Capability-Sicht (Abbildung 44) und die Szenario-bezogene Heatmap (Tabelle 40) nachvollziehbar gemacht. Die operative Verortung geschieht anschließend DP-basiert über den Crosswalk DP (Tabelle 22), der jedem DP die zugehörigen Business-/Application-Bausteine sowie Kernanker (Standards/Daten) zuweist. Die Schnittstellen-Operationalisierung wird über die Interface-Contracts (Tabelle 23) konkretisiert, die je DP Application Services, Provider/Consumer-Applikationen, Schnittstellentyp (Sync/Event/Batch), Kern-DO/Events und Standardanker konsolidieren. Das Daten- und Ereignismodell sichert die semantische Kohärenz je DP (Tabelle 24) ab; das Modell dokumentiert Kern-Datenobjekte und Events/Topics als Grundlage für Publikationslogik, Monitoring/Observability sowie Testfallableitung. Variabilität und Governance werden über die Variations-

punkte (Tabelle 25 und Anhang F) verortet, einschließlich standardbezogener Anker, Integrations-/Security-Leitplanken und Nachweisen/KPIs. Die Nachweisführung ist in den Szenario-bezogenen Walkthroughs bzw. Playthroughs (Tabelle 35) operationalisiert, etwa über Interface-Completeness, RACI-Consistency und Segmentierungsregeln („No-Go“-Kopplungen). Diese sind methodisch in das Evaluationsdesign eingebettet.

Während Abbildung 51 die Register- und Evidenzanker der Traceability verortet, zeigt die nachfolgende Coverage-Matrix (Tabelle 41) explizit die Abdeckung der Anforderungen auf Capability-Ebene. Sie macht für den Zielzustand S4 nachvollziehbar, welche Capabilities welche Anforderungsgruppen realisieren. Dabei wird sichergestellt, dass jede Anforderung mindestens einer Capability zugeordnet ist (Requirement-Coverage) und jede Capability mindestens einer Anforderung/Leitplanke entspricht (Capability-Rationale) (vgl. Tabelle 41).

Die Kombination aus Abbildung 51 (Evidenzpfad/Artefaktverortung) und Tabelle 41 sichert eine vollständige, nachvollziehbare und darstellungsökonomische Cross-Layer-Traceability im Konsolidierungsteil der REA. Die operative Detailtiefe bleibt in den prozess-, schnittstellen- und datenbezogenen Registern (Tabelle 22–Tabelle 25) und den Walkthrough- bzw. KPI-Nachweisen (Tabelle 35) verankert. Dieser Abschnitt (9.3.6) macht die Belegstruktur explizit und unterstützt so die Prüfbarkeit der REA-Merkmale als Gesamtsicht.

9.3.7 Modelle (kanonisch) als beispielhafte Ableitung aus der REA

Die entwickelte und evaluierte REA wird mithilfe von Registerartefakten und Steckbriefkorpora umgesetzt (vgl. Abbildung 55). Die nachfolgend vorgestellten Modelle – angelehnt an kanonische Modellbildung – dienen nicht als zusätzliche Festlegungsebene, sondern veranschaulichen die evaluierte REA exemplarisch. Sie bieten Index-Sichten (nach dem Prinzip „Verortung statt Wiederholung“), verdichten die bereits normierten Inhalte und erleichtern die Navigation durch drei komplementäre Perspektiven.

Die Verdichtung erfolgt in drei Sichten, die jeweils eine zentrale Architekturfrage klärt:

- (i) Was wird domänenübergreifend semantisch ausgetauscht (Datenmodell)?
- (ii) Wer realisiert diesen Austausch technisch (Applikationsmodell)?
- (iii) Wo ist die Zielkonfiguration (S4) verortet (Bebauungsplan)?

Die folgenden Abbildungen dienen als Beispielartefakte und lassen sich organisationspezifisch anpassen, solange die in den Tabellen (Tabelle 22–Tabelle 25) definierten Integrations- und Semantikprinzipien (ID-Führung, Kontraktlogik, Kern-DO/Events, VP-Leitplanken) unverändert bleiben.

Abgeleitetes kanonisches Datenmodell als semantischer Integrationsanker

Zur Auflösung der in Kapitel 5.2 diagnostizierten semantischen Heterogenität zwischen determinierten Linienverkehrssystemen (AO) und dynamischen On-Demand-Strukturen (BO) konstituiert die REA ein kanonisches Datenmodell. Dieses Modell fungiert nicht als redundante Speicherebene, sondern als logisches Meta-Schema, welches die Interoperabilität über die vier definierten Hauptdomänen hinweg gewährleistet. Abbildung 53 visualisiert die korrespondierenden Datenobjekte (DO) und deren relationale Interdependenzen gemäß den Steckbriefen in Anhang E.

Im Fundament des Modells, der Domäne Planung und Ressourceneinsatz (DP-I), wird die operative Leistungserbringung durch das zentrale Datenobjekt DO-24 (Fahrtausführungsdaten) abstrahiert. Dieses Objekt dient als polymorpher Anker: Es repräsentiert die logische Fahrtinstanz unabhängig davon, ob diese deterministisch durch DO-8 (Fahrplandaten) und DO-4 (Liniendaten) im AO-Kontext definiert oder stochastisch innerhalb von DO-6 (Stadtplanungsdaten/Service-Zones) im BO-Kontext verortet wird. Durch diese Abstraktion wird die nachgelagerte Vertriebslogik von der spezifischen Erbrin-

gungsart (Linienbus vs. On-Demand-Shuttle) entkoppelt. Die Ressourcenverfügbarkeit wird dabei restriktiv durch DO-102 (Kapazitätsdaten) gesteuert.

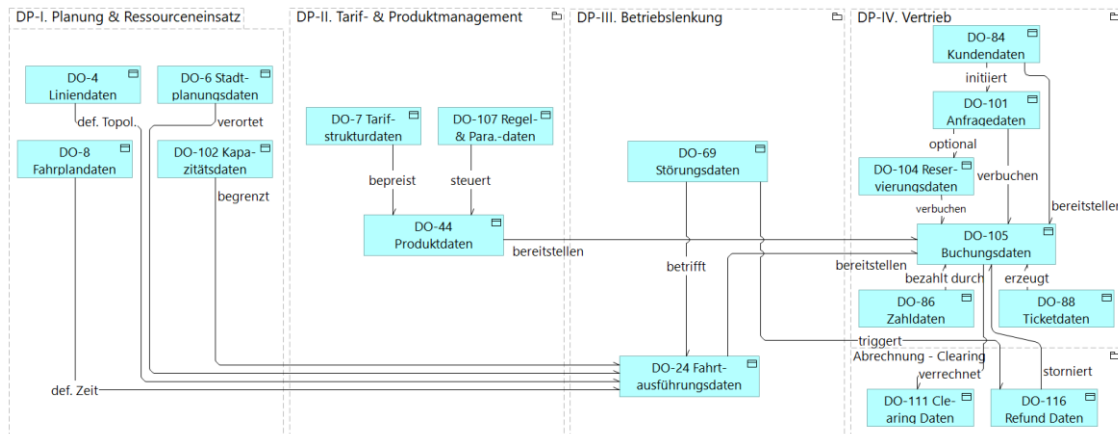


Abbildung 53: Kanonisches Datenmodell

Die Domäne Tarif- und Produktmanagement (DP-II) definiert mit DO-44 (Produktdaten) das verkaufsfähige Artefakt. Das Modell trennt strikt zwischen dem kaufmännischen Produkt (Sales Item) und der operativen Durchführung. DO-7 (Tarifstrukturdaten) bestimmt die Preisbildung und die Gültigkeit des Produkts, während DO-107 (Regel- und Parametrisierungsdaten) die Rahmenbedingungen etwa für Entitlements (Berechtigungen) setzt. Diese Modularisierung ermöglicht die Bündelung heterogener Mobilitätsleistungen in einem einheitlichen Produktmodell.

Die Buchung bildet die zentrale Integrationsklammer in der Domäne Vertrieb (DP-IV). Das Datenobjekt DO-105 (Buchungsdaten) verbindet als persistente Integrationsklammer bzw. „Integration Bracket“ die drei Dimensionen der Transaktion:

4. Wer? Die Referenz auf DO-84 (Kundendaten) identifiziert den Vertragspartner.
5. Was? Die Referenz auf DO-44 (Produktdaten) legt die kommerziellen Konditionen fest.
6. Wofür? DO-24 (Fahrtausführungsdaten) sichert die operative Beförderungsleistung.

Der Prozessfluss beginnt mit DO-101 (Anfragedaten), was den Kundenwunsch („Journey Request“) erfasst, und endet nach erfolgreicher Buchung mit der Erzeugung von DO-88 (Ticketdaten) als Berechtigungsnachweis. Optional kann eine temporäre Ressourcen-blockierung über DO-104 (Reservierungsdaten) vorgeschaltet werden.

Den Abschluss der Wertschöpfungskette bilden in DP-III und DP-IV die Integritätssicherung und das Clearing durch die Validierung der Leistungserbringung. Das Datenobjekt DO-111 (Clearing-Daten) aggregiert die vertragliche Forderung (DO-105 Buchungsdaten) und den monetären Fluss (DO-86 Zahldaten) und validiert diese gegen den operativen Status der Fahrt (DO-24). Erst wenn die in der Domäne Betriebslenkung (DP-III) überwachte Leistungserbringung bestätigt ist und keine invalidierenden Datenobjekte, konkret Störungsdaten (DO-69) vorliegen, erfolgt die finale Freigabe für das Settlement. Dies stellt die Revenue Integrity in einem multipolaren Partner-Ökosystem sicher.

Die in Abbildung 52 dargestellte Modellstruktur wird durch Tabelle 42 ergänzt; diese strukturiert die Entitäten, Kernattribute und den Bezug zu den in dieser Arbeit verwendeten Steckbriefartefakten (Anhang D und E). Die tabellarische Spezifikation stellt die Konsistenz zwischen Modell und Steckbriefkorpus sicher und erhöht die Nachvollziehbarkeit sowie die Reproduzierbarkeit der Modellannahmen.

Tabelle 42: Attribut-Spezifikation und Traceability

Entität	Kern-Attribute (TopAttribute)	Referenz ⁴⁵
Kunde (Customer)	Kundenkonto_ID, Präferenzen, Zahlungsprofil	DO-84
Fahrtanfrage/ Kundenwunsch (Journey Request)	Request_ID, Origin/Destination (Geo), Zeit- wunsch	DO-101/DP-16
Angebot (Offer)	Offer_ID, Reisezeit, Preis-Indikator, Status	DO-101
Buchung (Booking)	Booking_ID, Timestamp, Status (aktiv/storno)	DO-105/DP-17
Reiseetappe (Journey Leg)	Leg_ID, Soll/Ist-Abgleich, Tour_ID vs. Fahrt_ID	DO-8/DO-105
Zahlung (Payment)	Transaction_ID, Payment_Status, Betrag	DP-19

Das vorliegende Datenmodell zeigt, dass die Integration von AO und BO weniger eine Frage der Schnittstellentechnik als der Datensemantik ist. Durch die Einführung von DO-24 (Fahrtausführungsdaten) als Abstraktionsschicht und DO-105 (Buchungsdaten) als Integrationsklammer wird eine lückenlose Nachverfolgbarkeit (Traceability) vom initialen Kundenwunsch bis zur finalen Verrechnung (Clearing) realisiert, ohne die Autonomie der operativen Subsysteme zu verletzen.

Abgeleitetes Applikationsmodell als operative Integrationssicht

Das Applikationsmodell ergänzt das kanonische Datenmodell, indem es die Verantwortlichkeiten strukturell zuordnet. Es zeigt, welche Applikationskomponenten (AP) gemäß Anhang D als Provider oder Consumer agieren, um domänenübergreifende Geschäftsprozesse zu ermöglichen. Die Architektur folgt hierbei dem Prinzip der losen Kopplung.

In der Domäne Planung und Ressourceneinsatz (DP-I) bildet sich eine strikte, unidirektionale Versorgungskette („Supply Chain of Data“) ab. Ausgehend von der strategischen Netzplanung in AP-2 fließen topologische und reglementarische Vorgaben (DO-4, DO-20) an das Netz- und Fahrplanungssystem AP-3. Hier erfolgt die Bifurkation in die statische Fahrplanwelt (AO) und die Definition von Service-Zones (DO-6) für den Bedarfs-

⁴⁵ Vgl. Anhang E.

verkehr (BO). Diese Ergebnisse kaskadieren über die Umlaufplanung (AP-4) bis zur Dienstplanung (AP-5), bevor das Ergebnis als verbindliches Soll-Gerüst an die operative Ebene übergeben werden.

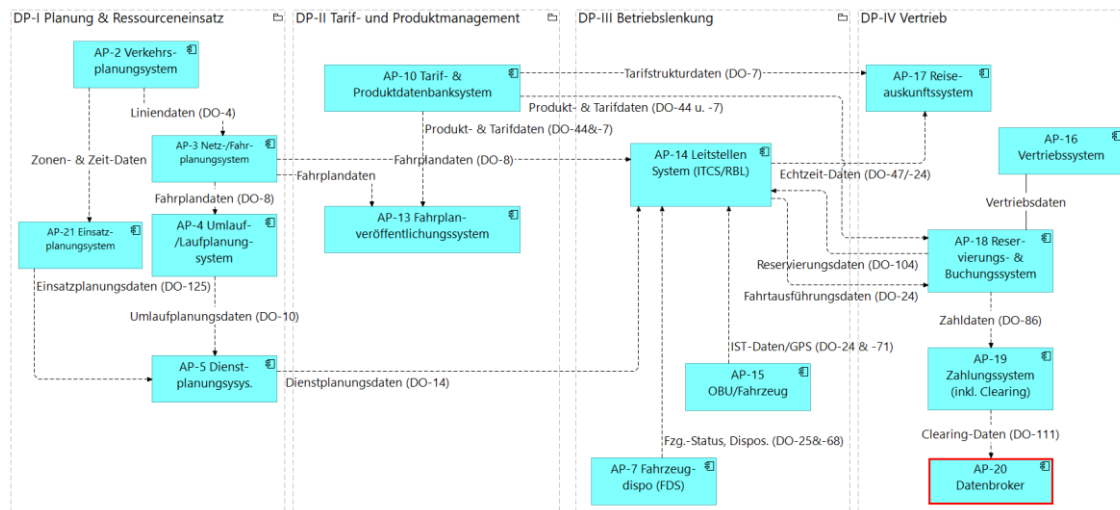


Abbildung 54: Applikationsmodell zum Datenmodell

Die Domäne Tarif- und Produktmanagement (DP-II) dient als isolierte „Single Source of Truth“ für die kommerzielle Logik. Das System AP-10 (TPDB) entkoppelt die Produktdefinition (Isolation der Produktstammdaten) vollständig von der operativen Dynamik. Die Produkt- und Tarifdaten (DO-44, DO-7) werden als Stammdaten an die Vertriebssysteme übermittelt. Diese Architektur verhindert, dass operative Störungen die Konsistenz der Verkaufsangebote beeinträchtigen.

Der zentrale Knotenpunkt bzw. operativer Konvergenzpunkt der Architektur ist das Leitstellensystem AP-14 (ITCS bzw. RBL) in der Domäne Betriebslenkung (DP-III). Es verbindet das theoretische Planungsmodell (aus DP-I) mit der physischen Realität, die durch Telemetriedaten (DO-71, DO-24) der Fahrzeuge (AP-15) repräsentiert wird. Für den Bedarfsverkehr (BO) erweitert sich die Rolle von AP-14 zum Orchestrator: Es wandelt eingehende Buchungsanforderungen mittels DO-68 (Dispatch Order) (siehe Applikationsmodell: AP-7) in Fahraufträge für die Fahrzeugdisposition (AP-7) um.

Die bedeutendste Innovation des Modells zeigt sich im Vertrieb (DP-IV) und dessen Verknüpfung mit dem Betrieb. Während klassische Linienauskünfte (AP-17) lediglich statische Fahrplandaten (DO-8) aus AP-3 nutzen, erfordert die Integration von On-Demand-Angeboten einen dynamischen „Availability Loop“:

1. Prüfung (Pre-Booking): Die Reiseauskunft (AP-17) startet über AS-17-A (OJP-Check) eine Echtzeit-Abfrage beim operativen System (AP-14), um die Verfügbarkeit in den Service-Zones zu prüfen.
2. Buchung (Commit): Das Buchungssystem (AP-18) reserviert über AS-18-A die Resource verbindlich im Betrieb (AP-14), bevor die Transaktion kaufmännisch abgeschlossen wird.

Die Tabelle 43 dient der Verortung und verdeutlicht die Schichtung sowie die Entkopplungslogik. Sie ersetzt jedoch keine Spezifikation von Schnittstellen- oder Datenobjekten, die in den einschlägigen Registern und Steckbriefen dokumentiert sind.

Tabelle 43: Schichtung des (kanonischen) Applikationsmodells

Schicht	AP	Funktion im kanonischen Modell	Referenz
Interaktions- ebene (Front- end/Customer Interface)	AP-16, AP-17	Primäre Kundenschnittstelle („Single Customer Interface“): Orchestrierung von Reiseinformation und Reiseplanung; keine operative Detailkenntnis der Produktionslogik erforderlich.	Anhang D (AP-16, AP-17)
Transaktions- ebene (Busi- ness Logic/ Transaktions- kern)	AP-18	Transaktionale Klammer über die Reisekette; Sicherung der logischen Trennung unverbindlicher Auskunft vs. verbindlicher Buchung; Nutzung der Integrationsschicht statt direkter Quellsystemkopplungen.	Anhang D (AP-18); Anhang G (CAP-VER-01)
Integrations- schicht (The Hub)	AP-20	Domänenübergreifender Kopplungspunkt: Protokoll-/Formatheterogenität kapseln, Partner-/Legacy-Anbindungen kanalisieren, Entkopplung von AP-18 gegenüber der Produktionslandschaft; operative Umsetzung der semantischen Vereinheitlichung. <i>Im Modell rot markiert.</i>	Anhang D (AP-20); Anhang F (VP-INT-02)
Produktionssys- tem/System-of- Record-Ebene (AO-Plan)	AP-3	Planungs-/Soll-Quellsysteme (AO): Bereitstellung planbasierter Produktionsdaten in Richtung Integration/Transaktion.	Anhang D (AP-3)
Produktionssys- tem/System-of- Record-Ebene (Betriebslen- kung/ OT-nah)	AP-14 <i>(ggf. in Kopp- lung mit AP- 15)</i>	Leitstellen-/ITCS-Quellsysteme: Echtzeit-/Betriebszustände und operative Steuerung als Input für Integration, Fahrgastinformation und nachgelagerte Verarbeitung.	Anhang D (AP-14; ggf. AP-15)
Unterstützungs- ebene (Finanz-/ Abrechnungs- kern)	AP-19	Zahlungs-, Abrechnungs- und Clearing-Backend: Verarbeitung transaktionaler Ergebnisse aus AP-18 bis zur Abrechnung/Settlement (DP-19/DP-20).	Anhang D (AP-19)

Den Abschluss des Modells bildet der gezielte Datenaustausch über den Datenbroker (AP-20). Nach erfolgreicher Ausführung und Bezahlung (AP-19) erhalten die externen Partner die aggregierten Clearing-Datensätze (DO-111). So verbleiben sensible operative Rohdaten in der geschützten Zone (DP-III), während lediglich abrechnungsrelevante Resultate die Systemgrenze überschreiten.

Tabelle 44: Schichtung und domänenbasierte Verortung

Domäne	Schicht-Bebauungslogik	AP	Funktion im Bebauungsplan	Referenz (Traceability)
DP-I Planung & Ressourcen Einsatz	Strategische Planungs- und Ressourcenebene	AP-2, AP-3, AP-4, AP-5, AP-21	Herstellung und Konsolidierung des Planungs-/Ressourcenrahmens AO- & BO-Leistungserstellung; Bereitstellung planbasierter Inputs für Betrieb & Vertrieb.	Anhang C (DP-I); Anhang D (AP-1...AP-9)
DP-II Tarif- u. Produktmanagement	Kommerzielle Regel-/Katalogebene	AP-10 AP-13	Verwaltung der Tarif-/Produktlogiken & kommerziellen Parameter als Bindeglied zwischen Planung & transaktionalem Vertrieb; Grundlage: Angebotsbildung.	Anhang C (DP-II); Anhang D (AP-10); Anhang E (DO-101)
DP-III Betriebslenkung	Operative Ausführung & Echtzeitsteuerung (OT-nah)	AP-7, AP-14, AP-15	Führungssysteme der operativen Durchführung: Bereitstellung/Verarbeitung Ist-Daten & Echtzeitzuständen; Aussteuerung Echtzeit-Sichten an Fahrgastinformat. & Integrationslayer.	Anhang C (DP-III); Anhang D (AP-11/AP-13/AP-14/AP-15)
DP-IV Vertrieb (Order-to-Cash)	Transaktionsebene (Kundenabschluss)	AP-16, AP-17, AP-18, AP-19	Kundenzugang (Auskunft/Vertrieb), transaktionale Klammer (Reservierung/Buchung) sowie Zahlungs-/Clearing-Abwicklung bis Settlement; Sicherung Integrität im Domänenkontext.	Anhang C (DP-IV); Anhang D (AP-12/AP-16 bis AP-19)
Querschnitt Integration/ Daten Broker (Rot markiert)	Horizontaler Integrationslayer (Kanalisation)	AP-20 (im Bereich Vertrieb)	Integrationsanker (kanonisch) zur kontrollierten domänenübergreifenden Kopplung (Protokoll-/Formattransformation, Partner-/Legacy Anbindung, Interdomänenflüsse) in Übereinstimmung mit dem Datenmodell & Integrationsvorgaben.	Anhang D (AP-20); Anhang F (VP-INT-03); Verweis auf Datenmodell

Das Tarif- und Produktmanagement (DP-II) zeigt eine hybride Struktur (grün). Das zentrale System AP-10 (TPDB), die exponierte Schnittstelle AS-10-C sowie die dort verorteten Datenobjekte Produkt (DO-44) und Tarif (DO-7) sind für beide Verkehrsarten nutzbar. Verkehrsartenspezifische Differenzierungen fehlen in dieser Darstellung.

In der Betriebslenkung (DP-III) im operativen Betrieb treffen hybride und bedarfsorientierte Elemente aufeinander. Das Leitstellensystem AP-14 (ITCS) bildet den hybriden

Kern (grün) und stellt über AS-14-A die Datenobjekte Fahrt (DO-24) und Ortung (DO-71) bereit. Die Dispositionskomponente AP-7 (grün) und die Schnittstelle AS-07-A verwalten das Datenobjekt DO-68 (Dispatch Order). Angebotsorientierte Elemente (blau) sind auf dieser Ebene im Modell nicht abgebildet.

Der Vertrieb (DP-IV) basiert auf hybriden Plattformen. Das Buchungssystem (AP-18) und der Datenbroker (AP-20) sowie die Datenobjekte Buchung (DO-105) und Clearing (DO-111) sind grün kodiert. Die Anforderungen des On-Demand-Verkehrs spiegeln sich in den orange markierten Elementen der Reservierung wider: Die Schnittstelle AS-18-A und das Datenobjekt DO-104 stellen bedarfsorientierte Erweiterungen dar, die parallel zum hybriden Booking-Commit existieren.

Das Modell (Bebauungsplan) zeigt, dass die Zielarchitektur auf einer hybriden Basis (grün) beruht, die vor allem in den Applikationen und zentralen Datenobjekten dominiert. In den Randbereichen der Planung (blau) sowie der operativen Disposition und Reservierung (orange) bleiben jedoch spezifische, nicht integrierte Elemente erhalten/ wurden spezifische Ausprägungen erhalten, die nicht in die hybriden Artefakte integriert wurden.

Fazit über die drei Modelle

Die drei Modelle verdichten die evaluierte REA und dienen als Index-Sichten für Kommunikation, Review und Orientierung: Das kanonische Datenmodell definiert die semantische Domänenkopplung über DO-Referenzpunkte, das kanonische Applikationsmodell ordnet AP-Kernkomponenten zu, und der Bebauungsplan verbindet beide in einer zonal abgesicherten Zielverortung (S4). Die normative Verbindlichkeit bleibt in den Registerartefakten (vgl. Abbildung 55) und Steckbriefen bestehen. Die kanonischen Modelle verbessern jedoch deren Lesbarkeit und Navigierbarkeit als Präsentationsschicht beispielhaft.

9.3.8 Zwischenfazit

Das konsolidierte Gesamtmodell vereint die in Phase 1 und Phase 2 evaluierten Befunde zu einer finalen, instanziierten Referenzkonfiguration der REA (S4 als Basissicht). Abbildung 56 fasst die Eigenschaften der REA im Endzustand zu einem kompakten Profil zusammen und ordnet ihnen die zentralen, evidenzbasierten Nachweise zu. So wird die im Text erläuterte Erfüllung der Qualitätskriterien klar und nachvollziehbar.

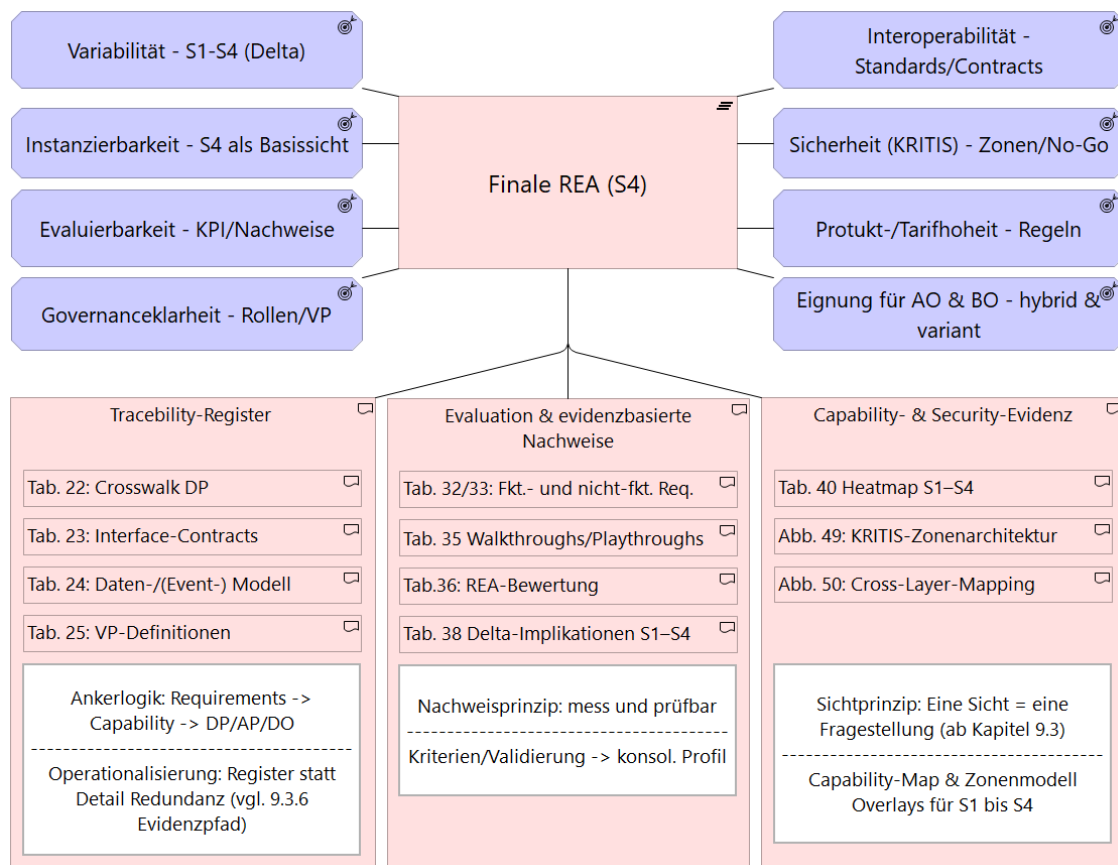


Abbildung 56: Evidenzbasierte Nachweisanker der finalen REA (S4)

Im Konsolidierungsteil wird die Zuordnung der Nachweisanker konkret umgesetzt: Abbildung 55 zeigt, über welche Register-, Tabellen- und Steckbriefartefakte die ID-Kette – von Anforderungen/Constraints über Capabilities bis in DP/AP/DO und KPI/Nachweise – geführt wird. Die Requirement-Capability-Coverage-Tabelle (S4) (Tabelle 41) dokumentiert diese Abdeckung explizit. Damit wird Traceability nicht nur anhand szenariospezifischer Beispiele (Kapitel 9.2) belegt, sondern als umfassender Nachweisrahmen für den finalen Artefaktstand (S4) etabliert.

In der Endfassung zeichnet sich die REA insbesondere durch folgende Eigenschaften aus: Variabilität und Instanzierbarkeit (S4 als Referenz-Zielbild; S1–S3 als Delta-Ausprägungen), Interoperabilität (standardsensible Schnittstellen- und Event-Governance), Sicherheit (KRITIS-konforme Zonierung und segmentierte Integrationsarchitektur), Evaluierbarkeit (KPI-gestützte Nachweisführung), Governanceklarheit (Rollen-/Verantwortungsmodelle), Produkt-/Tarifhoheit (konsistente Katalog- und Angebotsobjekte) sowie die konsistente Eignung für AO- und BO-Ausprägungen. Die Nachweis- und Traceability-Artefakte machen diese Merkmale samt ihrer Abdeckung transparent. Dazu gehören vor allem die methodischen Nachweistabellen (z.B. Tabelle 30 als Index der Lines of Evidence), die szenario- und evaluierungsbezogenen Evidenzen (u.a. Tabelle 35, Tabelle 36 und Tabelle 38) sowie die in den Artefaktkern eingebetteten Traceability-Register (Tabelle 22–Tabelle 25).

9.4 Methodische Fundierung der REA Merkmale

Die REA-Merkmale sind in Phase 1 (Evaluations-Episode I. bis VII.) methodisch doppelt rückgebunden:

- a. normativ über etablierte Rahmenwerke (TOGAF/ArchiMate und ITVU/VDV),
- b. empirisch über naturalistische Episoden (Kapitel 8).

In Phase 2 (Evaluations-Episode VIII. Bis IX.) sind die Merkmale über normative Rahmenwerke (vorrangig VDV) und durch 2 Episoden empirisch artifiziell bestätigt.

Entsprechend weist Tabelle 30 die Kohärenz (Deduktion) und Nützlichkeit/Passung (Induktion) kriterienbezogen nach; die Kriterien stammen aus Tabelle 3. Dank dieser methodischen Bifokalität genügt die REA sowohl wissenschaftlichen Qualitätsmaßstäben als auch praktischer Anwendungstauglichkeit.

Die Eigenschaften (Coverage/Traceability, Integrationsfähigkeit, RACI-Kohärenz, Segmentierungsregeln) wurden im Sinne einer summativen und artifiziellen FEDS-Episode operationalisiert (Kapitel 8.2, 8.3).

9.5 Bedrohungen der Validität und Gegenmaßnahmen

Die Validitätssicherungen dieser Arbeit sind entlang der in Tabelle 3 (Kapitel 3.3.4) formalisierten Kriterien (u. a. Rahmenwerke, Empiriegrad, Evaluationslogik) und der in Tabelle 30 (Kapitel 7.5.2) Traceability-basiert dokumentierten Nachweise organisiert. Methodisch sind die Build-Evaluate-Schleifen über FEDS (Vier-Schritt-Prozess) geplant; die hybride Vorgehensweise (Deduktion und Induktion) ist explizit belegt.

Aus der Szenario-Analyse resultieren Restrisiken, die aus laborhaften Playthroughs (artifizielles Setting) und Szenario-bedingter Kontextbindung herrühren. Hierfür wurden Gegenmaßnahmen ergriffen, insbesondere Variantenabdeckung (S1–S4), Rollen-/Größenklassen-Simulation und triangulierte Expertenurteile (Kapitel 8.3).

Die folgende Analyse fasst potenzielle Bedrohungen/Threats der Validität zusammen und beschreibt die implementierten Maßnahmen zur Reduktion negativer Auswirkungen. Sie knüpft an die methodische Einordnung (Tabelle 3) und die Traceability-basierte Evidenz wie in Kapitel 3.3.4 und Kapitel 7.5.2 gefordert.

(1) Konstruktvalidität – Gefahr der Übernormierung

Threat: Aus einer zu starken Orientierung an Rahmenwerken (z.B. TOGAF/ArchiMate, domänenspezifisch ITVU/VDV) könnte eine Übernormierung des Artefakts resultieren.

Mitigation: Einer Übernormierung wird durch induktive Schleifen mit Evaluationsepisoden entgegengewirkt, die Anpassungen am Modell erzwingen (Build–Evaluate): Die Forschungsarbeit verankert Episoden formativ sowie naturalistisch und koppelt sie iterativ an den Entwurf zurück (Kapitel 7.5.5, Kapitel 8.1–8.2, Episoden V–VIII). So werden Benennungen, Zuschnitte und Schnittstellen empirisch justiert, anstatt ausschließlich

top-down übernommen zu werden. Tabelle 30 dokumentiert diese Ko-Evidenz und ihre Rückwirkungen (Traceability).

Die hybride REAM-Logik (Deduktion und Induktion) macht die Kopplung von Rahmenwerk-Leitplanken mit naturalistischen Episoden methodisch verpflichtend; FEDS strukturiert die Schleifen. (Kapitel 3.3.4, Kapitel 2.8)

(2) Interne Validität – Gefahr von Scheinkorrelationen in der Evaluation

Threat: In der Evaluationsphase könnten Scheinkorrelationen auftreten, wenn Auswahl, Design und Auswertung der Episoden nicht systematisch gesteuert sind.

Mitigation: Die Dissertation nutzt FEDS als Vier-Schritt-Prozess (Ziele, Strategie(n), zu prüfende Eigenschaften, Episoden-Design) und verankert die Episoden entlang der Dimensionen formativ und summativ sowie naturalistisch und künstlich (Kapitel 2.8, Kapitel 8.1–8.2). Damit werden Evaluationsobjekte, -kriterien und -settings vorab festgelegt und die Build-Evaluate-Schleifen methodisch abgesichert [52, S. 77ff.].

(3) Externe Validität – Gefahr begrenzter Generalisierbarkeit

Threat: Eine allein fallbasierte Ausprägung könnte die Generalisierbarkeit der Referenz-EA einschränken.

Mitigation: Die Arbeit verzahnt

- (i) normative Referenzen aus der ÖPNV-Domäne (ITVU, VDV, Kapitel 6.1–6.2) mit
- (ii) Triangulation über Fallstudien/Episoden (Kapitel 6.3, Kapitel 8.2, insbesondere Episoden V–VIII).

Dieser Dual-Bezug – Domänenstandard und Realwelt-Evidenz – wird in Tabelle 30 explizit nachgewiesen (Deduktions- und Induktionsspalten) und erhöht die externe Validität der Artefaktbausteine.

(4) Reliabilität – Gefahr inkonsistenter Ableitungen

Threat: Ohne formale Rückverfolgbarkeit drohen inkonsistente Ableitungen zwischen Anforderungen, Entwurfsentscheidungen und Evaluationsergebnissen.

Mitigation: Tabelle 30 fungiert als Rückverfolgungs-/Nachweismatrix (Traceability) und markiert zu jedem Kriterium präzise Belegstellen (Kapitel, Tabellen, Abbildungen). Damit werden methodische Entscheidungen und Evidenzen transparent dokumentiert und replizierbar verknüpft.

9.6 Erkenntnisse

Die Evaluationen der Referenz-Enterprise-Architektur (REA) zeigt u.a. das klassische ÖPNV-Unternehmen bei der Integration bedarfsorientierter Mobilitätsangebote vor einer

strategisch sowie operativ weitreichenden Transformation stehen. Die im Rahmen der Episoden I.–VII. gewonnenen Einsichten sowie die Szenario-übergreifenden Befunde der Phase 2 (Episoden VIII. und IX.) belegen, dass die entwickelte REA ein konsistentes, skalierbares und variantenfähiges Architekturrahmenwerk bereitstellt, das den Anforderungen hybrider Mobilitätslogiken gerecht wird. Die nachfolgende Tabelle 42 fasst die zentralen Einsichten systematisch zusammen; diese bilden die Brücke zu den weiterführenden Implikationen in Kapitel 10.

Tabelle 45: Erkenntnisse der Phase 2

Erkenntnis	Kernaussage/Beitrag zur REA
Fähigkeiten und strategische Integration	ÖPNV-Unternehmen müssen gezielt digitale Plattformkompetenzen, datenbasierte Steuerungsfähigkeiten und nachhaltigkeitsbezogene Fähigkeiten (Umweltschutz) ausbauen. Die verbesserte Steuerung der „letzten Meile“ erhöht Kundenzahlen und Auslastung, verkürzt Wartezeiten und unterstützt ökologische sowie wirtschaftliche Ziele.
Architektur und Flexibilität	Die serviceorientierte Struktur der REA fördert Modularität, Interoperabilität und Anpassungsfähigkeit. Eine zentrale Integrationsschicht mit standardisierten Schnittstellen gewährleistet technologische Entkopplung und ermöglicht flexible Systemerweiterungen.
Effizienz in der Ressourcenplanung und -nutzung	Die integrierte Verknüpfung von Verkehrsplanung, Betriebsplanung und Disposition führt zu einem effizienteren Ressourceneinsatz. Die REA bietet einen konsistenten Rahmen, um angebots- und bedarfsorientierte Leistungen zu koordinieren.
Vertrieb und Kundenorientierung	Die Architektur erleichtert den Aufbau durchgängiger Mobilitätsplattformen mit flexiblen Buchungs-, Zahlungs- und Abrechnungsmechanismen. Nutzer profitieren von einer nahtlosen Mobilitätserfahrung ohne Medienbrüche.
Capability Map als Entscheidungsinstrument	Die Capability Map unterstützt Unternehmen bei der Priorisierung von Transformationsbedarfen. Durch die farbliche Differenzierung von AO-, BO- und hybriden Fähigkeiten wird strategische Planung operationalisierbar.
Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit	Die Integration von NMS erhöht die Auslastung und führen (direkt/indirekt) zur Reduktion von Individualverkehr und dadurch Emissionen (Umweltschutz). Das steigert gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit. Die REA verbindet ökologische und ökonomische Ziele in einem strukturierten Rahmen.

Die Ergebnisse unterstreichen, dass die REA weit mehr ist als ein technisches Modell. Sie kann als umfassendes Gestaltungsinstrument für digitale und organisatorische Transformation im ÖPNV dienen. Die Architektur verbindet strategische Ziele mit operativen Maßnahmen, sichert konsistente Governance- und Integrationsprinzipien und schafft die Grundlage, hybride Mobilitätsangebote strukturiert zu planen, zu implementieren und zu evaluieren. Diese Erkenntnisse bestätigen die praktische Relevanz der wissenschaftliche fundierten Architektur, die in Kapitel 10 vertieft wird.

10 Einordnung und Implikationen der Ergebnisse

Die vorangegangenen Untersuchungen, Entwürfe und Evaluationen führen zu einem tiefgehenden Verständnis einer systematischen Integration bedarfsorientierter Verkehre in klassische ÖPNV-Unternehmen. Beleuchtet wurden dabei die Implikationen, Herausforderungen und Potenziale einer solchen Integration. Dieses Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse zusammen und reflektiert sie entlang der aufgezeigten strategischen Ziele (siehe strategisch-motivatorische Ebene) der entwickelten REA.

Dabei ist ein weiteres Ziel dieses Kapitels, die Resultate aus allen Phasen des DSR-Zyklus konsistent mit den jeweiligen theoretischen und empirischen Erkenntnissen zusammenzuführen. Schlussfolgerungen und Ausblicke folgen später.

10.1 Einordnung in den Forschungskontext

Die vorliegende Dissertation adressiert ein Forschungsproblem an der Schnittstelle von EAM, ÖPNV und digitaler Mobilitätsinnovation, v.a. durch NMS. Diese Angebote wie Carsharing, E-Scooter, Ridepooling oder Bike-Sharing verändern die Rahmenbedingungen für klassische ÖPNV-Unternehmen in technischer, organisatorischer und strategischer Hinsicht (Kapitel 3.4).

Im Rahmen der gestaltungsorientierten Forschung (Kapitel 2.1) wurde eine Enterprise-Architektur als Design-Artefakt konzipiert, um die herausfordernde Integration neuer Mobilitätsdienste gezielt zu unterstützen. Die literaturgestützte Problemidentifikation (Kapitel 5) zeigte, dass bestehende Modelle – zurückgegriffen wird hier v.a. auf das ITVU-Branchenmodell – hybride Betriebsformen, wie sie durch NMS erforderlich werden, nicht hinreichend unterstützen.

Die entwickelte Referenzarchitektur schließt diese Lücke, indem sie bestehende Strukturen berücksichtigt und neue Fähigkeiten und Prozesse integriert, die für bedarfsorientierte Verkehrsangebote notwendig sind (Kapitel 7). Sie schlägt eine Brücke zwischen traditionell angebotsorientierten Systemen und Mobilitätsdiensten.

Die zentrale Forschungsfrage (siehe Kapitel 1.2) lautete:

Wie kann eine Referenz-Unternehmensarchitektur aussehen, die ÖPNV-Unternehmen bei der Integration von New Mobility Services (i.e.S. bedarfsorientierten Verkehr) und klassisch angebotsorientiertem Verkehr unterstützt?

Der Abgleich mit dem Forschungsstand (Kapitel 4.3) bestätigte eine Lücke in der bisherigen EA-Forschung zum ÖPNV hinsichtlich der Integration von NMS. Die entwickelte Referenzarchitektur schließt diese Lücke, indem sie sowohl strukturell als auch semantisch auf bewährte Architekturmodelle (v.a. ITVU) aufsetzt und diese um dedizierte Komponenten für NMS erweitert. Sie reflektiert domänenspezifische Anforderungen aus Praxis und Wissenschaft und operationalisiert diese in einem tragfähigen Architekturmodell.

(1) Forschungslücke und Relevanz

Die Literaturanalyse in Kapitel 4 offenbart, dass zum Zeitpunkt der Recherche (überprüft im August 2025) der Einsatz von EAM im ÖPNV zwar punktuell diskutiert wird – etwa in Bezug auf IT-Standardisierung oder Plattformarchitekturen (z.B. durch VDV-KA oder regionale Pilotprojekte) –, jedoch eine systematische Auseinandersetzung mit der Integration von NMS in bestehende EA-Strukturen fehlt. Insbesondere hybride Architekturansätze, die klassische und flexible Angebotsformen verbinden, sind in der bisherigen Forschung unterrepräsentiert.

Auch auf methodischer Ebene zeigte sich eine Lücke: Während Referenzprozessmodelle und betriebswirtschaftliche Plattformanalysen vorhanden sind (Kapitel 4.3.3), fehlt eine domänenspezifische Referenzarchitektur für klassische ÖPNV-Unternehmen, die NMS integrieren möchten. Diese Forschungslücke betrifft Theorie wie Praxis.

(2) Ziel und theoretischer Rahmen

Dieses Forschungsvorhaben reagiert auf die unter (1) identifizierte Forschungslücke durch die Entwicklung eines Enterprise-Architekturartefakts, das auf dem ITVU-Branchenmodell aufbaut und dieses um dedizierte NMS-Komponenten ergänzt (Kapitel 7.1). Der methodische Rahmen orientiert sich am DSR-Paradigma, das sich besonders für problemorientierte und anwendungsnahe Forschung eignet (Kapitel 2.1; [44]).

Die gestaltungsorientierte Herangehensweise ermöglichte es, Anforderungen aus der Praxis (siehe etwa Fallstudie BerlKönig in Kapitel 6.3) mit Konzepten des EAM (z.B. aus ArchiMate, TOGAF) zu kombinieren und so ein iterativ validiertes Referenzmodell zu entwickeln.

(3) Forschungsbeitrag im Gesamtfeld

Die Dissertation trägt damit auf mehreren Ebenen zum Forschungsfeld bei:

- Konzeptionell: Durch die Definition eines vollständigen Architekturmodells, das alle relevanten Sichten (strategisch, fachlich, technisch) umfasst.
- Anwendung: Das DSR-Framework nach Hevner et al. [44], das Framework for Design Science (FEDS) [52] zur systematischen Evaluation (Kapitel 8.1.2) und die Orientierung an der REAM-Methode [46] zur Referenzarchitekturentwicklung (Kapitel 3.3) wurden gezielt angewandt.
- Empirisch: Die Validierung in 9 Evaluationsepisoden mit Stakeholdern aus unterschiedlichen ÖPNV-Kontexten (Kapitel 8.2) belegt die Praxisnähe und Relevanz des Artefakts.

(4) Anschlussfähigkeit der Forschung

Das Forschungsvorhaben ist mit seinen Ergebnisse anschlussfähig für verschiedene bestehende Forschungsströme:

- Smart Mobility und Mobility-as-a-Service (MaaS): Die Architektur schafft eine Grundlage für die Integration multimodaler Plattformen (Kapitel 9.1.6), wie sie in vielen europäischen Städten im Aufbau sind.
- Digitale Transformation öffentlicher Unternehmen: Das Modell ermöglicht eine strukturierte Transformation der bestehenden Infrastruktur, wie sie z.B. in digitalen Leitbildern von Verkehrsverbünden vorgesehen ist (Kapitel 7.1.5).
- Domänenspezifisches EAM: Die Dissertation konkretisiert, wie generische EAM-Methoden auf sektorspezifische Anforderungen im Mobilitätsbereich zugeschnitten werden können (Kapitel 3.2.6 und 11.2).

Die Einordnung der Ergebnisse in das Forschungsfeld verdeutlicht, dass die vorliegende Dissertation nicht nur ein einzelnes Artefakt beschreibt, sondern Impulse für die wissenschaftliche Weiterentwicklung domänenspezifischer EA-Modelle im ÖPNV- und Mobilitätskontext liefern möchte. Die Relevanz der Thematik wird durch die wachsende Bedeutung von NMS, die Digitalisierung kommunaler Daseinsvorsorge und den Druck zur Systemintegration eindrücklich bestätigt.

Zum besseren Verständnis ist anzumerken, dass sich die hier vorliegende Forschungsarbeit nicht als methodologischer Beitrag zur Weiterentwicklung des DSR-Frameworks versteht, sondern als Anwendung desselben zur Generierung eines gestaltungsorientierten Artefakts – einer Referenzarchitektur für die Integration von bedarfsorientierten Verkehr bzw. NMS. Der Beitrag demonstriert somit auch die Anwendbarkeit von DSR im Bereich der Unternehmensarchitekturentwicklung im ÖPNV.

10.2 Alternativenvergleich im Referenzraum

Um den Beitrag dieser Arbeit einzuordnen, erfolgt ein Alternativenvergleich im externen Referenzraum. Ausgangspunkt ist die in Kapitel 4 ausgewiesene Forschungslücke: Es fehlt ein Ansatz, der eine Enterprise-Architektur für klassische ÖPNV-Unternehmen mit Komponenten bedarfsorientierter Mobilitätsdienste (NMS bzw. DRT, MaaS) in einem konsistenten, architekturtheoretisch verankerten Rahmen vereint. Bestehende Ansätze behandeln meist nur Teilphänomene wie Plattform-, Resilienz- oder Datenarchitekturen, ohne diese über strategische, fachliche und technische Ebenen hinweg zu integrieren. Vor diesem Hintergrund sind die „Alternativen“ zur hier entwickelten REA keine vollwertigen REA, sondern Baselines (brancheninterne Referenzrahmen) also Standard- und Referenzbausteine, die einzelne Architekturthemen abdecken.

Der Referenzraum dieser Arbeit gliedert sich in zwei Bereiche: (i) brancheninterne, im deutschsprachigen ÖPNV etablierte Referenzen (insb. VDV-Schriftenkorpus sowie ITVU/IVU-Branchenmodell) und (ii) Nicht-VDV-Beiträge (EU-Rechtsrahmen, CEN/ISO-

Normen, De-facto-Standards/OpenAPIs, Datenräume, Sicherheits- und Identitätsstandards sowie OSS-Referenzstacks). Die relevanten VDV-Schriften sind in Tabelle 12 als Referenzliste zusammengefasst und in Anhang A systematisiert. Die korrespondierenden Normen und externen Referenzbausteine sind in Tabelle 13 zusammengeführt und in Anhang B mit Quellenangaben dokumentiert.

Der Alternativenvergleich folgt einer bewusst darstellungsökonomischen Logik: Nicht die „Überlegenheit“ einzelner Standards wird bewertet, sondern ihre Eignung als primäre Architektur-Baseline entlang zentraler Architekturthemen (Scope/Schichtenabdeckung, Governance/Security, Traceability/Evidenz sowie AO-/BO- und End-to-End-Fähigkeiten). Die Kriterienmatrix (Tabelle 43) zeigt, dass externe Alternativen in der Regel als Teilarchitekturen bzw. Standard-Stacks relevant sind, den in dieser Dissertation entwickelten Enterprise-Anspruch (Variantenfähigkeit, DP-basierte Verortung, evidenzbasierte Traceability) jedoch nicht vollständig ersetzen.

Die Tabelle 43 verdeutlicht zunächst die Rolle der VDV-Baseline: Sie bietet mit dem ITVU-Modell eine solide Branchenreferenz für klassische AO-Kernprozesse und deren systemische Abbildung (Business/Application), jedoch erfüllt ohne den in dieser Dissertation geforderten, szenario- und partnerfähigen Enterprise-Integrationsanspruch von bedarfsorientierten Verkehr (BO). Dies ist konsistent zur Einordnung des ITVU-Modells (im Zuge der VDV-Baseline) als branchenbezogene, aber nicht vollumfängliche Unternehmensarchitektur (begrenzter Scope über die Gesamtorganisation hinweg). Die CEN/ISO-Baseline (Transmodel/NeTEx/SIRI/IFM) konzentriert sich auf fachliche Modelle und Austauschformate (Plandaten, Realtime, Fare-Management) und adressiert damit vor allem Daten- und Interoperabilitätsfragen. De-facto-Standards und OpenAPIs (GTFS/GBFS/MDS/TOMP) dienen primär als Austausch- und Integrationsreferenzen. Sie erleichtern die externe Kopplung in MaaS- und Plattformkonstellationen, ersetzen jedoch nicht per se die interne DP-basierte Verortung und Governance-Operationalisierung. OSDM als Vertriebs-/Distributionsbaseline sowie EMVCo/PCI-DSS als Zahlungs-/Sicherheitsbaseline unterstützen den End-to-End-Vertrieb und paymentnahe Concerns, bleiben aber auf diesen Bereich begrenzt. Data-Space/NAP-Baselines (Mobilithek/MDM/mCLOUD, Mobility Data Space) adressieren demgegenüber Governance, Zugriffskontrolle und Datenbereitstellung auf Ecosystem-Ebene und können als externer Rahmen für föderierte Datenbereitstellung dienen. Sie sind jedoch nicht identisch mit einer unternehmensinternen End-to-End-Architekturverortung. Security und OT-Segmentation-Baselines (z.B. IEC 62443, ergänzt um ISMS-Rahmen wie ISO/IEC 27001/27701 und API-Sicherheitsstandards wie OAuth/OIDC) sind besonders für KRITIS- und Zonierungsfragen relevant. Sie liefern Sicherheitsleitplanken, aber keine vollständige fachlich-operative Architekturstruktur.

Die Positionierung der entwickelten REA lässt sich vor diesem Hintergrund wie folgt präzisieren: Das erarbeitete Artefakt nutzt die genannten Baselines nicht als konkurrierende

Tabelle 46: Kriterienmatrix zum Alternativenvergleich

Kriterium (Baseline)	REA	VDV	CEN	TOMP	OSDM	MDS	OPEN	SEC
EA-Scope (unternehmensweit)	X							
Teilarchitektur/ Standard-Stack		X	X	X	X	X	X	X
Business/Prozess (DP-nah)	X	X						
Application (AP-nah)	X	X						
Data/Events (DO-nah)	X	X	X	X	X	X	X	
Security/Zonen (KRITIS/OT)	X					(X)		X
Governance/ Ownership	X					X		(X)
Traceability (IDs/Register)	X							
Evidenz/Evaluation (Nachweis)	X							
AO-Kern (Linie/Plan/Betrieb)	X	X	(X)					
BO/NMS-Integration	X		(X)	X	(X)			
End-to-End Vertrieb (Journey→Ticket)	X			(X)	X			
Payment/Clearing-Einbindung	X				(X)			
Interoperabilität (Multi-Provider)	X	X	X	X	X	X	X	
Variantenfähigkeit (S1–S4-Logik)	X							

Legende zu Tabelle 43: X = erfüllt/abgedeckt in relevanter Tiefe; (X) = „teilweise/indirekt möglich“, aber nicht als primärer Scope der Alternative (z.B. CEN-Standards liefern Daten-/Interoperabilitätsbausteine, aber keine vollständige Enterprise-Traceability). *Spalten:* REA (diese Arbeit: REA S4); VDV/ITVU (VDV-Baseline); CEN (CEN/ISO-Stack); TOMP; OSDM; MDS (Data-Space/NAP); OPEN (GTFS/GBFS); SEC (Security/OT-Segmentation)

Modelle, sondern integriert sie als normative Anker in einen konsistenten Enterprise-Rahmen. Dies geschieht durch: (i) die domänen- und prozessbasierte Verortung (DP-Katalog, Crosswalk), (ii) die operationalisierte Schnittstellen- und Daten-/Ereignissemanantik (Interface-Contracts, DO/Events je DP), (iii) die variantenfähige Governance-Operationalisierung über Variationspunkte sowie (iv) die evidenzbasierte Traceability-Führung und Evaluation. So wird deutlich, warum externe Alternativen zwar zentrale Bausteine liefern – insbesondere im Bereich Interoperabilität und Datenaustausch –, die konkret

entwickelte REA jedoch als übergeordnetes Referenzartefakt notwendig bleibt, um AO- und BO-Fähigkeiten in einem instanziierten Zielbild mit nachweisbarer Abdeckung der Anforderungen zu vereinen.

10.3 Validität und Grenzen der entwickelten REA

Die in dieser Dissertation entworfene und evaluierte Referenzarchitektur zur Integration von NMS in klassische ÖPNV-Unternehmen entstand auf Basis eines gestaltungsorientierten Forschungsansatzes (Kapitel 2.2). Die in Kapitel 8.3 zusammenfassend dargestellten Evidenzen verweisen auf eine hohe Konstrukt- und interne Validität (Merkmalsprüfung). Demgegenüber bleibt die externe Validität (Übertragbarkeit) durch Instanzierungen entlang von Größenklassen/Rollenmodellen begrenzt – es bestehen methodische und inhaltliche Limitierungen, die im Folgenden differenziert dargestellt werden.

(1) Methodische Validierung auf Basis des FEDS

Die Evaluation folgte dem Framework for Evaluation in Design Science (FEDS) nach Venable et al. [52], das verschiedene Dimensionen berücksichtigt:

- formative und summative Evaluation
- artifizielle bzw. künstliche und naturalistische Evaluationssettings

Im Rahmen von 9 Evaluationsepisoden (Kapitel 8.2) wurde die Architektur aus unterschiedlichen Perspektiven validiert: von internen Reviews über Experteninterviews bis hin zu realitätsnahen Anwendungsszenarien. Die Episoden umfassten die Analyse spezifischer Architekturebenen (z.B. Anwendungssicht bei der BSAG, Kapitel 8.2.2) ebenso wie die Validierung durch Vertreter des Branchenverbands VDV bei einer Fachkonferenz (Kapitel 8.2.5). Diese Mehrperspektivität erhöht die interne Validität und Glaubwürdigkeit der Artefakt-Bewertung.

(2) Bewertung in praktischen Anwendungskontexten

Die Architektur, bestehend aus motivatorischer, strategischer, geschäftlicher und technischer Ebene (Kapitel 7.1), wurde gezielt auf Praxisrelevanz ausgelegt. Elemente zur Tarif- und Produktgestaltung (Kapitel 9.1.4) sowie zur Ressourcenplanung (Kapitel 9.1.3) wurden im Dialog mit Praxispartnern aus München und Bremen plausibilisiert. Das Feedback zeigte, dass die Architektur sowohl klassische Angebotsformen als auch flexible NMS-Logiken abbilden kann.

Zusätzlich wurde in Kapitel 9.1.8 mit der Capability Map ein Werkzeug vorgestellt, das betriebliche Fähigkeiten systematisch erfasst, analysiert und weiterentwickelt. Transformationsverantwortliche in Verkehrsunternehmen bewerteten dieses Element als besonders nützlich.

(3) Begrenzung durch fehlende Umsetzung

Ein zentrales Defizit liegt darin, dass die Architektur nicht vollständig in einem realen operativen IT-System implementiert wurde. Die Validierung beschränkte sich also auf Modellprüfungen, Expertenmeinungen und hypothetische Anwendungsfälle. Eine reale Einführung mit langfristigem Monitoring fehlt.

Daraus ergibt sich eine Einschränkung bei der Ex-post-Wirkungskontrolle der Architektur (Kapitel 11.4): Aussagen zu ökonomischen Effizienzgewinnen, Nutzerakzeptanz, technischer Robustheit oder Skalierungseffekten basieren bislang auf qualitativen Plausibilitätsbewertungen und sind nicht empirisch belegt.

(4) Kontextuelle Einschränkungen und Übertragbarkeit

Die Referenzarchitektur basiert auf dem ITVU-Branchenmodell, das v.a. im deutschen Raum Anwendung findet (Kapitel 6.1). Viele der verwendeten Standards, Rollenbilder und Prozesse spiegeln die institutionellen und regulatorischen Bedingungen des deutschen ÖPNV-Markts wider, die etwa durch die Beiträge des VDV (bspw. Architekturen) geprägt sind.

Die internationale Übertragbarkeit des Modells – etwa auf Verkehrssysteme in Skandinavien, Nordamerika oder Asien – ist daher begrenzt und erfordert Anpassungen. Dies betrifft technische Schnittstellen (z.B. APIs, Datenformate) ebenso wie Governance-Strukturen und Geschäftsmodelle. Kapitel 11.4 diskutiert mögliche Anschlussfragen für internationale Vergleichsstudien.

(5) Abstraktionsebene und Implementierungstiefe

Das Modell arbeitet auf einer relativ hohen Abstraktionsebene. Dies erhöht die Wiederverwendbarkeit, lässt jedoch an manchen Stellen konkrete Implementierungsanleitungen oder detailgenaue Prozessdefinitionen vermissen. Dies betrifft im Besonderen die Schnittstellen zwischen bestehenden Ticketing-Systemen und neuen NMS-Reservierungsplattformen (Kapitel 9.1.6). Die Architektur bietet hierfür konzeptionelle Lösungsansätze, jedoch keine vollständige technische Spezifikation.

(6) Threats und Mitigation

In Tabelle 44 werden die in Kapitel 9.5 skizzierten Risiken adressiert durch:

- a. die explizite Kopplung von Konstrukten, Artefakten und Evidenzen,
- b. eine Evaluationssequenz nach FEDS sowie
- c. Referenzbezüge und Fallstudien-Triangulation.

Die folgende Tabelle listet die im Forschungsprozess ermittelten Risiken und die begründeten Erwiderung darauf. Hinweise, wo sich mehr Informationen zu den Risiken bzw. Bedrohungen finden, sind in der Spalte „Verweise“ dokumentiert.

Tabelle 47: Validitätsbedrohungen und Gegenmaßnahmen⁴⁶

Bedrohung ⁴⁷	Erwiderung/Begründung	Verweise
Konstruktvalidität – Gefahr der Übernormierung	Induktive Schleifen sichern Konstruktpassung. Die Arbeit erzwingt über <i>Episoden</i> (iterative Design- und Evaluationsschritte) die Anpassung der Artefaktbausteine an das beobachtete Organisations- und Systemumfeld. Die Kopplung Konstrukt → Designentscheidung → Evidenz ist in Tabelle 30 (Traceability) niedergelegt; damit werden Normannahmen gegen empirische Beobachtung rückgekoppelt.	Evaluationsepisoden; Tabelle 30
Interne Validität – Gefahr von Scheinkorrelationen in der Evaluation	FEDS-geleitete Evaluation reduziert Confounding. Die Evaluationsarchitektur folgt dem Vier-Schritt-Prozess nach FEDS (formativ, summativ und künstlich, naturalistisch) mit expliziter Sequenzierung von Artefakt-Inspektionen, Demonstrationen und Feldrückmeldungen; so werden interne Alternativerklärungen systematisch adressiert (Design-Rationale und Evidenzketten).	FEDS-Verortung; [52, S. 77ff.]
Externe Validität – begrenzte Generalisierbarkeit	Referenzbezüge und Fallstudien-Triangulation erweitern den Geltungsbereich: Die Modellierung bindet etablierte Branchenreferenzen (u.a. ITVU-/ VDV-Bezüge) ein und prüft das Artefakt in mehreren Nutzungskontexten (A/B-Domänen, Hybridfälle). Das erhöht Übertragbarkeit und Anschlussfähigkeit über Einzelfälle hinaus.	ITVU/VDV-Rahmung (Episoden, Cross-Checks)
Reliabilität – Gefahr inkonsistenter Ableitungen	Nachvollziehbarkeit via Traceability-Matrix. Tabelle 30 dokumentiert die Kette von Anforderungen, Designentscheidungen und Evidenzen; so wird Replikation (gleiche Ableitung bei gleicher Evidenzlage) begünstigt und Reviewer-Prüfbarkeit hergestellt.	Tabelle 30

Die Kombination aus episodensbasiertem Vorgehen (Adaptivität), FEDS-Leitplanken (Evaluationstypen und -zeitpunkte), Referenzverankerung (ITVU/VDV) und einer expliziten Traceability über Tabelle 30 stellt sicher, dass

⁴⁶ Erwiderung auf Kapitel 9.11.

⁴⁷ Vgl. dazu Kapitel 9.11.

- a. Konstrukte nicht übernormiert,
- b. interne Alternativerklärungen geprüft werden,
- c. externe Anschlussfähigkeit hergestellt ist und
- d. Ableitungen reproduzierbar dokumentiert sind.

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich der oben behandelten Themen festhalten, dass die entwickelte Referenzarchitektur ein robustes, methodisch fundiertes und praxistaugliches Modell darstellt, das zentrale Anforderungen aus Wissenschaft und Praxis erfüllt (Kapitel 6.3.2 und 11.1.2). Gleichzeitig ist ihre langfristige operative Wirksamkeit, internationale Übertragbarkeit und technische Implementierungstiefe bisher als begrenzt zu bewerten. Diese Limitationen bieten wichtige Ansatzpunkte für künftige Forschungsvorhaben.

Insgesamt berücksichtigt die Validitätsprüfung der REA potenzielle Verzerrungen (Biases) entlang des Forschungs- und Evaluationsprozesses sowie deren mögliche Minderung. Auf Ebene der Evidenzbasis der SLR werden Publikations-, Selektions-, Datenbank- sowie Sprach-/Zeitfenster-Bias adressiert (Kapitel 2.4, 0).

Für die Evaluation der Artefakte werden Evaluations-Biases (z.B. Auswahl- und Bestätigungs-Bias) durch ein nach FEDS geplantes, mehrstufiges, teilweise naturalistisches Vorgehen, durch standardisierte Dokumentation sowie die Einbindung heterogener Stakeholder in 8 Episoden mitigiert (Kapitel 2.8, 8.1.3, 8.2).

Modellierungs- und Kontext-Bias (z.B. potenzielle Verankerung im ITVU Branchenmodell, deutsche Regulierungslogiken) werden offengelegt. Die Generalisierbarkeit über den deutschen Kontext hinaus sowie Effekte einer fehlenden Voll-Implementierung bleiben als Restriktionen bestehen (Kapitel 11.2).

10.4 Erfüllung der Anforderungen und kritische Reflexion

Ein zentrales Ziel der Dissertation bestand darin, eine Referenzarchitektur zu entwickeln, die bedarfsorientierte Mobilitätsangebote, v.a. NMS, nahtlos in klassische ÖPNV-Strukturen integriert und dabei klar definierte funktionale sowie nicht-funktionale Anforderungen erfüllt. Diese Anforderungen wurden in Kapitel 6 systematisch abgeleitet – basierend auf einer domänenspezifischen Problemanalyse (Kapitel 5) und einer empirischen Fallstudie zur Integration des BerlKönig-Services (Kapitel 6.3.1). Dieses Kapitel beleuchtet, inwiefern diese Anforderungen im Architekturdesign (Kapitel 7) und der Evaluation (Kapitel 8) erfüllt, übertroffen oder nur teilweise berücksichtigt wurden.

Die Anforderungs-Coverage aus Kapitel 6.5 wird Szenario-bezogen bestätigt (Mapping Anforderung → Capability → Service/Prozess → *IT-Baustein*) und kritische Muss-Anforderungen (OJP-Trennung, Clearing, KRITIS-Segmentierung) sind konsistent erfüllt (Kapitel 8.3).

Zudem werden zentrale Annahmen zur technologischen und organisatorischen Umsetzbarkeit – und damit die Anforderungen selbst – kritisch hinterfragt.

(1) Erfüllung funktionaler Anforderungen

Die in Kapitel 6.4 verdichteten und dokumentierten funktionalen Anforderungen zielten v.a. auf hybride Betriebsmodelle, die Modularität der Architektur und die Integration betrieblicher Kernprozesse mit NMS-spezifischen Diensten. Diese Anforderungen wurden im Architekturentwurf in Kapitel 7 durch folgende Maßnahmen und Komponenten umgesetzt:

Modularität und Erweiterbarkeit: Die Architektur gliedert sich in strategisch-motivatorische, fachlich-geschäftliche und operative Komponenten (Kapitel 7.1). Die modellierten Anwendungsdienste und Geschäftsprozesse lassen sich unabhängig erweitern oder austauschen, etwa durch Module für On-Demand-Routing oder dynamische Preisgestaltung (Kapitel 9.1.3, 9.1.4).

Interoperabilität und Plattformintegration: Standardisierte Schnittstellenmodelle wie VDV-KA⁴⁸ und GTFS⁴⁹ schaffen eine Verbindung zwischen klassischen Backend-Systemen (z.B. Ticketing, Betriebslenkung) und NMS-Plattformen (Kapitel 7.4.2).

Strategische und operative Koppelung: Die Architektur verknüpft strategische Ziele wie Klimaneutralität oder urbane Flächenentlastung mit operativen Ebenen, etwa durch Capability Maps (Kapitel 9.1.8).

Praktiker bewerten die Umsetzung der Anforderungen in mehreren Evaluationsepisoden als vollständig oder weitgehend erfüllt (Kapitel 8.2).

(2) Bewertung nicht-funktionaler Anforderungen

Wesentliche nicht-funktionalen Anforderungen waren Verständlichkeit, Wiederverwendbarkeit, Skalierbarkeit und Wartbarkeit. Diese Aspekte wurden im Architekturmodell wie im Folgenden dargestellt adressiert.

Verständlichkeit: Die Modellierungssprache ArchiMate und eine strukturierte grafische Darstellung der Architektursichten (Kapitel 7.2) sorgten für eine hohe Transparenz, was auch die Evaluationen mit Experten der BSAG, des SWM und des VDV bestätigten (Kapitel 8.2.2, 8.2.3, 8.2.5 und 8.2.6).

Wiederverwendbarkeit: Die Architektur wurde generisch und domänenübergreifend gestaltet, sodass sie unabhängig vom spezifischen NMS-Anbietern oder Verkehrsverbünden einsetzbar ist. Die Kapitel 9.1.3 bis 9.1.6 zeigen dies anhand exemplarischer Umsetzungen für Ressourcenmanagement, Produktgestaltung und Vertrieb.

⁴⁸ Standardfamilie des VDV für das elektronische Fahrgeldmanagement (EFM) in Deutschland; organisatorisch getragen durch den VDV eTicket Service. Die VDV-KA definiert Prozesse, Rollen, Datenobjekte und Sicherheitsmechanismen für interoperables eTicketing über Verkehrsunternehmen und -verbünde hinweg („eTicket Deutschland“).

⁴⁹ Offen dokumentierte Datenspezifikation zur Veröffentlichung von Fahrplandaten (und Zustandsdaten) des öffentlichen Verkehrs; heute kuratiert von der Community (z.B. MobilityData) und De-facto-Standard für Fahrgastinformation und Routenplaner.

Skalierbarkeit und Wartbarkeit: Die serviceorientierte Architektur (SOA) ermöglicht es, Systeme iterativ einzuführen, auszutauschen oder zu erweitern, ohne zentrale IT-Ressourcen zu überfordern (Kapitel 7.4.2). Diese Eigenschaften wurden von den Interviewpartnern positiv bewertet (Kapitel 8.3).

(3) Eingeschränkt erfüllte oder offene Anforderungen

Einige Anforderungen werden nur teilweise bzw. nur eingeschränkt umgesetzt:

Dynamische Preismodelle und tarifliche Flexibilisierung: Diese wurden konzeptionell beschrieben (Kapitel 9.1.4), aber nicht technisch spezifiziert. Eine vollständige Umsetzung erfordert eine tiefere Integration in bestehende Tarifdatenbanken und Vertriebsportale.

IT-Governance über Plattformgrenzen hinweg: Die Zusammenarbeit zwischen Verkehrsbetrieben und Mobilitätsdienstleistern wurde als Anforderung identifiziert (Kapitel 6.3.2), jedoch lediglich abstrakt modelliert (Kapitel 7.1.9).

Diese Aspekte bieten Ansatzmöglichkeiten für künftige Forschung (Kapitel 11.4).

(4) Reflexion zentraler Annahmen

Die Entwicklung der Architektur basierte auf mehreren impliziten und expliziten Annahmen, deren Gültigkeit kritisch zu prüfen ist:

Standardisierte Schnittstellen: Die Architektur setzt auf offene APIs und Standards wie GTFS oder OJP als gemeinsame technische Basis, die verfügbar und implementierbar sein muss. In der Praxis sind diese jedoch teilweise heterogen, fragmentiert oder proprietär, wie Rückmeldungen von Praxispartnern zeigen (Kapitel 8.2.2).

Digitale Reife der Organisation: Die Umsetzung der Architektur erfordert digitale Kompetenz und Enterprise-Architecture-Knowhow. Insbesondere kleinere und außerstädtische Verkehrsunternehmen erfüllen diese Voraussetzungen nicht immer (Kapitel 11.2).

Kooperationsfähigkeit: Die Architektur setzt organisationsübergreifende Zusammenarbeit voraus, etwa zwischen Stadtwerken, Verkehrsverbünden, Tech-Plattformen und Verwaltungseinheiten von Kommunen. Divergierende Interessen, Governance-Fraktionen und fragmentierte Zuständigkeiten erschweren dies häufig (Kapitel 5.3.2).

Aus der Szenario-Analyse ergaben sich die folgenden praktischen Leitplanken: (i) Datendrehscheibe/Broker (separiert wg. KRITIS) statt durchgehender ESB, (ii) RACI-Klarheit bei AO/BO-Hybriden, (iii) Clearing/Revenue-Sharing als eigenständige Domäne, (iv) OJP-konforme Vertriebsarchitektur (Trennung: Reservierung und Buchung).

Die in Kapitel 9.6 konsolidierten Erkenntnisse verdeutlichen, dass die entwickelte REA nicht nur die definierten Anforderungen erfüllt, sondern diese in mehreren Bereichen übertrifft. Besonders den neu identifizierten Fähigkeiten – wie digitaler Plattformbetrieb, datenbasierte Steuerungslogiken und nachhaltigkeitsorientiertes Ressourcenmanagement – kommt eine strategische Bedeutung zu. Das gewählte Architekturmodell erweist

sich als geeignetes Instrument, um Unternehmen bei der Transformation zu unterstützen, die hybride Mobilitätsformen erforderlich machen. Die Evaluation belegt, dass die REA mit ihrer serviceorientierten Modularität, der integrationsfähigen Schnittstellenarchitektur sowie der gezielten Verknüpfung strategischer und operativer Sichten eine robuste Grundlage für dynamische Markt- und Nachfrageentwicklungen bietet. Zudem zeigt sich, dass Effizienzpotenziale in Planung, Disposition und Vertrieb nicht nur berücksichtigt, sondern strukturell verankert sind, wodurch die Anforderungen an Interoperabilität, Flexibilität und Wiederverwendbarkeit in außergewöhnlicher Tiefe erfüllt werden.

Zusammenfassend lässt sich das Fazit ziehen, dass die REA die definierten Anforderungen erfüllt. Die systematische Ableitung, architektonische Umsetzung und Evaluationen sorgen für die Erfüllung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen und sichern die Angemessenheit des Modells. Gleichzeitig verdeutlichen die offen gebliebenen Anforderungen und die kritischen Annahmen, dass technologische, institutionelle und methodische Weiterentwicklungen notwendig sind, um das Modell vollständig in der ÖPNV-Praxis zu verankern.

10.5 Implikationen für die Praxis von ÖPNV-Unternehmen

Die in dieser Dissertation entwickelte Referenzarchitektur soll nicht nur zur EA-Forschung betragen, sondern v.a. klassische ÖPNV-Unternehmen bei ihren Transformationsprozessen unterstützen, also praktischen Nutzen haben. Der strukturelle und technologische Wandel, konkret Digitalisierung, Nachhaltigkeitsziele und multimodale Mobilitätslösungen zwingen Verkehrsunternehmen, ihre strategischen, organisatorischen und technischen Grundlagen anzupassen. Im Folgenden wird gezeigt, wie die Architektur als Gestaltungs- und Steuerungsinstrument in der Praxis genutzt werden kann.

(1) Strategische Positionierung und Angebotsentwicklung

Klassische Verkehrsunternehmen streben heute an, über den Betrieb fester Linienverkehre hinaus zu agieren und sich zum umfassenden Mobilitätsdienstleister weiterzuentwickeln (Kapitel 1.1 und 5.1). Die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Architektur unterstützt dies, indem sie Angebot und Nachfrage strukturell verknüpft (Kapitel 7.1.1). Strategische Ziele wie Dekarbonisierung, Fahrgastgewinnung oder Flächeneffizienz lassen sich durch Architekturelemente wie z.B. Capability Maps integrieren (Kapitel 9.1.8).

So können Verkehrsunternehmen durch die modulare Anbindung von NMS-Komponenten wie Ridepooling oder E-Scooter-Sharing flexible Ergänzungen zum klassischen Taktverkehr schaffen, ohne ihre Betriebslogik zu verändern. Die Architektur sorgt dafür, dass diese neuen Dienste nahtlos in bestehende Geschäftsprozesse und IT-Strukturen eingebettet werden können, etwa in der Produktgestaltung (Kapitel 9.1.4) oder Ressourcenallokation (Kapitel 9.1.3).

(2) Operative Umsetzung und Prozessintegration

Die Architektur ermöglicht es, IT- und Prozesslandschaften schrittweise zu erweitern, ohne disruptive Systemumbrüche zu verursachen. Die in Kapitel 7.2 beschriebenen ArchiMate-Modelle zeigen, wie neue Dienste sich in vorhandene Prozesse wie Betriebslenkung, Tarifmanagement und Vertrieb integrieren lassen (Kapitel 9.1.4–9.1.6).

Ein Beispiel ist die Einführung eines NMS-Angebots über eine bestehende Mobilitätsplattform. Die Architektur erlaubt es, bestehende Buchungs-, Bezahl- und Kundensysteme um On-Demand-Services zu ergänzen, ohne sie neu zu entwickeln. Schnittstellenmodule und serviceorientierte Architekturprinzipien (SOA) binden externe Dienste an. Gleichzeitig passen sie interne Prozesse an, etwa durch die Erweiterung des Datenflusses zur Echtzeit-Disposition.

(3) Organisationale Transformation und Kompetenzentwicklung

Hybride Angebotslogiken erfordern nicht nur technische, sondern auch organisatorische Anpassungen. Die Architektur bietet hierfür klare Orientierung: Sie modelliert Rollen, Fähigkeiten und Prozesse so, dass neue Zuständigkeiten und Strukturen erkennbar und gestaltbar werden (Kapitel 7.1.3 und 9.1.8).

Verkehrsunternehmen müssen bspw. Einheiten für Datenanalyse, Plattformkoordination oder Drittanbieterintegration schaffen. Auch die flexible Ressourcenplanung, etwa zur dynamischen Fahrzeugbereitstellung, verlangt neue Kompetenzen im IT-gestützten Flottenmanagement (Kapitel 9.1.3). Die Architektur macht diese Bedarfe sichtbar und unterstützt damit die strategische Personalentwicklung sowie organisatorische Neugestaltungen.

(4) Fähigkeitstransformation als Kern organisatorischer Weiterentwicklung

Die Evaluation zeigt klar: Ohne eine systematische Weiterentwicklung organisationaler Fähigkeiten ist die Integration bedarfsorientierter Mobilitätsangebote nicht realisierbar. Die REA setzt hier an, indem sie diese Fähigkeiten über definierte Strukturen operationalisiert. So ermöglicht sie eine gezielte Priorisierung von Investitionen und eine konsistente Steuerung organisatorischer Transformation. Verkehrsunternehmen können damit gezielt die Kompetenzen auf- und ausbauen, die sie für die Koordination hybrider Angebotslogiken benötigen – insbesondere im Bereich digitaler Plattformen, datengetriebener Betriebsführung und nachhaltigkeitsorientierter Ressourcennutzung.

(5) Steuerungs- und Entscheidungsunterstützung

Die Architektur dient auch als Planungs- und Steuerungsinstrument für das Management. Besonders die Fähigkeit, strategische Ziele mit operativen Umsetzungspfaden zu verbinden (Kapitel 7.1.3), schafft eine Grundlage für fundierte Entscheidungen über IT-Investitionen, Angebotsinnovationen oder Plattformkooperationen.

Die strukturierte Darstellung von Abhängigkeiten zwischen Anwendungskomponenten und Geschäftsprozessen (Kapitel 7.2.2) ermöglicht etwa, Modernisierungsvorhaben nach strategischen Zielsetzungen und Prioritäten wie „Kundenfokus“ oder „digitale Resilienz“ zu bewerten. Auch kann das Modell als Vorlage für Ausschreibungen oder Förderanträge dienen, etwa im Rahmen nationaler Innovationsprogramme wie „Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme“.

(6) Relevanz für kommunale Aufgabenträger und Verbünde

Auch öffentliche Aufgabenträger wie Verkehrsverbünde oder Stadtverwaltungen profitieren von der entwickelten Architektur. Sie können diese als Referenzmodell zur Gestaltung integrierter Mobilitätsstrategien nutzen, insbesondere bei der Gestaltung von Ausschreibungen, Fördermechanismen oder Public Private Partnership⁵⁰. Die Architektur zeigt transparent, welche Anforderungen zukünftige Plattformbetreiber, Service-Provider oder Technologiepartner erfüllen müssen, um eine integrative Systemlandschaft zu schaffen (Kapitel 11.3).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Referenzarchitektur eine praxisnahe Grundlage für vielfältige Anwendungen darstellt. Sie adressiert die Bedürfnisse klassischer Verkehrsunternehmen ebenso wie die Anforderungen neuer Mobilitätsanbieter. Mit klaren Strukturen unterstützt die REA digitale, organisatorische und strategische Transformation. Besonders in komplexen hybriden Betriebsumgebungen verspricht sie erheblichen Mehrwert für die Praxis.

10.6 Theoretische Beiträge zur Forschung

Die in dieser Dissertation entwickelte Referenzarchitektur leistet – neben ihrer praktischen Anwendbarkeit – einen theoretischen Beitrag zur Forschung an der Schnittstelle von EAM, DSR und digitaler Mobilität. Sie integriert etablierte Konzepte, erweitert bestehende Modelle und entwickelt neue methodische Perspektiven für die Gestaltung und Evaluation domänenspezifischer Architekturen im öffentlichen Personenverkehr.

(1) Beitrag zum Forschungsfeld „Enterprise Architecture im ÖPNV“

Die Literaturanalyse (Kapitel 4.3) zeigte, dass domänenspezifische EAM-Modelle für den ÖPNV bisher nur in rudimentärer Form vorliegen. Während generische Referenzmodelle wie TOGAF oder ArchiMate existieren, fehlen detaillierte Umsetzungen für ÖPNV-Unternehmen – insbesondere zur Integration neuer Mobilitätsformen wie NMS.

⁵⁰ Öffentlich-private Partnerschaft bezeichnet eine langfristige, vertraglich geregelte Kooperation zwischen öffentlichen Auftraggebern (z. B. Staat, Kommune) und privaten Unternehmen zur Planung, Finanzierung, Realisierung, Betrieb oder Instandhaltung öffentlicher Aufgaben oder Infrastrukturen.

Diese vorliegende Dissertation schließt diese Lücke, indem sie das etablierte ITVU-Branchenmodell (Kapitel 6.1) um Komponenten erweitert, die NMS-spezifische Anforderungen strukturell abbilden – etwa Disposition, Plattforminteroperabilität, dynamische Tarifierung und Nutzerdatenmanagement (Kapitel 7.2, 9.1.3–9.1.6). So liefert sie einen validierten Vorschlag für eine hybride Architektur, die Angebots- und Bedarfsorientierung verbindet.

(2) Anwendung des DSR-Paradigmas

Das Forschungsvorhaben wendet die DSR-Methodologie an, indem es den vollständigen Artefaktentwicklungszyklus nach Hevner et al. (2004) [44] und die Evaluationschritte gemäß FEDS nach Venable et al. [52] durchläuft (Kapitel 2.1, 8.1.2). Besonders hervorzuheben ist die Verbindung von

- strukturierter Problemidentifikation (Kapitel 1.2, 5),
- iterativer Artefaktkonstruktion auf Basis architekturtheoretischer Prinzipien (Kapitel 7) und
- systematischer Evaluation in naturalistischen und artifiziellen Settings (Kapitel 8.2).

Die Anwendung des FEDS als Rahmen der Evaluation im sektorspezifischen Kontext zeigt die Anpassungsfähigkeit und Relevanz gestaltungsorientierter Forschung für reale Transformationsszenarien.

Wie bereits in Kapitel 10.1 erläutert, versteht sich diese Arbeit nicht als Beitrag zur Weiterentwicklung der DSR-Methodologie, sondern als deren domänenspezifische Anwendung.

(3) Kombination von ArchiMate-Modellierung und Capability Mapping

Ein weiterer theoretischer Beitrag liegt in der Kombination von ArchiMate-basierten Strukturmodellen mit strategischen Fähigkeitslandkarten (Kapitel 9.8). Diese Kombination ermöglicht eine differenzierte Abbildung:

- der operativen Umsetzungsebene (Prozesse, Anwendungen, Services),
- der strategischen Zielsetzung (z.B. Erweiterung von Leistungsportfolios)
- sowie der organisationalen und technischen Fähigkeiten, die diese Umsetzung ermöglichen.

So fördert die Dissertation ein integriertes Verständnis von Architektur als systemisches Steuerungsinstrument, das IT- und Managementperspektiven verbindet. Der Capability-Ansatz schafft zudem eine Brücke zur REAM-Methode von Timm [46], die u.a. als theoretische Referenz für die Modellgestaltung diene.

(4) Impulse für zukünftige domänenspezifische Referenzmodelle

Das entwickelte Architekturmodell liefert Verkehrsunternehmen einen Musterlösungsvorschlag, der als Referenzmodell im Sinne von Frank [239] verstanden werden kann: Es bleibt generisch genug, um in unterschiedlichen Unternehmen angewendet zu werden, bildet aber zugleich spezifische praxisrelevante Anforderungen präzise genug ab (Kapitel 11.2). Das Modell bietet damit:

- eine strukturierte Architekturvorlage,
- eine semantisch konsistente Terminologie
- und einen methodisch fundierten Baukasten für EA-Projekte im ÖPNV.

Darüber hinaus eignet sich das Modell als didaktisches Instrument in der akademischen Lehre, etwa zur Vermittlung von EA-Prinzipien anhand realer Mobilitätsanwendungen.

Episode VIII zeigt methodisch, dass die Szenario-getriebene, summative und artifizielle Evaluation eine wirksame Brücke zwischen REA-Merkmalen und Praxisfällen bildet [52, S. 77ff.]; [44, S. 75ff.]; [45, S. 45ff.].

Zwar entwickelt diese Forschungsarbeit keine eigenständige Methodik zur systematischen Gestaltung von Referenzarchitekturen, wie etwa Timm [46], doch trägt sie substantiell zur methodisch gestützten Artefaktentwicklung bei. Durch den gezielten Einsatz bestehender Modelle, die Einbettung in das DSR-Vorgehen nach Johannesson und Perjons [60] sowie die formative Evaluation über mehrere Iterationen hinweg wurden praxisnahe Architekturbestandteile generiert, die sich aufgrund ihrer Zusammensetzung und Abstraktion auf vergleichbare Problemstellungen im ÖPNV übertragen lassen sollten.

Diese Arbeit liefert damit keine neue Methodologie, aber ein valides empirisches Beispiel für die domänenspezifische Anwendung bestehender Architektur- und Evaluationsansätze im Bereich der öffentlichen Mobilität. Die entwickelten Modelle bieten einen Referenzrahmen für zukünftige Architekturprojekte, die innovative Verkehrsdienste in klassische ÖPNV-Strukturen integrieren – insbesondere dort, wo ähnliche technologische, organisatorische und strategische Herausforderungen bestehen.

(5) Theoretische Anschlussfähigkeit an Smart Mobility und MaaS

Die Architektur knüpft an aktuelle Forschungsdiskurse im Bereich Smart Mobility und Mobility-as-a-Service (MaaS) an. Durch die modellierte Fähigkeit, externe Mobilitätsdienste, dynamische Tarifsysteme und nutzerzentrierte Plattformlogiken (Kapitel 9.6) zu integrieren, liefert das Modell einen theoretischen Rahmen zur Analyse und Gestaltung komplexer Mobilitätsökosysteme.

Diese Anschlussfähigkeit eröffnet Potenziale für interdisziplinäre Forschung – etwa zur Kopplung mit Stadtplanung, Nachhaltigkeitspolitik oder Plattformökonomie – und erlaubt die Übertragung architekturbasierter Steuerungsmodelle auf andere urbane Infrastrukturbereiche (Kapitel 11.4).

Zusammenfassend liefert die Dissertation substanzielle theoretische Beiträge zur EA-Forschung, insbesondere durch:

- Weiterentwicklung sektorspezifischer Referenzarchitekturen,
- methodisch fundierte Anwendung des DSR-Zyklus,
- Integration von EA-Praktiken mit strategischen Managementkonzepten
- sowie die Operationalisierung domänenspezifischer Architekturmodelle zur Anwendung in Forschung, Lehre und Praxis.

Damit positioniert sich die Dissertation als Wegbereiterin im noch jungen Forschungsfeld hybrider, multimodaler Architekturentwicklung für den ÖPNV.

11 Abschließende Betrachtung und Ausblick

Die zentralen Ergebnisse dieser Dissertation zeigen, dass eine strukturierte Verbindung strategischer, geschäftlicher und technischer Architekturebenen eine tragfähige Grundlage für die digitale und betriebliche Transformation im ÖPNV schafft. Die entwickelte Architektur berücksichtigt sowohl klassische Angebote als auch die flexiblen, nutzerzentrierten Anforderungen von NMS. Experten aus Praxis und Forschung validierten sie in mehreren Evaluationsepisoden.

Dieses abschließende Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen, diskutiert die Beiträge zur Forschung wie zur praktischen Anwendung und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsperspektiven, die sich aus den gewonnenen Einsichten ableiten lassen. Dabei werden die Stärken und Grenzen der Referenzarchitektur reflektiert.

11.1 Zentrale Ergebnisse der Arbeit

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung systematisch zusammengefasst und im Kontext der Forschungsfragen sowie des theoretischen Rahmens reflektiert.

(1) Erkenntnisse zur Problem- und Anforderungsdefinition

Die Analyse des Status quo im öffentlichen Personenverkehr (Kapitel 5) zeigte die strukturelle Trennung zwischen angebotsorientierten Verkehrsmodellen und flexiblen, nutzerorientierten NMS. Klassische ÖPNV-Systeme arbeiten mit fixen Fahrplänen, zentralisierter Betriebsführung und stabilen IT-Infrastrukturen, während NMS durch dynamische Nachfrageorientierung, Plattformintegration und hohe IT-Flexibilität geprägt sind (Kapitel 3.3 und 5.3). Aus dieser Problemanalyse leitete Kapitel 6.4 funktionale und nicht-funktionale Anforderungen ab, darunter: Interoperabilität zwischen klassischen IT-Systemen und NMS-Plattformen, Unterstützung hybrider Betriebsformen sowie Wiederverwendbarkeit und Anpassbarkeit der Architekturmodelle.

Diese Anforderungen bildeten die Grundlage für das Design des Artefakts.

(2) Architekturentwurf als zentrales Forschungsartefakt

Das in Kapitel 7 entworfene Referenzarchitektur (REA) baut auf dem ITVU-Branchenmodell auf und erweitert es um dediziert NMS-spezifische Komponenten. Es umfasst mehrere Architekturebenen.

- Die strategisch-motivatorische Ebene adressiert übergeordnete Ziele wie Digitalisierung und Nutzerzentrierung (Kapitel 7.1.1).
- Die Geschäfts- und Anwendungsebene beschreibt Prozesse, Dienste und Informationsflüsse für hybride Betriebsformen (Kapitel 7.1.2).

- Die operative Ebene definiert Fähigkeiten, Organisationseinheiten und technische Komponenten (Kapitel 9.1.8).

Diese modulare Struktur ermöglicht eine vertikale Integration von der Strategie bis zur Infrastruktur sowie eine horizontale Erweiterungsoption für unterschiedliche Unternehmensgrößen und -typen.

(3) Evaluationsergebnisse und Validierung

Experten aus Praxis und Forschung prüften und diskutierten die Architektur. Ihre in 9 Evaluationsepisoden (Kapitel 8.2) gewonnenen Rückmeldungen flossen in die Weiterentwicklung des Artefakts ein. Die Evaluation basierte auf dem FEDS-Konzept von Venable et al. [52], das formative und summative Perspektiven integriert (Kapitel 8.1.3).

Wichtige Rückmeldungen betrafen die angestrebte Wiederverwendbarkeit dank modularer Architekturbausteine, die Verständlichkeit der ArchiMate-Modelle für EA-Verantwortliche und die Eignung der Capability Map als Planungsgrundlage für Transformationsprojekte (Kapitel 9.1.8).

Die Szenario-Analyse (8.2.8, 8.3) bestätigt Traceability, Integrations- und Sicherheitsgovernance, Variabilität (S1–S4) der Architektur und etabliert die Capability Map als Management-Artefakt.

Zusätzlich bestätigen die Evaluationspartner, dass die Architektur die systematische NMS-Integration unterstützt und als strategisches Orientierungsmodell für künftige Entwicklungen dienen kann.

(4) Wissenschaftliche und praktische Relevanz

Auf wissenschaftlicher Ebene trägt die Dissertation zur Weiterentwicklung des domänenspezifischen EAM in Mobilitätskontexten bei. Sie verbindet fundierte Architekturmodelle mit empirisch ermittelten Anforderungen. Dabei zeigt sie, wie sich Designprinzipien wie Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit im hochdynamischen Umfeld des öffentlichen Verkehrs anwenden lassen.

Auf praktischer Ebene bietet das Artefakt ein Werkzeug zur Planung und Steuerung digitaler Transformationsprozesse – zweckdienlich v.a. für Leiter des IT-Bereichs, für Strategieeinheiten und Architekturverantwortliche in Verkehrsunternehmen (Kapitel 11.3).

11.1.1 Einsatz des Design-Science-Research-Paradigmas

Diese Dissertation ist methodisch in der DSR verankert. Das Paradigma zeichnet sich durch die Entwicklung und Evaluation innovativer Artefakte zur Lösung komplexer, praxisrelevanter Probleme aus (Hevner et al. [44]; Venable et al. [52]). Der Hauptbeitrag dieser Dissertation ist die Konzeption, Umsetzung und Validierung eines Enterprise-Architekturartefakts für ÖPNV-Unternehmen. Entlang der 6 DSR-Phasen (Kapitel 2.1) wur-

den mehrere Erkenntnis- und Evaluationszyklen durchlaufen, die jeweils neue Anforderungen, Strukturen und Perspektiven aufzeigten.

(1) Relevanz durch Problemidentifikation und Zieldefinition

Das Forschungsvorhaben beginnt mit einer umfassenden Problemanalyse (Kapitel 1.2 und 5), die technologische und organisatorische Herausforderungen bei der Integration von NMS in klassische Verkehrsunternehmen beleuchtet. Dabei zeigte sich, dass bestehende EA-Ansätze – insbesondere im ÖPNV – hybride Geschäftsmodelle, wie sie durch neue Mobilitätslösungen erforderlich werden, nur unzureichend unterstützen. Diese Erkenntnis verdeutlichte die Notwendigkeit eines neuen, domänenspezifischen Referenzarchitektur (Kapitel 3.2.6 und 4.3).

(2) Konstruktion eines domänenspezifischen Artefakts

Der Kernbeitrag der Dissertation liegt in der Entwicklung einer mehrschichtigen, erweiterbaren Referenzarchitektur (Kapitel 7). Diese basiert auf dem ITVU-Branchenmodell und ergänzt es um Bausteine für NMS-Funktionalitäten. Die Modellierung erfolgte nach dem ArchiMate-Standard, um Verständlichkeit und semantische Konsistenz zu gewährleisten (Kapitel 7.2). Das Ergebnis ist ein in sich geschlossenes Artefakt, das sich flexibel auf ein breites Spektrum von Organisationsformen im ÖPNV anwenden lässt – vom städtischen Verkehrsbetrieb bis hin zu Verkehrsverbünden.

(3) Methodisch fundierte Evaluation nach FEDS

Die Evaluation des Artefakts folgte systematisch den Vorgaben des Framework for Evaluation in Design Science (FEDS) von Venable, Pries-Heje und Baskerville (2016). In 9 Evaluationsepisoden (Kapitel 8.2) wurden unterschiedliche Perspektiven berücksichtigt, darunter Experteninterviews mit Praktikern (z.B. Stadtwerke München, BSAG), Architekturreviews durch Fachgremien (z.B. VDV-Tagung Rostock) sowie eine modellbasierte Reflexion der strukturellen Konsistenz und Wiederverwendbarkeit (Kapitel 8.3).

Die Evaluation umfasste formative (gestaltungsbegleitende) und summative (bewertende) Ziele und erfolgte in artifiziellen wie in naturalistischen Settings. Dadurch konnte die Nützlichkeit, Akzeptanz und Übertragbarkeit der Architektur fundiert validiert werden.

(4) Integration bestehender methodischer Konzepte

Ein weiterer wissenschaftlicher Beitrag liegt in der Verbindung etablierter Methoden der Enterprise-Architektur-Forschung mit domänenspezifischen Anforderungen des ÖPNV. Besonders hervorzuheben ist die Erweiterung des DSR-Ansatzes, indem der REAM-Ansatz von Felix Timm [46] eingebunden wurde. Letzterer ermöglicht eine strukturierte Entwicklung und Anwendung von Referenzarchitekturen. Kapitel 3.3 verdeutlicht methodische und strukturelle Parallelen zu REAM, etwa bei der Definition und Dokumentation

von Architekturbausteinen, der Capability-Analyse und der Identifikation übertragbarer Muster.

(5) Erweiterung der Wissensbasis zur digitalen Transformation im Mobilitätssektor

Die Dissertation leistet einen konzeptionellen und methodischen Beitrag zur gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik, indem sie ein bisher wenig erforschtes Feld adressiert: die Verbindung von EAM mit neuen Mobilitätsdiensten. Der entwickelte Architekturrahmen ist dabei kein Einzelfallmodell, sondern ein generalisierbares Referenzartefakt. Mit klaren Strukturen, Rollen und Prozessen bietet er eine Grundlage für die Weiterentwicklung in anderen Mobilitätsdomänen (Kapitel 10.6).

11.1.2 Praktische Relevanz und Anwendungsmöglichkeiten

Die in dieser Dissertation entwickelte Referenzarchitektur birgt großes Potenzial für den praktischen Einsatz in klassischen ÖPNV-Unternehmen. Sie hilft, bedarfsorientierte Mobilitätsdienste – v.a. NMS – strukturell, prozessual und technologisch zu integrieren. Dabei stellt die Architektur nicht nur ein theoretisches Modell dar, sondern soll als praxisnahes Referenzinstrument dienen, um bestehende IT-Landschaften, Geschäftsprozesse und strategische Steuerungsmechanismen zu transformieren.

(1) Unterstützung des IT-Architekturmanagements in Verkehrsunternehmen

Ein zentraler Einsatzbereich liegt im Enterprise Architecture Management (EAM) von Verkehrsunternehmen. Die Referenzarchitektur ermöglicht eine konsistente Modellierung strategischer, geschäftlicher und technischer Komponenten, die im ArchiMate-Standard visualisiert wurden (Kapitel 7.2.1–7.2.3). Durch die Erweiterung des ITVU-Branchenmodells um NMS-spezifische Module können bestehende Architekturen gezielt weiterentwickelt werden, ohne sie vollständig zu ersetzen.

Dadurch können IT-Abteilungen sowohl Bestandsinfrastrukturen bewahren als auch gezielt neue Services, Schnittstellen und Datenflüsse integrieren. Diese Fähigkeit wurde in den Evaluationsepisoden mit den SWM und mit der BSAG als besonders relevant hervorgehoben (vgl. Kapitel 8.2.2 und 8.2.3).

(2) Strategische Entscheidungsunterstützung für Mobilitätsanbieter

Das Modell bietet Entscheidungsträgern, die ihre Organisation in Richtung hybrider Mobilitätsangebote transformieren möchten, einen Orientierungsrahmen. Die in Kapitel 9 entwickelten und konsolidierten Architekturebenen – etwa zur Ressourcenplanung (9.1.3), Tarifgestaltung (9.1.4) und strategischen Verkehrsplanung (9.1.7) – zeigen, wie sich klassische und bedarfsorientierte Logiken so organisieren lassen, dass sie sich gegenseitig ergänzen.

Beispielsweise können Verkehrsunternehmen dynamische Ressourcendisposition oder flexible Tarifmodelle (z.B. Flat vs. Pay-per-Use) in ihr Angebot integrieren, ohne dass strategische Zielkonflikte entstehen. Dies verschafft ihnen einen klaren Wettbewerbsvorteil in den sich wandelnden urbanen Mobilitätsmärkten.

(3) Handlungsgrundlage für öffentliche Aufgabenträger und Verbände

Auch kommunale Verkehrsverbünde als Aufgabenträger sowie politische Entscheidungsträger und Regulierungsbehörden können die Architektur nutzen, um Förderstrategien, Ausschreibungen oder Plattformkonzepte für integrierte Mobilitätsdienste zu entwickeln. Die in Kapitel 5.4 dargestellten Anforderungen der Stadtentwicklung sowie die Nutzerbedarfe an Komfort, Intermodalität und digitale Buchbarkeit spiegeln sich in den Architekturbausteinen wider.

Wichtig ist dabei die Capability Map (Kapitel 9.1.8). Sie bietet einen strukturierten Überblick über die Fähigkeiten, die ein NMS-fähiges Verkehrsunternehmen benötigt – von Service-Orchestrierung über Nutzerinteraktionsmanagement bis hin zu Plattform-Governance. Diese Fähigkeiten können als Referenz für Zielarchitekturen in Förderprojekten und als regulatorischen Rahmenbedingungen dienen.

(4) Tool für Digitalisierungsprojekte im ÖPNV

Die Architektur erweist sich zudem als wertvolles Werkzeug für Projekt- und Veränderungsmanagement in Digitalisierungsinitiativen. Sie macht Abhängigkeiten zwischen strategischen Zielen, technischen Realisierungen und operativen Prozessen transparent und unterstützt die Entwicklung von Transformations-Roadmaps. Kapitel 6.3 mit seiner Zusammenfassung der Anforderungen und Kapitel 7.1.9 durch die Verbindung von strategischer und operativer Ebene liefern hierfür konzeptionelle Grundlagen und Visualisierungsmuster.

Darüber hinaus erleichtert die Referenzarchitektur die Umsetzung durch klare Rollenverteilungen, definierte Verantwortlichkeiten und strukturierte Fähigkeitslandkarten, die eine effektive IT-Governance fördern.

Die in Kapitel 9.6 dargestellten Erkenntnisse verdeutlichen die doppelte Wirksamkeit der REA: Sie dient sowohl als theoretisch fundiertes und kohärentes Referenzmodell als auch als anschlussfähiges und damit praktisch einsetzbares Steuerungsinstrument. Die Architektur hilft Verkehrsunternehmen, strategische Ziele wie Digitalisierung, Flexibilisierung und ökologische Nachhaltigkeit in konkrete operative Strukturen zu übersetzen. Besonders hervorzuheben ist, dass die Modellierung von Fähigkeiten, Prozessen und Schnittstellen eine systematische Verknüpfung zwischen Angebots- und Bedarfslogiken ermöglicht.

11.2 Einordnung der Ergebnisse und theoretische Ableitung

Die vorliegende Dissertation verfolgte das Ziel, eine Referenz-Enterprise-Architektur (REA) zur Integration bedarfsorientierter Mobilitätsdienste in klassische ÖPNV-Unternehmen zu entwickeln. Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich dabei nicht nur im Hinblick auf den konkret untersuchten Anwendungsfall bewerten, sondern erlauben darüber hinaus eine Einordnung auf einer abstrakteren Ebene, die über die Domäne des öffentlichen Personennahverkehrs hinausweist.

Ein zentrales Ergebnis der Arbeit besteht in der Erkenntnis, dass die Integration bedarfsorientierter Verkehre weniger durch technologische Fragestellungen als vielmehr durch Aspekte der Governance, der Verantwortungszuordnung und der institutionellen Kopplung geprägt ist. Die in Kapitel 7 entwickelte Referenz-Enterprise-Architektur adressiert diese Dimensionen explizit, indem sie fachliche Zustandsverantwortungen (System of Record), Integrationsverantwortungen sowie organisatorische Zuständigkeiten (Owned, Shared, Partner) klar voneinander trennt und systematisch miteinander in Beziehung setzt (vgl. Kapitel 7.1 und 7.3). Architektur übernimmt damit eine ordnende und strukturierende Funktion, die über eine rein technische Perspektive hinausgeht.

Vor diesem Hintergrund kann die entwickelte REA als ein Instrument zur expliziten Ausgestaltung von Governance verstanden werden. Architekturentscheidungen wirken dabei unmittelbar auf institutionelle Verantwortlichkeiten, Kopplungsgrade zwischen Organisationseinheiten sowie auf die Abgrenzung interner und externer Rollen. Die Trennung von fachlicher Zustandsführung, Integrationslogik und organisatorischer Verantwortung – wie sie insbesondere in den Delta-Sichten der Szenarien ausgearbeitet wurde – macht deutlich, dass Enterprise-Architektur in hochregulierten sozio-technischen Systemen nicht nur technische, sondern zugleich organisationale Ordnungsfunktionen erfüllt (vgl. Kapitel 7.3 sowie Tabelle 38).

Auch die in der Arbeit entwickelten Szenarien S1 bis S4 sind vor diesem Hintergrund nicht als zeitliche Entwicklungsstufen oder Reifegradmodelle zu interpretieren. Vielmehr bilden sie einen diskreten architektonischen Entscheidungsraum, innerhalb dessen unterschiedliche Ausprägungen von Integration, Datenhoheit und Verantwortlichkeit vergleichbar gemacht werden können. S4 fungiert dabei als vollintegrierte Referenzsicht, während S1 bis S3 als bewusst reduzierte Delta-Ausprägungen verstanden werden, die alternative Governance- und Integrationskonfigurationen abbilden (vgl. Kapitel 7.2 und Abbildung 32). Diese Interpretation entspricht der in Kapitel 7 vorgenommenen szenariobasierten Ausgestaltung der REA und vermeidet implizite normative Zielpfade.

Eine besondere Rolle kommt in diesem Zusammenhang der Integrationsarchitektur zu. Der in der REA vorgesehene Datenbroker übernimmt keine fachliche Logik und keine Zustandsführung, sondern fungiert als entkoppelnde Integrations- und Orchestrierungsschicht zwischen autonomen Systemen und Organisationen. Durch diese Ausgestaltung verbleibt die fachliche Verantwortung bei den jeweiligen Systemen, während zugleich eine lose Kopplung zwischen Organisationseinheiten und externen Akteuren ermöglicht wird (vgl. Kapitel 7.4 sowie Abbildung 39). Die Integrationsarchitektur wirkt damit als

strukturelles Bindeglied, ohne die bewusst modellierte Trennung von Verantwortlichkeiten aufzuheben.

Die in der Arbeit identifizierten Architektur- und Governance-Muster sind nicht auf den öffentlichen Personennahverkehr beschränkt. Vergleichbare Konstellationen finden sich in anderen hochregulierten Domänen, in denen regulatorische Anforderungen, organisationsübergreifende Kooperation und technische Integration gleichermaßen zu berücksichtigen sind. Die entwickelte Referenz-Enterprise-Architektur kann daher als domänenspezifische Ausprägung allgemeiner Architektur- und Governance-Prinzipien interpretiert werden, deren Übertragbarkeit in Kapitel 8 im Rahmen der szenariobasierten Evaluation bereits angelegt ist (vgl. Kapitel 8.2).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse der Arbeit Enterprise-Architektur als zentrales Ordnungs- und Steuerungsinstrument in hochregulierten soziotechnischen Systemen positionieren. Die Dissertation leistet damit nicht nur einen Beitrag zur Integration bedarfsorientierter Mobilitätsdienste im ÖPNV, sondern erweitert zugleich das Verständnis der Rolle von Architektur im Zusammenspiel von Technik, Organisation und Governance, wie es in der entwickelten Referenz-Enterprise-Architektur systematisch ausgearbeitet wurde (vgl. Kapitel 7).

11.3 Limitationen und Validität der Ergebnisse

Trotz der erzielten Ergebnisse und der positiven Rückmeldungen in der Evaluation zeigt diese Dissertation mehrere Einschränkungen, die sowohl methodischer als auch inhaltlicher Art sind. Sie betreffen v.a. die Generalisierbarkeit der Ergebnisse, die Tiefe der praktischen Implementierung sowie die begrenzte Datenbasis hinsichtlich der Langzeiteffekte. Im Anschluss an diese Begrenzungen wird die Validität der Ergebnisse (Kapitel 11.3.1–11.3.2) diskutiert.

(1) Beschränkung auf den deutschen Raum

Die entwickelte Referenzarchitektur basiert maßgeblich auf dem ITVU-Branchenmodell, einem in Deutschland verbreiteten Rahmen für Verkehrsunternehmen (Kapitel 6.1). Obwohl dieses Modell eine hohe Relevanz und Akzeptanz im deutschen Raum besitzt, lässt er sich nicht ohne Weiteres auf internationale Kontexte übertragen. Viele der adressierten Anforderungen – etwa regulatorische Vorgaben, Anforderungen hinsichtlich Tarifstrukturen oder technischer Infrastruktur – sind kulturell, politisch und institutionell bedingt. Eine längsschnittliche Validierung in anderen nationalen Mobilitätssystemen steht noch aus und sollte in künftigen Studien erfolgen.

(2) Begrenzte praktische Umsetzung

Die Architektur wurde in 9 strukturierten Episoden evaluiert (Kapitel 8.2), die auf Experteninterviews, Dokumentenanalysen und modellbasierter Diskussion basierten. Die Evaluationen legten methodisch den FEDS-Rahmen nach Venable et al. [52] zugrunde. Eine

vollständige Implementierung der Referenzarchitektur in einem realen Betriebssystem eines Verkehrsunternehmens fand jedoch nicht statt. Daher konnten die tatsächliche Integration, Performanz und betriebliche Wirkung in produktiven IT-Landschaften bislang nicht vollständig überprüft werden.

Die Validierung der Architektur beschränkte sich auf eine formative und teils summative Evaluation auf konzeptioneller Ebene. Die in Kapitel 9 dargestellten Resultate zur Ressourcennutzung, Tarifgestaltung oder Betriebslenkung basieren auf Modellanwendungen und hypothetischen Szenarien. Messbare Ergebnisse aus realem Betrieb fehlen.

(3) Mangel an Langzeitdaten

Aus der oben beschriebenen begrenzten Tiefe der praktischen Implementierung ergibt sich eine weitere Begrenzung: Derzeit fehlen Daten, mit denen sich die kurz- und langfristigen Effekte der Architekturimplementierung (z.B. auf Kundenzufriedenheit, operative Effizienz, Technologieakzeptanz) analysieren lassen. Die Aussagen zur Wirksamkeit der Architektur basieren auf Ex-ante-Einschätzungen und Expertenmeinungen, nicht auf Messungen über einen definierten Zeitraum hinweg. Solche Daten wären notwendig, um die Nachhaltigkeit und Dynamik der architektonischen Anpassungen im Zeitverlauf systematisch zu bewerten.

(4) Abstraktionsgrad des Architekturmodells

Die entwickelte Referenzarchitektur wurde durch ArchiMate-Diagramme und Capability Maps operationalisiert (Kapitel 7, 9); diese bewegen sich auf einem abstrakten Niveau, was eine breite Anwendbarkeit ermöglichen soll. Spezifische technische, betriebliche oder regulatorische Rahmenbedingungen einzelner Unternehmen können infolgedessen nicht abgebildet werden. Der Abstraktionsgrad ist somit ein Kennzeichen der entwickelten REA.

Die vorliegende Untersuchung zielt darauf ab, eine solide Grundlage für eine tiefgreifende und spezifizierende Weiterentwicklung zu schaffen. Ein weiteres Ziel ist, die Kommunikation zwischen Management, IT- und Fachabteilungen bereitzustellen und zu erleichtern.

Der Fokus liegt demnach weniger auf einer umfassenden und detaillierten Anleitung zur Umsetzung, sondern vielmehr auf Orientierung und Entscheidungsunterstützung.

(5) Vorannahmen zur technologischen und institutionellen Reife

Der Forschungsarbeit liegt zugrunde, dass bestimmte technologische Voraussetzungen – wie standardisierte Schnittstellen (z.B. VDV-KA, GTFS, OJP) oder interoperable Datenplattformen – bereits existieren. In der Praxis zeigen sich jedoch heterogene Systemlandschaften, fragmentierte Datenquellen und teilweise begrenzte Integrationsmöglichkeiten (siehe Kapitel 5.3.1). Diese Diskrepanz zwischen Modell und Realität erfordert

eine kritische Auseinandersetzung mit den zugrunde gelegten Voraussetzungen und Transformationsstrategien auf IT-Ebene.

11.3.1 Validität der Ergebnisse

Dieser Abschnitt ergänzt die Limitationsdarstellung um eine systematische Prüfung der Validität der Ergebnisse. Im Sinne des DSR-Ansatzes werden dabei interne und externe Momente, Konstrukt- sowie Reliabilitäts-/Replizierbarkeitsaspekte adressiert. Ergänzend werden die Grenzen methodologisch/normativer (bzw. DSR) und statistischer Schlussfolgerungen von Governance-Rahmenbedingungen und Compliance-Annahmen diskutiert. Die Darstellung bildet die jeweilige Threat-Mitigation-Residualrisiko-Logik ab und macht den Geltungsbereich der Schlussfolgerungen transparent.

(1) Interne Validität

Die interne Validität stützt sich auf triangulierte Evidenz (Interviewdaten, korrespondierende Architekturdokumente, Referenzprozesse und Normen) sowie auf den systematischen Abgleich des Entwurfs mit den im Unternehmen etablierten Wertschöpfungsketten. Potenzielle Verzerrungen (z.B. Selektionsbias) wurden durch standardisierte Protokolle und die Dokumentation von abweichenden Fällen adressiert. Dennoch verbleibt ein Residualrisiko, dass parallel laufende Transformationsprogramme beobachtete Effekte mitverursachen.

(2) Konstruktvalidität

Zur Sicherung der Konstruktvalidität werden zentrale Begriffe operationalisiert und in einer Traceability-Matrix der Evidenz zugeordnet (Tabelle 3, Tabelle 30, Domänen-/Prozesssteckbriefe (vgl. Anhang C, Abbildung 32). Das schließt eine Normen-Harmonisierung (Anhang A zu VDV-Schriften und Anhang B zu Nicht-VDV-Schriften) sowie die Unterscheidung Reservierung vs. Buchung (OJP-Logik) ausdrücklich ein. Wo nur Proxy-Messungen vorliegen (z.B. ‚Flexibilität‘ über Änderungsaufwände), wird die Aussagekraft entsprechend begrenzt.

(3) Externe Validität bzw. Übertragbarkeit

Die Ergebnisse sind primär für deutsche ÖPNV-Unternehmen mit VDV-KA und/oder OJP-Bezug, mit mittlerer bis großer Betriebsgröße und bei vorhandenem ITCS- und Vertriebs-Stack gültig. Übertragungen auf kleine Unternehmen, rein ländliche Räume oder Regionen ohne VDV-Bezug erfordern Anpassungen (z.B. alternative Standardprofile, andere Vertriebsarchitekturen). Die dokumentierten Randbedingungen (vgl. Kapitel 1) definieren die Grenzen der Verallgemeinerbarkeit.

(4) Reliabilität und Replizierbarkeit

Die Replizierbarkeit wird durch Versionierung des Artefakts (Modellsichten, Datenobjektkataloge), Entscheidungsprotokolle (Design-Rationale) sowie eine nachvollziehbare Evidenzkette (Anforderung → Entwurfsentscheidungen → Evaluation) gestützt. Eine vollständige Wiederholung der Evaluation setzt den Zugriff auf äquivalente Systemartefakte und Rollen (Leitstelle/ITCS, Vertrieb, Planung) voraus.

(5) Statistische Schlussfolgerungsvalidität

Wo quantitative Indikatoren (z.B. Auslastung, Wartezeiten) herangezogen wurden, dienen sie der deskriptiven Plausibilisierung und nicht der inferenzstatistischen Kausalprüfung. Effektgrößen und Konfidenzen sind in der Summativ-Evaluation zu ergänzen, sobald längsschnittliche Felddaten vorliegen.

(6) Triangulation und Robustheitsprüfungen

Methoden-, Daten- und Forscher-Triangulation wurden kombiniert: Dokument-/Normen-Analyse (VDV), Experteninterviews, Architekturanalysen sowie Szenario-basierte Walkthroughs entlang der Integrationsstufen. Robustheit wurde via Sensitivitätsanalysen getestet (z.B. alternative Gewichtungen in der Capability Map; Variation der Schnittstellenabdeckung; Hybridfälle mit z.B. Bedarfstopp bzw. Halten auf Anfrage (On-request)).

(7) Validität im FEDS-Sinn (Design-Science)

Die Evaluation folgt FEDS (formativ, summativ, künstlich, naturalistisch). Formative und künstliche Zyklen validierten Struktur und Vollständigkeit des Artefakts (Modell-/Normenabgleich, Experten-Reviews). Naturalistische Elemente ergaben sich aus realen Prozess- und Systemreferenzen. Eine summativ, naturalistische Bewertung (z.B. KPI-Vergleich über Betriebsperioden) bleibt aufgrund des Projektzeitraums begrenzt und bietet sich als Gegenstand künftiger Untersuchungen an.

Trotz der getroffenen Maßnahmen verbleiben Residualrisiken, besonders im Hinblick auf Generalisierbarkeit und längerfristige Wirksamkeit im Feld. Die Ergebnisse sind daher als durch Evidenz gestützte, jedoch kontextgebundene Empfehlungen zu verstehen.

(8) Governance, Ethik und Compliance als Validitätsbedingungen

Die Gültigkeit der Ergebnisse hängt von Governance- und Compliance-Annahmen ab (wie z.B. Datenschutz, KRITIS/BSI, Segmentierung kritischer Domänen). Weichen organisatorische Rahmenbedingungen hiervon ab, reduziert sich die Übertragbarkeit der Ergebnisse; entsprechende Abweichungen sind zu dokumentieren.

11.3.2 Threats und Mitigation anhand von Validitätsdimensionen

Der folgende Übersichtsrahmen fasst die wesentlichen Gefährdungen der Validität (Threats to Validity) der entwickelten REA entlang 8 Validitätsdimensionen (vgl. Tabelle 48) zusammen und stellt ihnen jeweils konkrete Mitigation-Maßnahmen gegenüber. Ziel ist es, die Aussagekraft der Ergebnisse systematisch abzusichern und deren Grenzen transparent zu machen. Weiterhin soll der Zusammenhang zwischen Forschungsfragen, Artefaktgestaltung und Evaluation nachvollziehbar werden. Die Tabelle verdichtet hierfür die in den Kapiteln 7–10 dokumentierten Entwurfs-, Evaluations- und Evidenzbausteine zu einem kompakten Prüf- und Argumentationsraster für Kapitel 11.

Tabelle 48: Threats und Mitigation

Validität	Typische Threats (kurz)	Mitigation ⁵¹	Interne Evidenz	Externe Evidenz
(1) Interne Validität	Alternativerklärungen; Confounding (Selektion, Historie, Reifung); unklare Kausalketten	Mehrstufiges Evaluationsdesign (FEDS); Ableitung von Erkenntnissen je Episode; Rückkopplung ins Artefakt	Kap. 8.1–8.3: Evaluationsdesign, Episoden u. Ergebnisse Kap. 9.6: Erkenntnisse	[240]; Kap. 2 (Methodik); Kap. 11.3.1 (Validitätsprüfung)
(2) Konstruktvalidität	Unklare/zu enge Operationalisierungen; Begriffs-/Mess-Drift	Systematische Begriffs- und Objektmodellierung (z.B. Trennung Reservierung/Buchung), Capability Map; strukturierte Steckbriefe	Kap. 9.1.8: Capability Map; Kap. 8.2: Einarbeitung Expertenfeedback Anhang D–G (Steckbriefe)	[72], Kap. 2 Design Tests u. Taktiken für Konstruktvalidität; Multiple Quellen/ <i>Chain of Evidence</i> (Anhang Z).
(3) Externe Validität (Übertragbarkeit)	Kontextabhängigkeit; eingeschränkte Generalisierbarkeit	Fall-/Kontext-Triangulation über BSAG, SWM, BVG sowie VDV-Formate; Misch-/Hybridmodelle explizit adressiert	Kap. 8.2: Episoden I–IX Kap. 8.3: Ergebnisse	[72, S. 77–79], Design Tests (externe Validität) u. Generalisierungslogik.
(4) Reliabilität und Replizierbarkeit	Inkonsistente Datenerhebung; fehlende Prozess-/Artefaktdokumentation	Dokumentation (View-Katalog), standardisiertes Evaluationsdesign; Case-Database über strukturierte Anhänge.	Kap. 7.5.9: Dokumentation & Replizierbarkeit Anhang C & Anhang G	[72, S. 154, 178–179], Case-Database, <i>chain of evidence</i> → stärkt Reliabilität Konvergenz durch mehrere Quellen.
(5) Statistische Schlussfol-	Geringe Power; α/β -Fehler; inadä-	Einsatz simulationsgestützter Bewertungen und domänenspezifischer	Anhang F (Variationspunkte)	[240, S. 42–52], (Statistical Conclusion

⁵¹ Mitigation und Designentscheidung.

Validität	Typische Threats (kurz)	Mitigation ⁵¹	Interne Evidenz	Externe Evidenz
gerungsvalidität	quate Effektschätzung	scher Metriken (z.B. CO ₂ -Einsparung) – wo quantitativ sinnvoll; Verzicht auf Inferenzstatistiken	Hinweis auf simulationsgestützte Architekturbewertungen.	Validity und Threats) Fokus auf deskriptive Plausibilisierung.
(6) Triangulation und Robustheit	Einquellen-Bias; fragile Resultate.	Methoden-/Quellen-Triangulation (Literatur-, Fallstudie-, Architekturreviews); Evaluationsmatrix je Anforderung.	Kap. 7.3.2: triangulierter Anforderungskorpus; Kap. 8.1–8.3 FEDS-Strategie.	[72, S. 169–173], (Triangulation – „converging lines of inquiry“)
(7) Validität im FEDS-Sinn (Design-Science)	Unpassende Evaluationsstrategie (früh/ spät; künstlich oder naturalistisch).	Übernahme FEDS formative und naturalistische Episoden in Build-Schleifen; spätere summative Elemente	Kap. 8.1 FEDS-Einsatz; Kapitel 7.3.5: iteratives Build mit formativer Evaluation	[52, S. 77–89] (FEDS-Prozess; naturalistisch und formativ, summativ)
(8) Governance, Compliance als Validitätsbedingungen	DSGVO/KRITIS-Risiken; unscharfe Verantwortlichkeiten; Repro-/Audit-Lücken	Domänen-Segmentierung, Data-Broker/ Zero-Trust, klare Rollen/Governance (z.B. Payment als Nebenbuch); Schutz menschlicher Probanden in Studien	Kap. 10.2: Einordnung der Ergebnisse und theoretische Ableitung Kap. 11.3: Limitationen Lessons-Learned (Security).	[72, S. 86–89] (Protecting Human Subjects); [44, S. 83–87] (Guidelines inkl. Rigor/Evaluation).

Die Übersicht beansprucht keine Vollständigkeit aller denkbaren Bedrohungen/Threats. Die Tabelle dokumentiert den aktuellen Stand sowie diesbezügliche Absicherungen für diese Dissertation und ist als „lebendes“ Artefakt zu verstehen: Bei Replikationen oder Follow-up-Studien (Kapitel 11.4) sollte sie projektspezifisch fortgeschrieben werden.

11.4 Ausblick und weitere Forschung und Anwendung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine Referenz-Enterprise-Architektur entwickelt und evaluiert, die New Mobility Services in klassische ÖPNV-Unternehmen integriert. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik. Die gewonnenen Erkenntnisse eröffnen zugleich zahlreiche Ansätze für weiterführende Forschung, um das theoretische Modell empirisch zu überprüfen, zu verfeinern und auf andere Kontexte zu übertragen.

(1) Längsschnittstudien zur empirischen Validierung der Architekturwirkung

Die Referenzarchitektur wurde bisher konzeptionell validiert (Kapitel 8). Experteninterviews und strukturierte Evaluationsepisoden belegen ihre Nützlichkeit, doch fehlen langfristige empirische Daten, um die Auswirkungen auf betrieblicher, ökonomischer oder ökologischer Ebene zu bewerten (Kapitel 10.2). Daraus ergibt sich ein zentrales Desiderat. Zukünftige Studien sollten Fallbeispiele über 12 bis 24 Monate untersuchen, um bspw. folgende Fragen zu klären:

- Wie verändert sich die Nutzung von NMS im Verhältnis zum rein klassischen Angebot, wenn NMS in ein ÖPNV-Unternehmen integriert werden?
- Welche Auswirkungen hat die Integration von NMS auf die operative Ressourcennutzung im ÖPNV-Unternehmen?
- Inwieweit ändert die Integration die Systemlandschaft und technologische Flexibilität des ÖPNV-Unternehmens?

Die Ergebnisse aus Kapitel 9.6 verweisen auf Forschungsbedarf und weiterführende Forschungsfelder. Dazu gehören die empirische Messung ökologischer und ökonomischer Effekte hybrider Mobilitätssysteme, die Weiterentwicklung dynamischer Kompetenzmodelle für Verkehrsunternehmen und die Untersuchung algorithmischer Optimierungsverfahren zur präzisen Verknüpfung von AO- und BO-Prozessen. Auch die zunehmende Plattformisierung des ÖPNV⁵² eröffnet neue Forschungsräume – etwa zur Governance multimodaler Ökosysteme, zu datenbasierten Modellen und zur Resilienz kritischer Mobilitätsinfrastrukturen.

(2) Integration adaptiver und KI-basierter Architekturelemente

Die gegenwärtige Referenzarchitektur basiert auf einem modularen, deterministischen Aufbau mit klar definierten Komponenten und Schnittstellen (Kapitel 7.1). Eine vielversprechende Erweiterung könnte sein, adaptive Architekturkonzepte einzubinden, die sich mithilfe von Datenanalysen und maschinellem Lernen an veränderte Nutzungsprofile oder Verkehrslagen anpassen.

Prognosemodelle für Nachfrageverteilungen, automatisierte Ressourcenplanung oder dynamische Preismodelle könnten künftige Architekturversionen bereichern. Dies würde die Entwicklung „kognitiver Unternehmensarchitekturen“ ermöglichen, die externe und interne Impulse proaktiv verarbeiten.

⁵² Die Plattformisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ist eine logische Konsequenz der fortschreitenden Digitalisierung sowie der Integration von bedarfsorientierten Verkehrs (NMS).

(3) Übertragung auf weitere Mobilitätsdomänen und Smart Cities

Die Dissertation fokussiert auf den klassischen ÖPNV in Deutschland. Ein logischer nächster Schritt wäre die Anwendung des Referenzmodells auf angrenzende Mobilitätsbereiche wie:

- Regionalverkehr und intermodale Verkehrsplattformen,
- Mobility-as-a-Service-Ökosysteme,
- Smart-City-Infrastrukturen mit integrierten Energie- und Mobilitätslösungen.

Dafür müssten die in Kapitel 9.1.8 in der Capability Map beschriebenen Fähigkeiten um zusätzliche Rollen, Schnittstellen und Integrationsmechanismen erweitert werden, etwa für städtische Datenplattformen, Umweltinformationssysteme oder nutzerzentrierte Services.

(4) Anpassung an andere IT-Governance-Systeme: Internationale Vergleichsstudien

Die Architektur orientiert sich am ITVU-Modell sowie an den institutionellen Strukturen und technischen Standards des deutschen Markts (Kapitel 6.1). Für eine internationale Anwendung müsste sie an andere regulatorische, kulturelle und technologische Rahmenbedingungen angepasst werden. Dabei könnten Forschungsprojekte begleitend untersuchen:

- Welche EA-Standards im und für den ÖPNV dominieren in anderen Ländern?
- Wie beeinflussen Unterschiede in Mobilitätsregulierung und Datenschutz die Architektur?
- Welche Rolle spielen privatwirtschaftliche Plattformanbieter wie Uber oder Bolt in der Architekturentwicklung?

Ein Vergleich europäischer, US-amerikanischer und asiatischer Mobilitätsmodelle könnte hier wertvolle Erkenntnisse liefern.

(5) Weiterentwicklung von EA-Evaluationsmethoden im DSR-Kontext

Die Evaluation der Architektur (Kapitel 8) liefert auch methodologische Impulse: Das FEDS [52] erwies sich als tragfähiger Rahmen, doch bleibt die Verknüpfung von Enterprise-Architecture-Evaluation und praxisnahen Nutzungsdaten ausbaufähig.

Künftige Forschung könnte zudem die systematische Integration weiterer Aspekte in DSR-Projekte untersuchen, so etwa

- hybride Evaluationsformen (z.B. Kombination qualitativer Interviews mit z.B. (quantitativen) Betriebsdaten),
- simulationsgestützte Architekturbewertungen,

- und domänenspezifische Metriken (z.B. CO₂-Einsparung, Intermodalitätsquote).

Eine naturalistische Evaluation in Pilotumgebungen wäre der nächste Schritt. Sie sollte laufzeitnahe Mess-KPI, automatisiertes Conformance-Checking und vertiefte Sicherheitsvalidierung (Netzsegmentierung, No-Go-Kopplungen) umfassen.

Darauf könnte eine summative Feldevaluation über mehrere Fahrplanperioden folgen, mit präzise definierten KPIs (z.B. Auslastung, mittlere Wartezeit, Anschlussqualität, Störungsrobustheit) und einem kontrolliertem Vorher-Nachher-Vergleich mit einer Kontrollgruppe. Ergänzend wären – wo operativ möglich – randomisierte A/B-Tests zu spezifischen Integrationsmustern durchzuführen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die in diesem Kapitel skizzierten Forschungs- und Anwendungsperspektiven nicht auf die Weiterentwicklung einzelner Systemlösungen abzielen, sondern konsequent an der in dieser Dissertation entwickelten Logik eines architektonischen Entscheidungsraums ansetzen. Die Referenz-Enterprise-Architektur stellt damit eine strukturierte Grundlage bereit, um zukünftige Architektur-, Integrations- und Governance-Entscheidungen in hochregulierten Mobilitätskontexten nachvollziehbar, vergleichbar und reflektiert zu treffen. In dieser Funktion wirkt der Ausblick zugleich als Brücke zwischen den in Kapitel 11.2 vorgenommenen theoretischen Einordnungen und einer weiterführenden empirischen, methodischen und praktischen Vertiefung der Arbeit und unterstreicht den Anspruch der Dissertation, einen nachhaltigen Beitrag zur Enterprise-Architecture-Forschung zu leisten.

Glossar

Data Owner bezeichnet eine fachliche Rolle, die die Verantwortung für den Inhalt, die Qualität und die Zugriffsberechtigungen eines Datenobjekts trägt (Abgrenzung zum Data Steward).

Data Steward bezeichnet eine IT-seitige Rolle, die für die technische Verwaltung, Speicherung und Strukturierung von Daten verantwortlich ist.

DRT {Demand Responsive Transport = flexible, nachfragegesteuerte öffentliche Verkehrsleistung} bezeichnet flexible, nachfragegesteuerte öffentliche Verkehrsleistungen, die Fahrten außerhalb fester Linien und Takte erbringen, Fahrgastanfragen bündeln und dynamisch disponieren; konzeptionell liegt DRT „zwischen Linienbus und Taxi“ (intermediate form of transport). Diese klassische Kurzdefinition geht auf Mageean und Nelson zurück [241, S. 255].

In der internationalen Literatur werden DRT-Angebote häufig als Flexible Transport Services (FTS), Dial-a-Ride bzw. (im deutschen Sprachraum) Rufbus/AST gefasst [242, S. 39–45]. DRT unterscheidet sich vom angebotsorientierten Linienverkehr (AO) durch variable Routen, Haltepunkte und Einsatzzeiten sowie eine obligatorische Voranmeldung (Telefon/App). Europäische Referenzmodelle klassifizieren DRT als eigenständige „demand-responsive“ Kategorie neben „scheduled“ und „personal“ modes (CEN/TS 17413:2020 [243], Scope und Tabellen zur Mode-Einteilung).

DRT ist in der Regel ICT-basiert (Buchung/Dispatching), nutzt kleinere Gefäße, bündelt Fahrten (Pooling) und wird besonders in Niedrig-Nachfrage-Räumen oder als Zubringer/Last-Mile eingesetzt (vgl. Überblick und Markt-Nischenanalyse bei Davison et al. [244, S. 50–61]).

FTS {Flexible Transport Services} bezeichnet einen Sammelbegriff für kollektive, nachfrageorientierte ÖV-Bedienformen mit Flexibilität bzgl. Route/Stopps/Zeit, die klassische Linienverkehre ergänzen oder speisen; umfasst DRT als Subtyp [242].

Idempotenz (Idempotency): Eine Eigenschaft von Schnittstellen-Operationen (API-Calls), bei der das mehrfache Ausführen derselben Anfrage denselben Zustand auf dem Server bewirkt wie eine einzige Ausführung. Das bedeutet: Auch wenn ein Client (z.B. die App) denselben Befehl (z. B. „Buche Ticket X“) aufgrund eines Verbindungsfehlers dreimal sendet, wird die Buchung und Abbuchung im Hintergrund technisch nur einmal durchgeführt.

Ingestion (Datenaufnahme): Der Prozess der technischen Anbindung und Aufnahme von Daten aus verschiedenen internen und externen Quellen (z. B. Sensoren, Partner-APIs, Altsysteme) in eine zentrale Datenplattform (hier: AP-20). Im Gegensatz zum einfachen Kopieren umfasst Ingestion oft auch die erste Validierung, Bereinigung und Transformation der Rohdaten in ein einheitliches Format, bevor sie weiterverarbeitet oder gespeichert werden.

Latenz: Verzögerungszeit bei der Datenübertragung; im Kontext von NMS entscheidend für die Aktualität von Fahrzeugpositionen und -vorhersage (kritisch für Betrieb und Fahrgastinformation) und Buchungsstatus.

OJP (-Logik) (Open Journey Planner → Open API for Distributed Journey Planning) bezeichnet die vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) definierte Norm CEN/TS 17118, welche eine API zur föderierten, verteilten Reiseauskunft definiert. Die OJP-Logik umfasst (a) das Home-System mit Active/Passive/Distributing-Rollen und (b) die Trennung von Reservierung (Auskunft/Option) und Buchung (Vertrag/Bezahlung); ausgetauscht werden primär Routing-Ergebnisse zur „Linking-of-Services“-Kopplung bestehender Systeme [245, S. 1–3, 2–3, 17, 24–26, 23–24].

Playthrough (Modell-Durchspiel): Eine Methode der Architekturevaluation (in dieser Arbeit in Episode VIII angewandt), bei der spezifische Szenarien oder Konfigurationen (z. B. verschiedene Unternehmensgrößen oder Szenarien S1–S4) simulativ durch das Architekturmodell „gespielt“ werden. Im Gegensatz zum rein statischen Walkthrough liegt der Fokus auf der Prüfung der Instanzierbarkeit und Variabilität: Es wird getestet, ob das Referenzmodell auch unter veränderten Parametern (z.B. „Kleines Unternehmen ohne eigene IT“) logisch konsistent bleibt und funktioniert.

PRISMA { Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses } bezeichnet das in dieser Arbeit eine evidenzbasierte Berichts-richtlinie für systematische Reviews und Metaanalysen. Die aktuelle Fassung PRISMA 2020 ersetzt die Version von 2009 und umfasst eine 27-Punkte-Checkliste sowie ein Flussdiagramm (Flow Diagram) zur standardisierten Offenlegung von Identifikation, Screening, Eligibility und Einschluss der Studien; Ziel ist vollständige, transparente und reproduzierbare Berichterstattung der Review-Ergebnisse [66, S. 1–2].

Reconciliation: (Finanzieller) Abgleich und Abstimmung von Datensätzen zwischen verschiedenen Systemen (z.B. zwischen Vertriebs- und Bankensystem), um Konsistenz sicherzustellen.

Settlement: Der tatsächliche finanzielle Ausgleich (Zahlungsfluss) zwischen Parteien (z. B. Plattformbetreiber und Subunternehmer) nach erfolgtem Clearing.

SLR-LOGIK {Systematic Literature Review} bezeichnet in dieser Arbeit die angewandte Methode zum Systematic Literature Reviews. SLR ist eine protokollbasierte, reproduzierbare und bias-minimierende Methode zur systematischen Suche, Bewertung und Synthese der Literatur zu einer spezifischen Forschungsfrage. Die SLR-Logik umfasst dabei die Protokollierung, Suche, das Screening, die Qualitätsbewertung, die Extraktion, die Synthese, das PRISMA-konforme Reporting und Updates [70, S. 10–11, 13–16]; [66, S. 1–3].

System of Record (SoR): Das führende Quellsystem, das den verbindlichen, originalen Datenbestand für ein bestimmtes Geschäftsobjekt (z. B. Kundendaten) hält.

Token: Digitaler Stellvertreter oder Identifikator (z.B. für eine Kreditkarte oder Fahrtberechtigung), der sensible Originaldaten ersetzt, um Sicherheit und Datenschutz zu erhöhen.

Tr./Bu. {„Tr.“ = Trip/Journey/Reservation, unverbindlich; „Bu.“ = Buchung, verbindlich} bezeichnet das in dieser Arbeit architekturleitende Trennprinzip zwischen (i) vorvertraglicher Reise-/Reservierungslogik („Tr.“ = Trip/Journey/Reservation, unverbindlich) und (ii) dem vertraglich bindenden Buchungsschritt („Bu.“ = Buchung) gemäß OJP-Logik. Dieses Prinzip steuert Haftungs-/SLA-Zuweisungen, Schnittstellen und Datenflüsse (z. B. Offer/Quote → Reservation → Booking), wird in der Vertriebsdomäne modellhaft verankert (u.a. Journey Hub, Booking Core) und in den Szenario Walkthroughs als Konformitätskriterium „Tr./Bu.-Compliance“ überprüft. Vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 8.1.3–8.2 zur Traceability und KPI Operationalisierung; Szenario Tabelle mit „Checkliste OJP Konformität Tr./Bu.“ und KPI: Tr./Bu.-Compliance = 100 %; Domänen/Applikationssteckbriefe „Reiseauskunft/Reservation/Booking“; sowie VDV Expertenhinweis: „Buchung in der Architektur trennen in (nicht bindende) Reservierung und (verbindliche) Buchung.

Trust Boundary: Sicherheitsgrenze innerhalb einer IT-Architektur (z.B. zwischen Office-IT und KRITIS-relevanter Leitstellentechnik), an der Datenflüsse kontrolliert werden müssen.

Walkthrough (Architektur-Durchsprache): Eine statische Evaluationsmethode, bei der Architekturartefakte (wie Prozessmodelle, Datensteckbriefe oder Applikationslandschaften) gemeinsam mit Domänenexperten schrittweise durchgegangen und geprüft werden. Ziel ist die Identifikation von logischen Brüchen, fehlenden Elementen oder Missverständnissen im Entwurf, bevor eine dynamische Simulation (siehe Playthrough) erfolgt. Der Fokus liegt auf der strukturellen Korrektheit und Vollständigkeit der Modelle.

Anhang

Der Anhang dieser Dissertation dient der Dokumentation und Transparenz ergänzender Materialien, die den Forschungsprozess, die Modellierungsergebnisse sowie die Evaluation nachvollziehbar machen, jedoch den Umfang des Haupttextes überschreiten würden. Er stellt damit eine systematische Erweiterung des Hauptteils dar und ermöglicht es, die in der Arbeit entwickelten Konzepte, Modelle und Ergebnisse im Detail zu prüfen.

Durch diese Struktur wird der Anhang zu einem eigenständigen Nachweisteil, der es ermöglicht, die wissenschaftliche Herleitung, Konstruktion und Evaluation der Dissertation auf einer umfassenden Datengrundlage nachzuvollziehen. Gleichzeitig wird der Haupttext entlastet und auf die wesentlichen Argumentationsschritte fokussiert.

Verzeichnis des Anhang

- A. Einordnung VDV-Schriften
- B. Einordnung Nicht-VDV-Schriften
- C. Domänen-Prozess-Steckbriefe (DP)
- D. Applikations-Steckbriefe (AP)
- E. Datenobjekt-Steckbriefe (DO)
- F. Variationspunkt-Steckbriefe (VP)
- G. Capability-Steckbriefe (CS)
- H. Applikationsdienst-Steckbrief (AS)
- I. Implementation-und-Migration-Sicht (Komponenten)
- J. Event-Steckbriefe (EV)
- K. Business-Service-Steckbrief (BS)
- L. Business-Rolle-Steckbrief (BR)
- M. Business-Actor-Steckbrief (BA)
- W. Weitere Elemente (Cx, PLx, REQx, WPx)
- Z. Digitales Zusatzmaterial (externer Datenträger)

Hauptquellen der Steckbriefe

VDV-Referenzkorpus, europäische Normen der Transmodel-Familie (EN 12896, SIRI, NeTex), OJP/TRIAS, OSDM, TOMP-API, Design-Science-Research-Rahmenwerke sowie einschlägige ISO/IEC-Normen zu Security und Governance.

Anhang A: Einordnung VDV-Schriften

Alle hier aufgeführten Schriften sind offiziell vom Verband (VDV) publiziert und können über die Homepage des VDV (<https://www.vdv.de/schriften---mitteilungen.aspx>, abgerufen am 14.11.2025) offen eingesehen werden.

VDV-Schrift	Thema/Zweck	Architektur	Anforderungsbezug	Primärer Einsatzk.
VDV-KA (Kernapplikation/ eTicket Deutschland)	Spezifikationsfamilie für elektronisches Fahrgeldmanagement (Rollen/Prozesse, Medien, Clearing).	B/A/T	Governance/ Sicherheit; Interoperabilität	Vertrieb/Kontrolle (Ticket/Beleg), Auskunft (Preise)
VDV 300 (IBIS-Wagenbus)	Klassischer Fahrzeugbus (seriell) zur Kopplung Bordrechner–Peripherie.	T (A)	Interoperabilität (On-Board)	On-Board
VDV 301 (IBIS-IP)	IP-basierter Nachfolger des Wagenbusses; Services im Fahrzeug & Anbindung ITCS.	A/T	Interoperabilität Sicherheit (Netz/IP)	On-Board, Echtzeit
VDV 451	Austauschformat zwischen ÖPNV-Anwendungen (Begleitformat zu 452/455).	A	Interoperabilität (Backoffice)	Planung/ Backoffice
VDV 452	Geplante Daten (Netz/Fahrplan, Kalender u.a.) für IT-Systeme.	A	Datenobjekte; Interoperabilität	Plan/ Publikation
VDV 453	Ist-Daten/DFI, Anschlusssicherung (ITCS ↔ DFI/ITCS).	A/T	Echtzeit- Interoperabilität	Ist-Daten/DFI
VDV 454	Ist-Daten zur Reiseauskunft/Abfahrtsmonitore (SIS/REFSIS).	A	Echtzeit- Interoperabilität	Auskunft/DFI
VDV 459	Schnittstelle für nachfragegesteuerte Verkehre (AST/On-Demand) ins ITCS/Info-Gefüge.	A	Interoperabilität (DRT)	Ist-Daten DRT
VDV 462 (NeTEx-DE-Profil)	Profil/Regeln für standardisierten Austausch geplanter Daten (CEN NeTEx).	A	Datenobjekte; Interoperabilität	Plan/ Publikation

VDV-Schrift	Thema/Zweck	Architektur	Anforderungsbezug	Primärer Einsatzk.
VDV 430/431-1/431-2 (TRIAS/EKAP)	System-/Schnittstellenarchitektur für Auskunfts-/Mobilitätsplattformen (TRIAS/EKAP).	A	Interoperabilität (APIs)	Auskunft/MaaS
VDV 432	Einheitliche Haltestellen-ID (DHID/Global ID).	B/A	Datenobjekte/IDs	Plan/Publikation/RT
VDV 433	IDs für Linien/Fahrten (DLID/DTID/DFID).	B/A	Datenobjekte/IDs	Plan/Ist-Daten
VDV 456	Infrastruktur-Datenmanagement (IDMVU) für schienengebundenen Stadtverkehr.	A/T	Datenobjekte; Asset-Governance	Infrastruktur/Plan
VDV 457/457.2	APC/FGZ: Handlungsempfehlung & Rohdatenschnittstellen (Belegung/Auslastung).	A	Datenobjekte; Interoperabilität	Monitoring/Analytics
VDV 461	ITCS ↔ BMS/Depot: Ist-Datenaustausch Leitstelle–Betriebshof.	A	Interoperabilität (Betriebshof)	Depot/Disposition
VDV 463	E-Bus-Lademanagement (CMS ↔ ITCS/BMS), inkl. Preconditioning.	A/T	Energie/Depot; Sicherheit	Depot/E-Bus-Betrieb
VDV 736-1/-2 (UmS/SIRI-SX)	Standardisierte Störungs-/Situationskommunikation.	A	Governance (Redaktion); Interoperabilität	Auskunft/DFI
VDV 455	Dienstplandaten an ITCS/AVMS (Roster, Fahrerzuordnung).	A	Interoperabilität (Ressourcen)	Operative Prozesse
VDV 261	Vorkonditionierung E-Bus (ISO 15118 VAS) – Heizen/Kühlen/Lüften beim Laden.	A/T	Energie/Depot; Interoperabilität	Depot/E-Bus-Betrieb
VDV-7046 (Mitteilung)	<i>Nutzeranforderungen an eine offene Mobilitätsplattform</i> (Grundlage OMP).	B	Governance/Anforderungen (MaaS); Interop-Leitplanken	Plattform/MaaS

VDV-Schrift	Thema/Zweck	Architektur	Anforderungsbezug	Primärer Einsatzk.
VDV-436-1 (OMP Teil 1)	Rollenmodell & typische Kooperations-szenarien (OMP).	B	Governance/ Kooperationsmodelle	Plattform/ MaaS
VDV-436-2-1 (OMP Teil 2-1)	Referenzarchitektur für Mobilitätsplattformen.	A	Interoperabilität Architektur-richtlinien	Plattform/ MaaS
VDV-436-2-2 (OMP Teil 2-2)	Interaktionen/ Prozesse in der OMP.	A	Interoperabilität Prozess-schnittstellen	Plattform/ MaaS

Legende zur Tabelle: Architekturebene(n): B = Business, A = Application, T = Technology; Anforderungsbezug (Beispiele): Interoperabilität, Datenobjekte/IDs, Governance/Sicherheit, Echtzeit, Energie/Depot, Buchung/Reservierung

Hinweise zur Ableitung der Spalten 3–5

Die Schichtenzuordnung (B/A/T) folgt der Enterprise Architekturlesart (Business/Application/Technology-Layer) und der technischen Verortung in den ITCS/Echtzeit, Planungs, On Board sowie Depot/EBus Domänen. Beispiele und Schnittstellenflüsse für 301/452/453/454/463/461/455 und die Auskunft/DFI Kette sind in ITCS und Anzeiger Dokumenten dargestellt.

Die in der Dissertation genutzte OMP-Reihe (VDV-436-x) sowie VDV-7046 sind offiziell publiziert (VDV-Downloads und Verlagsseite); 7046 dient als Anforderungskorpus, die 436 Teile leiten Rollen, Architektur und Interaktionen ab.

Anhang B: Einordnung Nicht-VDV-Schriften

Alle hier aufgeführten Schriften sind offiziell publiziert und können über die jeweilige Gremium offen eingesehen werden.

Norm	Hauptkriterium	Quelle (Link)	Entsprechende VDV-Schriftenreihe
ITS-Richtlinie/ MMTIS- Durchführungsakte Richtlinie 2010/40/EU (ITS) und Delegierte Verordnung (EU) 2017/1926	Governance & Rechtsrahmen	Europäisches Parlament und Rat (2010): Richtlinie 2010/40/EU über intelligente Verkehrssysteme, ABl. L 207, 06.08.2010; Europäische Kommission (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/1926 (EU-weite multimodale Reiseinformationen), ABl. L 272, 21.10.2017. (Mobility and Transport)	VDV 463 (OJP-Anbindung in Auskunft), VDV 452/453/454 (Echtzeit/ITCS/DFI)
EU Data Act/PSI (Open-Data) Verordnung (EU) 2023/2854 („Data Act“) und Richtlinie (EU) 2019/1024 (PSI/Open-Data)	Governance & Rechtsrahmen	EU (2023): Verordnung (EU) 2023/2854 über harmonisierte Vorschriften für einen fairen Datenzugang und -nutzung, ABl. L , 22.12.2023; EU (2019): Richtlinie (EU) 2019/1024 über offene Daten, ABl. L 172, 26.06.2019. (EUR-Lex)	VDV 463 (Datenbereitstellung Auskunft), VDV 436-x (NMS/DRT – Datenhoheit), VDV 702 (org./Governance, sofern verwendet)
eIDAS 2.0/EU-Wallet Verordnung (EU) 2024/1183 („eIDAS 2.0“/EU-Wallet; Änderung der VO (EU) 910/2014)	Governance & Rechtsrahmen	EU (2024): Verordnung (EU) 2024/1183 zur Einführung der Europäischen Digitalen Identitäts-Wallet, ABl. L , 11.04.2024. (EUR-Lex)	VDV 459 (Ticketing/Payment-Prozesse; Identitäten/Token in Vertriebsflüssen)
NIS2 (Cyber) Richtlinie (EU) 2022/2555 („NIS 2“)	Governance & Rechtsrahmen Sicherheit & Identität	EU (2022): Richtlinie (EU) 2022/2555 über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau, ABl. L 333, 27.12.2022. (EUR-Lex)	keine eigene VDV-Norm Querschnitt zu allen VDV-Schnittstellen (Betrieb/ISMS); keine dedizierte VDV-„NIS2“-Schrift

Norm	Hauptkriterium	Quelle (Link)	Entsprechende VDV-Schriftenreihe
Transmodel (EN 12896) (Transmodel, Teile 1–x)	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	CEN: Transmodel – Überblick und Beziehungen zu Implementierungsstandards (EN 12896). (transmodel-cen.eu)	VDV 463 (OJP nutzt Transmodel-Konzepte), VDV 462/464 (Datenbereitstellung/Publication; abhängig von Einsatz)
NeTEx (EN 16614) (NeTEx, Teile 1–3)	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	Link (abgerufen am 14.12.2025): https://transmodel-cen.eu/index.php/netex/	VDV 463/462 (Import/Austausch in Auskunft/Publication), Bezug zu Fahrplandatenflüssen
SIRI (EN 15531) (SIRI, aktuelle Fassung)	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	CEN: EN 15531-1:2022 (SIRI – Service Interface for Real-time Information). (Iteh Standards)	VDV 452/453/454 (ITCS/DFI/Echtzeit)
ISO 24014-1 (IFM) (Public transport – Interoperable fare management system)	Fachmodelle & Austauschformate (CEN/ISO)	ISO (2015): ISO 24014-1:2015; ergänzend ISO-Webstore-Eintrag (Leitlinien). (Iteh Standards)	VDV 459 (E-Ticketing/Payment), ggf. VDV 431/432 (Vertrieb/Verfahren – je nach Einsatz)
GTFS/GTFS-Realtime	De-facto-Standards & Open-APIs	MobilityData: GTFS-Referenz (Schedule/Realtime). (General Transit Feed Specification)	VDV 462/464, VDV 463 (Anschluss an Auskunft)
GBFS (General Bikeshare Feed Specification)	De-facto-Standards & Open-APIs	NABSA/MobilityData: GBFS-Spezifikation (GitHub/Guides). (GitHub)	keine eigene VDV-Norm (Anbindung über Auskunft/Plattform; optional via VDV 463-basierte Föderation)

Norm	Hauptkriterium	Quelle (Link)	Entsprechende VDV-Schriftenreihe
MDS (Mobility Data Specification)	De-facto-Standards & Open-APIs	LADOT/NACTO: MDS – Überblick und Zielsetzung. (Los Angeles Department of Transportation)	keine eigene VDV-Norm (kommunale Steuerung; außerhalb VDV-Schnittstellen)
TOMP-API (Transport Operator to MaaS Provider)	De-facto-Standards & Open-APIs	TOMP Working Group: TOMP-API Überblick & Spezifikation. (tomp-wg.org)	keine eigene VDV-Norm (Geschäfts-API MaaS/Broker; ggf. Kombination mit VDV 463/459 in Lösungen)
UIC OSDM (IRS 90918-10)	Vertrieb & Zahlung	UIC/OSDM: IRS 90918-10 (General Part), aktuelle Online-Spezifikation. (Open Sales and Distribution Model)	VDV 459 (Vertrieb/Zahlung – Brückenmodell möglich), ggf. VDV 463 (Auskunft → Vertrieb)
EMVCo Contactless/PCI-DSS	Vertrieb & Zahlung	EMVCo: EMV® Contactless Specifications; PCI SSC: PCI DSS v4.x Dokumente. (EMVCo)	VDV 459 (Payment-Integration), operative Sicherheitsanforderungen
Mobility Data Space (DE)	Datenräume & Plattformen	Mobility Data Space – offizieller Auftritt und Leistungsbeschreibung. (Mobility Data Space)	keine eigene VDV-Norm (Datenraum/Usage Control; VDV-Schnittstellen können Datenquellen sein)
MDM/mCLOUD/Mobilithek (BMDV)	Datenräume & Plattformen	BMDV: Mobilithek (Nationaler Zugangspunkt, Nachfolge von MDM/mCLOUD); mCLOUD-Infoseite. (BMV)	VDV 462/464 (Publikation/Datendrehscheiben), VDV 463 (Auskunftsanbindung)
ISO/IEC 27001/27701	Sicherheit & Identität	ISO: ISO/IEC 27001:2022 (ISMS-Anforderungen); ISO/IEC 27701: 2019 (PIMS-Erweiterung). (ISO)	keine eigene VDV-Norm Querschnitt zu allen VDV-Schnittstellen (Betrieb/ISMS)

Norm	Hauptkriterium	Quelle (Link)	Entsprechende VDV-Schriftenreihe
OAuth 2.0/OpenID Connect (FAPI-Profil)	Sicherheit & Identität	IETF RFC 6749 (OAuth 2.0); OpenID Connect Core 1.0; OpenID FAPI 1.0 (Final). (IETF Datatracker)	VDV 459 (Vertriebs-/Payment-Flows), generell API-Sicherheit für VDV-Schnittstellen
IEC 62443 (Industrial Automation & Control Systems Security)	Sicherheit & Identität	ISA/IEC 62443-Reihe – Überblick & Zweck. (isa.org)	keine eigene VDV-Norm (OT-Security, relevant bei Depot- und Leittechnik; nicht VDV-spezifisch)
OpenTripPlanner/Navitia/MOTIS/Digitransit	Referenz-Stacks & OSS	OTP Projektseite & Doku; Navitia API-Doku; MOTIS (GitHub); Digitransit (HSL). (opentripplanner.org)	VDV 463/462 SIRI-Anbindungen als Datenquellen (indirekter Bezug)
Pelias/Photon (Geocoding)	Referenz-Stacks & OSS	Pelias Projektseite; Photon (komoot) – GitHub & Live-Instanz. (pelias.io)	keine eigene VDV-Norm
Keycloak, Kong/Apigee, Kafka/NATS	Referenz-Stacks & OSS	https://www.keycloak.org/	keine eigene VDV-Norm (Integrations-Backplane; VDV-Schnittstellen als Payload)

Anhang C: Domänen-Prozess-Steckbriefe (DP)

Dieser Anhang dokumentiert standardisierte Domänen-Prozess-Steckbriefe, die die im Rahmen der Dissertation identifizierten Domänen und Prozesse strukturiert abbilden und eine intermediäre Rolle im Ordnungsrahmen einnehmen.

Domänen-Steckbriefe	Prozess-Steckbriefe
DP-I Planung & Ressourceneinsatz	DP-1 Fahrgastzählung & Analyse DP-2 Planung (AO) DP-3 Planung (BO) (Gebiete/Zeiten) DP-4 Fahrplanung (AO) DP-5 Umlaufplanung (AO) DP-6 Dienstplanung (AO, BO) DP-7 Einsatzplanung (BO) DP-8 Fahrzeugdisposition (AO, BO) DP-9 Personaldisposition (AO, BO)
DP-II Tarif- und Produktmanagement	DP-10 Tarif- u. Produktgestaltung (AO) DP-11 Fahr und Mietgestaltung (BO) DP-12 Produktkataloggest. (AO, BO)
DP-III Betriebslenkung	DP-13 Fahrgastinformation (AO, BO) DP-14 Kurzfr. Verkehrsdispo. (AO, BO) DP-15 Fahrleistungserbringung (AO, BO)
DP-IV Vertrieb	DP-16 Reiseausk. & Reisepl. (AO, BO) DP-17 Buchung (AO, BO) DP-18 Reservierung (BO) DP-19 Abrechnung intern (AO und BO) DP-20 Abrechnung extern (AO und BO) DP-21 Clearing (BO)

Die jeweilige Domäne (römisch I–IV) wird durch die zugehörigen Prozesse (arabisch 1–20) konkretisiert. Der Aufbau und die Struktur der Steckbriefe werden auf den folgenden zwei Seiten erläutert. Die ausgefüllten Steckbriefe selbst sind aus Gründen der Umfangsbegrenzung der Hauptarbeit ausschließlich in digitaler Form auf einem separaten Datenträger bereitgestellt und in Anhang Z (Digitale Zusatzmaterialien) verzeichnet.

Struktur der Domänensteckbriefe

Name (Id.)	<i>DP-X – Domänenname</i> (z. B. „DP-III Betriebslenkung“)
Zweck/Ziele	Kurzbegründung und Zielsetzung der Domäne/Prozessgruppe (warum sie existiert; angestrebte Wirkungen).
Scope/Prozesse (DP IDs)	Geltungsbereich und zugehörige Prozess-IDs (DPx); benennt die im Steckbrief adressierten Prozesse.
AO/BO-Logik (Kurz)	Kurzlogik zur Ausprägung in Angebots- (AO) und Bedarfsorientierung (BO), häufig mit Verantwortungsverschiebungen je Szenario (S1–S4).
Stakeholder	Wichtige interne/externe Rollen/Einheiten mit Bezug zur Domäne.
Eingaben (typisch)	Typische Inputs (Daten/Signale/Parameter) in die Domäne.
Ausgaben (typisch)	Typische Outputs (Artefakte/Ergebnisse/Daten) aus der Domäne.
Schnittstellen	Relevante Systemschnittstellen/angrenzende Funktionsbereiche.
Standards	Branchen-/Verbands- oder technische Standards, auf die sich die Domäne stützt (z. B. VDV, OJP/OSDM, NeTEx/GTFS, SIRI).
Primärsysteme	Kern-Applikationen/Systeme, die in der Domäne maßgeblich sind.
Integrationsanker	Leitmotive für Integration/Schnittstellen (z. B. API-Gateway/IAM, Data-Broker, Event-Streaming; Kataloghoheit, Synchronität).
KPIs (Beispiele)	Beispielhafte Kennzahlen zur Steuerung/Überwachung (z. B. p95-Wartezeit, Sync-Zeiten, Quote-Treffer).
Sicherheit/Compliance	KRITIS-/Security-Leitplanken (Zonentrennung OT ↔ IT, starke AuthN/Z, Audit-Trails, Freigabe-Workflows, Vier-Augen-Prinzip).

Struktur der Prozessbriefe

Name (Id.)	<i>DP-x (1..) – Prozessname</i> (z. B. „DP-17 Buchung (AO, BO)“)
Zweck/Ziele	Kurz präziser Zweck und angestrebte Ergebnisse des Prozesses
AO/BO-Logik (Kurz)	Einordnung Angebotsorientierung/Bedarfsorientierung; Verantwortungsprinzip (Owned/Shared/Partner) je Szenario S1–S4 in Stichpunkten
Stakeholder	Relevante Rollen/Funktionen (z. B. Fachbereiche, Leitstelle, Controlling etc.)
Eingaben (typisch)	Typische Inputs/Datenquellen (fachlich/technisch)
Ausgaben (typisch)	Zentrale Outputs/Arbeitsergebnisse (Artefakte/Daten)
Schnittstellen	Angebundene Systeme/Dienste (fachlich/technisch), inkl. Flussrichtung
Standards	Relevante Normen/Spezifikationen (z. B. VDV, OJP/TRIAS, SIRI etc.)
Primärsysteme	Führende Anwendung(en)/Komponenten, die den Prozess primär stützen
Integrationsanker	Leitmuster/Technologieanker (z. B. API-Gateway/IAM, Event-Backbone, Data Broker/DMZ)
KPIs (Beispiele)	Messgrößen mit Richtwerten/Sollvorgaben (z. B. p95, Erfolgsquoten, Durchlaufzeiten)
Sicherheit/Compliance	OT/IT-Trennung, Datenschutz/PII, Audit-/Versionierungspflichten, KRITIS-Bezug etc.

Anhang D: Applikations-Steckbriefe (AP)

Dieser Anhang enthält standardisierte Applikationssteckbriefe die im Rahmen der Dissertation identifizierten und untersuchten Anwendungssysteme.

AP-1 Fahrgastzählung & -analyse	AP-12 Ticketkontrollsysteme
AP-2 Verkehrsplanung	AP-13 Fahrplanveröffentlichungssysteme
AP-3 Netz- & Fahrplanungssysteme	AP-14 Leitstellen Systeme
AP-4 Umlauf & Laufplanungssysteme	AP-15 On Board Rechnersystem
AP-5 Dienstplanungssystem	AP-16 Vertriebssysteme (stationär/mobil)
AP-6 Personaldispositionssystem	AP-17 Reiseauskunftssystem
AP-7 Fahrzeugdispositionssystem	AP-18 Reservierungs- & Buchungssysteme
AP-8 Betriebshof-/Depotmanagementsysteme	AP-19 Abrechnungs-/Zahlungssysteme
AP-9 Werkstatt-/Instandhaltungssysteme	AP-20 Datenbroker
AP-10 Tarif & Produktdatenbankssysteme	AP-21 Einsatzplanungssystem
AP-11 Anzeiger Systeme	AP-22 NMS-Plattform

Struktur der AP-Steckbriefe (einheitliches Schema)

Name	eindeutige Bezeichnung der Applikation
Anwendungs-komponente	fachliche Rolle und Systemgrenzen der Applikation
Beschreibung	(kurze) präzise fachliche Zweckbestimmung
Art	Betriebsmodell (zentral/dezentral; organisatorisch, technisch)
Nutzer	zugeordnete Rollen (z.B. Verkehrsplaner, Personaldisponent, Leitstellenmanager, ...)
Funktionen	zentrale Application Functions (intern)
Datenflüsse (intern)	wesentliche interne Datenflüsse/Verarbeitungswege
Anwendungs-dienste	extern bereitgestellte Application Services (Leistungen für andere Systeme/Bereiche)
Anwendungs-funktionen	interne Leistungsbausteine (Ausführungslogik, ggf. kapselbar als Service)
Anwendungs-schnittstellen	Application Interfaces inkl. Zugriffs-/Protokollhinweisen
Beziehungen	Abhängigkeiten zu anderen Anwendungen, Services und Datenobjekten (inkl. Richtung und Zweck)

Die einzelnen Applikationssteckbriefe (AP) sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger abgelegt. Das Verzeichnis der digitalen Zusatzmaterialien ist in Anhang Z gesondert aufgeführt.

Anhang E: Datenobjekt-Steckbriefe (DO)

Der Anhang dokumentiert die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Datenobjekte in tabellarischer Form je Anwendungssystem. Ziel ist die strukturierte, konsistente und nachvollziehbare Darstellung der für die Referenzarchitektur relevanten Informationsobjekte. Die Datenobjekttabellen ergänzen die im Hauptteil dargestellten Architektur- und Modellierungsergebnisse um eine detaillierte Beschreibung der zentralen Informationsbausteine.

Ihre Aufnahme dient zum einen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der modellierten Referenzarchitektur durch die explizite Ausweisung der zugrundeliegenden Datenstrukturen, und zum anderen der praktischen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Organisationen, die die entwickelten Modelle anwenden oder erweitern möchten.

Damit leisten die Datenobjekttabellen einen zentralen Beitrag zur Verknüpfung fachlicher Anforderungen, systemischer Umsetzung und Datenarchitektur sowie zur Sicherstellung der Konsistenz innerhalb der entwickelten Enterprise-Architektur. Der Anhang bündelt hierzu standardisierte Datenobjekte je Anwendungssystem. Folgende Datenobjekte wurden identifiziert und untersucht:

DO-1 Fahrgastzahlendaten	DO-2 Fahrgastumfragedaten
DO-3 Beförderungsnachfragedaten	DO-4 Liniendaten
DO-5 Anschlussdaten	DO-6 Stadtplanungsdaten
DO-7 Tarifstrukturdaten	DO-8 Fahrplandaten
DO-9 Haltestellendaten	DO-10 Umlaufplanungsdaten
DO-11 Fahrzeugdaten	DO-12 Fahrzeugperipheriedaten
DO-13 Personaldaten	DO-14 Dienstplanungsdaten
DO-15 Personaldaten (Disposition)	DO-16 Dienstausführungsdaten
DO-17 Verfügbarkeitsdaten	DO-18 Abwesenheits- und Sperrdaten
DO-19 Arbeitszeit-/Kontostanddaten	DO-20 Regel- und Restriktionsdaten (Arbeitszeit/Tarif)
DO-21 Tausch- und Wunschkdienst-Daten	DO-22 Dispositions-Event-/Logdaten
DO-23 Fahrzeugdaten (Disposition)	DO-24 Fahrtausführungsdaten
DO-25 Fahrzeugstatus- und Verfügbarkeitsdaten	DO-26 Umlauf-/Blockausführungsdaten
DO-27 Störungs- und Incidentdaten (fahrzeugbezogen)	DO-28 Depot- und Abstellflächenbelegungsdaten
DO-29 Tank-/Lade- und Energieverbrauchsdaten	DO-30 Onboard-Peripherie- und Kommunikationsstatusdaten

DO-31 Fahrzeugstatusdaten – Betriebshofmanagement	DO-32 Qualitätskennziffern (Betriebshof)
DO-33 Reinigungs- und Pflegeauftragsdaten	DO-34 Werkstatt-/ Instandhaltungsauftragsdaten (Depot)
DO-35 Rangier- und Bewegungsauftragsdaten (Depot)	DO-36 Sicherheits- und Kontrollchecklisten (Fahrzeug & Depot)
DO-37 Ressourcendaten Betriebshofpersonal	DO-38 Infrastruktur- und Anlagenstammdaten (Depot)
DO-39 Betriebsbereitmeldungen an Leitstelle	DO-40 Depot-Ereignisdaten
DO-41 Prognosedaten Fahrzeugbedarf/Ersetzungsfahrzeuge	DO-42 Tarifdaten (AO)
DO-43 Fahrgeld- und Mietkonditionen (BO)	DO-44 Produktdaten (AO/BO)
DO-45 Berechtigungs- und Kundensegmentdaten	DO-46 Erlösaufteilungs- und Clearingregeldaten
DO-47 Abfahrts-/Ankunftsinformationen	DO-48 Sprachen- und Lokalisierungsdaten
DO-49 Template- und Textbausteindaten	DO-50 Kanal-/Zielgruppen-Mapping
DO-51 Anschlussinformationen	DO-52 Störungsinformation
DO-53 Ticketkontrolldaten	DO-54 Prüfer-/Kontrollpersonalstammdaten
DO-55 Kontrolleinsatz- und Schichtplandaten	DO-56 EBE-/Revenue-Protection-Falldaten
DO-57 Kontrollgerät-/Prüfmittelstammdaten	DO-58 Kontrollstrategie- und Kampagnendaten
DO-59 Kontroll-KPIs und Reportingdaten	DO-60 Fahrplandaten (Fahrplanveröffentlichung)
DO-61 Publikationsmetadaten & Release-Management-Daten	DO-62 Medien- und Layoutdaten für Fahrplanmedien
DO-63 Profil-/Exportkonfigurationsdaten (NeTEx/GTFS/MMTIS)	DO-64 Änderungs-/Delta-Daten (Diff-Fahrpläne)
DO-65 Qualitäts- und Konsistenzprüfungsdaten (Validation Reports)	DO-66 Nutzungs- und Downloadstatistiken
DO-67 Kommunikationsdaten (ITCS)	DO-68 Dispositionsdaten
DO-69 Störungsdaten	DO-70 Fahrgastinformationsdaten

DO-71 Fahrzeug- und Lokalisierungsdaten (ITCS)	DO-72 Fahrer-/Personalstatusdaten (ITCS)
DO-73 ITCS-Kennzahlen & Betriebsreports (KPIs)	DO-74 Leitstellen-Event-/Auditlogdaten
DO-75 ITCS-Konfigurations- und Parametrisierungsdaten	DO-76 On-Board-Statusdaten
DO-77 On-Board-Konfigurationsdaten	DO-78 On-Board-Event-/Logdaten
DO-79 On-Board-Fahrgastzählraten	DO-80 On-Board-Fahrgastinformati- onsdaten
DO-81 On-Board-Kommunikations- und Verbindungsstatusdaten	DO-82 On-Board-Diagnose- und War- tungsdaten
DO-83 Produktdaten (ÖPNV)	DO-84 Kundendaten
DO-85 Verkaufsdaten	DO-86 Zahldaten
DO-87 Vertrags-/Abodaten	DO-88 Ticket-/Mediumsdaten
DO-89 Gutschein- und Rabattdaten	DO-90 Channel-/Terminalstammdaten
DO-91 Vertriebs-KPIs & Reportingdaten	DO-92 Service-/Beschwerdedaten (vertriebsnah)
DO-93 Anfragedaten/Suchparameter	DO-94 Nutzer-/Profil- und Präferenz- daten
DO-95 Haltestellen-/POI-Daten (Auskunfts- sicht)	DO-96 Tarif-/Preisinformationsdaten (für Auskunft)
DO-97 FGI-/Output-Layoutdaten (Reiseinfo)	DO-98 Routeninformationen
DO-99 Verkehrsdaten	DO-100 Reiseauskunfts-KPIs & Nut- zungsstatistiken
DO-101 Anfragedaten/Angebotsvorschlags- daten	DO-102 Kapazitäts- und Ressourcen- planungsdaten (Slot-/Tourenplanung)
DO-103 Stornierungs- und Änderungsdaten	DO-104 Reservierungsdaten
DO-105 Buchungsdaten	DO-106 Kommunikations- und Be- nachrichtigungsdaten
DO-107 Regel- und Parametrisierungsda- ten (Buchungs-/Stornoregeln)	DO-108 Buchungs-/Reservierungs- KPIs & Reportingdaten
DO-109 Zahlungsarten- und Gebühren- stammdaten	DO-110 Mandats- und Einzugsdaten (SEPA)
DO-111 Clearing-Daten	DO-112 Bankdaten

DO-113 PSP-/Provider-Konfigurationsdaten	DO-114 Risikomanagement- und Fraud-Daten
DO-115 Payment-Transaktionslogdaten	DO-116 Refund-/Chargeback-Daten
DO-117 Zahlungsarten- und Provider-KPIs & Reportingdaten	DO-118 Verkehrslagedaten
DO-119 Wetterdaten	DO-120 Veranstaltungsdaten
DO-121 GIS-Daten	DO-122 Park- und Stellplatzdaten
DO-123 Taxi- und Rufsystemdaten	DO-124 Mobilfunkbewegungsdaten
DO-125 Einsatzplanungsdaten	

Struktur der DO-Steckbriefe

Name (Id.)	Eindeutiger Name (DE/EN), Synonyme
Domäne/Prozess (DP)	Zuordnung: Domäne (z. B. <i>DP II – Planung & Ressourceneinsatz</i>) und Prozess(e)
Kurzdefinition	1–2 Sätze, fachlich präzise Zweckbestimmung
Primärer Identifikator	Schlüssel (z. B. DO-ID, zusammengesetzter Schlüssel)
Top-Attribute (max. 8)	Wichtigste Felder mit kurzer Semantik (Typ/Einheit)
Beziehungen (max. 5)	Zu anderen DOs (Richtung/Art, z. B. <i>Fahrplan</i> → <i>Umlauf</i> „instanziiert“)
CRUD × Prozess	Wer <i>erzeugt/liest/ändert/löscht</i> (stichpunktartig, Prozess/Applikation)
System of Record/Schnittstellen	Führendes System; konsumierende Systeme/APIs; Ereignisse (<i>Events</i>)
Datenqualität (DQ)	Aktualität, Vollständigkeit, Genauigkeit, Zielwerte/SLA
Schutz & Recht	Schutzbedarf, DSGVO-Bezug (PII: ja/nein), Aufbewahrung/Löschung
Standards/Mapping	Relevante Standards/Klassifikationen (z. B. Transmodel, NeTEx/GTFS, SIRI, OJP)
Verantwortung	Data Owner (Fach), Data Steward (IT)
Szenario & AO/BO	Relevanz je Szenario S1–S4; Beitrag <i>angebotsorientiert/bedarfsorientiert</i>
Versionierung	Schema-Version, Änderungslog (Verweis)

Die Datenobjektsteckbriefe (DO) sind auf dem digitalen Datenträger enthalten; dessen Inhalt ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang F: Variationspunkt-Steckbriefe (VP)

Die in der Szenario-Analyse erarbeiteten Variationspunkte (VP) wurden in Form von Variationspunkt-Steckbriefen (VP) dokumentiert. Folgende Variationspunkte wurden in der Arbeit identifiziert und untersucht:

VP-PR-01: BO-Planung	VP-PR-02: Dienstplanung AO/BO
VP PR 03: Disposition Fahrzeug/Personal AO/BO	VP TP 01: Tarif-/Produktgestaltung AO
VP TP 02: Fahr-/Mietpreisgestaltung BO	VP TP 03: Produktkatalog-Hoheit AO/BO
VP OPS 01: Fahrgastinformation AO/BO	VP OPS 02: Kurzfrist-Disposition (AO/BO) & Fahrleistung
VP SA 01: Reiseauskunft/-planung (AO/BO)	VP SA 02: Reservierung (BO, unverbindlich) vs. Buchung (AO/BO, verbindlich)
VP SA 03: Abrechnung intern/extern	VP INT 01: Zonen-/Integrationsleitbild (cross-cutting)
VP INT 02: Standards & Schnittstellen (cross-cutting)	VP INT 03: Daten/Events & Semantik (cross-cutting)
VP SEC 01: Security/KRITIS & Compliance (cross-cutting)	VP ORG 01: Make-or-Buy & Plattformfähigkeit
VP ORG 02: Partner-/SLA-Management & Clearing	VP ORG 03: Rollen-/Prüfprozesse

Struktur der VP-Steckbriefe

VP-ID	Eindeutiger Identifier für den Steckbrief
VP-Name	Name des Variationspunkt
Ziel/Rationale	Warum existiert der VP? Welche Entscheidungslogik/Leitplanke wird variabel gemacht?
Scope (DP)	Betroffene DP-IDs (Range oder Liste) bzw. „cross“ inkl. Schwerpunkt-DPs
Verantwortung S1–S4	Owned/Shared/Partner je Szenario; bei AO/BO-Split explizit „AO:“/„BO:“
Architektur-Impact	Betroffene Ebenen (B/A/D/I), betroffene Kernbausteine, Integrationsmuster/Overlay-Konsequenzen
Daten/Events	Relevante DO/EV (oder Topics/Artefakte) und deren Semantik/Qualitätsaspekte
Security/KRITIS	Zonen/DMZ-Leitplanken, AuthN/Z, Audit, regulatorische Anforderungen, Schutzbedarf
KPIs & Nachweise	Erfolgskriterien + Evidenzmethode (Monitoring/Audit/Walkthrough/Review etc.)
Migration	Szenario-Transitionen (S1→S2→S3→S4) als Pfad/Meilensteine
Risiken & Kontrollen	Hauptrisiken + Kontrollen (SoD, Vier-Augen, Audit Trails, technische/organisatorische Controls)
Constraints	Cross-Tree-Constraints (z. B. C1–C4) + ggf. zusätzliche Leitplanken als harte Regeln
Traceability	DP-IDs ↔ RACI ↔ ArchiMate/Crosswalk ↔ DO/EV ↔ Evidenzanker (Tabellen/Anhänge)

Die Variationspunktsteckbriefe (VP) sind auf dem digitalen Datenträger enthalten; dessen Inhalt ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang G: Capability-Steckbriefe (CS)

Im Folgenden werden die in der Dissertation verwendeten Capabilities aufgelistet und danach die Struktur der Capability-Steckbriefe vorgestellt.

Initiale Capabilities (Abbildung 24) und abgeleitete Capabilities (Abbildung 48)

Initiale Capabilities	Abgeleitete Capabilities
Kundenbetreuung (A)	C01 , C03 , C02
IT-(Weiter-) Entwicklung (B)	C13 , C10, C12
Managen von digitalen Plattformen (C)	C10 , C11 , C12 , C01, C03
Umweltschutzmanagement (leistungsbe- zogen) (D)	C13
Mmgt. bedarfsorientierten ÖPNV (E)	C02 , C11

Die fett dargestellten Capabilities ist das jeweilige primär Capability. Die normal dargestellte Capability ist jeweils das sekundär Capability.

Variantengetriebene Capabilities

CAP-INT-01: Integrations- und Datenmanagement- Plattform	CAP-INT-02: Schnittstellen- und Event-Governance
CAP-DATA-01: Datenhoheit & -governance	CAP-VER-01: End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS

Struktur des Steckbriefs

Name (Id.)	Kurzbezeichnung und eindeutige Kennung der Capability (z.B. „CAP-...“ + sprechender Name), damit sie in Text, Modellen und Referenzen eindeutig identifizierbar ist.
Zweck/Ziele	Beschreibt knapp, wozu die Capability existiert und welchen Beitrag sie zur Zielarchitektur leistet (Problem, das gelöst wird; Nutzen für AO/BO, NMS, Partner usw.).
Scope/ Prozesse (DP-IDs)	Grenzt den Geltungsbereich ein: auf welche Domänen und Geschäftsprozesse (DP-Nummern) sich die Capability bezieht und wo sie wirksam ist (End-to-End oder nur in Teilprozessen).
AO/BO-Logik (Kurz, S1–S4)	Erklärt, wie sich die Capability in den Szenarien S1–S4 ausprägt und wie sie angebotsorientierte (AO), bedarfsorientierte (BO) und hybride (HY) Logiken unterstützt (Owned/Shared/Partner je Szenario).

Stakeholder (typisch)	Listet typische Rollen und Organisationseinheiten, die von der Capability betroffen sind oder sie verantworten (Fachbereiche, IT, Partner, Governance-Rollen).
Eingaben (typisch)	Typische Informations- und Datenobjekte, die die Capability benötigt oder verarbeitet (z.B. Angebote, Buchungen, Events, DQ-Vorgaben, SLA-Parameter).
Ausgaben (typisch)	Ergebnisse, Artefakte oder Daten, die die Capability erzeugt und anderen Prozessen/Systemen zur Verfügung stellt (z.B. Tickets, Abrechnungen, Schnittstellenkontrakte, Monitoring-Infos).
Schnittstellen (kurz)	Kurze Beschreibung der wichtigsten technischen und fachlichen Kopplungspunkte zu anderen Systemen/Partnern (z.B. Journey, Booking, Payment, Clearing, OT/IT-Übergänge). Kombinierte Sicht auf Kopplungspunkte und verwendete Standards, wenn beides im Steckbrief gemeinsam beschrieben wird (z.B. konkrete API-Flows plus Standardreferenz).
Standards (Auszug)	Relevante Normen, Branchenstandards und Protokolle (z.B. OJP, TRIAS, OSDM, SIRI, TOMP, VDV), an denen sich die Capability fachlich und technisch orientiert.
Primärsysteme (AP)	Benennung der zentralen Applikationen/Plattformen (AP-Nummern), in denen die Capability technisch hauptsächlich realisiert ist (System of Record bzw. Integrationskern).
Integrationsanker	Beschreibt, wo und wie die Capability in der Integrationsarchitektur verankert ist (Zonenmodell, DMZ, API-Gateway, Event-Backbone, Data Broker, Kontrollpunkte).
KPIs (Beispiele)	Beispiele für Messgrößen, mit denen die Leistungsfähigkeit der Capability überwacht wird (z.B. Latenzen, Erfolgsquoten, Abweichungen, SLA-Erfüllung).
Sicherheit/ Compliance	Fasst Sicherheits-, Datenschutz- und Compliance-Anforderungen zusammen, die bei dieser Capability besonders relevant sind (z.B. KRITIS-Zonen, AuthN/Z, Audit, DSGVO/PII-Bezug).

Die Capability-Steckbriefe (CS) sind auf dem digitalen Datenträger enthalten; dessen Inhalt ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang H: Applikationsdienst-Steckbrief (AS)

Im Folgenden werden die Applikationsdienste aufgelistet und im Anschluss die Struktur dargestellt.

AS-01-A	Zählzeiten-Export/Auslastungsdienst
AS-02-A	Angebotsvorgaben-Dienst
AS-03-A	Fahrplan-Export/Netzobjekt-Katalog
AS-03-B	Fahrplan-Export (Publikation)
AS-04-A	Umlauf-Export
AS-05-A	Dienstplan-Export (Roster)
AS-06-A	Einsatzstatus-Dienst (Crew)
AS-07-A	Zuteilungsdienst/Dispatch-API
AS-10-A	Tarif-/Produkt-API
AS-10-B	Entitlement-Regeln/BO Pricing
AS-10-C	Produkt-Katalog/MDM-Service
AS-14-A	Realtime-Feed (ITCS-Soll)/Deployment Plan API
AS-14-B	DFI-Publikationsdienst/Realtime-Feed
AS-14-C	Störungsdienst/Dispatch-Events
AS-15-A	Positions-/Event-Dienst (OBU)
AS-17-A	OJP-Check (Pre-Booking)
AS-18-A	Booking-API (Reservation-Part)
AS-18-B	Booking-API (Commit)
AS-19-A	Authorize/Capture/Refund-APIs
AS-20-A	Settlement-Reports/Clearing-Dienst

Struktur des Steckbriefs

ID/Ref (Referenz)	Eindeutige Identifikation des Dienstes zur Traceability; i. d. R. als AS-xx-Suffix geführt und einer AP zuordenbar.
Zugehörige Domäne (DP)	Business IT Alignment Brücke: zeigt, dass der Dienst einen konkreten Prozess (DP) unterstützt (prozessgetrieben statt „Technik um der Technik willen“).
Name	Lesbarer, fachlich aussagekräftiger Titel als „sprechender Anker“ des Dienstes (wichtig für Nachvollziehbarkeit in Crosswalk/Interface Contracts).
Kurzbeschreibung	„Management-Summary“ der Funktionalität; häufig inkl. Hinweis operativ (Echtzeit) vs. strategisch (Batch/slow data).
Schnittstelle (Provider → Consumer)	Schnittstelle zwischen den Applikationen/Anwendungen mit Ausprägung zwischen Provider und Consumer.
Schnittstellen Typ	Architektonische Entscheidung: Batch, Sync (API) oder Event (klassische Massendaten vs. Interaktion vs. Realtime Kopplung).
Output (Core Data/DO)	Verweis auf die Kern Datenobjekte (DO) des Dienstes; dient der Single Source of Truth Logik und verhindert Silobildung (Owner Klarheit).
Output (Events/EV)	Kern der Event Driven Architecture: Welche Ereignisse werden publiziert (lose Kopplung über Event Backbone).
Format/Standard	Präferierter Integrationsstandard bzw. Formatvorgabe in der Zielarchitektur (S3/S4) als Interoperabilitätsanker.
Szenario-Verantwortung (S1–S4)	Markiert, in welchen Integrationsszenarien der Dienst benötigt/ausgeprägt wird (Basissicht S4; Delta Sichten S1–S3).
Bebauungsplan-Kodierung (AO/BO/HY)	Kodierung erfolgt in Abbildung 54, S4
Security/Compliance	AuthN/Z, Zonenzugehörigkeit (OT/DMZ/IT/Partner), Datenschutz/PII Bezug, Audit Scope; konsistent zum KRITIS/Zonenleitbild.
Quelle (Kernverortung)	Verwendung innerhalb der Dissertation.

Die Applikationsschnittstellensteckbriefe (AS) sind auf dem digitalen Datenträger enthalten; Verzeichnis und Speicherort sind in Anhang Z dokumentiert.

Anhang I: Implementation und Migration Sicht (Komponenten)

Zur Unterstützung des Kapitels 9.2.4 wurde die hier unten aufgeführte Tabelle (Implementation-und-Migration-Sicht (Komponenten)) erstellt, die die Implementation- & Migration-View anhand der verwendeten Komponenten analysiert und auflistet. Diese Tabelle diene hauptsächlich zur Ausformulierung des Gesamtarchitektur in Kapitel 9.3.

Implementation-und-Migration-Sicht (Komponenten)

Szenario	Komponente	Delta zu S4 (Begründung)
S4	Im Vollintegrationsszenario S4 liegt die REA als konsistentes Zielbild vor, in dem die strategischen Capabilities CAP-VER-01, CAP-INT-01, CAP-INT-02 und CAP-DATA-01 vollständig ausgeprägt sind und gemeinsam die Rolle des Verkehrsunternehmens als plattform- und datengetriebener Mobilitätsakteur tragen.	
S3	CAP-VER-01 End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS	Gegenüber S4 ist CAP-VER-01 in der AO-Schiene weitgehend gleich stark, in der BO-/NMS-Schiene aber noch teilweise Shared mit Plattform- und NMS-Partnern; einzelne Vertriebsschritte und Produktlogiken für BO werden nicht vollständig intern, sondern kooperativ gesteuert.
S3	CAP-INT-01 Integrations- und Datenmanagement-Plattform	Die Integrationsplattform ist technisch im Wesentlichen wie in S4 etabliert (Broker, Event-Backbone, DMZ), übernimmt aber in BO-/Partnerflüssen noch eine koordinierende Rolle mit geteilten Verantwortlichkeiten; nicht alle Integrationsentscheidungen und Datenströme werden vollständig intern festgelegt.
S3	CAP-INT-02 Schnittstellen- und Event-Governance	Schnittstellen- und Event-Governance ist für interne Flüsse bereits stark, bei NMS-/Plattformanbindungen bestehen aber noch Aushandlungs- und Shared-Regelungen zu Formaten, SLAs und Schemaänderungen; die Organisation setzt Standards mit Partnern gemeinsam, nicht ausschließlich.
S3	CAP-DATA-01 Datenhoheit & -governance	Datenhoheit und -governance sind für AO-Daten weitgehend wie in S4 ausgeprägt, bei BO-/NMS-Daten bleibt eine geteilte Hoheit bestehen (z.B. zu detaillierten Nutzungs- oder Kontextdaten); Data-Governance adressiert verstärkt gemeinsame Regelungen zu Zugriff, Nutzung und Aggregation.
S3	AP-3 Netz- & Fahrplanungssysteme	AP-3 führt AO-Fahrpläne vollständig intern wie in S4, die BO-Fahrpläne (DRT/NMS) sind jedoch nur teilweise intern und in Shared-Verantwortung modelliert; BO-Zeitfenster/-Relationen werden über AP-20 stärker mit Partnerdaten synchronisiert.

Szenario	Komponente	Delta zu S4 (Begründung)
S3	AP-10 Tarif- & Produktdatenbanksysteme	AO-Tarife/-Produkte werden intern wie in S4 geführt, BO-Preisparameter und Teile des Produktkatalogs werden aber noch kooperativ gepflegt (z.B. Revenue-Share-Logiken, NMS-spezifische Produkte), so dass die volle Kataloghoheit für BO erst im Übergang erreicht wird.
S3	AP-14 Leitstellen-System (ITCS/RBL)	ITCS/Leitstelle koordiniert bereits AO und BO, einige BO-Steuerungsfunktionen und SLA-Verantwortungen sind jedoch weiterhin Shared mit NMS-/Plattformpartnern; die vollständige Internalisierung der BO-Betriebsverantwortung wie in S4 ist noch nicht vollständig umgesetzt.
S3	AP-16 Vertriebssystem(e)	AO-Vertrieb läuft wie in S4, BO-Vertriebsprozesse (NMS/DRT) werden jedoch teilweise gemeinsam mit Partnern betrieben; AP-16 bedient sowohl eigene Kanäle als auch kooperative White-Label-/Shared-Szenarien, anstatt die gesamte Kette allein zu dominieren.
S3	AP-17 Reiseauskunftssystem	Multimodale Auskunft inkl. NMS/DRT ist technisch vorhanden, Teile der BO-spezifischen Angebotslogik (z.B. Detailregeln für DRT-Nutzung) verbleiben jedoch noch in Shared-Verantwortung bei Partnern; AP-17 nutzt Partnerlogiken stärker als in S4.
S3	AP-18 Reservierungs- & Buchungssystem(e)	AO-Buchungen werden intern wie in S4 gesteuert, BO-Buchungen für NMS/DRT werden aber teilweise über Shared-APIs und Kooperationslogik mit externen Plattformen orchestriert; AP-18 ist noch nicht alleiniger Kern für alle BO-Buchungspfade.
S3	AP-19 Zahlungssystem(e) inkl. Clearing-Kern	Payment läuft weitgehend wie in S4 intern, im Clearing-/Revenue-Share-Bereich (insb. BO/NMS) bestehen jedoch noch Shared-Modelle mit Verbund/Plattformpartnern; AP-CLR ist noch nicht in allen Erlöspfaden vollständig intern führend.
S3	AP-20 Datenbroker/Integrationsplattform	Der Broker ist als zentraler Integrationsanker etabliert, übernimmt aber in BO-/Partnerflüssen noch koordiniert geteilte Aufgaben in der Daten- und Event-Governance; nicht alle externen Datenströme unterliegen bereits der gleichen internen Steuerungsrigor wie in S4.
S2	CAP-VER-01 End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS	Gegenüber S4 verschiebt sich CAP-VER-01 deutlich: Ein großer Teil der Kundenschnittstelle und der BO-Vertriebskette liegt bei der externen Plattform;

Szenario	Komponente	Delta zu S4 (Begründung)
		intern verbleibt vor allem Zuliefer-, Abwicklungs- und Kontrollfunktion, nicht die vollständige End-to-End-Vertriebshoheit.
S2	CAP-INT-01 Integrations- und Datenmanagement-Plattform	CAP-INT-01 wird stärker als Brückenfähigkeit eingesetzt: die Integrationsplattform fungiert primär als Hub zwischen internen Systemen und externer White-Label-Plattform, statt alle Domänenflüsse intern zu orchestrieren; der Fokus liegt auf Import/Export statt auf durchgängiger interner Integration.
S2	CAP-INT-02 Schnittstellen- und Event-Governance	Wesentliche APIs und Event-Schemata für BO/NMS werden von der externen Plattform vorgegeben; CAP-INT-02 wirkt daher stärker als Fähigkeit zur API-/Event-Konsumenten-Governance (SLA, Monitoring, Nutzung), weniger als originäre Standardsetzungs-Instanz.
S2	CAP-DATA-01 Datenhoheit & -governance	Ein signifikanter Teil der relevanten Daten (z. B. Kunden-, NMS-, Buchungsdaten) liegt primär bei der Plattform; CAP-DATA-01 fokussiert auf Regelung von Zugriffs- und Nutzungsrechten sowie Compliance in einer partnerdominierten Datenlandschaft, nicht auf vollständige interne Datenhoheit.
S2	AP-3 Netz- & Fahrplanungssysteme	AO-Fahrpläne werden intern wie in S4 geführt, BO-Fahrpläne (z. B. On-Demand-Zeitfenster) kommen überwiegend von der Plattform/NMS; AP-3 übernimmt hier überwiegend eine konsumentische Spiegelungsrolle und ist nicht mehr alleiniger Fahrplan-Master für BO.
S2	AP-10 Tarif- & Produktdatenbanksysteme	AO-Tarife und -Produkte verbleiben intern, BO-Tarife/-Produkte werden jedoch teilweise in den Katalogen der externen Plattform gehalten; AP-10 ist damit nicht mehr vollständiger Katalog-Master für BO-Anteile, sondern Lieferant und Abnehmer in einem geteilten Katalogverbund.
S2	AP-14 Leitstellen-System (ITCS/RBL)	ITCS fokussiert hauptsächlich auf AO-Leistungen; NMS-/DRT-Steuerung und SLA-Einhaltung liegen zu einem großen Teil bei der externen Plattform/den NMS-Betreibern, sodass die Leitstelle nur selektive oder aggregierte BO-Informationen verarbeitet.
S2	AP-16 Vertriebssystem(e)	AP-16 wird vor allem als Backend/Zulieferer für die White-Label-Plattform genutzt; die externe Plattform dominiert Frontend und Teile der Buchungslogik,

Szenario	Komponente	Delta zu S4 (Begründung)
		während interne Vertriebskanäle an Bedeutung verlieren oder nur ergänzend wirken.
S2	AP-17 Reiseauskunftssystem	AP-17 liefert Plan-, Tarif- und Echtzeitdaten an die externe Plattform und kann intern genutzt werden; die zentrale öffentliche Auskunft ist jedoch primär die Plattform des Partners, wodurch AP-17 seine Rolle als primäres „Gesicht“ der Mobilitätsauskunft einbüßt.
S2	AP-18 Reservierungs- & Buchungssystem(e)	Für BO/NMS-Buchungen liegt der Kern der Buchungslogik auf der externen Plattform; AP-18 bildet diese externen Buchungen primär nach innen ab (z.B. für Abrechnung und Reporting) und steuert vor allem interne AO-Buchungen selbst.
S2	AP-19 Zahlungssystem(e) inkl. Clearing-Kern	Ein erheblicher Teil von Payment- und Clearingprozessen, insbesondere für NMS/DRT, wird auf externer Plattform oder beim Verbund durchgeführt; AP-19/AP-CLR übernehmen hauptsächlich Nachvollzug, Prüfung und Verbuchung statt vollständiger operativer Steuerung.
S2	AP-20 Datenbroker/ Integrationsplattform	AP-20 fungiert vor allem als Integrations- und Übersetzungs-Hub zwischen internen Systemen und externer Plattform; die Rolle als zentrales internes Rückgrat über alle Domänen wird zugunsten einer stärker nach außen gerichteten Integrationsfunktion relativiert.
S1	CAP-VER-01 End-to-End-Vertrieb & Ticketing inkl. NMS	CAP-VER-01 wirkt faktisch nur im klassischen ÖPNV-/Verbundvertrieb; NMS-/DRT-Vertrieb ist kaum oder gar nicht integriert, sodass die Fähigkeit zur End-to-End-Vertriebsgestaltung inkl. NMS im Wesentlichen ungenutzt bleibt.
S1	CAP-INT-01 Integrations- und Datenmanagement-Plattform	CAP-INT-01 ist nur rudimentär ausgeprägt; zahlreiche Kopplungen zwischen Systemen erfolgen noch als direkte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, Event-/Broker-Ansätze sind optional und nicht flächendeckend umgesetzt.
S1	CAP-INT-02 Schnittstellen- und Event-Governance	Schnittstellen- und Event-Governance beschränkt sich auf ausgewählte kritische Flüsse (z. B. OT ↔ ITCS/OBU); eine umfassende, domänenübergreifende API-/Event-Governance wie in S4 ist noch nicht etabliert.

Szenario	Komponente	Delta zu S4 (Begründung)
S1	CAP-DATA-01 Datenhoheit & -governance	Datenhoheit und -governance sind auf klassische ÖPNV-/Verbunddaten fokussiert; NMS-/DRT-bezogene Daten liegen weitgehend außerhalb des eigenen Governance-Rahmens bzw. werden nur als externe Zusatzinformationen behandelt.
S1	AP-3 Netz- & Fahrplanungssysteme	AP-3 führt im Wesentlichen nur AO-Fahrpläne für den Linienverkehr; BO-/NMS-Leistungen sind nicht oder nur in Form rudimentärer Fremdangebote im Netz- und Fahrplanmodell vertreten.
S1	AP-10 Tarif- & Produktdatenbanksysteme	AP-10 fokussiert auf das ÖPNV-Tarif- und Produktportfolio; BO-/NMS-Produkte werden meist nicht in der internen Tarif- und Produktlogik abgebildet, sondern ggf. separat vom Partner verwaltet.
S1	AP-14 Leitstellen-System (ITCS/RBL)	ITCS/RBL steuert den Linienbetrieb, ohne NMS-/DRT-Betrieb durchgängig einzubinden; BO-Leistungen werden operativ durch Partner gesteuert und erscheinen höchstens am Rand in der Leitstellen-Sicht.
S1	AP-16 Vertriebssystem(e)	Vertriebssysteme bedienen primär klassische ÖPNV-/Verbundprodukte; NMS-/DRT-Vertrieb findet, falls vorhanden, außerhalb der integrierten Vertriebssysteme statt (z. B. separate Apps, Portale).
S1	AP-17 Reiseauskunftssystem	AP-17 bildet überwiegend ÖPNV-Angebote ab; NMS-/DRT-Verbindungen werden nicht als integraler Bestandteil von Reiseketten behandelt, sondern allenfalls als ergänzende Hinweise oder externe Links.
S1	AP-18 Reservierungs- & Buchungssystem(e)	AP-18 wird im Kern für ÖPNV-Buchungen genutzt; NMS-/DRT-Buchungen sind nicht integriert und laufen in separaten, nicht architekturkonsistenten Prozessen.
S1	AP-19 Zahlungssystem(e) inkl. Clearing-Kern	AP-19/AP-CLR sind auf klassische ÖPNV-/Verbund-Clearing- und Paymentprozesse ausgerichtet; NMS-/DRT-Erlöse werden weitgehend außerhalb der eigenen automatisierten Clearing-Logik verbucht.
S1	AP-20 Datenbroker/Integrationsplattform	AP-20 ist nur punktuell im Einsatz, z. B. für ausgewählte Use Cases; viele Integrationsbeziehungen sind noch systemspezifisch realisiert und nutzen den Broker nicht als durchgängiges Integrationsparadigma.

Anhang J: Event-Steckbriefe (EV)

Im Folgenden werden die verwendeten Events aufgelistet und im Anschluss die Struktur der Event-Steckbriefe vorgestellt.

Event-ID	Event-Name
EV-1	Zählungen aktualisiert (Counts Updated)
EV-2	Prognose aktualisiert (Forecast Updated)
EV-3	Angebot veröffentlicht (Offer Plan Published)
EV-4	Angebotsplan aktualisiert (Offer Plan Updated)
EV-5	Slots veröffentlicht (Slots Published)
EV-6	Slots aktualisiert (Slots Updated)
EV-7	Fahrplan veröffentlicht (Timetable Published)
EV-8	Fahrplan aktualisiert (Timetable Updated)
EV-9	Umlauf veröffentlicht (Circulation published)
EV-10	Umlauf aktualisiert (Circulation Updated)
EV-11	Dienstplan veröffentlicht (Roster Published)
EV-12	Dienstplan geändert (Roster Changed)
EV-13	Einsatz angeordnet (Deployment Issued)
EV-14	Einsatz aktualisiert (Deployment Updated)
EV-15	Einsatzbefehl erteilt (Dispatch Order Issued)
EV-16	Fahrzeugstatus geändert (Vehicle State Changed)
EV-17	Besatzung zugewiesen (Crew Assigned)
EV-18	Besatzungsstatus geändert (Crew State Changed)
EV-19	Tarifregel geändert (Fare Rule Changed)
EV-20	Produkt aktualisiert (Product Updated)
EV-21	Preisregel geändert (Pricing Rule Changed)
EV-22	Angebot erstellt (Quote Created)
EV-23	Katalog veröffentlicht (Catalog Published)
EV-24	Angebot geändert (Offering Changed)
EV-25	Störungs-Benachrichtigung eingegangen (Service Alert (SIRI))
EV-26	Prognose aktualisiert (Prediction Updated)
EV-27	Störung erkannt (Disruption Detected)

EV-28	Dispositionentscheidung entsand (Dispatch Decision)
EV-29	Reiseereignis entsand (Trip Event)
EV-30	Fahrzeugtelemetrie veröffentlicht (Vehicle Telemetry)
EV-31	Fahrt berechnet (Journey Calculated)
EV-32	Angebot aktualisiert (Offer Updated)
EV-33	Buchung bestätigt (Booking Confirmed)
EV-34	Ticket ausgestellt (Ticket Issued)
EV-35	Reservierung erstellt (Reservation Created)
EV-36	Reservierung abgelaufen (Reservation Expired)
EV-37	Zahlung autorisiert (Payment Authorized)
EV-38	Zahlung erfasst (Payment Captured)
EV-39	Verrechnung abgeschlossen (Clearing Settled)
EV-40	Abstimmungsdifferenz (Reconciliation Delta)

Struktur der EV-Steckbriefe

ID/Ref (EV-x)	Eindeutige Event-ID nach dem Schema „EV-“ als Register-/Traceability-Anker (z. B. EV-15).
Name (Event-Name, EN)	Prägnanter, konsistenter Event-Name (i. d. R. englisch; verbasierte Zustandsänderung, z. B. ... <i>Updated</i> , ... <i>Published</i>). Konvention aus Tabelle 24 ableitbar.
Domäne/Prozess (DP-Zuordnung)	Zuordnung zu DP-x (Scope). Verankert das Event in der Prozesslogik und ermöglicht DP-basierte Navigation/Abdeckung.
Kurzdefinition (1–2 Sätze)	Fachlich präzise Bedeutungsbeschreibung: <i>Was ist passiert?</i> (Domänenereignis) inkl. Abgrenzung zu ähnlichen EVs.
Auslöser/ Entstehungskontext	Bedingung/Business-Trigger (z. B. Publikation, Statuswechsel, Entscheidung, Zahlung autorisiert). Dient der Nachvollziehbarkeit der Event-Entstehung.
AO/BO & Szenario-Relevanz (S1–S4)	Einordnung, ob Event primär AO, BO oder HY unterstützt; Relevanz/Änderungen je Szenario (S1–S4) als knapper Stichpunkt. (Analog zur Szenariologik der Arbeit).
Referenzierte Datenobjekte (DO)	Verweis auf die fachlichen Informationsobjekte (DO-IDs), die durch das Event beschrieben/indiziert werden (Single-Source-of-Truth bleibt in DO-Steckbriefen).
Event-Semantik (Zustandsänderung)	Präzisierung, ob das Event „Created/Updated/Deleted/Published/Detected/Issued“ etc. ausdrückt (Semantik muss test- und KPI-fähig sein).
Payload-Art (Snapshot/Delta/ Reference)	Festlegung, ob vollständiger Snapshot, Delta-Änderung oder nur Referenzen/IDs übertragen werden (entscheidend für Konsistenz, Replay, Consumer-Komplexität).
Schlüssel & Korrelation	Pflicht-IDs im Event (z. B. EventId, EntityId/DO-Key, CorrelationId, Timestamp, ProducerId). Dient Traceability über Prozessketten (Request→Offer→Booking→Payment...).
Idempotenz-/ Deduplikationslogik	Festlegung des Idempotenzschlüssels und Umgang mit Duplikaten/Retry (z. B. „at-least-once“ Zustellung → Consumer idempotent). Explizit relevant, da die Arbeit Idempotenz als KPI/Qualitätskriterium benennt.
Producer (AP/AS, Systemkontext)	Erzeugendes System bzw. verantwortliche Applikationskomponente (AP) und ggf. Application Service (AS). Sichert die Zuordnung im Sinne der Interface-Contracts.
Consumer (AP/AS, Zielgruppen)	Konsumierende Systeme/Services (AP/AS) bzw. externe Partner/Clients (z. B. Apps/Web, Partner-Zone).

Verortung im Schnittstellenkontrakt	Referenz auf betroffene Interface-Contracts (Tabelle 23) inkl. AS-Bezug, Provider→Consumer und Typ (Event/Sync/Batch).
Topic/Kanal & Integrationsanker	Technischer Publikationskanal (Topic/Stream) und Architekturanker (Event-Backbone/Streaming, Data-Broker). Dient der Umsetzung der lose gekoppelten Integration.
Standard-/Mapping-anker	Falls vorhanden: Norm-/Standard-Verortung bzw. Mapping (z. B. SIRI ServiceAlert, TOMP TripEvents, OJP/TRIAS, OSDM).
Format & Schema (inkl. Version)	Serialisierung (z. B. Avro/JSON/XML), Schema-Ort (Registry/Repo), Kompatibilitätsregel (Backward/Forward), SchemaVersion. (Analog zur DO-Versionierungsidee).
Zonierung & Security-Pfad	Einordnung OT/DMZ/IT/Partner und zulässiger Kopplungspfad (kontrollierte Kopplung über DMZ-Komponenten). Stützt KRITIS-/Security-Leitplanken.
Qualitätsziele/SLA (Event-QoS)	Zielwerte: Latenz (z. B. p95), Vollständigkeit, Reihenfolge/Ordering, Delivery-Semantik, Fehlerraten. Explizit als Evaluations-/Monitoring-Ableitung nutzbar.
Monitoring & Evidenz (KPIs/Nachweise)	Welche Metriken/Logs/Traces werden erhoben (Topic-Lag, Throughput, Error-Rate, Duplicate-Rate), und wo werden sie als Nachweis in der Evaluation genutzt.
Schutz & Recht (DSGVO/PII)	Schutzbedarf, PII ja/nein, Aufbewahrung/Löschung, Audit-Anforderungen (analog zu DO-Steckbrief „Schutz & Recht“).
Verantwortung (Owner/Steward)	Benennung Event Owner (fachlich) und Steward (IT) inkl. Freigabe-/Change-Prozess (analog zum Governance-Gedanken der Arbeit).
Retention/Replay & Lifecycle	Aufbewahrungszeit, Replay-Fähigkeit (z. B. Reprocessing für Abrechnung/Monitoring), Deprecation-Regeln (Ersatz-EV, Sunset-Datum).
Änderungslog (Verweis)	Dokumentation der Änderungen am Event-Schema/Semantik (Datum, Grund, kompatibel ja/nein, Verweis auf Artefakt/Commit). (Analog zur DO-Versionierung).

Die einzelnen Event-Steckbriefe (EV) sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger abgelegt. Das Verzeichnis der digitalen Zusatzmaterialien ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang K: Business-Service-Steckbriefe (BS)

Im Folgenden werden die verwendeten Business Services (BS) aufgelistet und im Anschluss die Struktur der Steckbriefe vorgestellt.

BS-1 BO-Planung Service	BS-2 Netz- und AO-Planung Service
BS-3 Fahrplanung Service	BS-4 Umlaufplanung Service
BS-5 Dienstplanung Service	BS-6 Einsatzplanung Service
BS-7 Fahrzeugdisposition Service	BS-8 Personaldisposition Service
BS-9 Tarif- & Produktgestaltung Service	BS-10 Fahrgastinfo Service
BS-11 Leitstelle Service	BS-12 Verkauf Service
BS-13 Buchhaltung Service	BS-14 Kontokorrent Service
BS-15 Clearing Service	BS-16 Vertriebsplattform Service

Struktur der BS-Steckbriefe

BS-Id/Name	z. B. BS-01 Reiseauskunft bereitstellen
Kurzbeschreibung/ Zweck	1–2 Sätze: Was leistet der Service fachlich, für wen, mit welchem Ziel?
AO/BO-Logik	Kurz: Rolle in AO, Rolle in BO (z. B. „AO & BO identisch“, „nur AO“, „BO-Variante erweitert“)
Domäne/ Hauptprozess(e)	z. B. DP-II Tarif & Vertrieb, DP-4 Fahrplanung, DP-7 Einsatzplanung (BO)
Business Owner (Fachbereich)	z. B. Vertrieb, Fahrgastinformation, Leitstelle, Technik, Finanzen
Unterstützende Applikationen	AP-Nummern mit Namen, z. B. AP-16 Vertriebssystem, AP-19 Zahlungssystem
Wichtige Datenobjekte (DO)	Liste der wichtigsten DO-Nrn. + Titel, z. B. DO-85 Verkaufsdaten, DO-86 Zahldaten
Eingehende Abhängigkeiten	Wichtige vorgelagerte BS/AP/DO, die benötigt werden (stichpunktartig)
Ausgehende Abhängigkeiten	Wichtige nachgelagerte BS/AP/DO, die der Service beliefert (stichpunktartig)
Zentrale KPIs/Qualitätsziele	2–3 Kennzahlen, z. B. Antwortzeit, Verfügbarkeit, Fehlerquote, Datenaktualität

Die einzelnen Business-Service-Steckbriefe (BS) sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger abgelegt. Das Verzeichnis der digitalen Zusatzmaterialien ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang L: Business-Rollen-Steckbriefe (BR)

Im Folgenden werden die verwendeten Business-Rollen (BR) aufgelistet und im Anschluss die Struktur der Steckbriefe vorgestellt.

BR-1 Verkehrsplaner	BR-2 Fahrplaner
BR-3 Personalplaner	BR-4 Verkehrsdisponent
BR-5 Personaldisponent	BR-6 Tarifplaner
BS-7 Fahrgastinformationsmanager	BR-8 Leitstellenmanager
BR-9 Help Desk Manager	BR-10 Vertriebsmitarbeiter
BR-11 Buchhalter	BR-12 Fahrgast

Struktur der BS-Steckbriefe

Name (Id.)	BR-x – Rollenbezeichnung (z.B. „NMS-Plattform- & Partnermanager“)
Zweck/Ziele	Warum gibt es die Rolle? Welchen Beitrag leistet sie zur REA-/NMS-Integration?
Domänen- & Prozessbezug	Zugeordnete Domänen & Prozesse (DP-IDs, z.B. DP-II, DP-IV, DP-16–DP-20)
AO/BO-Logik	Rolle in angebotsorientierten (AO) und bedarfsorientierten (BO) Teilen, inkl. S1–S4
RACI je Szenario	Verantwortlichkeiten für zentrale Prozesse (RACI-Matrix-Auszug für S1–S4)
Zentrale Aufgaben	5–7 wichtigste Tätigkeiten/Verantwortlichkeiten
Zugeordnete Capabilities	Referenz auf relevante Capabilities aus der Capability Map
Unterstützte Anwendungen	Referenz auf AP-IDs (z.B. AP-10, AP-16, AP-18, AP-19, AP-20)
Typische Eingaben	Wichtige Infos/Reports, die die Rolle benötigt (KPI, Partner-Reports, Normen-Updates etc.)
Typische Ausgaben	Entscheidungen, Freigaben, Vorgaben, Eskalationen
Schnittstellen	Wichtige interne/externe Rollen & Organisationseinheiten
Relevante Standards	Zentrale Normen/Standards (z.B. OJP, TRIAS, OSDM, TOMP, VDV-Schriften, DS/KRITIS)

KPIs (Beispiele)	3–5 Kennzahlen, über die die Rolle „geführt“ wird
Sicherheit/ Compliance	Beitrag zu Datenschutz, KRITIS, Audit, Freigabe von Rollen-/Zugriffsmodellen
Traceability/ Artefakte	Verweise auf zugehörige DP-/AP-Steckbriefe, Variationspunkte (VP) und ArchiMate-Views

Die einzelnen Business Role Steckbriefe (BR) sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger abgelegt. Das Verzeichnis der digitalen Zusatzmaterialien ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang M: Business-Actor-Steckbriefe (BA)

Im Folgenden werden die verwendeten Business Actors (BA) aufgelistet und im Anschluss die Struktur der Steckbriefe vorgestellt.

BA-1 ÖPNV-Mitarbeiter	BA-2 Kunde
-----------------------	------------

Struktur der BS-Steckbriefe

Name (Id.)	Eindeutige Kennung des Business Actors (z.B. „BA-1“) plus Klarname, damit im Text und in den Modellen klar ist, von welchem Actor die Rede ist.
Typ	Einordnung des Actors: intern/extern/Verbund/Dienstleister sowie seine Rolle im AO-/BO-/HY-Kontext (also angebotsorientiert, bedarfsorientiert oder hybrid).
Zweck/Ziele	Wozu dieser Actor existiert und welchen Beitrag er zur Zielarchitektur bzw. zur REA leistet (z.B. Integration NMS, Vertrieb, Betrieb, Clearing).
Capabilities	Zu welchen Capabilities (Fähigkeiten) und ggf. strategischen Zielen der Actor beiträgt; sorgt für die Verankerung im Referenz-Enterprise-Architecture-Modell.
Domänen- & Prozessbezug	In welchen Domänen oder Prozessen (DP-Nummern) der Actor beteiligt ist und welche Rolle er dort spielt (z.B. verantwortend, mitwirkend, zuliefernd).
Zugeordnete Business-Rollen	Welche Business-Rollen (z.B. aus ArchiMate) dieser Actor bündelt bzw. wahrnimmt, z.B. „Plattformbetreiber“, „Clearing-Partner“, „On-Demand-Operator“
Verantwortung je Szenario (S1–S4)	Welche Verantwortung der Actor in den verschiedenen Szenarien hat (z.B. Owned/Shared/Partner) – hilft, die Szenario-Varianten konsistent zu dokumentieren.
AO/BO-Logik (Kurz)	Kurzbeschreibung, wie der Actor in angebotsorientierten (AO), bedarfsorientierten (BO) und hybriden (HY) Prozessen wirkt (z.B. wer steuert das Angebot, wer reagiert auf Nachfrage).
Interaktionen mit anderen Business Actors	Welche anderen Business Actors wichtige Partner sind und wie die Zusammenarbeit grob aussieht (z.B. Verbund, externe Plattform, Zahlungsdienstleister).
Verknüpfte Applikationen (AP-IDs)	Welche zentralen Applikationen bzw. Primärsysteme der Actor nutzt (Referenz auf AP-IDs), z.B. Vertriebssystem, Buchungssystem, Zahlungssystem, Datenbroker.

Zentrale Datenobjekte (DO-IDs, CRUD)	Welche Datenobjekte (DO-IDs) für den Actor relevant sind und was er damit macht: erzeugen, lesen, ändern, löschen (CRUD-Sicht) – wichtig für Datenverantwortung und Schnittstellen.
Security/ KRITIS/ Compliance	In welchen Sicherheitszonen der Actor agiert, ob KRITIS-Bezug besteht und welche Sicherheits- und Compliance-Aspekte (IAM, Audit, regulatorische Vorgaben) relevant sind.
KPIs (Beispiele)	2–5 zentrale Kennzahlen, mit denen die Leistung dieses Actors im Zielbild gemessen werden soll (z.B. Verfügbarkeit, Buchungsquote, Fehlerquote, SLA-Erfüllung).

Die einzelnen Business-Actor-Steckbriefe (BA) sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger abgelegt. Das Verzeichnis der digitalen Zusatzmaterialien ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang W: Weitere Elemente (Cx, Dx, Gx, PLx, Rx, WPx)

In diesem Abschnitt werden weitere verwendete Elemente der REA erläutert. Folgende sind in Anlage Z: Digitale Zusatzmaterialien in der Datei „W_weitere_Elemente.docx“ zu finden.

Reihenfolge innerhalb der Dokumentationsdatei:

- I. Cx (x = 1..4) Constrain (Einschränkung [Architektur])
- II. Dx (x = 1..4) Driver (Treiber)
- III. Gx (x = 1..4) Goal (Ziel)
- IV. PLx (x = 1..4) Plateaus (S1 bis S3) (Entwicklungsstufe)
- V. Rx (x = 1..5) Requirements (Anforderungen)
- VI. WPx (x = 1..4) Work Packages (Arbeitspakete)

Die Elemente sind auf dem digitalen Datenträger enthalten; deren Verzeichnis ist in Anhang Z dokumentiert.

Anhang Z: Digitales Zusatzmaterial

Das digitale Zusatzmaterial ist als Anhang (Digital: USB-Stick, gepackt) der Dissertation zu finden und enthält die folgende Verzeichnisstruktur:

1. Evaluationsrelevante Unterlagen⁵³: (Unterverzeichnis: Evaluation)
 - 1_Evaluation – Architektur Check I
 - 2_Evaluation – Bremen – 3-11- und 7-11-2022
 - 3_Evaluation - Muechen - 05-04-2023
 - 4_Evaluation - Architektur Check II
 - 5_Evaluation - VDV - Rostock - 19-10-2023
 - 6_Evaluation - VDV - Experten - 05-12-2023
 - 7_Evaluation - BVG-Experten - 11-01-2024
 - 8_Evaluation - Szenario Analyse
 - 9_Evaluation - Gesamtevaluation Architektur
2. Grafiken und Modelle (einzelne Dateien): (Unterverzeichnis: Modelle-Grafiken)
 - Archi (ArchMate) Modelle (Hauptmodell und Nebenmodelle)
 - Modellgrafiken (Hauptmodell: strategisch-/motivatorisch und operativ)
3. Protokolle (transkribierte Interviews) mit Experten (Unterverzeichnis: Protokolle)
 - Interview: Friedrich Menge-CIO-BVG (Berlin) inkl. transkribierte Aufzeichnung
 - Interview: Michael Bartnick-BVG (Online) inkl. Fragebogenentwurf
4. Steckbriefe (Unterverzeichnis: Steckbriefe)
 - C_Domaenen-_und_Prozesssteckbriefe_DP.docx
 - D_Applikationssteckbrief_AP.docx
 - E_Datenobjektsteckbrief_DO.docx
 - F_Variationspunktsteckbriefe-VP.docx
 - G_Capability-Steckbriefe-CS.docx
 - H_Anwendungsdienst-Steckbriefe_AS.docx
 - J_Event_Steckbriefe_EV.docx
 - K_Business_Service_BS.docx
 - L_Business_Rolle_BR.docx
 - M_Business_Alroer_BA.docx
 - W_weitere_Elemente.docx

⁵³ Transkribierte Expertengespräche, Protokolle usw.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Canzler und A. Knie, *Grüne Wege aus der Autokrise: Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister. Ein Strategiepapier*, Schriften zur Ökologie Bd. 4, Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2009, ISBN 978-3-86928-005-9.
- [2] H. Wagner und T. Beschler, „Mobilität im Wandel der Zeit“, in: Unternehmerische Wertschöpfung neu aufstellen: Volatile, disruptive, digitale Welt – Anforderungen an das Management der Zukunft, M. Knoppe, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2024, S. 169–200
- [3] International Association of Public Transport (UITP), *Zum echten Mobilitätsanbieter werden: Kombinierte Mobilität: der ÖPNV in Synergie mit anderen Verkehrsmitteln wie Car-Sharing, Taxi, Fahrrad*, Position Paper, UITP, 2011.
- [4] M. Kamargianni, W. Li, M. Matyas und A. Schäfer, „A critical review of new mobility services for urban transport“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 3294–3303, 2016.
- [5] F.-W. Menge, *Digitale Transformation in einem ÖPNV-Unternehmen (BVG)*. Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) AÖR, D-13355 Berlin-Wedding. Experteninterview am 6. Februar 2020 (Anhang Z).
- [6] C. Pflügler, M. Schreieck, G. Hernandez, M. Wiesche und H. Krcmar, „A Concept for the Architecture of an Open Platform for Modular Mobility Services in the Smart City“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 19, S. 199–206, 2016. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.080>.
- [7] B. Hildebrandt, A. Hanelt, E. Piccinini, L. Kolbe und T. Nierobisch, "The Value of IS in Business Model Innovation for Sustainable Mobility Services - The Case of Carsharing" (2015). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2015*, S. 1008–1022.
- [8] P. Marchetta, E. Natale, A. Pescapé, A. Salvi und S. Santini, „A map-based platform for smart mobility services“, in: *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, 2015, S. 19–24, Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/ISCC.2015.7405448>.
- [9] G. Scholz, *IT systems in public transport: Information technology for transport operators and authorities*. Heidelberg: dpunkt.Verlag, 2016.
- [10] Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Multimodale digitale Mobilitätsdienste: Eckpunkte zur Diskussion auf europäischer Ebene. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-positionspapier-mdms-.pdfx> (Zugriff am 18. Februar 2025).
- [11] T. Steinert, R. Koreng, C. Mayas, C. Dohmen u.a., Definition und Dokumentation der Nutzeranforderungen an eine offene Mobilitätsplattform, Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV 7046, 3/2018.

- [12] T. Steinert, R. Koreng, C. Mayas, C. Dohmen u.a., Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 1: Rollenmodell & typische Kooperationsszenarien, Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV 436-1, 8/2019.
- [13] T. Steinert, R. Koreng, C. Mayas, C. Dohmen u.a., Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 2-1: Referenzarchitektur, Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV 436-2-1, 8/2019.
- [14] T. Steinert, R. Koreng, C. Mayas, C. Dohmen u.a., Offene Mobilitätsplattform (OMP) – Teil 2-2: Interaktionen zwischen den Systemkomponenten, Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV 436-2-2, 8/2019.
- [15] J. Becker, B. Niehaves, S. Olbrich und D. Pfeiffer, „Forschungsmethodik einer Integrationsdisziplin – eine Fortführung und Ergänzung zu Lutz Heinrichs ‚Beitrag zur Geschichte der Wirtschaftsinformatik‘ aus gestaltungsorientierter Perspektive,“ in: Wissenschaftstheorie und gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik, J. Becker, H. Krcmar und B. Niehaves, Hg., Heidelberg, New York: Physica-Verlag, 2009, S. 1–22. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7908-2336-3_1 (Zugriff am 2. Oktober 2024).
- [16] H.-J. Appelrath, J. Becker, M. Frank, H. Grohmann, J. Heistermann, P. Korevaar, H. Krcmar, K. Kurbel, F. Mang, P. Mertens, E. Ortner, B. Rieger, O. Röper, F. Schönthaler, E. Sinz, T. Sommer-Dittrich, D. Steinbauer, L. Suhl, R. Unland, A. Warner und R. Wild, „Mitteilungen der Wissenschaftlichen Kommission Wirtschaftsinformatik und des GI-Fachbereichs Wirtschaftsinformatik“, *Wirtsch. Inform.*, Jg. 49, Nr. 4, S. 318–325, 2007. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s11576-007-0072-z>.
- [17] P. Ulrich und W. Hill, *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5.7+ 8 (1976): 304–309.
- [18] M. Berkovich, *Requirements Engineering für IT-gestützte Product Service Systems*, München: Technische Universität München. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1081662> (Zugriff am 24. September 2024).
- [19] M. Wind, „IT in der Verwaltung – lange Historie, neue Perspektiven“, in: Handbuch IT in der Verwaltung, D. Kröger und M. Wind, Hg., 1. Aufl. Berlin: Springer, 2006, S. 3–33.
- [20] A. R. Schwertsik, *IT-Governance als Teil der organisationalen Governance: Ausgestaltung der IT-Entscheidungsrechte am Beispiel der öffentlichen Verwaltung* (Informationsmanagement und Computer Aided Team). Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [21] K. Kurbel, „Das Studium der Wirtschaftsinformatik“, in: *Studienführer Wirtschaftsinformatik 2009/2010: Studieninhalte – Anwendungsfelder – Berufsbilder : Universitäten in Deutschland, Österreich, Schweiz*, K. Kurbel, Hg., Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 17–37.

- [22] R. Winter, „Was ist eigentlich Grundlagenforschung in der Wirtschaftsinformatik?“, *Wirtsch. Inform.*, Jg. 51, Nr. 2, S. 223–231, 2009. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s11576-008-0130-1>.
- [23] B. Schwarzer, *Einführung in das Enterprise-Architecture-Management: Verstehen, Planen, Umsetzen*. Norderstedt: Books on Demand, 2009.
- [24] H. Jonkers, M. M. Lankhorst, H. W. L. ter Doest, F. Arbab, H. Bosma und R. J. Wieringa, „Enterprise architecture: Management tool and blueprint for the organisation“, *INFORM SYST FRONT*, Jg. 8, Nr. 2, S. 63–66, 2006. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10796-006-7970-2>.
- [25] P. Fettke und P. Loos, *Reference modeling for business systems analysis: Perspektiven der Referenzmodellierung*, Hershey, Pennsylvania: IGI Global, 2007.
- [26] L. Aversano, C. Grasso und M. Tortorella, „A Literature Review of Business/IT Alignment Strategies“, *Procedia Technology*, Jg. 5, S. 462–474, 2012. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.09.051>.
- [27] N. O. Kandil, E. K. Abou-Elkheir und A. M. Kotb, „IT governance matter: A structured literature review“, *COC*, Jg. 20, 3, special issue, S. 408–420, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.22495/cocv20i3siart14>.
- [28] S. Kotusev, *The practice of enterprise architecture: A modern approach to business and IT alignment*. Sk Publishing, 2018.
- [29] M. Lankhorst, *Enterprise architecture at work: Modelling, communication and analysis* (The Enterprise Engineering Ser). Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4821995> (Zugriff am 12. August 2025).
- [30] L. Herbert, *Digital transformation: Build your organization's future for the innovation age*. London, Oxford, New York, New Delhi, Sydney: Bloomsbury, 2017.
- [31] M. Weyrich, T. Jung und C. Ebert, „Referenzarchitekturen für das IoT: Überblick zum Stand der Technik und wesentlichen Trends“, *OBJEKTSpektrum*, Nr. 6, S. 10–15, 2016. Verfügbar unter: https://www.ias.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2016_Referenzarchitekturen_fuer_das_IoT_Ueberblick_zum_Stand_der_Technik_und_wesentlichen_Trends.pdf (Zugriff am 24. September 2024).
- [32] S. Unverdorben, B. Bohm und A. Luder, „Reference Architectures for Future Production Systems in the Field of Discrete Manufacturing“, in: *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, B. Vogel-Heuser, Hg., 2018, S. 869–874. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/COASE.2018.8560454>.
- [33] S. Kotusev, *The history of enterprise architecture: An evidence-based review*, 2016.

- [34] F. S. de Boer, M. M. Bonsangue, L. Groenewegen, A. W. Stam, S. Stevens und L. van der Torre, „Change impact analysis of enterprise architectures“, in: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)*, Du Zhang, Hg., 2005, S. 177–181. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/IRI-05.2005.1506470>.
- [35] B. Anthony Jnr, „Managing digital transformation of smart cities through enterprise architecture – a review and research agenda“, *Enterprise Information Systems*, Jg. 15, Nr. 3, S. 299–331, 2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1812006>.
- [36] Cubic Transportation Systems, *Digital Mobility: Enabling the Future of Transportation: Digital Mobility [White Paper]*. Verfügbar unter: https://www.cubic.com/sites/default/files/Cubic_Digital_Mobility_Whitepaper.pdf (Zugriff am 16. Januar 2026)
- [37] O. Serrat, „Identifying and Sharing Good Practices“, in: *Knowledge solutions: Tools, methods, and approaches to drive organizational performance*, O. Serrat, Hg., Singapore: Springer, 2017, S. 843–846. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-0983-9_92 (Zugriff am 2. Februar 2025).
- [38] M.-O. Würtz und K. Sandkuhl, „Enterprise Architecture for Integration of Demand-Responsive Services in Public Transport“, *CSIMQ*, Jg. 0, Nr. 34, S. 62–83, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7250/csimq.2023-34.03>.
- [39] A. J. Bokolo, „Exploring interoperability of distributed Ledger and Decentralized Technology adoption in virtual enterprises“, *Information Systems and e-Business Management*, Jg. 20, Nr. 4, S. 685–718, 2022. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10257-022-00561-8>.
- [40] E. Niemi und S. Pekkola, „The Benefits of Enterprise Architecture in Organizational Transformation“, *Bus Inf Syst Eng*, Jg. 62, Nr. 6, S. 585–597, 2020. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00605-3>.
- [41] N. Vandevenne, J. van Riel und G. Poels, „Green Enterprise Architecture (GREAN) – Leveraging EA for Environmentally Sustainable Digital Transformation“, *Sustainability*, Jg. 15, Nr. 19, S. 14342, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/su151914342>.
- [42] Tiitinen, S., Nurmi, J. and Seppänen, V., *Enterprise Architecture Management value creation mechanisms*, 2024. Verfügbar unter: <https://ceur-ws.org/Vol-3804/paper1.pdf> (Zugriff am 12. Dezember 2024).
- [43] M.-O. Würtz und K. Sandkuhl, „A Target Enterprise Architecture Approach for New Mobility Services in Demand-Responsive Public Transport,“ in *Proc. BIR-WS 2022 Workshops and Doctoral Consortium*, Rostock, Germany, Sep. 2022, vol. 3223, pp. 35–43.

- [44] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park und S. Ram, „Design Science in Information Systems Research“, *MIS Quarterly*, Jg. 28, Nr. 1, S. 75, 2004, Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2307/25148625>.
- [45] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger und S. Chatterjee, „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research“, *Journal of Management Information Systems*, Jg. 24, Nr. 3, S. 45–77, 2007. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.
- [46] F. Timm, „A method for developing Reference Enterprise Architectures“, 2020. Verfügbar unter: https://doi.org/10.18453/ROSDOK_ID00002924.
- [47] M.-O. Würtz, K. Sandkuhl und K. G. Abramowicz, „Impact of New Mobility Services on Enterprise Architectures: Case Study and Problem Definition“, *Lecture Notes in Business Information Processing*, Jg. 394, S. 45–56, 2020. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61146-0_4.
- [48] M.-O. Würtz, K. Sandkuhl, R. H. Reussner, A. Koziol, R. Heinrich, „New mobility services and their impact on enterprise architectures: A case study [Neue Mobilitätsdienste und ihre Auswirkungen auf Unternehmensarchitekturen: Eine Fallstudie]“, *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings – Series of the Gesellschaft für Informatik (GI)*, Jg. P-307, 2020. Verfügbar unter: https://doi.org/10.18420/inf2020_15.
- [49] M.-O. Würtz und K. Sandkuhl, „Towards a Reference Architecture for Demand-Oriented Public Transportation Services“, *Proceedings – IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop, EDOCW*, 2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/EDOCW52865.2021.00041>.
- [50] M.-O. Würtz und K. Sandkuhl, „Content and Evaluation of an Enterprise Reference Architecture for Demand-Responsive Public Transport“, in: *Smart Transportation Systems 2023: Proceedings of 6th KES-STIS International Symposium* (Smart Innovation, Systems and Technologies), Y. Bie, K. Gao, R. J. Howlett und L. C. Jain, Hg., Singapore: Springer Nature, 2023, S. 125–137.
- [51] M.-O. Würtz und K. Sandkuhl, „Integration neuer Mobilitätsdienste in klassische Verkehrsbetriebe“, *HMD*, 2025. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1365/s40702-025-01174-8>.
- [52] J. Venable, J. Pries-Heje und R. Baskerville, „FEDS: a Framework for Evaluation in Design Science Research“, *European Journal of Information Systems*, Jg. 25, Nr. 1, S. 77–89, 2016. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36>.
- [53] S. Scherer und M. A. Wimmer, „Analysis of enterprise architecture frameworks in the context of e-participation“, in: *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference: Digital Government Innovation in Challenging Times*, New York, NY, USA, 2011. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1145/2037556.2037571>.

- [54] L. J. Heinrich, „Forschungsmethodik einer Integrationsdisziplin: Ein Beitrag zur Geschichte der Wirtschaftsinformatik“, *N.T.M.*, Jg. 13, Nr. 2, S. 104–117, 2005. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s00048-005-0211-9>.
- [55] T. Wilde und T. Hess, „Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik“, *Wirtsch. Inform.*, Jg. 49, Nr. 4, S. 280–287, 2007. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s11576-007-0064-z>.
- [56] P. Järvinen, „On a variety of research output types,” in Proc. IRIS23, L. Svensson, U. Snis, C. Sorensen, H. Fägerlind, T. Lindroth and C. Östlund, Eds. Trollhättan, Sweden: Laboratorium for Interaction, University of Trollhättan Uddevalla, 2000, pp. 251–265.
- [57] S. T. March und G. F. Smith, „Design and natural science research on information technology“, *Decision Support Systems*, Jg. 15, Nr. 4, S. 251–266, 1995. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2).
- [58] Mauro, Christian, *Ein Framework zur serviceorientierten Integration medizinischer Geräte im Krankenhaus*. Springer, 2012.
- [59] F. P. Brooks, „The computer scientist as toolsmith II“, *Commun. ACM*, Jg. 39, Nr. 3, S. 61–68, 1996. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1145/227234.227243>.
- [60] P. Johannesson und E. Perjons, *An introduction to design science*, 1. Aufl. Cham, Heidelberg: Springer, 2014.
- [61] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 13. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz, 2022.
- [62] A. R. Hevner, *A three cycle view of design science research*, Scandinavian Journal of Information Systems, vol. 19, no. 2, pp. 87–92, 2007.
- [63] C. Dohmen und G. Scholz, Hg., *IT-Systeme für Verkehrsunternehmen: Das Branchenmodell ITVU*. MKWI. 2012.
- [64] The Open Group, ArchiMate® 3.2 Specification, 6th Aufl. Zaltbommel: Van Haren Publishing, 2023. ISBN 978-94-018-09559-x.
- [65] B. Kitchenham and S. Charters, *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*, EBSE Technical Report EBSE-2007-01, Keele Univ. and Univ. of Durham, UK, 2007.
- [66] M. J. Page u.a., „The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews“, *BMJ*, Early Access. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- [67] C. Wohlin, E. Mendes, K. R. Felizardo und M. Kalinowski, „Guidelines for the search strategy to update systematic literature reviews in software engineering“, *Information and Software Technology*, Jg. 127, S. 106366, 2020. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106366>.

- [68] C. Wohlin, „Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering“, in: *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, New York, NY, USA, 2014, S. 1–10. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>.
- [69] D. S. Cruzes und T. Dyba, „Recommended Steps for Thematic Synthesis in Software Engineering“, in: *2011 International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 2011, S. 275–284. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/esem.2011.36>.
- [70] B. Kitchenham, S. Charters u.a., „Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3“, *Engineering*, Jg. 45, 4, S. 1051, 2007.
- [71] The Open Group, ArchiMate® 3.1 Specification, 6. Aufl. Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2019, ISBN 978-94-018-0512-4.
- [72] R. K. Yin, *Case study research and applications: Design and Methods*, 6. Aufl., Thousand Oaks, CA: SAGE, 2018.
- [73] U. Frank, *Evaluation of Reference Models*, in Reference Modeling for Business Systems Analysis, P. Fettke and P. Loos, Eds., Hershey, PA/London: IGI Global, 2007, pp. 118–140.
- [74] J. Gausemeier, A. Fink und O. Schlake, „Scenario Management“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 59, Nr. 2, S. 111–130, 1998. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/s0040-1625\(97\)00166-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1625(97)00166-2).
- [75] J. C. Henderson und H. Venkatraman, „Strategic alignment: Leveraging information technology for transforming organizations“, *IBM Syst. J.*, Jg. 38, Nr. 2.3, S. 472–484, 1999. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1147/sj.1999.5387096>.
- [76] The Open Group, *The TOGAF® Standard, Version 9.2*, 11. Aufl. Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2018. ISBN 978-94-018-02833-3.
- [77] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling und H. A. Reijers, Hg. *Fundamentals of business process management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.
- [78] J. vom Brocke und M. Rosemann, *Handbook on Business Process Management 1*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [79] H. Mintzberg, „Structure in 5's: A Synthesis of the Research on Organization Design“, *Management Science*, Jg. 26, Nr. 3, S. 322–341, 1980. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1287/mnsc.26.3.322>.
- [80] Weill, Peter, and Jeanne W. Ross. "IT governance on one page." Verfügbar unter SSRN 664612 (2004).
- [81] R. Abraham, J. Schneider und J. vom Brocke, „Data governance: A conceptual framework, structured review, and research agenda“, *International Journal of Infor-*

- mation Management*, Jg. 49, S. 424–438, 2019. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.07.008>.
- [82] V. Khatry und C. V. Brown, „Designing data governance“, *Commun. ACM*, Jg. 53, Nr. 1, S. 148–152, 2010. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1145/1629175.1629210>.
- [83] S. Sadiq und G. Governatori, „Managing Regulatory Compliance in Business Processes“, in: *Strategic alignment, governance, people and culture* (Handbook on Business Process Management 2), Vom Brocke, Jan, and Michael Rosemann, eds. Handbook on business process management 2. Berlin: Springer, 2010, S. 159–175.
- [84] International Transport Forum (ITF): The Innovative Mobility Landscape: The Case of Mobility as a Service, International Transport Forum Policy Papers 92. Paris, 2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1787/46903a00-en>.
- [85] D. Simon, K. Fischbach und D. Schoder, „Enterprise architecture management and its role in corporate strategic management“, *Information Systems and e-Business Management*, 2014, 12. Jg., Nr. 1, S. 5–42.
- [86] E. Niemi und S. Pekkola, „Using enterprise architecture artefacts in an organisation“, *Enterprise Information Systems*, Jg. 11, Nr. 3, S. 313–338, 2017. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/17517575.2015.1048831>.
- [87] The Open Group, The TOGAF® Standard, 10th Edition – Architecture Development Method, Hertogenbosch/Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2022.
- [88] D. Stelzer, *Prinzipien für Unternehmensarchitekturen – Grundlagen und Systematisierung*, in Proc. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2010 (MKWI 2010), Göttingen, 2010, pp. 55–66.
- [89] H. Krcmar, „Informationsmanagement,“ in: *Informationsmanagement*, H. Krcmar, Hg., 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2015, S. 85–111.
- [90] N. Urbach und F. Ahlemann, *IT management in the digital age: A roadmap for the IT department of the future* (Management for professionals). Cham: Springer, 2019.
- [91] Q. Neo Bui, "Evaluate enterprise architecture frameworks using essential elements." Communications of the association for information systems (2023).
- [92] D. Greefhorst, H. Koning und H. van Vliet, „The many faces of architectural descriptions“, *Inf Syst Front*, Jg. 8, Nr. 2, S. 103–113, 2006. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10796-006-7975-x>.
- [93] ISO/IEC/IEEE, *ISO/IEC/IEEE 42010:2011: Systems and software engineering – architecture description*, 2011.
- [94] J. A. Zachman, „A framework for information systems architecture“, Los Angeles, Calif., Rep. G320-2785, 1986.

- [95] R. Winter und R. Fischer, „Essential Layers, Artifacts, and Dependencies of Enterprise Architecture“, in: *10th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops (EDOCW'06)*, 2006. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/edocw.2006.33>.
- [96] D. Matthes, *Enterprise Architecture Frameworks Kompendium: Über 50 Rahmenwerke für das IT-Management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [97] The Open Group, *The TOGAF® Standard, 10th Edition – Content, Capability, and Governance*, 1. Aufl. Hertogenbosch/Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2022.
- [98] The Open Group, *The TOGAF® Standard, 10th Edition – Applying the ADM*, 1. Aufl. Hertogenbosch/Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2022. (Teil der TOGAF® Standard 10th Edition).
- [99] The Open Group, *ADM Techniques in The TOGAF® Standard, 10th Edition – Architecture Development Method*, 1. Aufl. Hertogenbosch/Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2022.
- [100] The Open Group, *The TOGAF® Standard, 10th Edition – Enterprise Architecture Capability and Governance*, 1. Aufl. Hertogenbosch/Zaltbommel, NL: Van Haren Publishing, 2022.
- [101] S. A. Bernard, *An Introduction to Enterprise Architecture*, 1. Aufl. Bloomington, Indiana: AuthorHouse, 2012.
- [102] M. Lankhorst, *Enterprise architecture at work. Modelling, Communication and Analysis. The Enterprise Engineering Series*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [103] Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt, *IVS-Rahmenplan Sachsen-Anhalt: Rahmenplan zur Einführung und Nutzung Intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und öffentlichen Personenverkehr in Sachsen-Anhalt*, Magdeburg: Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt, 2013.
- [104] A. Ceder, *Public transit planning and operation: Theory, modelling and practice*, 1. Aufl. (Transport/Infrastructure). Amsterdam, Heidelberg: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [105] C. M. Pereira und P. Sousa, „Enterprise architecture: business and IT alignment“, in: *Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing*, 2005, S. 1344–1345.
- [106] M. Lankhorst, *Enterprise Architecture at Work: Modelling, Communication and Analysis*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 2013.
- [107] D. Greefhorst und E. Proper, *Architecture Principles: The Cornerstones of Enterprise Architecture*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- [108] J. Ziemann, *Fundamentals of Enterprise Architecture Management: Foundations for Steering the Enterprise-Wide Digital System*, 1. Aufl. (The Enterprise Engineering Series). Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [109] P. Hillmann, D. Schnell, H. Hagel, and A. Karcher, “*Enterprise Model Library for Business-IT-Alignment*, 2022. arXiv Preprint arXiv:2211.11369
- [110] S. Angelov, P. Grefen und D. Greefhorst, „A framework for analysis and design of software reference architectures“, *Information and Software Technology*, Jg. 54, Nr. 4, S. 417–431, 2012. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2011.11.009>.
- [111] R. Cloutier, G. Muller, D. Verma, R. Nilchiani, E. Hole und M. Bone, „The concept of reference architectures“, *Systems Engineering*, Jg. 13, Nr. 1, S. 14–27, 2010.
- [112] M. Galster und P. Avgeriou, „Empirically-grounded reference architectures: a proposal“, in: *Proceedings of the joint ACM SIGSOFT conference-QoSA and ACM SIGSOFT symposium-ISARCS on Quality of software architectures-QoSA and architecting critical systems-ISARCS*, 2011, S. 153–158.
- [113] E. Y. Nakagawa, F. Oquendo und J. C. Maldonado, „Reference architectures“, *Software Architecture 1*, S. 55–82, 2014.
- [114] T. Baudis, J. Czapowski, A. Reiz und M. Wißotzki, *Enterprise Architecture Management in kleinen und mittleren Unternehmen*. Bonn: Gesellschaft für Informatik. Verfügbar unter: https://doi.org/10.18420/in2017_207.
- [115] ISO/IEC/IEEE 42010:2022, Software, systems and enterprise — Architecture description, ISO/IEC/IEEE, Nov. 2022.
- [116] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Statusreport Industrie 4.0 – Begriffe/Terms and definitions, VDI/VDE-GMA, 2022.
- [117] J. W. Ross, P. Weill, and D. C. Robertson (2006). *Enterprise Architecture as Strategy: Creating a Foundation for Business Execution*. Boston, MA: Harvard Business Review Press.
- [118] J. Krogstie, *Model-Based Development and Evolution of Information Systems: A Quality Approach*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [119] F. Sánchez-Puchol, J. A. Pastor-Collado und B. Borrell, „First in-depth analysis of enterprise architectures and models for higher education institutions“, *IJCSIS*, Jg. 13, Nr. 2, S. 30–46, 2018. Verfügbar unter: https://doi.org/10.33965/ijcsis_2018130203.
- [120] M. C. Tremblay, A. R. Hevner und D. J. Berndt, „Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research“, *CAIS*, Jg. 26, 2010. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.17705/1cais.02627>.

- [121] P. Fettke, „Eine Methode zur induktiven Entwicklung von Referenzmodellen,“ in Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2014 (MKWI 2014): Tagungsband der 26. – 28. Februar 2014 in Paderborn, D. Kundisch, L. Suhl und L. Beckmann, Hrsg., Paderborn: Univ. Paderborn, 2014, pp. 1034–1047. ISBN 978-3-00-045311-3.
- [122] F. Timm und V. Sauer, *Applying the Minimal Cost of Change Approach to inductive Reference Enterprise Architecture Development* (GI Proceedings 272\ Digital Enterprise Computing). Bonn: Köllen, 2017.
- [123] W. Kieslich, M. Weber, H. Albrecht, A. Dinkel, T. Henninger und M. Rose, „Entwicklung einer ÖV-IVS-Rahmenarchitektur in Deutschland unter Einbindung Europäischer IVS Richtlinien mit ÖV-Relevanz: Schlussbericht“ (Forschungsbericht FE-Nr. 70.0846/2010), Mrz. 2013.
- [124] P. Krüger, „Methodische und konzeptionelle Hinweise zur Entwicklung einer IVS-Rahmenarchitektur für Deutschland“, Darmstadt: Technische Universität (zugel. Diss. Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik), 2013.
- [125] J. Belz et al., *Mobilität in Deutschland – MiD 2023: Ergebnisbericht*, Bonn/Berlin: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), IVT Research GmbH, infas 360 GmbH, 2025. Verfügbar unter: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2023_Ergebnisbericht.pdf (Zugriff am 21. Dezember 2025).
- [126] K. Hofmann, „Personenverkehrsstatistik im Wandel“, WISTA – Wirtschaft und Statistik, Vol. 77, Nr. 2, Seite 55–70, 2025. Statistisches Bundesamt (Destatis). K. Hofmann, „Personenverkehrsstatistik im Wandel,“ *Wirtschaft und Statistik*, 2025. doi: 316325.
- [127] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), *Daten & Fakten: Statistik zum öffentlichen Personennahverkehr und Schienengüterverkehr in Deutschland*, VDV – Die Verkehrsunternehmen. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/daten-fakten.aspx> (Zugriff am 18. Februar 2025).
- [128] Gabler Wirtschaftslexikon, „Öffentlicher Personennahverkehr (öPNV): Definition: Was ist ‚öffentlicher Personennahverkehr‘?“ SpringerGabler Verlag. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oeffentlicher-personennahverkehr-oepnv-46428> (Zugriff am 17. Dezember 2023).
- [129] C. Altena, R. Demtschenko, C. Doll, A. Greinus, and M. Kauder, „Mobilitätsplattformen in Deutschland – Ansätze für mehr Intermodalität und einen besseren öffentlichen Verkehr,“ *ZfV – Zeitschrift für Verkehrswissenschaft*, Vol. 92, Nr. 3, Seite 109–142, 2022. Verkehrs-Verlag J. Fischer.
- [130] W. Kriswardhana und D. Esztergár-Kiss, „A systematic literature review of Mobility as a Service: Examining the socio-technical factors in MaaS adoption and bundling packages“, *Travel Behaviour and Society*, Jg. 31, S. 232–243, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.12.007>.

- [131] Donau-Iller Nahverkehrsverbund GmbH (DING), Kooperationsvertrag zwischen Verkehrsunternehmen und dem Verkehrsverbund DING, 2023. Verfügbar unter: https://ding.eu/pdf/DING_KoopV.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [132] International Transport Forum (ITF), *Integrating Public Transport into Mobility as a Service: Summary and Conclusions*, ITF Roundtable Reports Nr. 184, Paris: OECD Publishing, 2021. Verfügbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/10/integrating-public-transport-into-mobility-as-a-service_1ef153c8/94052f32-en.pdf (Zugriff am 1. Februar 2025).
- [133] N. Zuniga-Garcia, K. M. Gurumurthy, C. N. Yahia, K. M. Kockelman und R. B. Machemehl, „Integrating shared mobility services with public transit in areas of low demand“, *Journal of Public Transportation*, Jg. 24, S. 100032, 2022. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2022.100032>.
- [134] Deutsches Institut für Urbanistik (Difu), „Potenziale neuer Mobilitätsformen und -technologien für eine nachhaltige Mobilitäts- und Raumentwicklung,“ Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik, 2018.
- [135] Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, *Mobilitätskonzepte in neuen Wohnquartieren: Mobilität sichern, Flächen und Emissionen sparen, Wohnqualität schaffen*, Endbericht, 2022. Verfügbar unter: https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/buw/staedtebaufoerderung/220507_endbericht_mobilitaetskonzepte_in_neuen_wohnquartieren.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [136] S. Bratzel, R. Tellermann, and F. Böbber, *Mobility Services Report 2023*: Studie, Center of Automotive Management, Bergisch Gladbach, 2023. Verfügbar unter: https://mobility-services-report.com/wp-content/uploads/2023/11/CAM_Mobility SERVICES-Report_2023_v1.02_o.V.pdf (Zugriff am 26. März 2025).
- [137] Q. Long, J. Ma, F. Jiang und C. J. Webster, „Demand analysis in urban air mobility: A literature review“, *Journal of Air Transport Management*, Jg. 112, S. 102436, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102436>.
- [138] A. Montes, N. Geržinic, W. Veeneman, N. van Oort und S. Hoogendoorn, „Shared micromobility and public transport integration – A mode choice study using stated preference data“, *Research in Transportation Economics*, Jg. 99, S. 101302, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101302>.
- [139] C. Gertz and E. Gertz, *Vom Verkehrs- zum Mobilitätsverbund: Die Vernetzung von inter- und multimodalen Mobilitätsdienstleistungen als Chance für den ÖV*, Hintergrundpapier, Verwaltungsrat des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Hamburg, 18 Jun. 2012. Verfügbar unter: https://infoportal.mobil.nrw/fileadmin/02_Wiki_Seite/03_Projekte/08_Mobilitaetsverbund/vdv-hintergrundpapier-mobilitaetsverbund.pdf (Zugriff am 28. März 2025).

- [140] A. Koesling, *Abgrenzung und Bestimmung neuer Mobilitätsbegriffe und -konzepte*, Bachelorarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2018.. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/121078/> (Zugriff am 4. März 2025)
- [141] A. Araldo, A. de Palma, S. Arib, and V. Gauthier, *Pooling for First and Last Mile: Integrating Carpooling and Transit*, THEMA Working Paper 2022–23, Université de Cergy-Pontoise, CY-Tech, 2022. Verfügbar unter: <https://thema.u-cergy.fr/IMG/pdf/2022-23.pdf> (Zugriff am 16.01.2026)
- [142] D. Piétron, A. Ruhaak und V. Niebler, *Öffentliche Mobilitäts-Plattformen: Digitalpolitische Strategien für eine sozial-ökologische Mobilitätswende*, Studie der Rosa-Luxemburg-Stiftung, Juni 2021. Verfügbar unter: https://www.rosalux.de/fileadmin/images/Dossiers/Spurwechsel/Studien_8-21_Mobilitätswende_Web.pdf (Zugriff am 16. Mai 2025).
- [143] S. A. Shaheen and A. P. Cohen, “Mobility on Demand (MOD) and Mobility as a Service (MaaS): Early Understanding of Shared Mobility Impacts and Public Transit Partnerships,” in *Demand for Emerging Transportation Systems: Modeling Adoption, Satisfaction, and Mobility Patterns*, Elsevier/Transportation Sustainability Research Center, UC Berkeley, 2020, ch. 3.
Verfügbar unter: [https://www.semanticscholar.org/paper/Mobility-on-demand-\(MOD\)-and-mobility-as-a-service-Shaheen-Cohen/82426c7ee5a716c16c04a7c4fd4b62ca17f95b6c](https://www.semanticscholar.org/paper/Mobility-on-demand-(MOD)-and-mobility-as-a-service-Shaheen-Cohen/82426c7ee5a716c16c04a7c4fd4b62ca17f95b6c) (Zugriff am 14. Mai 2025).
- [144] P. Jittrapirom, V. Caiati, A.-M. Feneri, S. Ebrahimigharehbaghi, M. J. A. González und J. Narayan, „Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges“, *UP*, Jg. 2, Nr. 2, S. 13–25, 2017. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.931>.
- [145] MaaS Alliance, *Mobility as a Service: Why do we need MaaS?*, MaaS Alliance, Brussels. Verfügbar unter: <https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/> (Zugriff am 16. Mai 2025).
- [146] Public-Private Infrastructure Advisory Facility (PPIAF), *Mobility as a Service – Use Case*. Verfügbar unter: <https://cdn.github.org/umbraco/media/3173/1-mobility-as-a-service-use-case.pdf> (Zugriff am 28. März 2025).
- [147] Knowledge Centre Data and Society, *Mobility as a Service: A new mobility model with data as its raw material*, brAIInfood, Brussels, Dec. 2021. Verfügbar unter: https://data-en-maatschappij.ai/uploads/publications/brAIInfood_mobilititeit_02.pdf (Zugriff am 23. März 2025).
- [148] A. Najmi, T. H. Rashidi, and W. Liu, *Ridesharing in the era of Mobility as a Service (MaaS): An activity-based approach with multimodality and intermodality*, arXiv preprint arXiv:2002.11712, Feb. 2020. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/2002.11712> (Zugriff am 28. März 2025).

- [149] H. Proff, *Mobility-as-a-Service*, Deloitte Touche Tohmatsu Limited/Deloitte Global, London, 2023. Verfügbar unter: <https://www.deloitte.com/global/en/Industries/consumer/analysis/mobility-as-a-service.html> (Zugriff am 23. März 2025).
- [150] Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP). „Ticketing in Mobility as a Service“. Verfügbar unter: <https://www.uitp.org/publications/ticketing-in-mobility-as-a-service/> (Zugriff am 28. März 2025).
- [151] B. Bianchi Alves et al., *Adapting Mobility-as-a-Service for Developing Cities: A Context-Sensitive Approach*, Mobility and Transport Connectivity Series, Washington, D.C.: The World Bank, 2021. Verfügbar unter: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/0990000001032286768/pdf/P1680070377e780e80aa930110b11750d1b.pdf> (Zugriff am 28. März 2025).
- [152] O. Pollicino, V. Lubello und A. Stojanovic, „Regulating Mobility-as-a-Service“, *SSRN Journal*, 2022. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4011633>.
- [153] D. Piétron, *Verkehrswende demokratisch steuern – Mobilitätsplattformen in öffentliche Hand: Impulspapier auf Basis der Studie „Öffentliche Mobilitätsplattformen: Digitalpolitische Strategien für eine sozial-ökologische Mobilitätswende“*, attac e. V., Frankfurt am Main, 2021. Verfügbar unter: https://www.attac.de/fileadmin/user_upload/Kampagnen/Verkehrswende/Studie_Mobi-Plattformen/Impulspapier_zur_Studie_Mobilitaetsplattformen_web.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [154] S. A. Shaheen and A. Cohen, *Similarities and differences of Mobility on Demand (MOD) and Mobility as a Service (MaaS)*, Transportation Sustainability Research Center, University of California, Berkeley, 2020. Verfügbar unter: https://tsrc.berkeley.edu/sites/default/files/publications/shaheen_cohen_similaritiesdifferences_modandmaas_.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [155] P. Cáceres, A. Sierra-Alonso, C. E. Cuesta, B. Vela und J. Barca, „Improving urban mobility by defining a smart data integration platform“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 204094-204113, 2020. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033584>.
- [156] K. Fang, T.-Y. Shi and B. Li, “Passenger train service integration innovation analysis based on SOA,” *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 10, Nr. 3, S. 171–175, 2010. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/pages/publications/77954484041?inward> (Zugriff am 28. März 2025).
- [157] C. García, F. Alayón, G. Padrón, M. A. Rodríguez, and P. Suárez, *Architecture of an integral information system for public road transport of passengers*, *Advances in Transport*, Vol. 6, S. 95–101, 2000. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/pages/publications/4544268290?inward> (Zugriff am 28. März 2025).
- [158] A. Ishizaka, H. Ikegaya und H. Nishimura, „Upgrading Approach for MaaS Level 4 Using UAF“, *ISSE 2022 - 2022 8th IEEE International Symposium on Systems*

- Engineering, Conference Proceedings*, 2022. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.1109/ISSE54508.2022.10005337>.
- [159] S. Jüngling, I. Fetai, A. Rogger, D. Morandi und M. Peraic, „On the Track to Application Architectures in Public Transport Service Companies“, *Applied Sciences (Switzerland)*, Jg. 12, Nr. 12, 2022. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.3390/app12126073>.
- [160] C. Lastrucci, L. Lastrucci und F. Casati, „PowerDriverDTSS: the advanced demand responsive transport service system“, *International Conference on Multimedia Computing and Systems – Proceedings*, Jg. 2, 1999. Verfügbar unter:
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0032660310&partnerID=40&md5=58595cc8817f14ed40936f9d779c6626> (Zugriff am 28. März 2025).
- [161] L. Lastrucci, „Building a flexible on-demand public transport system using its techniques“, *Intelligent Transportation Society of America – 12th World Congress on Intelligent Transport Systems 2005*, Jg. 6, 2009. Verfügbar unter:
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84878469437&partnerID=40&md5=ade31da553dcde3dd261a83ddc63cdd4> (Zugriff am 28. März 2025).
- [162] C. Li, „Travel Information Service System for public travel based on SOA“, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2010*, 2010. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.1109/SOLI.2010.5551560>.
- [163] D. Vauquier und Aiguier M., Caseau Y., Krob D., Rauzy A., „Modeling transportation systems: A case study with the open method praxeme“, *Complex Systems Design and Management – Proceedings of the 3rd International Conference on Complex Systems Design and Management*, 2012, 2013. Verfügbar unter:
https://doi.org/10.1007/978-3-642-34404-6_5.
- [164] M. Hwang und E. Lerner-Lam, „Enterprise architecture planning for public transit“, *Transportation and Development Innovative Best Practices 2008 – Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices 2008, TDIBP 2008*, Jg. 319, 2008. Verfügbar unter:
[https://doi.org/10.1061/40961\(319\)43](https://doi.org/10.1061/40961(319)43).
- [165] A. Ozpinar, „A Hyper-Integrated Mobility as a Service (MaaS) to Gamification and Carbon Market Enterprise Architecture Framework for Sustainable Environment“, *Energies*, Jg. 16, Nr. 5, 2023. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.3390/en16052480>.
- [166] Z. Zhou, Y. Matsubara und H. Takada, „Resilience analysis and design for mobility-as-a-service based on enterprise architecture modeling“, *Reliability Engineering and System Safety*, Jg. 229, 2023. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108812>.

- [167] J. Sochor, H. Arby, I. M. Karlsson und S. Sarasini, „A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals“, *Research in Transportation Business & Management*, Jg. 27, S. 3–14, 2018. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2018.12.003>.
- [168] UITP Organising Authorities Committee (OAC), New mobility services: Managing Change and Disruption, Brussels, Belgium: International Association of Public Transport (UITP), 2020. Verfügbar unter: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/07/PB_-_NMS_Managing_Change_and_Disruption.pdf (Zugriff am 3. Februar 2025).
- [169] European Federation for Transport and Environment AISBL, *Integrating new mobility services in urban transport*, Brussels, Belgium, 2018. Verfügbar unter: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2018_03_New_mobility_policy_paper_final.pdf (Zugriff am 3. Februar 2025).
- [170] C. Wolking, „Öffentliche Mobilität und neue Mobilitätsdienstleistungen – Rahmenbedingungen und Gestaltungsperspektiven“, in *Öffentliche Mobilität*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 105–138.
- [171] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Roadmap: Digitale Vernetzung im öffentlichen Personenverkehr“, Juli 2016. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/roadmap-digitale-vernetzung-im-oepv.html> (Zugriff am 29. Januar 2024).
- [172] M. Weber, M. Gsell, N. Fanderl, J. Krauß und M. Kern, *Mobilität 4.0: Digitale Plattformen als Beitrag zur nachhaltigen Verkehrswende in Stadt und Land?* Freiburg: Öko-Institut, Mai 2020. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/regGEM-digital-Mobilitaet.pdf> (Zugriff am 3. Februar 2025).
- [173] K. Schöneberg und H. Riede, *Öffentlicher Personennahverkehr: Trends in der städtischen Mobilität und das Engagement der Gewerkschaften: Herausforderungen für die Finanzierung des ÖPNV und Folgen von wettbewerblichen Vergabeverfahren und Privatisierung*. Verfügbar unter: https://www.etf-europe.org/wp-content/uploads/2024/01/ETF_UPT_wmp_report_final_DE_FINAL.pdf (Zugriff am 3. Februar 2025).
- [174] M. Daskalakis, C. Sommer, A. Roßnagel und J. Kepper, Hg. *Ländliche Mobilität vernetzen: Ridesharing im ländlichen Raum und dessen Integration in den öffentlichen Nahverkehr*, München: oekom, 2019.
- [175] A. Stein, S. Lehmann, L. Eiser, C. Stadter, C. Hasenbalg, and F. Quast, Weiterentwicklung des ÖPNV in und nach der Pandemie, UBA-Texte 91/2022, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2022. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-08-29_texte_91-2022_weiterentwicklung_des_oepnv_in_und_nach_der_pandemie.pdf (Zugriff am 3. Februar 2025).

- [176] N. Friesen, T. Sander, C. Büsing, K. Nachtigall und N. Nießen, „The complexity of the timetable-based railway network design problem“, *Networks*, Jg. 83, Nr. 2, S. 289–299, 2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/net.22192>.
- [177] P. Sharma, K. M. Heidemann, H. Heuer, S. Mühle und S. Herminghaus, „Sustainable and convenient: Bi-modal public transit systems outperforming the private car“, *Multimodal Transportation*, Jg. 2, Nr. 3, S. 100083, 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.multra.2023.100083>.
- [178] Deutsche Bahn AG, *Integrated Report 2024*, Berlin: Deutsche Bahn AG, 2024. Verfügbar unter: https://ibir.deutschebahn.com/2024/fileadmin/downloads/DB_IB24_e_web_01.pdf (Zugriff am 21. Dezember 2025).
- [179] Deutsche Bahn AG, „Größte Bus-Vergabe der Unternehmensgeschichte“, DB Newsroom Berlin, 13. Dezember 2025. Verfügbar unter: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Groesste-Bus-Vergabe-der-Unternehmensgeschichte-DB-schliesst-Rahmenvertraege-fuer-mehr-als-3-000-neue-Busse-fuer-DB-Regio-13700596 (Zugriff am 16. Januar 2026).
- [180] Deutsche Bahn AG, „Mobility on demand“. Verfügbar unter: <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/en/measures/ioki-shuttle> (Zugriff am 21. Dezember 2025).
- [181] C. An und J. Shen, „Assessing the impact of Mobility-as-a-Service (MaaS) on sustainable urban travel behaviors: a systematic literature review“, *Front. Sustain. Cities*, Jg. 7, 2025, Art. Nr. 1645488. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1645488>.
- [182] E. Palla, *E-Bikes und Mietwagen sollten in ÖPNV-Angebote integriert werden*, WELT – Politik/Deutschland, 24 Sep. 2024. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/politik/deutschland/article253671646/Oeffentlicher-Nahverkehr-E-Bikes-und-Mietwagen-sollten-in-OEPNV-Angebote-integriert-werden.html> (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [183] G. W. Heinze and H. H. Kill, *Zukunftsfähige Strategien für den ÖPNV in Berlin-Brandenburg: Handlungsempfehlungen und Visionen für einen finanzierbaren öffentlichen Verkehr*, *Der Nahverkehr: öffentlicher Personenverkehr in Stadt und Region*, Nr. 10, S. 8–16, 1994. Verfügbar unter: <https://api-depositonce.tu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/b98218ff-2c03-4769-9481-c6e708cf1b00/content> (Zugriff am 16. Januar 2026).
- [184] I. Kolloosche, S. Rammler und D. Thomas, „Die Auswirkungen digitaler Plattformen auf den öffentlichen Verkehr. Neue Strategien für die Ausgestaltung von Mobilität“, *WSI*, Jg. 74, Nr. 3, S. 234–240, 2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5771/0342-300x-2021-3-234>.
- [185] C. Wolking und J. Trölsch, „Multimodale Mobilitätsplattformen in öffentlicher Hand: Herausforderungen auf dem Weg von der Theorie in die Praxis“, *Internationales Verkehrswesen*, Jg. 75, Nr. 1, S. 57–63, 2023.

- [186] Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP), *New mobility services: managing change and disruption*, POLICY BRIEF, 2020. Verfügbar unter: https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/PB_-_NMS_Managing_Change_and_Disruption_web.pdf (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [187] Kompetenzzentrum Digitalisierung NRW und Zentrale Koordinierungsstelle (ZKS) NRW, *Leitfaden zur Standardisierung und Daten Governance des ÖPNV in NRW*, Version 1.0, 2022. Verfügbar unter: https://digitalemobilitaet.nrw/fileadmin/Redaktion/05_Downloads/Leitfaden_zur_Standardisierung_und_Daten_Governance_des_OEPV_in_NRW_1.0.pdf (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [188] D. Piétron, „Mobilitätsplattformen in Deutschland“, *SuN Sonderband 3: Beschleunigter Wandel oder nachhaltige Nicht-Nachhaltigkeit?*, S. 105–134, 2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.17879/sun-2024-5273>.
- [189] G. Fridgen, J. Röhlen, T. Guggenberger, V. Schlatt, and M. Schulze, *Überprüfung der Machbarkeit eines offenen und dezentralen Mobilitätssystems (OMOS)*, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik (FIT), Bayreuth, 2019. Verfügbar unter: <https://orbilu.uni.lu/handle/10993/44520> (Zugriff am 17. Februar 2025).
- [190] N. Werner und T. Zeitz, „Combining Predicted and Live Traffic with Time-Dependent A* Potentials“, Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ESA.2022.89>.
- [191] M. Schmitz, *Bus- und Bahnunternehmen in der Transformation: D-Ticket: Blaupause der Digitalisierung des ÖPNV*, polis Magazin, Ausg. 01/2023 – MOBILITY, 2023 (Gastbeitrag). Verfügbar unter: <https://polis-magazin.com/ausgabe/po-lismobility-01-2023> (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [192] N. Kryvinska, C. Strauss und L. Auer, „Next Generation Applications Mobility Management with SOA – A Scenario-Based Analysis“, in: *2010 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, 2010, S. 415–420. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/CISIS.2010.137>.
- [193] European Commission/Urban ITS Expert Group, *Guidelines for ITS deployment in Urban Areas*, 1. Aufl. Toulouse, France, 2013. Verfügbar unter: https://transport.ec.europa.eu/document/download/f545c05c-371b-4122-bfa4-9eb5ba8b1f6f_en?filename=2013-urban-its-expert_group-guidelines-on-smart-ticketing.pdf (Zugriff am 25. Dezember 2025).
- [194] Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP), *Demystifying ticketing and payment in public transport*, Brussels, Belgium, Juli 2022. Verfügbar unter: <https://www.uitp.org/publications/ticketing-in-mobility-as-a-service/> (Zugriff am 23. Dezember 2025).
- [195] J. Hollnagel und A. Fook, „The future of Fare Media in Automated Fare Collection Systems for Urban Mobility in the Latin America and Caribbean Region“, IDB

- Technical note 1730, September 2019. Verfügbar unter: https://publications.iadb.org/publications/english/document/The_Future_of_Fare_Media_in_Automated_Fare_Collection_Systems_for_Urban_Mobility_in_the_Latin_America_and_Caribbean_Region_en.pdf (Zugriff am 25. Dezember 2025).
- [196] Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP), „Ticketing in Mobility as a Service“. Verfügbar unter: <https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Report-Ticketing-MaaS-JULY2022-web.pdf> (Zugriff am 23. Dezember 2025).
- [197] Federal Transit Administration (FTA), „Mobility Payment Integration: State-of-the-Practice Scan“, FTA Report Nr. 0143, Oktober 2019. Verfügbar unter: https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/134056/mobility-payment-integration-state-practice-scan-fta-report-no0143_1.pdf (Zugriff am 25. Dezember 2025).
- [198] Shared use Mobility Center, „Seamless Payments for Complete Trips: A Guide for Transit Agencies“, Whitepaper, Chicago, Illinois, Dezember 2020. Verfügbar unter: <https://sharedusemobilitycenter.org/wp-content/uploads/2021/04/SeamlessPayment.pdf> (Zugriff am 25. Dezember 2025).
- [199] K. Stouffer u.a., „Guide to Operational Technology (OT) security“, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, 2023. Verfügbar unter doi: 10.6028/NIST.SP.800-82r3.
- [200] D. Damjanovic, O. Peck, M. Berger und A. Kammerhofer, *SLIMobility – System-integrierende Lösungsansätze für Innovationsbarrieren neuer Mobilitätsdienstleistungen*, Wien: Technische Universität, 2023. Verfügbar unter: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/192058> (Zugriff am 17. Februar 2025).
- [201] R. Oehme, C. Scherf, J. Emmerich, C. Emmerich, M. Streif, W. Schade und M. Knauff, *Digitale Mobilitätsplattformen – Zwischenbericht: Arbeitspaket 1: Analyse und Bestandsaufnahme zu plattformbasierten Mobilitätskonzepten und -angeboten*, Texte 94/2024, Umweltbundesamt, Karlsruhe, 2024. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/94_2024_texte_digitale_mobilitaetsplattformen.pdf (Zugriff am 3. Februar 2025).
- [202] C. Böttger et al., *Mobilität unter neuen Vorzeichen: Was den Wandel in Individualverkehr und Logistik treibt*, ifo Schnelldienst, Vol. 76, Nr. 06, Seite 3–21, 2023. Verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/handle/10419/279715> (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [203] W. Canzler, J. Haus, R. Kellermann, S. Schröder, and C. Thomsen, *Gemeinsam in Bewegung: Forschung und Praxis für die Mobilitätswende – Beispiele und Erkenntnisse aus den Projekten der BMBF-Fördermaßnahmen MobilitätsWerk-Stadt 2025 und MobilitätsZukunftsLabor 2050*, Berlin: nexus Institut und WZB,

2024. Verfügbar unter: <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/99468> (Zugriff am 16. Februar 2025).
- [204] C. Wolking, „Public Mobility and New Mobility Services: Contextual Conditions and Perspectives for Design“ *Public Mobility: Prerequisites for human-oriented transport planning*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, S. 95–124.
- [205] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), *Mobility-as-a-Service: Flexibel von A nach B mit multimodalen Mobilitätsdiensten*, 2024. Verfügbar unter: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mFUND/Aktuell/mobility-as-a-service-flexibel-von-a-nach-b-mit-multimodalen-mobilitaetsdiensten.html> (Zugriff am 18. Februar 2025).
- [206] S. Shaheen and A. Cohen, *Shared Mobility and Public Transit Integration: Shared Mobility Policy Playbook*, Transportation Sustainability Research Center, University of California, Berkeley, 2019. Verfügbar unter: <https://escholarship.org/content/qt9678b4xs/qt9678b4xs.pdf> (Zugriff am 28. März 2025).
- [207] International Association of Public Transport (UITP), *Mobility as a Service: Report*, Brussels: UITP, 2019. Verfügbar unter: https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Report_MaaS_final.pdf (Zugriff am 27. März 2025).
- [208] Europäisches Parlament, *Bericht über einen neuen europäischen Rahmen für urbane Mobilität*, A9-0108/2023, 2023. Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0108_DE.html (Zugriff am 28. März 2025).
- [209] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), *Für eine aktive und umweltfreundliche Stadtmobilität: Wandel ermöglichen*, Kapitel 6, Umweltgutachten 2020, SRU, Berlin, 2020. Verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_06_Stadtmobilitaet.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [210] L. Söhngen and F. Sommer, *Shared Mobility und Mobility-as-a-Service: Nachhaltiger, effizienter und kundenfreundlicher durch den Verkehr mit Shared Mobility*, Working Paper, FIR e.V. an der RWTH Aachen, Aachen, 2024. Verfügbar unter: https://epub.fir.de/frontdoor/deliver/index/docId/3557/file/fir_soehngen_u_sommer_shared-mobility_wp_diserhub_2024.pdf (Zugriff am 3. April 2025).
- [211] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), *Sharing Strategie im Personen-Mobilitätsbereich: Eine Umsetzungsstrategie des Mobilitätsmasterplans 2030 für das Teilen von Fahrzeugen (Sharing) und Fahrten (Mitfahren)*. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr%3A2b506ac1-8f9e-4939-a3cf-703921a1f904/BMK_Sharing_Strategie_UA.pdf (Zugriff am 28. März 2025).

- [212] Handelsblatt Research Institute, „Mobility – nachhaltiger Verkehr Trendradar #5“. Verfügbar unter: https://research.handelsblatt.com/wp-content/uploads/2024/07/Trendradar_Mobility_DS.pdf (Zugriff am 28. März 2025).
- [213] Interreg Central Europe, „Mobility as a Service – Chancen für die Stadtregion Graz“, EU-projekt „solez“. Verfügbar unter: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/GRAZ-GER.pdf> (Zugriff am 27. März 2025).
- [214] Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), „BerlKönig geht, neue Angebote kommen“, Pressemitteilung vom 23. Juni 2022. Verfügbar unter: <https://www.bvg.de/de/unternehmen/medienportal/pressemitteilungen/berlkoenig-geht-neue-angebote-kommen> (Zugriff am 1. Dezember 2025).
- [215] K. K. Viergutz and F. Brinkmann, „Ridepooling: ein Erfolgsmodell? Digitalisierung im Nahverkehr. Ridepooling: a model for success? Digitalization in local public Transport,“ SIGNAL + DRAHT, vol. 110, no. 7+8, pp. 13–18, 2018.
- [216] P. Schneider, T. Koska und C. Schäfer-Sparenberg, „On-Demand-Ridepooling als Beitrag zu Mobilitätswende und Daseinsvorsorge: Erkenntnisse zum Status quo in Deutschland und Entwurf einer Systemtypologie“, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Rep. 202, 2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.48506/opus-8611>.
- [217] G. L. Geerts und W. E. McCarthy, „An ontological analysis of the economic primitives of the extended-REA enterprise information architecture“, *International Journal of Accounting Information Systems*, Jg. 3, Nr. 1, S. 1–16, 2002. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/s1467-0895\(01\)00020-3](https://doi.org/10.1016/s1467-0895(01)00020-3).
- [218] F. Hunka und J. Matula, „Towards Paired Transactions Modeling“, in: *Annals of Computer Science and Information Systems*, 2016, S. 1153–1158. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.15439/2016f145>.
- [219] W. E. McCarthy et al. „*The REA Accounting Model as an Accounting and Economic Ontology (Version 0.90—2019)*“.
- [220] T. A. Sedbrook, „Modeling the REA Enterprise Ontology with a Domain Specific Language“, *Journal of Emerging Technologies in Accounting*, Jg. 9, Nr. 1, S. 47–70, 2012. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2308/jeta-50406>.
- [221] F. Gailly und G. Poels, „Using the REA Ontology to Create Interoperability between E-Collaboration Modeling Standards“, in: *Advanced Information Systems Engineering: 21st International Conference, CAiSE 2009, Amsterdam, Niederlande, 8.–12. Juni 2009. Proceedings*, D. Hutchison u.a., Hg., 2009, S. 395–409. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02144-2_32.
- [222] M. Bartnik, *Integration von NMS und MaaS in Unternehmen der ÖPNV-Branche – insb. BerlKönig*. (Experteninterview, BVG). Protokoll am 24.03.2021 (Anhang Z).

- [223] I. Rentz, „Der „BerlKönig“ kommt – und mit ihm die Ochsenknechts“. Verfügbar unter: <https://www.horizont.net/marketing/nachrichten/bvg-macht-ridesharing-der-berlkoenig-kommt---und-mit-ihm-die-ochsenknechts-170128> (Zugriff am 12. August 2021).
- [224] A. Rühle, „Keine Bundesmittel mehr: BerlKönig bc dankt ab“, Taxi-Times, 06. Mai 2021. Verfügbar unter: <https://www.taxi-times.com/keine-bundesmittel-mehr-berlkoenig-bc-dankt-ab/> (Zugriff am 12. August 2021).
- [225] M. Razavi, F. S. Aliee und K. Badie, „An AHP-based approach toward enterprise architecture analysis based on enterprise architecture quality attributes.“ *Knowledge and information systems* 28.2 (2011): S. 449–472.
- [226] Visual Paradigm, „Referenzarchitekturen – Business Strategy View,“ Online-Diagramm-Vorlage. Verfügbar unter: <https://online.visual-paradigm.com/de/diagrams/templates/archimate-diagram/business-strategy-view/> (Zugriff am 12. August 2021).
- [227] J. S. Rings, *Evaluation der Enterprise Referenzarchitektur für ÖPNV-Unternehmen (Interview 1: BSAG)*. Microsoft Teams am 03.11.2022 (Anhang Z).
- [228] J. S. Rings, *Evaluation der erstellten Enterprise Referenzarchitektur für ÖPNV-Unternehmen (Interview 2: BSAG)*. Microsoft Teams am 07.11.2022 (Anhang Z).
- [229] M. Winkler (Stadtwerke München), *Experteninterview zur Evaluation der REA für ÖPNV-Unternehmen*. Microsoft Teams am 05. und 06.04.2023 (Anhang Z).
- [230] Experten des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und deutscher Verkehrsunternehmen, *VDV DTT Herbstsitzung in Rostock* am 05.12.2023 (Anhang Z).
- [231] D. Weißer (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), *Expertengespräch zur Evaluation: Architekturerggebnis Vertrieb*. Microsoft Teams (Remote) (Anhang Z).
- [232] ISO/IEC 25010:2023, *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model*, ISO/IEC, Genf, CH, 2023. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/78176.html> (Zugriff am 2. Dezember 2023).
- [233] *ISO/IEC/IEEE International Standard – Systems and software engineering – Life cycle processes—Requirements engineering*, Piscataway, NJ, USA.
- [234] C. S. Dionisio, *A Project Manager’s Book of Forms: A Companion to the PMBOK® Guide – 6. Auflage*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [235] Information Systems Audit and Control Association, *COBIT 5: Enabling processes*. Rolling Meadows, Ill.: ISACA, 2012.
- [236] ISO/IEC/ANSI 62443-3-2:2020, *Security for industrial automation and control systems – Part 3-2: Security risk assessment for system design*, IEC/ISO/ANSI/ISA, 2020.

- [237] M. Op 't Land, E. Proper, M. Waage, J. Cloo und C. Steghuis, „The Enterprise Architect“, *Enterprise Architecture*, S. 113–125, 2009. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85232-2_6.
- [238] K. D. Niemann, *From Enterprise Architecture to IT Governance: Elements of Effective IT Management*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2006.
- [239] U. Frank, „Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges“, *Softw Syst Model*, Jg. 13, Nr. 3, S. 941–962, 2014. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10270-012-0273-9>.
- [240] W. R. Shadish, T. D. Cook, and D. T. Campbell, *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference*, Boston, MA: Houghton Mifflin, 2002.
- [241] J. Mageean und J. D. Nelson, „The evaluation of demand responsive transport services in Europe“, *Journal of Transport Geography*, Jg. 11, Nr. 4, S. 255–270, 2003. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/s0966-6923\(03\)00026-7](https://doi.org/10.1016/s0966-6923(03)00026-7).
- [242] C. Mulley und J. D. Nelson, „Flexible transport services: A new market opportunity for public transport“, *Research in Transportation Economics*, Jg. 25, Nr. 1, S. 39–45, 2009. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.08.008>.
- [243] DIN CEN/TS 17413:2020-06, *Intelligente Verkehrssysteme – Städtische IVS – Modelle und Festlegungen für neue Modi*, englische Fassung CEN/TS_17413:2020. Berlin, 2020.
- [244] L. Davison, M. Enoch, T. Ryley, M. Quddus und C. Wang, „Identifying potential market niches for Demand Responsive Transport“, *Research in Transportation Business & Management*, Jg. 3, S. 50–61, 2012. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.04.007>.
- [245] DIN CEN/TS 17118:2025-02, *Intelligente Verkehrssysteme – Öffentlicher Verkehr – Offene API für verteilte Reiseplanung*, englische Fassung CEN/TS_17118:2024. Berlin, 2025.
- [246] Rockley, Ann. The impact of single sourcing and technology. Technical communication, 2001, 48. Jg., Nr. 2
- [247] Codd, Edgar F. A relational model of data for large shared data banks. Communications of the ACM, 1970, 13. Jg., Nr. 6

Eidesstattliche Erklärung/Statutory Declaration

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel

Integration von bedarfsorientiertem Verkehr – insbesondere NMS – in klassische ÖPNV-Unternehmen – Eine Referenz-Enterprise-Architektur-Empfehlung

selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Diese Dissertation wurde bisher weder im Ausland noch im Inland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bewusst, dass bei Abgabe einer falschen Erklärung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Statutory Declaration

I hereby declare that I have written the present dissertation thesis with the title

**Integration of demand-oriented transportation – in particular NMS – into traditional public transport companies –
A reference enterprise architecture recommendation**

independently and without outside help. Only the sources and aids explicitly mentioned in the thesis were used. I have marked ideas taken literally or by analogy as such. So far, this dissertation has not been submitted in the same or similar form to another examination authority either abroad or in Germany.

I am aware that if a false declaration is made, the exam will be deemed failed.

Rostock, den 09.02.2026

Mark-Oliver Würtz

