

**Optimierung von**  
**Karosserievorbehandlungsanlagen in der**  
**Automobilindustrie**

Dissertation  
zur  
Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
der Universität Rostock

urn:nbn:de:gbv:28-diss2008-0097-6

vorgelegt von

Detlef Majohr, geb. am 15.11.1944 in Marienwerder (Westpr.)  
aus Bad Pyrmont, Mühlenstrasse 30

Rostock, Juni 2008

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Technischer Stand der Automobil-Lackierung .....	4
3	Problem- und Aufgabenstellung .....	7
4	Automobil-Serienlackierung .....	9
4.1	Ziele und Funktionen des Automobil-Lackierprozesses .....	10
4.1.1	Glanz und Farbeindruck .....	11
4.1.2	Qualität des Lackierprozesses .....	12
4.2	Lackaufbau und Prozessfolge .....	13
4.2.1	Lackaufbau .....	15
4.2.2	Lackierprozessfolge .....	17
4.2.3	Prozessfolgeplan .....	19
4.3	Prozessqualität – Prozessfehler .....	20
4.3.1	Prozessqualität Beschichtungsstoff .....	20
4.3.2	Prozessfehler Gesamtsystem .....	21
4.3.3	Fehleridentifikation und Ursachenfindung .....	23
4.4	Fehlervermeidung-Qualitätsstrategie .....	26
4.4.1	Prozesssteuerung .....	26
4.4.2	Prozessregelung .....	26
4.4.3	Qualitätsmanagement .....	27
4.5	Idealierter Lackierprozess – Einleitung .....	28
4.5.1	Ausgangssituation „Reale Lackierstrasse“ .....	29
4.5.2	Idealierter Lackierprozess- Definition .....	32
4.6	Realisierte Optimierungsprojekte .....	39
4.6.1	Gesamtüberblick Prozessoptimierungsprojekte .....	41
4.6.2	Kurzbeschreibung der Einzelprojekte nach Fertigungsabschnitten .....	41
4.6.3	Gesamtergebnis Prozessoptimierung – Projekte .....	45
5	Grundlagen- Karosserievorbehandlung .....	47
5.1	Metallische Karosseriewerkstoffe .....	47
5.2	Karosserievorbehandlung .....	49
5.2.1	Reinigung – Entfettung .....	50
5.2.2	Phosphatierung .....	53
5.3	Elektrotauchlackierung .....	58
5.3.1	Prinzipien der Abscheidung .....	61
5.3.2	Physikalische Kenngrößen .....	61
5.3.3	Chemie der Kataphorese .....	64
5.3.4	Chemische Kenngrößen .....	65
6	Lackiertechnologie und Defizite .....	67
6.1	Vorbehandlungsanlagen .....	67
6.1.1	Defizite - Vorbehandlung .....	68
6.2	Elektrotauchanlage .....	68
6.2.1	Stromversorgung .....	69
6.2.2	Wärmeaustauscher – Lackkreislauf .....	70
6.2.3	Ultrafiltration .....	71
6.2.4	Filter .....	72
6.2.5	Lackdosierung .....	72
6.2.6	Anolytkreislauf .....	72
6.2.7	Spülzonen .....	73
6.2.8	Elektrotauchlack-Trockner .....	75
6.2.9	Defizite – Elektrotauchlackierung .....	77
7	Strömungsmechanische Grundlagen zur Karosserievorbehandlung .....	79
7.1	Modell „Tauchbecken – Karosse“ in Vorbehandlungsbädern .....	79
7.2	Vorgehen bei der numerischen Simulation von komplexen Geometrien .....	80
7.2.1	Konstruktion des zu berechnenden Volumens mit Pro/Engineer .....	80
7.2.2	Festlegung der „Familiennamen“ mit dem ICEM CDF Meshing Interface .....	81
7.2.3	Vernetzung der Geometrie mit ICEM CFD .....	81
7.2.4	Berechnung mit dem Löser CFX-TASCflow3D .....	82
7.2.5	Auswertung der Daten mit TecPlot .....	83

7.3	Grundgleichungen der Strömungsphysik zur numerischen Simulation .....	83
7.4	Strömungskonditionen Tauchbecken mit Karossern .....	85
8	Strömungsmechanische Untersuchungen im KTL- Bad .....	87
8.1	Ergebnisse aus der CFD-Simulation im Tauchbecken .....	87
8.1.1	CFD-Simulation: Beckenströmung „ohne Karosse“ in Mittelebene.....	87
8.1.2	CFD-Simulation Beckenströmung „mit Karosse“ in Mittelebene .....	89
8.1.3	Zusammenfassung: Strömungsstruktur im Tauchbecken.....	91
8.1.4	Strömungsmechanische Folgerungen aus den CFD- Simulationen .....	92
8.2	Charakteristischer KTL-Schmutz .....	92
8.3	Haftkraft: Eisenoxid- Partikel auf phosphatisierter Blechoberfläche.....	93
8.3.1	Definition der Adhäsionszahl $\gamma_F$ .....	93
8.3.2	Experimentelle Haftkraftuntersuchungen .....	93
8.3.3	Fazit der Haftkraftuntersuchungen bei ebener Platten-Grenzschichtströmung .....	94
8.3.4	Adhäsionszahl $\gamma_F$ als Funktion der Wandschubspannung $\tau_w$ .....	94
8.3.5	Fazit der Haftkraft-Untersuchung hinsichtlich der Wandschubspannung $\tau_w$ .....	94
8.4	Düsenstrahlausbreitung: Wurfweite unterschiedlicher Düsen .....	95
8.5	Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen bei verschiedenen Auf treffwinkeln .....	95
8.5.1	Einleitung .....	95
8.5.2	Grundlegende Betrachtungen .....	96
8.5.3	Versuchsdurchführung .....	96
8.5.4	Ergebnisse.....	99
8.6	Fazit zur Strömungsmechanik des KTL-Tauchbeckens „VWN Hannover“ .....	101
8.6.1	Schematische Darstellung der Freistrahlanordnung, li. und re. Seite .....	101
9	Anlagentechnische Realisierung der strömungsanalytischen Ergebnisse .....	102
9.1	Kurzbeschreibung der KTL-Anlage „VWN- Hannover“ .....	102
9.2	Generelles Vorgehen „KTL-Anlagenoptimierung“ .....	103
9.3	Technische Realisierung der KTL- Strömungsoptimierung .....	103
9.3.1	Technische Ausschreibung .....	104
9.3.2	Technischer Umbau, Fa. IAM, Industrieanlagenmontage GmbH .....	105
9.4	Ergebnisse nach Anlagenoptimierung .....	106
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	107
11	Anhang .....	110
11.1	Bildliche Darstellungen „KTL- Becken“ vor dem Umbau (Januar 2004) .....	110
11.2	Bildliche Darstellungen „KTL-Becken“ nach dem Umbau (April 2007) .....	113
11.3	Dokumentation „Technischer Umbau“ Fa. IAM Industrieanlagen GmbH .....	116
11.4	Sonderfarben-Innovationskonzept .....	118
11.5	Großprojekt Reduzierung Fertigwagen-Nachlackierung.....	123
11.6	„Von Kindheit an dem Auto treu“ .....	124
12	Literaturverzeichnis .....	125
12.1	Zitate .....	125
12.2	Allgemeine Literatur .....	127

### Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer breit angelegten Prozessoptimierung in der Lackiererei des Volkswagenwerkes in Hannover. Hierbei wurden wesentliche technische Neuerungen zur Optimierung der Lackiererei durch den Autor initiiert und mit dem Lackteam erfolgreich umgesetzt.

Das Volkswagenwerk Hannover ist das Leitwerk für die Marke Volkswagen-Nutzfahrzeuge im Konzernverbund der Volkswagen AG.

Die arbeitstägliche Fertigung zum Zeitpunkt der Untersuchung belief sich auf 850 Fahrzeuge am Tag mit den Anteilen von 700 Fahrzeugen des Modells VW T5 mit den verschiedensten Derivaten und 150 Fahrzeuge des Modells LT als reines Nutzfahrzeug.

Aufgrund der vielseitigen Fahrzeugkonzepte und der exzellenten Produktqualität genießen die genannten Modelle eine äußerst positive Marktpräsenz. Das Modell Volkswagen T5 ist in seiner Fahrzeugklasse in Deutschland der Marktführer.

Im Volkswagenwerk Hannover sind 8000 Mitarbeiter beschäftigt, der Lackierereianteil liegt bei 1400 Mitarbeitern. In der Region Hannover ist das Volkswagenwerk VWN der größte Arbeitgeber.

Um diese gute Position, mit Blick auf den weltweiten Wettbewerb, abzusichern und weiter auszubauen, waren und sind umfangreiche Aktivitäten auf den Gebieten der Produktivitätssteigerung und der Verbesserung der Kostenstrukturen anzugehen.

Ein absoluter Schwerpunkt bildet in diesem Zusammenhang die deutliche Verbesserung der Prozessabläufe von der Entwicklung, über die Fertigung bis hin zur Auslieferung der Fahrzeuge an die Kunden.

Eine besondere Chance mit entsprechenden Potentialen liegt nach Überzeugung des Autors in der Vereinfachung und Verbesserung der Prozessabläufe bei gleichzeitiger Anhebung der Produktqualität und der Produktivität.

Die Prozessabläufe in der Lackiererei bieten aufgrund der Komplexität und der noch vorhandenen Verbesserungspotentiale ein besonderes Feld für weitergehende Prozessoptimierungen und die Anwendung der genannten Maxime.

Die Voraussetzung für die Hinführung zu einem konstanten und stabilen Lackierprozess ist jedoch die konsequente Analyse der Ursachen-Wirkungskette, die, wie mit der vorliegenden Arbeit bestätigt, nur mit einer wissenschaftlichen Bearbeitung zum positiven Ergebnis geführt hat.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der strömungsmechanischen Untersuchung und Optimierung der Vorbehandlungs- und Grundierbäder für Fahrzeug-Karosserien.

Die wissenschaftlichen und experimentellen Teile der Arbeit wurden durch das Steinbeis-Transfer-Zentrum für Strömungs- und Energietechnik Rostock unterstützt. Herrn Professor Dr.-Ing. Alfred Leder danke ich sehr für seine stete Diskussions-Bereitschaft sowie die Übernahme des Referates. Ein weiterer Dank geht an die Gutachter, Herrn Professor Dr. K. Ortlib, Fa. Dürr, Stuttgart, und an Herrn Professor Dr. W. Bremser, Universität Paderborn. Bei beiden Herren bedanke ich mich ausdrücklich für die spontane Bereitschaft der Übernahme dieser Funktion und die damit verbundenen Verpflichtungen und Anstrengungen.

Das gute Zusammenwirken verschiedener weiterer Partner führte zu einem positiven Gesamtergebnis des Projektes.

Herr Dipl.-Ing. Dietmar Mnich als Fertigungsleiter des VW-Werkes in Hannover unterstützte das Optimierungsprojekt durch persönliche Beratung und Bereitstellung der finanziellen Mittel in hervorragender Weise.

Die Materiallieferanten mit Herrn Bohnhorst, Fa. Henkel, für den Fachbereich Vorbehandlung und Herrn Kuphal, Fa. DuPont, für den Fachbereich KTL-Grundierung, unterstützten durch intensive fachliche Beratung und Bereitstellung von Ressourcen.

Der Anlagenlieferant mit Herrn Moosbauer, Fa. IAM, gemeinsam mit Herrn Meier von der Fa. WM consult & sales, beteiligten sich bereits in der frühen Projektphase sehr intensiv und brachten viele Anregungen und Erfahrungen ein.

Sehr bedanken möchte ich mich bei den Kollegen und Mitarbeitern aus meinem Verantwortungsbereich innerhalb der Lackiererei des Volkswagenwerkes Hannover, die das Gesamt-Projekt deutlich unterstützt haben und in der späten Phase dann auch konkret ausgeplant und umgesetzt haben.

Stellvertretend für die jeweiligen Organisationseinheiten möchte ich die Herren Dr. Krallmann, Prozesstechnik, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Scharf, Technisches Büro sowie Herrn Dipl.-Ing. Rolf Ohliger, Verfahrenstechnik-Lackiererei nennen.

Besonders danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Ullrich Krüger aus Bad Pyrmont, der mich bei der datentechnischen Gestaltung dieser Arbeit aktiv beraten und unterstützt hat.

Allen erwähnten Herren danke ich sehr für die fachliche und persönliche Unterstützung.

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Symbole

$f_i$	Körperkräfte
$P, p$	Druck
$t$	Zeit
$u$	Komponente der Geschwindigkeit in x-Richtung
$v$	Komponente der Geschwindigkeit in y-Richtung
$w$	Komponente der Geschwindigkeit in z-Richtung
$ U $	Isotachenfläche
$U_\infty$	Anströmgeschwindigkeit (auf Oberfläche)
$U_{\max, o}$	Anströmgeschwindigkeit (Düse)
$U_j$	3D-Geschwindigkeitsvektor
$x$	kartesische Koordinate
$y$	kartesische Koordinate
$z$	kartesische Koordinate
$N$	Anzahl der restlichen Partikel auf der Testfläche
$N_o$	Anzahl der Partikel auf der Testfläche
$d$	Durchmesser (Düse)
$\dot{V}_o$	Volumenstrom

### Griechische Symbole

$\delta_{ij}$	Kroneckersymbol ( $\delta_{ij} = 1$ für $i=j$ ; $\delta_{ij} = 0$ für $i \neq j$ )
$\varepsilon$	Dissipationsrate von $k$
$\mu$	dynamische Viskosität
$\mu_b$	Volumenviskosität
$\nu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\tau_{ij}$	viskoser Spannungstensor
$\tau_w$	Wandschubspannung
$\varphi$	Prallstrahlwinkel
$\delta$	Wandgrenzschicht (Dicke)
$\gamma_F$	Adhäsionszahl

## 1 Einleitung

In kaum einem anderen Zweig der Oberflächenbeschichtung haben sich aus handwerklichen und langwierigen Lackierverfahren so hoch technisierte und schnelle industrielle Lackierverfahren entwickelt wie in der Automobilindustrie. Waren früher Tage bis Wochen für das Lackieren von Automobilen erforderlich, so durchlaufen heute Karossen in 8 bis 10 Stunden eine komplette Lackierstrasse mit allen Reinigungsschritten, der Vorbehandlung, der Elektro-Tauchgrundierung und den üblicherweise zwei bis vier Lackschritten für die Aufbringung des Decklackes.

Im VW-Konzern besteht der Lackaufbau nach der Vorbehandlung Elektrotauchlack bis zum abschließenden Klarlack generell aus vier Lackschichten.

Nicht nur die in wirtschaftlichen Notwendigkeiten begründeten Aufgaben initiieren die Weiterentwicklung und Einführung neuer und optimierter Lackierprozesse. Auch die Verringerung der Umweltbelastung sowie qualitative Verbesserungen z.B. im Korrosionsschutz, in der Langzeitbeständigkeit und nicht zu übersehen in der Appearance sind treibende Kräfte für die Lack- und Prozessentwicklung bei der Beschichtung von Automobilen.

Zur Erfüllung dieser Ziele wurde im VW-Konzern generell der umweltfreundliche Wasser-Basecoat als farbgebende Lackschicht sowie der homogene Klarlack als Garant für eine gute Appearance und Langzeitbeständigkeit zum Einsatz gebracht. Mit dem VW-Lackierprozeß werden eine 12-jährige Durchrostungsgarantie und eine 3-jährige Lackgarantie für die PKW-Modelle ausgesprochen.

Dabei sollte man sich vor Augen führen, welchen extremen Belastungen die Fahrzeuge und damit die Lackierung während der Gebrauchsduer ausgesetzt sind. Hohe Temperaturen z.B. bis 70 °C bei dunklen Farbtönen in Florida und anderen heißen Regionen sowie mit bis zu -50°C extrem tiefe Temperaturen in den nördlichen Regionen und den Polargebieten, permanente Temperaturwechsel von 10 – 30 °C pro Tag. Hinzu kommen Steinschlagbeanspruchungen auf Schotter- und unbefestigten Strassen, starke Salzbelastung in Küstengebieten und durch Streusalz in den Wintermonaten, hohe UV-Einstrahlung, Einwirkung von sauren und alkalischen Abgasen sowie mechanische Beanspruchungen in den Waschanlagen.

Es ist leicht verständlich, dass ein derartiges Bündel von Forderungen nicht mit einer einzigen Lackschicht zu erfüllen ist. Aus diesem Grund werden aufeinander abgestimmte Lacke eingesetzt, die, in mehreren Schichten aufgetragen, verschiedene Aufgaben aus dem Anforderungsprofil der Automobilakkierung übernehmen.

Die Herstellung einer derartigen qualitativ hoch anzusiedelnden Kraftfahrzeug-Lackierung erfolgt seriell in umfangreichen Lackieranlagen, auch Lackierstrassen genannt, die innerhalb der Fabrikstruktur in separaten Gebäuden oder Hallen installiert sind.

Die Länge einer Lackierstrasse von der Übergabe der Karosserie aus dem Rohbau bis zur Abgabe an die Endmontage bewegt sich üblicherweise zwischen 2 und 3 Kilometer.

Neben den technischen Anforderungen an eine Lackiererei sind organisatorische Aspekte wie Abläufe und Lacklieferantenverantwortung für das Lackierergebnis stark in den Vordergrund gerückt.

Mit dem Betrieb dieses stark anlagentechnisch geprägten Lackierbereiches sind logischerweise erhebliche Kosten verbunden, die die Herstellkosten eines Fahrzeuges deutlich beeinflussen. Von den gesamten Kostenarten wie Investitions-, Energie-, Personal- und Wartungskosten machen die reinen Lackmaterialkosten nur etwa 20% des gesamten Kostenblocks aus.

Zusätzliche Reparaturaufwendungen für Defekte oder nicht qualitätsgerechte Oberflächen belasten in diesem Zusammenhang das Kostenbild negativ und führen zu zeitlichen Verzögerungen in der Fertigung.

Damit bekommt aus Sicht der Kosten, der Qualität und der Liefertreue der „Direktlauf“ oder auch „Geradeauslauf“ der Karossen eine ganz besondere Bedeutung.

Der „Direktlauf“ bedeutet, dass eine Karosserie entsprechend der Qualitätsstandards den jeweiligen Lackierabschnitt oder auch die Endabnahme passiert und von der Endmontage direkt übernommen werden kann.

Der Direktlauferanteil in guten Lackierereien liegt bei 90 bis 95 % und bei weniger guten Lackier-Prozessen kann sie auf 75 bis 85 % abfallen.

Die Nachbesserungskosten sowohl innerhalb des Prozessablaufes als auch bei Teil- oder Ganznachlackierungen nach der Endabnahme können die Kostenbudgets der Lackierereien und damit die Wettbewerbsfähigkeit des gesamten Fahrzeugwerkes deutlich negativ beeinflussen.

In diesem Sinne gilt es die Prozesssicherheit in Richtung 100 % zu treiben!

Eine der Hauptursachen für Oberflächenstörungen in den einzelnen Lackschichten ist die Kontamination und Einbettung von Fremdpartikeln verschiedenster Art, die nach der Vernetzung beziehungsweise Trocknung eines Lackfilmes als Oberflächendefekt wahrgenommen werden.

Der Fehleranteil der Partikeldefekte beträgt im Durchschnitt betrachtet etwa 50 % aller auftretenden Defekte.

Bisherige Aktivitäten zur Schmutzreduzierung in Karosserie-Lackierereien richteten sich schwerpunktmäßig auf die Fertigungsabschnitte nach der Grundierung. In diesen Bereichen bewegen sich die Karossen im Medium Luft. Hier konnten durch Verbesserung der Luftkonditionierung in den Spritzkabinen, in den Trocknern und durch die Einführung von Reinräumen mit entsprechender Zoneneinteilung gute Fortschritte erreicht werden.

Organisatorische Maßnahmen, vor allem durch entsprechende Mitarbeiterschulung zum Thema des Verhaltens in Reinräumen und des Tragens entsprechender faserfreien Kleidung, führten zu weiteren positiven Effekten.

Mit der vorliegenden Arbeit wird der erste große Prozessabschnitt, die Karosserie-Vorbehandlung und KTL-Grundierung, einer detaillierten und tiefer gehenden Analyse bezüglich des Partikeleinflusses unterzogen.

Die zugrunde liegende Erkenntnis und das Ziel nach erfolgter Optimierung ist eine fehlerfreie Karosserieoberfläche nach der KTL-Grundierung als Basis für den Entfall von aufwendigen und fehlerträchtigen Schleifoperationen vor den nachfolgenden Lackbeschichtungen.

Im so genannten Nassbereich der Vorbehandlung und Grundierung ist die Karosserie von flüssigen Fluiden umgeben, die in der Art von Prozessmedien als Entfettungslösung, als Phosphatierlösung, als kataphoretischer Lack oder als Spülmedium vorliegt.

Hierin liegt ein grundsätzlicher Unterschied zu den luftkontaktierten Bereichen.

Auch die andersartigen Partikel und deren Verhalten im flüssigen, strömenden Fluid sowohl als schwebendes oder auch haftendes Partikel auf der Karosserieoberfläche erfordert eine strömungsmechanische differenzierte Betrachtung und Beurteilung. Die gewonnenen Erkenntnisse der Vorgänge im Oberflächen-Grenzbereich können als innovatives Optimierungsprojekt mit positiven wirtschaftlichen Effekten angesehen werden.

## 2 Technischer Stand der Automobil-Lackierung

Auf den ersten Blick stellt sich die Automobil-Lackierung im Bereich der optischen Sinneswahrnehmung mit den Ausprägungen der Ästhetik, des Stils und der Farbgebung dar.

Doch die Lackierung leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur Mobilität des Automobils. Die Automobil-Lackierung stellt auch im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern wie Zügen, Flugzeugen oder Schiffen die höchsten Ansprüche an die optische und funktionelle Qualität.

Zum technischen Stand hierzu einen kurzen Überblick über die verbreiteten Automobilfertigungsprozesse und die darin eingesetzten Beschichtungskonzepte.

Der dreiteilige Fertigungsprozess im Automobilbau beginnt im Allgemeinen im Karosseriebau, wo die Karosserie überwiegend aus Stahlblechen unterschiedlicher Beschaffenheiten und Blechdicken zusammengefügt wird. Die traditionelle Fügetechnik ist hier weltweit das Schweißen. Moderne Karosseriekonstruktionen setzen aus Gewichtsgründen Werkstoffe mit geringerem spezifischem Gewicht, wie zum Beispiel Aluminium, ein.

Nach der Fertigstellung im Rohbau läuft die Karosserie in den Lackierprozess, der mit der Reinigung, Entfettung und der anschließend folgenden Metallocerflächenkonvertierung, der so genannten „Phosphatierung“, beginnt. Der klassische Aufbau danach besteht aus dem elektrophoretisch aufgetragenen Korrosionsschutz als Elektrotauchlack, dann dem Füller und der abschließenden Decklackschicht. Nach dem Abschluss der Lackierung erfolgt in der Regel die Hohlraumkonservierung, die den Langzeit-Korrosionsschutz in allen Hohlräumen garantiert.

Danach erfolgt die Übergabe der lackierten Karosserie an die Fertigmontage, hier werden das Interieur, die Aggregate, die Fahrwerkskomponenten und die Verglasung eingebaut.

Es sei erwähnt, dass im Durchschnitt ungefähr zwölf Kilogramm Beschichtungsmaterialien im Verlauf des Lackierprozesses aufgetragen werden, die die Optik und die Schutzfunktion über das gesamte Fahrzeugeleben erfüllen müssen.

Die heute gängigen Karosserie- Lackierverfahren wurden durch jahrelange Verbesserungen entwickelt, wobei im Detail je nach Schwerpunktsetzung der einzelnen Automobilunternehmen Unterschiede festzustellen sind.

Beim Korrosionsschutz hat sich die elektrophoretische kationische Applikation im Volltauchprozess flächendeckend durchgesetzt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Oberfläche bestmöglich geschützt ist und die Materialeffizienz beispielhaft erhöht wurde. Für alle anderen funktionellen Schichten, wie Füller, Basis- und Klarlacke, wurde die Sprühapplikation durch pneumatische Zerstäubung oder Hochrotationszerstäubung mit elektrostatischer Unterstützung im Auftragswirkungsgrad verbessert. Hochentwickelte Bewegungsautomaten und Roboter erreichen optimale Wirkungsgrade durch äquidistantes Nachfahren der komplexen Karosseriegeometrie.

Während der vergangenen fünfzehn Jahre beherrschte das Thema der Umweltverträglichkeit des Beschichtungsprozesses maßgeblich das Szenario der Fahrzeuglackierung. Die stark zunehmende Umweltgesetzgebung in diesem

Zeitraum definierte immer weiter reduzierte Umweltdaten, die von den einzelnen Lackierereien mit entsprechenden Zeitvorgaben umzusetzen waren.

Beim schon erwähnten Korrosionsschutz, der KTL, standen Lösemittel- und Abwasserreduzierung sowie Bleifreiheit im Fokus. Bei den Füllertechnologien konkurrieren wasserverdünnbare Dünnschichtsysteme mit der Pulverbeschichtung.

Die farbige Vielfalt der Decklackierungen hat durch wasserverdünnbare Systeme und High-Solid-Systeme keine Einschränkungen erfahren. Bei den Klarlacken wurde vor ca. zehn Jahren nach kontinuierlicher Festkörperanhebung oder auch zum Teil mit wasserverdünnbaren Lösungen oder auch durch fahrzeugspezifische Weiterentwicklung der Pulver- und Slurrytechnologie der Weg in Richtung Nullemissionssysteme für den Großserieneinsatz geöffnet.

Wichtig für ein erfolgreiches und dauerhaftes Beschichtungsergebnis war die von Schicht zu Schicht fallende Reaktionstemperatur. Das führt im gesamten Filmaufbau zu spannungsarmen Polymerfilmen. Die höchsten Temperaturen, die für den klassischen KTL- Korrosionsschutz notwendig sind, werden gleichzeitig für das Bake- Hardening von Metallsubstraten genutzt.

Die Reaktionstemperaturen für die Füllertrocknung werden weitgehend verwendet um Nahtabdichtungsoperationen und Unterbodenschutzapplikationen abschließend zu vernetzen beziehungsweise auszuhärten. Zusätzlich werden meist noch kleinere Anbauteile, wie zum Beispiel Tankdeckel oder Leisten, an dieser Stelle angehängt, um- wie bei den genannten Dichtungs- und Dämmmaßnahmen- die anschließende einheitliche farbliche Dekoration zu nutzen. Damit wird der Umfang von erforderlichen Zusatzmaßnahmen auf ein Minimum reduziert.

Ganz besonders im Automobilbereich gehören starke Marken und ein exzellentes Styling zu den Schlüsselfaktoren des Markterfolges. Die Decklackgüte, attraktive Farben sowie eine möglichst glatte und strukturfreie Oberfläche werden weiterhin ein entscheidendes Element der Markendifferenzierung bleiben. Mit diesen Ansprüchen an die optische Qualität steigt zudem die Anforderung an die Beständigkeit gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen.

Im Allgemeinen beruhen die konventionellen Beschichtungstechnologien auf thermisch beschleunigte chemische Vernetzungsreaktionen von Lacken. Hauptsächlich dadurch, jedoch auch durch weitere Prozessstörungen, wie Nacharbeiten und Doppellackierungen überschreitet der heutige Lackierprozess immer noch mehr oder weniger deutlich die 4-Stunden-Grenze. Es besteht großes Interesse diese Zeitspanne im Sinne einer schlanken und terminintreuen Fertigung zu reduzieren und damit letztlich auch die Produktionskosten zu senken.

Zu interessanten und kostensenkenden Verbesserungsmöglichkeiten gelangt man, wenn es gelingt, Funktionalitäten zu integrieren und letztlich auf eine der klassischen vier Schichten zu verzichten. Um diese so genannten „Integrierten Prozesse“ weiter voranzutreiben, forschen und entwickeln alle namhaften Lack- und Automobilhersteller intensiv an Material- und Prozesskonzepten, die bei weiter verbesserter Ökologie unter den bestehenden Applikationsbedingungen arbeiten können [1].

Nach der Beschreibung des technischen Standes der Automobil-lackierung mit einem Blick auf mögliche Zukunftsentwicklungen wende ich mich nunmehr den Realitäten im eigentlichen Fabrikprozess hin und leite den Focus auf mehr oder weniger vorhandene Prozessdefizite. Generell sind Prozessdefizite ursächlich in den Bereichen der Anlagentechnik, den Lackmaterial aber auch im Bereich der manuellen Arbeitsoperationen und im Lackmanagement zu finden. Es entstehen durch Prozessdefizite Fertigungsverzögerungen mit Auswirkungen auf die Liefertreue

sowie Mehrkosten in unterschiedlicher Höhe, je nach Schwere der Prozessstörung. Hinzu kommt, dass die Prozessstörungen und Defizite häufig ungeplant und plötzlich auftreten, da besonders bei der Verarbeitung der Halbfertigprodukte als flüssiges Lackmaterial Effekte im Mikrobereich oder an Grenzflächen auftreten, die in der Regel nur schwer vorher bestimmbar sind. Aufgrund der thermischen Vernetzung in den Trocknern sind diese Störungen dann fixiert und somit nur schwer reparabel. Eine Korrektur bedingt ein aufwändiges mechanisches Abtragen im Schleifverfahren und eine Wiederholung des gesamten Prozessschrittes, mit den negativen Folgen von Zeitverzögerungen und von Zusatzkosten. Hinzu kommt, dass besonders bei Nachlackierungen im Decklack mit höchster Sorgfalt gearbeitet werden muss, denn der spätere Kunde möchte grundsätzlich kein nachlackiertes Fahrzeug erhalten. Kleinste Hinweise auf Nachlackierungen führen in der Regel zur Verunsicherung des Kunden und es kommt erfahrungsgemäß entweder zu Schadenersatzforderungen bis hin zu gerichtlichen Verfahren.

Deswegen gilt die Maxime alle technischen und organisatorischen Maßnahmen zu treffen um einen 100%-igen Geradeauslauf der Karossen zu gewährleisten.

Meine Empfehlung lautet in diesem Sinne eine intensive und wiederholende Analyse auf allen Prozessfeldern nicht nur zuzulassen, sondern permanent und aktiv zu betreiben. Die Erkenntnisse sind schnellsten umzusetzen und es sind alle modernen Qualitätssicherungsmethoden und Zielvereinbarungssysteme einzusetzen und permanent zu nutzen. Dem Lackmanagement fällt hierbei als Promoter eine außerordentlich wichtige Rolle zu.

### 3 Problem- und Aufgabenstellung

Der Untersuchungsbereich dieser wissenschaftlichen Arbeit bezieht sich auf die großtechnische und serielle Vorbehandlung und Grundierung von Automobil-Karosserien.

Der Vorbehandlungs- und Grundierbereich erfüllt neben der Sicherstellung des Langzeit-Korrosionsschutzes die Aufgabe einer funktionsgerechten Grundlage für die nachfolgenden Lackierschichten.

Vom Karosseriebau werden die Karosserien der Lackiererei angeliefert und durchlaufen dann die Prozessstufen Reinigen, Phosphatisieren, Spülen und KTL-Grundieren.

Die für die Automobilindustrie verwendeten Stahlbleche verschiedener Vorveredlungs-Stufen wie reiner Stahl, elektrolytisch verzinkt, feuerverzinkt, vorphosphatiert oder auch organisch vorbeschichtet sowie auch Aluminiumbleche werden diversen Zieh- und Umformvorgängen unterworfen.

Die Blechoberfläche vor der Übernahme in die Lackiererei ist mit den verschiedensten Stoffen, wie Korrosionsschutzölen, Ziehfetten, Schweißrückständen und sonstigen Verschmutzungen kontaminiert.

Die Oberflächengüte der Karosserien nach dem Verlassen der Vorbehandlungs- und Grundierungsanlagen bildet bei einem Benchmark verschiedener Automobil-Lackierereien je nach Prozessfolge und eingesetzter Anlagen- und Filtertechnik ein mehr oder weniger unterschiedliches Bild. Überwiegend sind jedoch noch nachgelagerte Korrekturen, beziehungsweise manuelle Schleif- und entsprechende Reinigungsoperationen erforderlich.

Diese Nachbehandlung führt neben den anfallenden Kosten und anlagentechnischen Aufwendungen zu Qualitätsrisiken im weiteren Lackierablauf, zum Beispiel durch Schleiffehler oder vagabundierendem Schleifstaub. Darüber hinaus sind Verletzungen oder Durchschlässe der KTL-Schicht korrosionsrelevant und bedürfen einer zusätzlichen Nachbehandlung. Generell sind diese Nachbesserungen außerhalb des Kernprozesses nicht werterhöhend und müssen deshalb eliminiert werden.

Daraus ableitend ist grundsätzlich zu bemerken, dass das Ziel besteht, sämtliche Schleifoperationen im Karosserie-Lackierablauf auf „0“ zu bringen, dass heißt komplett entfallen zu lassen. Die frühere lacktechnische Begründung der Haftungsverbesserung durch den Flächenschliff entfällt bei den heute zum Einsatz kommenden Lackierprozessaufbauten durch eine optimale Abstimmung der einzelnen Lackmaterialien.

Bei dem hier untersuchten Lackierprozess und der vorhandenen Anlagentechnologie liegt der Fehleranteil durch Partikeldefekte nach der KTL-Grundierung bei etwa 15 bis 20 Fehlerstellen pro Karosserie, die eine Nachbearbeitung zur Folge haben. (Außenfläche: 25m<sup>2</sup>)

Bisherige Maßnahmen zum Beispiel mit einer verbesserten Vorreinigung der Karosserien oder mit der Optimierung der Filtertechnologie führten jeweils zu graduellen Verbesserungen.

Über die bisherigen praxisorientierten Optimierungen hinaus, wird mit der vorliegenden Arbeit das Verhalten anhaftender Partikel auf einer Blechoberfläche im flüssigen Fluid bei unterschiedlichen strömungsmechanischen Parametern untersucht und bewertet.

Hieraus ergeben sich Konsequenzen für die Auslegung beziehungsweise Optimierung der eingesetzten Anlagen und Anlagenkomponenten.

Die Zielsetzung besteht in einer wissenschaftlich abgesicherten Definition der strömungsmechanischen erforderlichen Kennwerte, die in der Folge anlagentechnisch umgesetzt werden.

## 4 Automobil-Serienlackierung

Die Weltjahresproduktion an Kraftfahrzeugen inklusive Lastkraftwagen erreichte 57 Millionen Einheiten im Jahre 2000. Deutsche Hersteller erreichten auf Basis der weltweiten Produktion deutscher Automobilhersteller einen Marktanteil von 21%. In Deutschland wurden 5,5 Mio. Einheiten produziert. Die dafür notwendige Lack-Menge betrug ca. 140.000 t. Der weltweite Lackmarkt für die Automobil-Lackierung beläuft sich auf ca. 1 Mio.t [2].

Neben den primären Fahrzeugeigenschaften, wie zum Beispiel Leistungsmerkmale, Wirtschaftlichkeit, Raumangebot u.a. bildet die Automobil-Lackierung gemeinsam mit dem Fahrzeugdesign einen starken und besonders kundenorientierten Faktor. Die Formgebung des Automobils sowie die Auswahl der Farbpalette sind als integrale Bestandteile des Fahrzeugdesigns zu verstehen.

In der PKW-Fahrzeuglackierung werden gewöhnlich 15 bis 25 Serienfarbtöne angeboten, im Nutzfahrzeugbereich kann sich durch spezielle Firmenfarben die Sonder-Farbtonpalette, wie im VWN-Werk Hannover, auf bis zu 250 Farbtönen ausweiten.

Die treibende Kraft bei der ständigen Weiterentwicklung der Lackierprozesse sind die Automobilhersteller. Dabei ist die enge partnerschaftliche Zusammenarbeit mit der Lackindustrie und der Lackieranlagenindustrie eine wesentliche Voraussetzung. Bei der Entwicklung von neuen Lackierprozessen und Lackieranlagenplanungen sind neben den Qualitätskriterien besonders die Belange des Umweltschutzes zu berücksichtigen.

Die gestiegenen Anforderungen auf den Gebieten der Qualität, des Umweltschutzes und des Brand- und Arbeitsschutzes führen zu Anforderungsprofilen, die in erster Linie Entwicklungsfortschritte in der Lackindustrie auslösen. Diese werden im Labormaßstab getestet und mit den jeweiligen Beteiligten oder auftraggebenden Automobilunternehmen abgestimmt. Die in der Regel damit veränderten Lackier- und Applikationsparameter führen jeweils zwangsläufig zu Korrekturen oder neuen technischen Konzepten seitens der Lackieranlagenbauer.

Wegen der erforderlichen Prozessabsicherung und Abschätzung der Produktionsreife müssen die veränderten Lackmaterialien und Applikationsverfahren in eigens dafür geschaffenen Technikumsanlagen bei den Lack- und Anlagenlieferanten mit Originalteilen beziehungsweise Karosserien getestet werden. Im Zuge dieser Testreihen sind weitere Anpassungen der Lackmaterialien und der Applikationsanlagen erforderlich. Erst nach abgesicherten Ergebnissen erfolgt dann eine größer angelegte Versuchsreihe in den Produktionsanlagen.

Bei der generellen Umstellung auf eine neue Lackmaterialgeneration, die in der Regel mit deutlichen Veränderungen der Applikationsbedingungen und größeren Anlagenumbauten und Investitionen verbunden ist, werden vor der endgültigen Entscheidung und Prozessfreigabe, separate Pilotlackieranlagen seitens der namhaften Automobilhersteller errichtet und in den Produktionsfluss im Bypass integriert. Im Zuge dieser Pilotphase erfolgen dann weitere Optimierungen und Produktionsanpassungen.

Derartige Pilotanlagen wurden im VW-Konzern zum Beispiel vor der Umstellung von der konventionellen Tauchtechnik auf das KTL-Tauchverfahren (1965-1970) oder dann in der späteren Phase vor der Umstellung von Lösemittel-Lacken auf die

Wasserlacktechnologie errichtet (1985-1990) und über längere Zeiträume betrieben. Im Rahmen der Wasserlack-Pilotphase wurden mehrere Prozessalternativen getestet und ganzheitlich bewertet. Aus insgesamt etwa 10 Alternativprozessen wurde der optimalste Prozess im Hinblick auf „Qualität-Umwelt-Kosten“ herausgearbeitet und als „VW-Lackierprozess“ entschieden und eingeführt.

#### 4.1 Ziele und Funktionen des Automobil-Lackierprozesses

An einen modernen Automobil-Lackierprozess werden vielfältige Anforderungen gestellt, die sich im Wesentlichen aus den Ansprüchen der Kunden, aus den Erfordernissen des Produktes und dem technischen Stand der Fertigungstechnologie zusammensetzen.

Zwei der wichtigsten Ziele und Funktionen, die die Fahrzeuglackierung zu erfüllen hat, sind der dauerhafte Schutz im Hinblick auf den langjährigen Erhalt der Oberflächengüte und des Korrosionsschutzes sowie die dekorative, optische Erscheinung der Lackierung.

Der Oberflächenschutz dient der Werterhaltung des Automobils und ist damit aus ökonomischer Sicht die wichtigste Aufgabe der Lackierung. Besonders hervorzuheben ist der Schutz der überwiegend metallischen Werkstoffe des Automobils, die durch den Lackeraufbau einen dauerhaften Korrosionsschutz erhalten. Weitere Belastungen der Automobil-Lackierung ergeben sich aus äußeren, zum Teil aggressiven natürlichen und anthropogenen Atmosphärelen, wie Baumharzen, Vogelkot, Säuren, Laugen, Salzen und organischen Lösemitteln. Gegen alle genannten Stoffe und weitere muss die aufgebrachte Lackierung resistent sein.

Die Schutzfunktion darf selbst unter extremen mechanischen Belastungen, wie Steinschlag durch aufgewirbelten Straßenschmutz oder durch Bürstenstriche der Waschanlagen, nicht beeinträchtigt werden.

Außerdem müssen Automobil-Lackierungen kombiniert, das heißt, physikalischen und chemischen Einflüssen standhalten, wie sie beispielsweise bei der Belastung im Wetter vorliegen.

Durch das Wechselspiel von Sonneneinstrahlung, Regen, Hitze und Frost in Verbindung mit Emissionen aus Feuerungsanlagen und Verbrennungsmotoren, sowie durch Ozon und Salznebel, werden hohe Ansprüche an die Widerstand und Schutzfunktion einer Automobil-Lackierung gestellt.

Neben der Schutzfunktion sind die optisch-visuellen Qualitätsmerkmale der Automobil-Lackierung von der Übergabe des Fahrzeugs an den Kunden sowie über die gesamte Gebrauchszeit von hohem Stellenwert.

Der Farbton, die Farbeffekte und der Lackglanz der Oberfläche sind Sinneseindrücke und damit subjektive Wahrnehmungen des durch die Wechselwirkung mit Lackierungen veränderten Lichtes.

Farbdesigner untersuchen die subjektive Wahrnehmung von Farbe, Glanz und Effekten in Verbindung mit der Form des Automobils und tragen so dazu bei, ästhetische und funktionelle Eigenschaften miteinander zu verknüpfen. Es gelingt immer wieder, neue optische Effekte in Schönheit und Eleganz, zum Beispiel mit bestimmten Metallic-Effekten, zu transformieren, um dadurch Anreize zu bieten und Kaufwünsche zu wecken.

#### 4.1.1 Glanz und Farbeindruck

Der visuelle Gesamteindruck, den der Betrachter empfindet, wird im Wesentlichen durch zwei unterschiedliche Phänomene hervorgerufen.

In der Abbildung 4.1.1-1 sind die Unterschiede zwischen den optischen Effekten von Glanz und Farbe dargestellt.

Ein Teil des auf die Lackierung auftretenden natürlichen Lichtes wird an der Oberfläche reflektiert und gelangt ohne weitere Wechselwirkung mit den Bestandteilen der Lackierung - unabhängig von ihrer Farbe – in das Auge des Betrachters.

Handelt es sich um eine gerichtete Reflektion auf einer glatten Oberfläche wird diese als glänzend empfunden. Der weitaus größere Anteil des Lichtes dringt in die Lackierung ein, um dort nach Wechselwirkung mit den Pigmenten und Effektstoffen Farbigkeit, Deckvermögen und zusätzliche Effekte hervorzurufen.

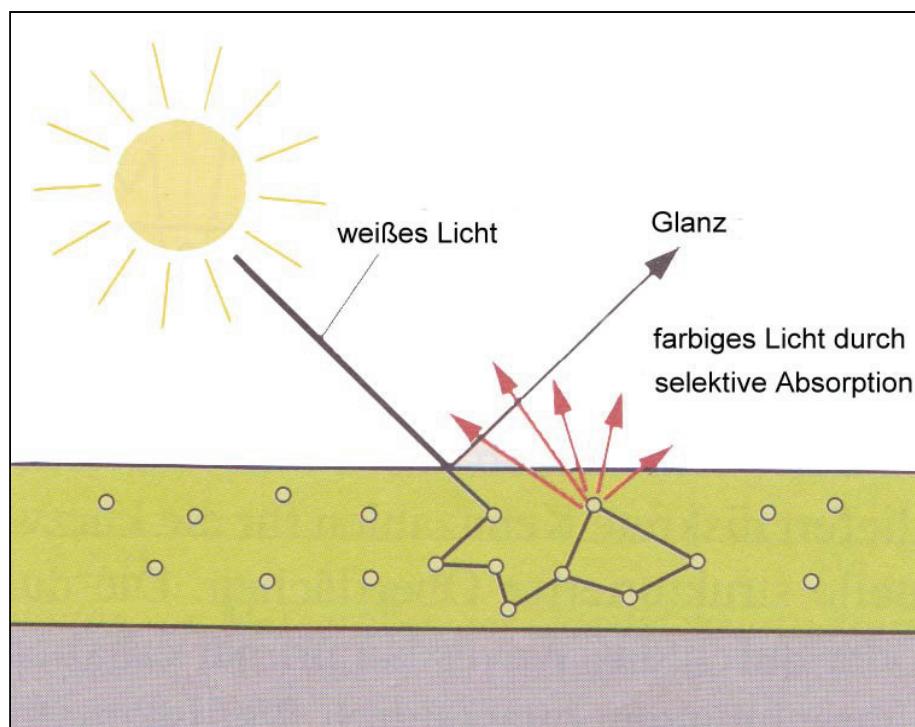


Abb. 4.1.1-1 Schematische Darstellung zwischen Glanz und Farbe [2.1]

Im Gegensatz zum Glanz der ein durch die Reflektion des Lichtes an der Oberfläche hervorgerufener Sinneseindruck ist, resultiert der Farbeindruck als physiologische Wirkung aus der Wechselwirkung des Lichtes innerhalb der Lackierung mit deren Bestandteilen. Farbigkeit entsteht dann, wenn dem sichtbaren Spektrum des angebotenen Lichtes von 380 – 720 nm bestimmte Wellenlängenanteile entnommen werden.

Je nach Fähigkeit der Farbpigmente, durch selektive Absorption oder Interferenz aus dem weißen Licht einzelne Wellenlängenanteile zu entfernen, entstehen Reflexions-Spektren, die beim Betrachter zu unterschiedlichen Farbeindrücken bezüglich Farbton, Buntheit und Helligkeit führen. Das menschliche Auge ist von einer derartigen Empfindlichkeit, dass es mehrere Millionen Einzelfarben unterscheiden kann.

Farbtonwirkung und Glanzgrad werden vom menschlichen Auge nicht getrennt sondern zeitgleich und integrierend wahrgenommen. Bei der Betrachtung des

Begriffes Glanz werden kleinste Gestaltungsabweichungen von der absolut störungsfreien planen Oberfläche wahrgenommen und erzeugen bewusste oder auch unbewusste negative Assoziationen. So führen lang- und kurzwellige Oberflächenstörungen zu lokal geringen Änderungen des Einfallswinkels und dementsprechend auch zu Abweichungen des Ausfallwinkels. Bewegt sich diese Oberflächenstruktur noch im vorgegebenen Toleranzfenster entsteht zwar insgesamt ein geringerer Glanz, jedoch ist dann noch eine gewisse Gleichmäßigkeit gewahrt.

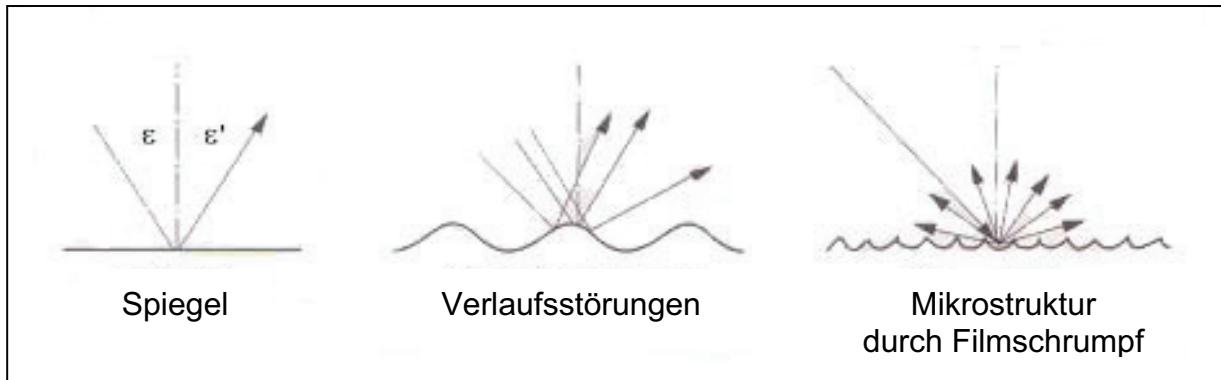


Abb. 4.1.1-2 Lichtreflexion an unterschiedlich strukturierten Oberflächen [2.2]

Dagegen sind punktuelle Oberflächenstörungen durch totale Störung der Reflexion deutlich erkennbar und aus Sicht des Betrachters (Kunde) immer störend. So würde ein in den Lack eingebettetes Schmutzpartikel mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Kundenbeanstandung führen und den Eindruck einer negativen Qualität vermitteln. Das heißt, dass derartige punktuelle Störungen generell bereits im Lackierprozessablauf vermieden werden müssen.

#### 4.1.2 Qualität des Lackierprozesses

Die permanente Weiterentwicklung der Lackierprozesse, mit den Hauptparametern der Schutzfunktion und der visuellen-dekorativen Erscheinung der Lackierung, führte in der Automobilindustrie zu sehr hohen Qualitätsstandards.

So konnte der VW-Konzern daraus abgeleitet eine 12-jährige Korrosionsschutz-Garantie auf Durchrostungen und eine 3-jährige allgemeine Lackgarantie aussprechen.

Vergleichbar mit den Begriffen „Pflicht und Kür“, wird die Schutzfunktion der Lackierung durch den vorgegebenen Prozess erfüllt und gegenüber dem Kunden sichergestellt, dagegen aber werden die optischen Merkmale der Lackierung im Wettbewerbsumfeld ständig optimiert.

Eine besonders hohe Qualitätsausprägung erhält in diesem Kontext die visuelle Erscheinung auf den Wahrnehmungsfeldern der Farbgebung, der Farbeffekte und des Lackglanzes.

Bei der Auslieferung und Übernahme des Neufahrzeugs besteht das logische Ziel, dem Kunden eine fehlerfreie Lackoberfläche zu übergeben.

Jegliche Abweichungen der Oberflächengüte durch punktuelle oder flächige Störungen, selbst bei kleinster Ausprägung, werden nicht toleriert.

Die Wahrnehmung eines beispielsweise kleinen Lackeinschlusses durch einen Fremdpartikel stört den Kunden, verunsichert ihn und führt in der Folge häufig zu einer insgesamt kritischen Einstellung zur Gesamtqualität des Fahrzeugs.

Auch Nachreparaturen solcher Mängel führen häufig zu Kundenbeanstandungen und Verärgerungen.

Die Qualitätssicherungssysteme der Automobilindustrie müssen sich logischerweise an den Qualitätserwartung der Kunden orientieren. Speziell im optischen Bereich der Fahrzeulglockierung sind dementsprechende Maßnahmen im Verlauf des Lackierprozesses oder nach der Fertigstellung der Lackierung durchzuführen.

Mit Bezug auf die vorliegende Arbeit ergibt sich der Ansatz, zwecks Vermeidung von kostenaufwendigen Nacharbeiten nach Prozessabschnitten oder am Ende der Lackierung, die Prozesssicherheit in den Lackierapplikationsbereichen deutlich anzuheben.

Die einzelnen Lackierprozessabschnitte sind so zu konzipieren, beziehungsweise zu optimieren, so dass die jeweiligen Lackierschichtergebnisse und die Endlackierung fehlerfrei erzeugt werden können und damit keine weitere Nacharbeit erforderlich wird.

## 4.2 Lackaufbau und Prozessfolge

Der Automobil-Lackierprozess ist eine komplexe Verknüpfung chemischer, physikalischer, verfahrenstechnischer, ökologischer und ökonomischer Einflussgrößen.

Bedingt durch gestiegene Kundenerwartungen, durch den technischen Fortschritt und beschleunigt durch größtenteils umweltorientierte gesetzgeberische Auflagen, befanden und befindet sich die Lackierprozesstechnik im permanenten Wandel.

Daraus erwächst die ständige Aufgabe, wohlbekanntes Wissen mit neuem Wissen zu verknüpfen.

Eine Besonderheit des Lackierprozesses ist es, dass die chemischen Veränderungen vom Rohstoff bis zur Endlackierung beim Rohstoff- beziehungsweise Lackhersteller beginnen, dann bewusst unterbrochen werden, um während der Verarbeitung durch die Automobilhersteller wieder aufgenommen und abgeschlossen zu werden.

Das Eigenschaftsbild einer Automobil-Lackierung wird durch den Lack und damit durch den Lackhersteller präformiert, aber durch die Automobil-Lackiererei erst erzeugt und vollendet. Die Automobil-Lackierung ist damit ein gemeinschaftliches Ergebnis der jeweiligen Lackhersteller und der Automobilindustrie.

Der Lackhersteller soll, wenn er seine Aufgabe richtig versteht, nicht nur Lack entwickeln, herstellen und verkaufen. Er hat die zusätzliche Aufgabe, durch permanente technische Präsenz in dem Automobilunternehmen, gemeinsam mit dem Fachpersonal der Lackiererei die Voraussetzungen für ein erfolgreiches Lackierergebnis zu schaffen. Dieses umfasst weitgehend das Lackmaterial und alle Einflüsse aus dem Lackierverfahren (siehe Abbildung 4.2-1).

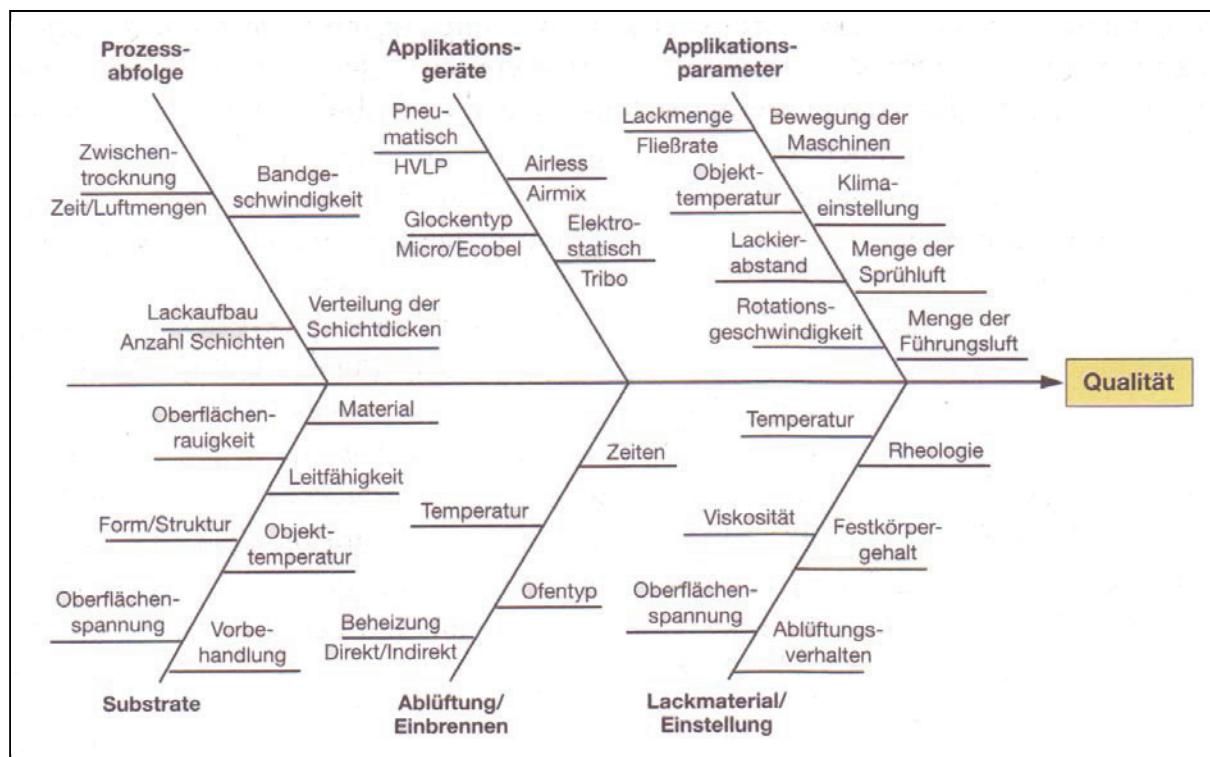


Abb. 4.2-1 Technische Einflüsse auf das Lackierergebnis [2.3]

Der folgende Rückblick auf die Anfänge der Automobil-lackierprozesse hat das Ziel, durch Aufzählen einiger Schlüsselereignisse den Weg in die Gegenwart aufzuzeigen und die Fortschritte transparent zu machen.

Mit der Einführung des Fließbandes durch Henry Ford in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts war der Startpunkt für die industrielle Lackiertechnik im Rahmen einer Großserie gesetzt.

Das Fließband hat nach der Phase der Einzelfertigung von Automobilen enorme Vorteile im Hinblick auf eine schnelle und damit wirtschaftliche Fertigungstechnik gebracht. Die dazu notwendigen rascheren Lackierabläufe waren aber nur mit schnelltrocknenden Lacken und einer neuen Applikationstechnik voll zu nutzen.

Die Konsequenz daraus war die Substitution der über mehrere Wochen aushärtende Öllacke durch die schnelltrocknenden Nitrolacke mit einem Lösemittelanteil bis zu 80 %. Gleichzeitig musste die bis dahin abfallfreie Pinseltechnik durch das Spritzverfahren ersetzt werden.

Die Einführung der bereits im 19. Jahrhundert von „de Vilbiss“ erfundenen Spritz-Pistole führte aber gleichzeitig wegen des äußerst schlechten Materialauftragswirkungsgrades von weniger als 50 % zu einem neuen Problem: der Entstehung von Farbabfällen und gleichzeitig wegen der erheblich höheren Lösemittelanteile der Nitrolacke zu einer dramatischen Zunahme der organischen Emissionen.

Im Ergebnis bedeutete die serielle Lackierung von Fahrzeugen zwar einen technischen Fortschritt in Form einer gesteigerten Qualität der Beschichtung durch verbesserte Applikation und einer ökonomischen Fertigungstechnik, jedoch zu Lasten der Umwelt durch die deutliche Zunahme von Abfällen und Emissionen.

Bis zum endgültigen Bewusstwerden dieser Situation und einer entsprechenden konzentrierten Aktivität bedurfte es der Unterstützung durch die Politik durch das Verabschieden von Umweltgesetzen. Die in der Folgezeit erbrachten Innovationen waren nicht mehr nur Ergebnisse von Einzelideen, sondern zunehmend durch Kooperation aller am Lackierergebnis Beteiligten erreicht worden [2].

Erste Zielrichtung in den Jahren nach 1950 war die Rationalisierung der Prozesse und die Optimierung der Qualität auf der Basis der lösemittelhaltigen so genannten konventionellen Lackiertechnik [3].

Später entwickelte sich beginnend in den 60er-Jahren, eine neue Forschungsrichtung mit dem gemeinsamen Ziel, der Entwicklung lösemittel- und abfallarmer Lackiertechniken.

Resultate dieser Arbeit in den letzten 50 Jahren sind nennenswerte Innovationen, wie die Einführung der Elektro-Tauchlackierung, die Entwicklung der Wasserlack-Technologie als Füller- und Lackbeschichtung, der Walz- und Gießauftrag, z.B. für die Coil-Coating-Lackierung und die Applikation von festen Pulverlacken.

Der Volkswagen-Konzern hat gemeinsam mit der Lack- und Anlagenindustrie sehr maßgeblich die Initiierung, Erprobung und Einführung dieser Innovationen ausgelöst. So wurde in den 70-er Jahren die erste Versuchsanlage für die anaphoretische Elektro-Tauchlackierung von Automobilkarossen erstellt und das Verfahren serienreif entwickelt und optimiert. Mit der Einführung waren wesentliche Verbesserungen in den Bereichen Qualität, Produktivität und Umweltschutz verbunden.

In den 90-er Jahren wurde in einer eigens dafür errichteten Pilotanlage zur Karosseriebehandlung die Wasserlacktechnologie für die Füller- und Lackbeschichtung erprobt und mit den dazugehörigen angepassten Applikationsanlagen zur Serienreife entwickelt.

Die gefundenen abgesicherten Ergebnisse und Erkenntnisse sind dann in den heutigen VW- Lackierprozess eingeflossen und bildeten die Grundlage für die Konzernprozessentscheidung und die kostenintensive Umsetzung in den VW-Lackiereien.

#### 4.2.1 Lackaufbau

Zur Erfüllung aller Anforderungen an eine Automobil-Lackierung werden aufeinander abgestimmte Lacke eingesetzt, die in mehreren Schichten aufgetragen werden und verschiedene Aufgaben aus dem Anforderungsprofil der Gesamtlackierung abdecken. Im Bereich der PKW-Lackierung besteht der Gesamtlackaufbau nach dem heutigen technischen Stand aus 4 Lackschichten (siehe Abb. 4.2.1-1).

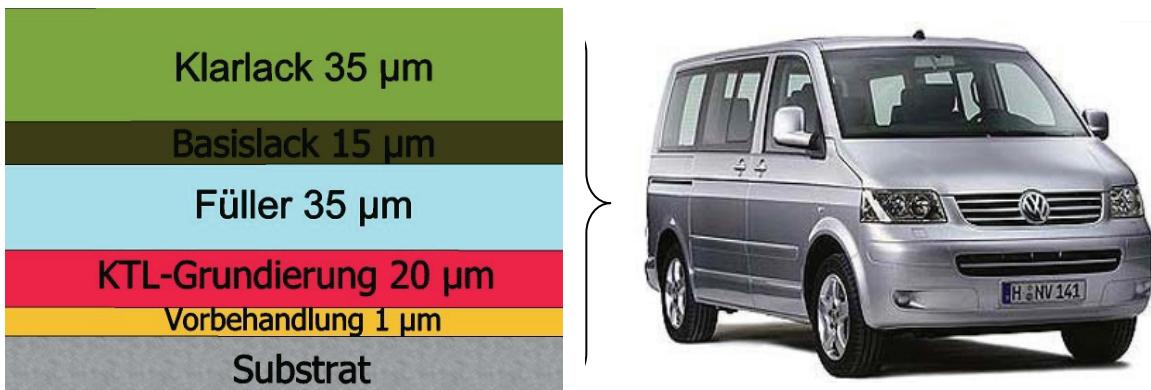


Abb. 4.2.1-1 Schematischer Aufbau einer Automobil-Lackierung

Entsprechend des Materialflusses in einer Automobilfabrik beginnt der Lackierprozess an der Schnittstelle zwischen Karosseriebau und Lackiererei mit der Übernahme der Rohkarosserie.

Die an den heutigen Karosserien verwendeten Blechsubstrate, wie Stahl, verzinkter Stahl und teilweise Aluminium, werden zunächst gereinigt und in der Vorbehandlung mit einer anorganischen Konversionsschicht aus Metall-Phosphaten von etwa 1-2 µm Schichtdicke versehen. Diese Konversionsschicht erhöht den Korrosionsschutz und verbessert durch Vergrößerung der Oberfläche erheblich die Haftung der organischen Beschichtung.

Es folgt der Grundierungsauftrag üblicherweise durch kathodisches Elektrotauchlackieren für den passiven Korrosionsschutz. Die durchschnittlichen Schichtdicken erreichen 20µm auf der Außenfläche und etwa 10-15 µm auf den Innenflächen und in den Hohlräumen.

Der folgende Wasserfüller soll Unebenheiten des Untergrundes abdecken und dadurch derartig glatte Oberflächen erzeugen, dass diese ohne weitere Schleifoperationen die Grundlage für eine brillante Decklackierung bilden können. Weiter übernimmt die Füllerschicht die Funktion des Steinschlagschutzes und sorgt für ausreichenden UV-Schutz der KTL- Grundierung.

Für den seltenen Fall des Durchschliffes der KTL- Grundierung sorgt der Füller für den Erhalt des Korrosionsschutzes.

Die Decklackschicht wird vorwiegend in zwei Schritten mit einem farbgebenden Basislack und einem Klarlack aufgebracht. Der Basislack als umweltfreundlicher Wasserlack wird im ersten Schritt der Decklackapplikation mit einer Schichtdicke von durchschnittlich 15 µm aufgetragen. Danach erfolgt eine Zwischentrocknung des Basislackes zum Verdampfen des eingelagerten Wassers.

Als abschließende homogene Schicht wird ein hochwertiger Klarlack, in 2-Komponenten-Qualität appliziert.

Beide Schichten werden dann gemeinsam eingebrannt und vernetzt.

Dieses Decklacksystem muss den Farbeindruck und ein hohes Appearance im Zusammenspiel mit dem Untergrund und den übrigen Lackschichten bilden.

Bezogen auf eine Oberfläche einer Standardkarosse von 70 m<sup>2</sup>, die von der Elektrotauchlackierung bedeckt wird, und etwa 22 m<sup>2</sup> Außenfläche, die von den Decklacken erfasst wird, beträgt die durchschnittliche Lackverbrauchsmenge ca. 15 – 20 kg pro PKW-Karosse.

Die Applikation der Hohlräumversiegelung, Karosserienahtabdichtung und Schall-Dämmmaßnahmen liegt üblicherweise in der Verantwortung der Lackierereien. Die Nahtabdichtung erfolgt nach der Elektrotauchlackierung und nutzt die Härtung der Füller zu ihrer Festigung aus, während die Hohlräumversiegelung nach der Lackierung erfolgt, um somit Wachskontaminierungen während des Lackierprozesses zu vermeiden.

Diese Prozessschritte sind notwendig für einen hervorragenden Korrosionsschutz und für den akustischen Komfort, jedoch sind die Operationen innerhalb des Lackier-Ablaufes wegen der Schmutzbelastung als kritisch anzusehen.

#### 4.2.2 Lackierprozessfolge

Die Lackierprozessfolge ist in einem Prozessfolgeplan für jedes Fahrzeugmodell verbindlich und verpflichtend vorgegeben. Im Prozessfolgeplan sind alle relevanten Prozessschritte, die zu verwendenden Prozessmaterialien und alle technischen Prozessparameter, wie z.B. Temperaturen und Prozesszeiten, vorgegeben.

Die Festschreibung des Prozessfolgeplans geschieht auf der Basis der jeweiligen Qualitätsvorgaben des Modells. Bei Prozessveränderungen erfolgt eine intensive laborseitige Abprüfung und je nach Einschätzung der Auswirkungen und Risiken eine Absicherung über Testkarossen und im Bedarfsfall werden auch Felderprobungen durchgeführt.

In der Abbildung 4.2.2-1 sind die typischen Prozessschritte einer Lackieranlage in der Automobilindustrie aufgezeigt.

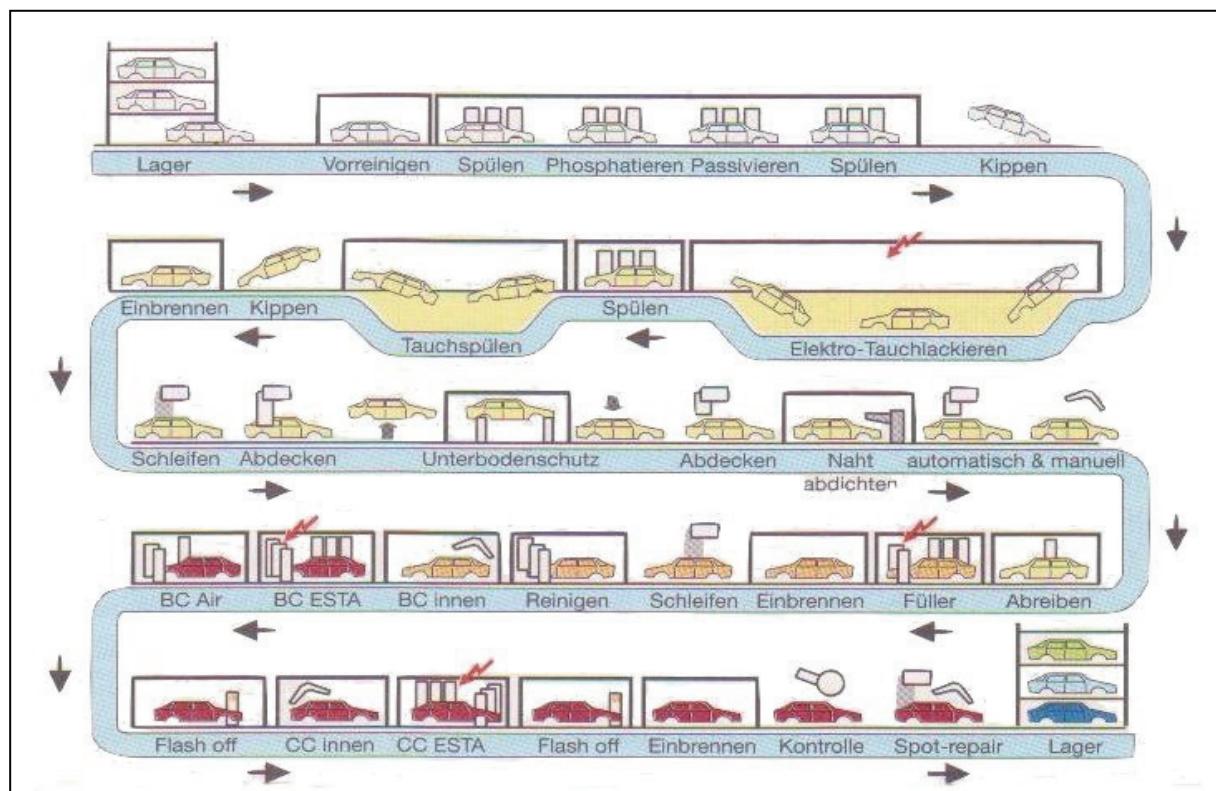


Abb. 4.2.2-1 Schematische Darstellung einer Automobil-Lackieranlage [2.4]

Die Länge einer Lackierstrasse von der Übergabe der Karossen aus dem Rohbau bis zur Abgabe an die Endmontage bewegt sich üblicherweise zwischen 2 und 3 km, in größeren Automobilwerken werden mehrere Lackierstrassen parallel aufgebaut.

Die Bandgeschwindigkeiten bewegen sich im Durchschnitt aller Anlagen zwischen 3 und 6 m/min, so dass bei Taktlängen von ca. 5-6 m pro Karosse etwa 40 bis 70 Karossen pro Stunde und Lackierstrasse lackiert werden. Die Verweilzeiten in der Lackiererei liegen dann je nach Wirkungsgrad zwischen 8 und 11 Stunden.

Die unter Umweltgesichtspunkten zu lösenden Probleme der immer effizienter arbeitenden Lackieranlagen sind die Lösemittelemissionen und der als Lackschlamm anfallende Abfall durch den Overspray bei der Füller- und Decklackierung. Bezüglich der Lösemittelemissionen haben sich die Lackmaterialien gerade in den letzten 30 Jahren deutlich verbessert (siehe Bild 4.2.2-2).

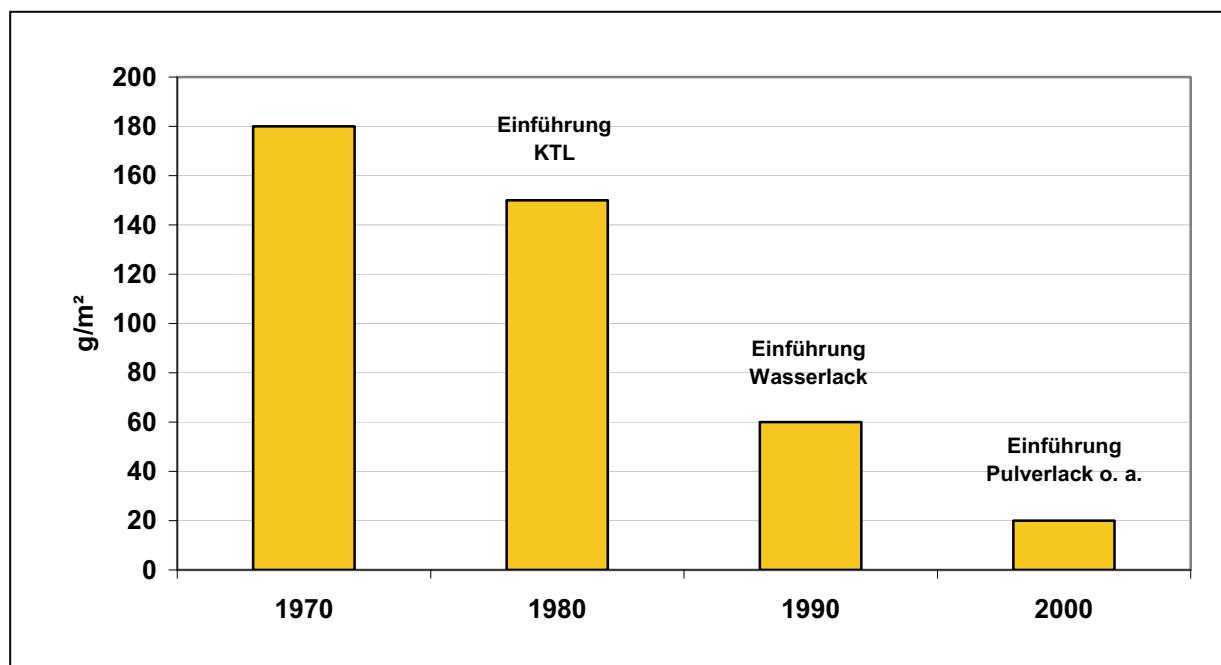


Abb. 4.2.2-2 Emissionsreduzierung bei der Lackierung von Automobilen bezogen auf den  $\text{m}^2$  zu lackierende Fläche [2.5]

Neben den Lackieraggregaten in allen Stationen wird eine Lackversorgung der vielen Abnahmestellen über so genannte Ringleitungen benötigt. In diesen wird der Lack aus einem Vorratsgefäß von der Größe von 200 bis 1000 l im Kreislauf umgepumpt und so den Pistolen und Lackierglocken zugeführt. Die Größe der Vorratsgefäße richtet sich nach der Abnahmegergeschwindigkeit. Sie stehen im so genannten „Farbmischraum“, der den Lager- und Sicherheitsbestimmungen entsprechen muss. Um zu einer defektfreien Oberfläche zu gelangen, ist man bemüht, unter Reinraum-Bedingungen in den Lackierzonen zu arbeiten. Zusätzlich sind je nach Stand der Prozesssicherheit und nach Erfahrung Reinigungs- und Korrekturschritte in den Ablauf integriert. Vorbeugende Maßnahmen zur Reinhaltung der Karossen und Umgebungsbedingungen in den Lackierereien gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die Sprühaggregate sind überwiegend elektrostatische Hochrotationszerstäuber, die den Lackauftrag mit Dach- und Seitenmaschinen gewährleisten. In jüngster Vergangenheit werden Lackierroboter mit aufgesetzten Zerstäubern eingesetzt, sodass nach entsprechender Programmierung eine sehr flexible Anpassung an die Karosserieform bei optimaler Beschichtung ermöglicht wird. Bei den immer kürzer werdenden Modellzyklen und bei Gemischtfahrweise verschiedener Modelle ergeben sich weitere Vorteile in Richtung Flexibilität und Qualität.

Hohe Energiekosten fallen bei der Belüftung der Spritzkabinen und in den Trocknungsöfen an. Der mit der Sprühapplikation verbundene Overspray wird durch die Luftführung in den Spritzkabinen dem unterhalb der Lackierebene befindlichen Waschwässern zugeführt und mit entsprechenden chemischen Zusätzen entklebt.

Der koagulierte Lacknebel wird entweder kontinuierlich entsorgt oder in angemessenen Zyklen aufgearbeitet. In der Regel erfolgt nach einer Entwässerung eine weitere thermische Verwertung des Lackschlammes.

Etwa notwendige Reparaturen von defekten Stellen in der Oberfläche der Lackierung werden durch Ausschleusen der Karossen in kleineren Spritzkabinen mit so genannter Spot-Repairtechnik durchgeführt. Üblicherweise erfolgt bei größeren oder zu vielen kleineren Defekten in der Oberfläche eine Ganznachlackierung der Karosse.

#### 4.2.3 Prozessfolgeplan

Im Folgenden soll an einem konkreten Beispiel einer Volkswagen T5-Karosserie der Prozessfolgeplan aufgezeigt werden.

Die modellbezogene Prozessfolge beinhaltet den Regelablauf und gibt in verbindlicher Form die Prozessschritte, die Prozessmaterialien und die Prozesszeiten an (Änderungen sind vorbehalten).

Auf die Angabe von Materialnummern und Lieferanten wurde aus Wettbewerbsgründen verzichtet.

Aus Prioritätsgründen stellt der Prozessfolgeplan themenbezogen den Lackeraufbau, ohne Abdicht- und Nebenoperationen dar.

Prozessschritt	Prozessparameter	Prozessmaterial
1. Entfetten, Aktivieren, Phosphatisieren, Passivieren in 9-Zonen-Spritz-Tauch- VBH- Anlage	Durchlaufanlage: 4,5 m/min	
2. Spritzentfetten	60 s Spritzen bei 54°C	alkalisches Entfettungsmittel Tensid Entschäumer
3. Spritz-Tauch-Entfetten	15 s Spritzen 180 s Tauchen bei 54°C	alkalisches Entfettungsmittel Tensid
4. Aktivieren	RT bis 48°C	Aktivierung auf Titan-Salzbasis
5. Tauchphosphatisieren	10 s Spritzen bei 52°C 180 s Tauchen	Niedrigzink-Phosphatiermittel (Zn/Ni/Mn-haltig) Phosphatiermittel Beschleuniger Chlorat
6. Tauchpassivieren	60 s Tauchen bei RT	Deoxylite 54 NCA Passivierung pH-Regulator
7. Elektrodeneinbau nach E- Einbauplan		
8. KTL- Grundierung	Durchlaufanlage: 9 m/min Taktzeit: 60s Beschichtungszeit 200s unter Dach	2K-KTL-Tauchgrundierung bleifrei
9. Spülen einschl. Tauchspülen	Tauchspülen mit Ultrafiltrat Spritzen bei Austauchen mit Rezirkulat	
10. Spritzspülen	Rezirkulat mit anschl. Reinfiltrat	
11. Tauchspülen	VE- Wasser 45-48°C mit anschl. Rein V	
12. Elektrodenausbau		
13. KTL- Trockner mit Kühlzone	Objekttemperatur ≥ 14 min 180°C	
14. Füller- Zwischengrund wasserverdünnt	Füllerapplikation an allen Außenflächen und planmäßigen Innenbereichen	Füllerfarbtöne: anthrazit altweiss
15. Decklack Uni- und Metallic Wasser-Base-Coat	Zwischenetrocknung 2,5 min bei 75°C Objekttemperatur	Wasserbasislacke in allen Serien- und Sonderfarben
16. Decklack Klarlack	Trocknung: min. 20 min bei 135°C Objekttemperatur	2K- Stammlack und Härter

### 4.3 Prozessqualität – Prozessfehler

Ein bedeutender Aspekt, der die Automobil-Lackiererei von anderen Fertigungsbereichen unterscheidet, besteht in der Tatsache, dass das Halbfertigprodukt „Lack“ verarbeitet wird, welches vom Lackhersteller verantwortungsbewusst hergestellt wird und vom Lackanwender in der Lackiererei des jeweiligen Fahrzeug-Werkes zum Endprodukt verarbeitet wird.

Prozessstörungen bei der Verarbeitung können bereits in der Lackherstellung begründet sein, deswegen müssen generell beide großen Prozessabschnitte ursächlich und komplex betrachtet werden.

#### 4.3.1 Prozessqualität Beschichtungsstoff

Die Qualität des Beschichtungsstoffes beim Lackhersteller muss unter anderen Bedingungen als in der Lackverarbeitung in den Lackierereien kontrolliert werden. Bei der Lackherstellung kommt hinzu, dass Lackrohstoffe aufgrund der großtechnischen Herstellung teilweise noch Schwankungen unterliegen, so dass es bei der Lackproduktion nicht immer nur darum geht, identische Mischungen herzustellen, sondern auch Kompositionen zu finden, die eine mit den Vorgängerchargen identische Verarbeitbarkeit besitzen und gleichzeitig identische Eigenschaften der Beschichtung erhalten. Messungen physikalischer Kennzahlen wie Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung und Festkörperanteile sind zwar wichtige Prüfmaßnahmen, sie reichen aber nicht zur umfassenden Sicherung der Verarbeitungs- und Endqualität aus. Dieser Tatbestand ist u.a. auch der Grund dafür, dass häufig noch das Nachempfinden der Praxisbelastung durch Verbiegen, Ritzen, Schaben oder Kratzen und das visuelle Beurteilen von Testlackierungen zur Qualitätsbeurteilung herangezogen werden.

Angesichts derartiger Fakten ist es zwingend erforderlich, dass zwischen dem Lieferanten und dem Verarbeiter ein enger Kontakt und Gedankenaustausch stattfinden muss, will man dem Beschichtungsstoff als ETL, Füller oder Decklack auf seinem Weg zur Fahrzeulglockierung die besten Voraussetzungen für eine optimale Qualität bieten.

Letztlich geht es bei der Herstellung von Beschichtungsstoffen aus Sicht des Verarbeiters, also der Lackiererei, um die Sicherstellung eines identischen Eigenschaftsbildes. Der Begriff „Eigenschaft“ bezieht sich dabei in gleicher Weise auf die Verarbeitungseigenschaften und die Filmeigenschaften. Die Identität der Eigenschaften zweier Chargen hat deshalb in einem bestimmten Umfang gegenüber der Identität der stofflichen Zusammensetzung Priorität.

Das Verarbeitungsverhalten auf den einzelnen Anlagen in den Lackstrassen der Fahrzeulglockierereien ist allein durch die physikalischen Kennzahlen nicht zu prognostizieren. Erst die aufwendige Verarbeitung unter den Bedingungen der jeweiligen Originallackierstrasse oder die komplette anwendungstechnische Erfassung des Applikationsverhaltens durch statistische Methoden erlaubt eine verbindliche Bewertung der verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Beschichtungsstoffen.

Wegen der zahlreichen Anforderungen an die Eigenschaften und an das Verarbeitungsverhalten treffen die Beteiligten Vereinbarungen, in denen das Qualitätsniveau und die erlaubten Toleranzen in allen Einzelheiten fixiert sind. In solchen Spezifikationen oder technischen Lieferbedingungen sind neben der

genauen Beschreibung der Eigenschaften auch Angaben über deren Mess- und Prüfmethoden zu finden.

Für den flüssigen, noch zu verarbeitenden Beschichtungsstoff sind die Stabilität des Produktes, die umweltrelevanten Aspekte sowie die Applikationsfähigkeit die entscheidenden Kriterien. Dabei ist zwischen direkt zu ermittelnden anwendungstechnischen Eigenschaften und bestimmten physikalischen Kenngrößen, die nur indirekte Informationen über das Applikationsverhalten liefern können, zu unterscheiden.

Zur ersten Gruppe gehören alle praktischen Prüfungen zur Bestimmung der Läuferneigung, des Verlaufens, der Bildung von Filmstörungen in Form von Kochern und Kratern. Zur Gruppe der indirekten Prüfungen durch Messen physikalischer Kenngrößen zählen die Viskosität, die Oberflächenspannung, die Dichte und speziell für die pigmentierten Lacke das Deckvermögen, die Farbstärke und die Feinheit der Dispergierung.

Für die Verarbeitung von Beschichtungsstoffen in der Lackiererei sind die physikalischen Kenngrößen der Viskosität und der Oberflächenspannung von besonderer Bedeutung.

#### 4.3.2 Prozessfehler Gesamtsystem

Im gesamten Ablauf von Herstellung, Vertrieb, und Anwendung von Lacken muss eine Fülle von Parametern angefangen beim Vorbehandlungsprozess über die Lackeigenschaften bis zu den Applikations- sowie Härtungsbedingungen eingehalten werden, um ein spezifikationsgerechtes Ergebnis der Beschichtung zu erzielen. Abweichungen einzelner oder mehrerer Parameter können zu fehlerhaften Beschichtungen führen.

Solche Defekte sind zum Beispiel eine starke Orangenhautstruktur der Lack-Oberfläche oder Lackläufer an senkrechten Flächen, nicht ausreichender Steinschlagschutz oder ein von der Vorlage abweichender Farbton wie auch punktuelle oder systematische Oberflächenfehler.

Eine sachgemäße Applikation auf spezifizierten Untergründen mit sorgfältig geprüften und freigegebenen Lackmaterialien führt in der Regel zu mängelfreier Beschichtung. Da Lack und Verfahren stark voneinander abhängen, muss entschieden werden, ob die Verfahrens- oder Lackoptimierung der ökonomischere, schnellere und sichere Ansatzpunkt zur Problemlösung darstellt.

Ein typisches Beispiel dafür sind Lackläufer. Wenn ausreichend Spielraum für die wichtigsten Filmeigenschaften in der Herabsetzung der Schichtdicke existiert, ist die Verfahrensoptimierung der einfachste und ökonomischste Schritt. Ist das nicht der Fall, muss über die Lackformulierung mehr Sicherheit in der Standfestigkeit eingestellt werden.

Der Schwerpunkt in der Optimierung der Sicherheit von Beschichtungsprozessen liegt seit Jahren bei den punktuellen und systematischen Oberflächenstörungen von Automobilslackierungen. Diese führen seltener zu Einbußen in den Anwendungseigenschaften, stören jedoch das Wertgefühl der Konsumenten für das Produkt Automobil erheblich.

Versucht man die Fehlerursachen aus der Erfahrung zu klassifizieren, so liegen sie in vielen Fällen in Störstellen durch die Substrate und deren Vorbehandlung, im Lackiermaterial und im Beschichtungsprozess.

Hinzu kommt, dass die heute überwiegend verwendeten umweltfreundlichen Lacksysteme eine größere Aufmerksamkeit erfordern als die robuster formulierbaren

lösemittelhaltigen Systeme, da sie als wässrige oder pulvrige Produkte in gewisser Hinsicht metastabil sind und in thermodynamisch günstigere Zustände streben. Dieses kann sich als Agglomeration, Phasentrennung und Micellenbildung bestimmter Lackbestandteile darstellen. Die Applikation solcher dann inhomogener Lacke führt zu verschiedenen Defekten in der Oberfläche, wie Rauigkeit oder Kratern und kann auch die Filmeigenschaften negativ beeinflussen.

Neben diesen lackinhärenten Fehlerquellen gibt es eine Fülle an äußereren Einflussgrößen auf das Ergebnis des Beschichtungsprozesses. Das in dieser Hinsicht bedeutendste Problem ist der Staubeinfall, der trotz aller Vorkehrungen selbst bei den hochtechnisierten Lackierverfahren und Anlagen immer noch an erster Stelle steht.

Nicht nur Staub, sondern auch Hilfsstoffe in den Lackierereien und den zu beschichtenden Objekten können zu sichtbaren Defekten in den Lackaufbauten führen. Insbesondere sind die weit verbreitenden Öle und Dichtungsmaterialien auf Basis von Silikonen oder perfluorierten Verbindungen zu nennen. Diese Materialien zeichnen sich durch sehr niedrige Oberflächenspannungen von < 20 mN/m aus. Sie führen in fast allen Lacken, insbesondere bei den heute verwendeten wässrigen Lacken und auch bei den so genannten High Solids wegen ihrer Unverträglichkeit zu deutlichen Oberflächenstörungen.

Daneben kann die Geschwindigkeit der Lackierprozesse zu Problemen führen, die z.B. in unzureichendem Verdunstungsverhalten von Lösemitteln inkl. Wasser begründet sind. Die korrekte Einstellung der Sprüh- und Spritzorgane ist ebenfalls notwendig für das Erzeugen defektfreier und glatter Filme. Das menschliche Auge ist in der Lage, regelmäßige Oberflächenstrukturen bis zu 0,5 µm Tiefe zu erkennen.

Egal welche Ursachen für Oberflächenstörungen vorliegen:

In den hochtechnisierten Lackierstrassen in der Automobilindustrie lösen sichtbare Defekte aufgrund der hohen Ansprüche enorme Reparaturkosten aus!

Wenn im Lackierprozess messbare Fehler auftreten, ist deshalb rasches Handeln angesagt. Dann gilt es, die richtige Analysenmethode und die Erfahrungen aller Fachkräfte der Lackiererei und der Lacklieferanten zu nutzen, um durch zielgerichtetes Vorgehen die Ursache der Störung zu finden und Abhilfe zu schaffen. Dabei sind folgende wichtigen Aktionsparameter zu unterscheiden:

1. Die sorgfältige Analyse der Oberflächenstörung
2. Eine sofortige Registrierung in der Defektstatistik in zeitlicher und örtlicher Auflösung
3. Überprüfung aller Applikationsparameter
4. Analyse der Qualitätsdaten der Lackmaterialien

Je nach Schwere des Vorfalls kann das Aufgreifen aller Ansatzpunkte gleichzeitig opportun sein. Das Zusammenspiel von Mensch, Lackeigenschaften und den Applikationsparametern führt nicht in allen Fällen allein durch die Ausprägung der Oberflächenstörung zu einem eindeutigen und schnellen Auffinden der Fehlerursache. Kriminalistische Fähigkeiten aller Beteiligten werden insbesondere bei mehrschichtigen Automobil-Lackieraufbauten gefordert, da das Lokalisieren des Defektes einen entscheidenden Schritt zur Ursachenfindung darstellt.

Im folgenden Kapitel werden die Möglichkeiten der Oberflächenanalyse und die Form bekannter Defekte beim Vorliegen entsprechender Fehler bei der Applikation oder den Lack selbst beschrieben.

### 4.3.3 Fehleridentifikation und Ursachenfindung

Defekte und Störungen in der Lackierung von Automobilkarosserien lassen sich, wie schon beschrieben unterteilen in sichtbare Defekte durch lokale oder großflächige Oberflächenstörungen einerseits und solche mit einer Beeinträchtigung der Gebrauchstüchtigkeit bzw. Funktion der Beschichtung andererseits [4].

In den vielen unterschiedlichen Lackierprozessen können diese Fehlerklassen einzeln und zusammen auftreten.

#### 4.3.3.1 Sichtbare, lokale Störungen der Oberfläche

Die lokalen Störungen der Oberfläche werden üblicherweise nach ihrem Erscheinungsbild klassifiziert. So spricht man von Läufern, Pieken, Kratern, Kochern, Nadelstichen, Schmutzeinschlüssen oder benutzt ähnliche Begriffe, die allerdings in vielen Fällen keinen eindeutigen Hinweis auf mögliche Fehlerursachen geben. Ein Krater kann z.B. ohne genauere Betrachtung durch ein Mikroskop ein großer Kocher sein. Im übrigen ist diese Begriffswelt nicht klar definiert, was die Kommunikation selbst unter Experten erheblich erschwert.

Der erste Schritt zur Behebung der Defekte sollte immer die Registrierung und visuelle Klassifizierung der Oberflächenstörung am Fertigungsband als Grundlage der Ursachenanalyse sein. Hierzu zählt die Beschreibung der Störung, soweit sie mit bloßem Auge erkennbar ist, wie auch die Lokalisierung am Objekt sowie die Aufzeichnung der zeitlichen Abfolge. Auch eine Lupe oder ein transportables Mikroskop kann vor Ort als weitere Hilfe eingesetzt werden. Reicht dies für eine eindeutige Fehlerzuordnung nicht aus, muss eine oder mehrere Fehlstellen für weitergehende Untersuchungen präpariert werden.

Dazu kommen drei Verfahren in Frage:

1. Eine weitergehende Analyse der Störstelle unter Zuhilfenahme eines Skalpells und eines Stereomikroskops. Hierbei wird die unter dem Mikroskop sichtbare Fehlstelle mit dem Skalpell durchtrennt, sodass die Fehlstelle im Querschnitt des Lackaufbaus sichtbar wird. Auf diese Weise kann mit hoher Wahrscheinlichkeit bei mehrschichtigen Aufbauten die Quelle der Störung der jeweiligen Lackschicht zugeordnet werden.
2. Die Mikrotomie als Dünnschnitttechnik, bei der die Lackschicht in Schritten von etwa 1 µm Schichtdicke abgetragen wird. Diese Präparatscheiben lassen sich im Mikroskop im Auflicht und Durchlicht betrachten.
3. Am häufigsten wird die Technik der Querschliffpräparation in der Lackindustrie eingesetzt. Dazu wird die zu untersuchende Fehlstelle aus dem Objekt geschnitten und in härtbare Kunststoffe eingebettet. Dieser Gießling wird bis zur Schadstelle geschliffen, um danach eine mikroskopische Aufsichtaufnahme der Fehlstelle anzufertigen.

Zusammen mit der visuellen Beurteilung kann nach einer so ausgeführten Fehlstellenanalyse die Störung üblicherweise in Schmutzeinschlüsse, Krater, Kocher oder Pieken, Blasen und sonstige Störungen klassifiziert werden.

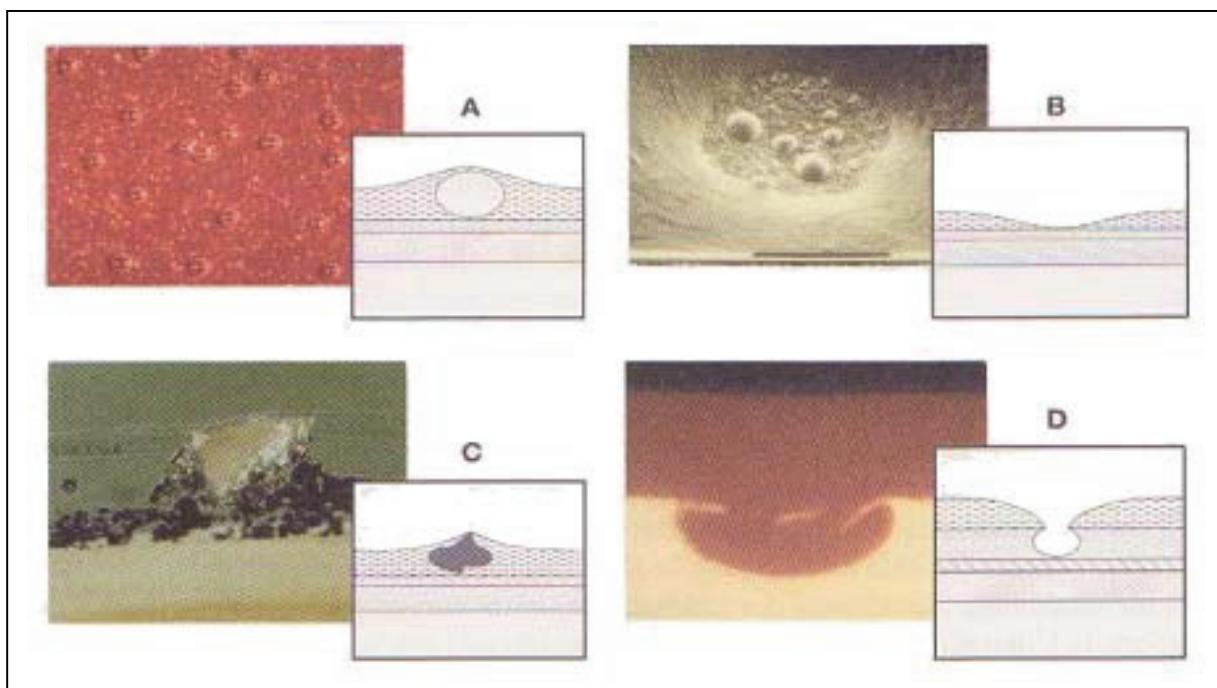


Abb. 4.3.3.1-1 Typische Störstellen auf Lackoberflächen, wie Blasen(A), Krater(B), Schmutz(C) und Kocher/Pieken(D) [2.6]

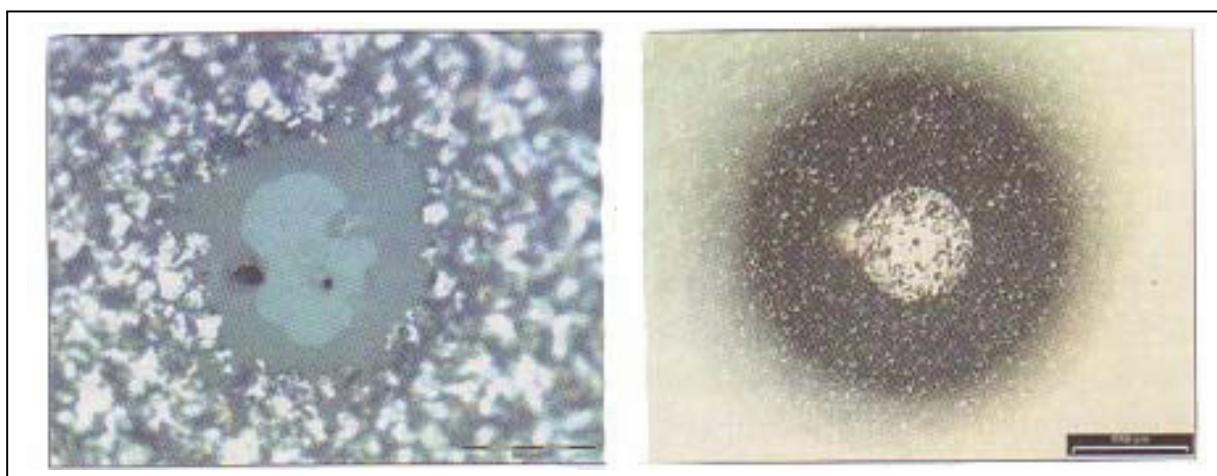


Abb. 4.3.3.1-2 Krater in einem Automobil-Lackaufbau bis zur KTL, verursacht durch oberflächenaktive Substanzen [2.7]

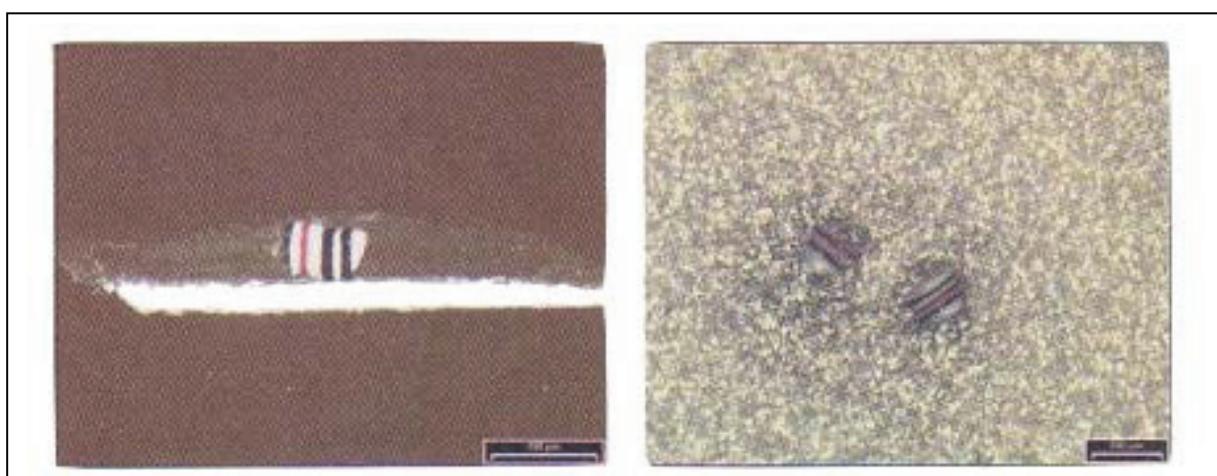


Abb. 4.3.3.1-3 Querschnitt und Aufsicht von Schmutz durch häufig mitlackierte Betriebsmittel, wie z.B. Lackiergehänge [2.8]

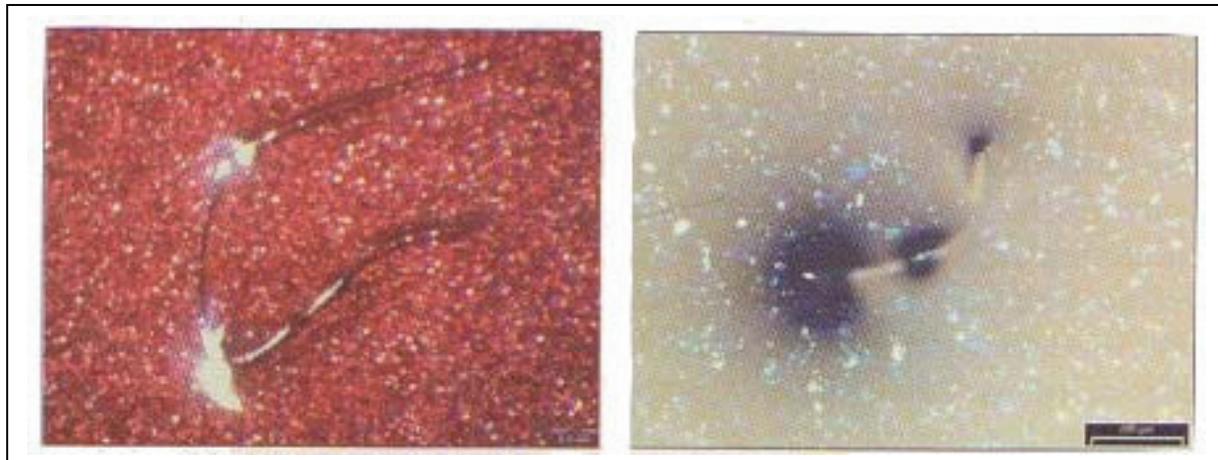


Abb. 4.3.3.1-4 Beispiele von Fasern im Decklack [2.9]

Diese Klassifizierungen geben deutliche Hinweise, jedoch reicht es in vielen Fällen nicht aus, die Ursache bzw. Quelle der Störung zu identifizieren. In diesen Fällen werden weitere analytische Methoden eingesetzt, die möglichst deutliche Hinweise auf die Art der störenden Substanz liefern.

Beim Nachweis anorganischer meist eingelagerter Komponenten kann der Einsatz eines Rasterelektronenmikroskops (REM) den jeweiligen Störstoff identifizieren.

Werden Beschichtungsstörungen durch Grenzflächenphänomene mit oberflächenaktiven Substanzen hervorgerufen, sind deren Konzentrationen in den Grenzschichten der Lackschichten so klein, dass ein Nachweis mit IR-Spektroskopie oder mit der Röntgenmikroanalyse nicht möglich ist. Die Störsubstanzen bei derartigen Kontaminationen liegen im ppm- und ppb-Bereich [5].

Die von „Benninghofen“ [6] entwickelten Geräte nach dem Verfahren der Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy (TOF-SIMS) erfüllen die Voraussetzung für eine hohe Empfindlichkeit zur Analyse chemischer Substanzen auf der Oberfläche von Beschichtungen. Sie ermöglichen eine schonende Ionisierung durch Beschuss mit Argon- und Metallionen zur Erzeugung von Sekundärionen aus der Beschichtung. Die Methode hat sich heute etabliert und hat in vielen Fällen, so auch in der VW AG im Werk Hannover, das Auffinden von Störsubstanzen und deren wirkungsvolle Elimination möglich gemacht.

#### 4.3.3.2 Sichtbare großflächige Oberflächenstörungen

Großflächige Oberflächenstörungen können von einem trainierten Auge schnell und zweifelsfrei analysiert werden. Zu großflächigen Störungen zählen Orangenhautstruktur (Orange Peel), Glanzschleier (Haze), Wolkigkeit bei Metallic-Effekt-Lacken (Mottling), mangelnder Hell-Dunkel-Flop bei Metallic-Effekt-Lacken und Läufer an senkrechten Flächen und Kanten.

Die Methode der Ursachenfindung ist genauso anzugehen, wie bei den punktuellen Störungen. Eine chemische Analyse ist wegen der makroskopischen Struktur in den meisten Fällen nicht sinnvoll. Der häufigste Ansatzpunkt zur Beseitigung solcher Störungen liegt in der Applikationstechnik und/oder in der Lackformulierung.

#### 4.3.3.3 Beeinträchtigung der Gebrauchstüchtigkeit

Fehler in der Gebrauchstüchtigkeit zeigen sich in der Regel erst im späteren Lebenszyklus des Automobils, sodass sie während des Lackierprozesses noch nicht zu erkennen sind.

Die häufigsten Fehler sind hier: Enthaftung zum Substrat oder zwischen den Lackschichten, Kreidung oder zu schneller Glanzverlust, Blasenbildung, Verfärbung und zu frühe Korrosion.

Fehler in der Gebrauchstüchtigkeit sind generell durch ein wirkungsvolles Qualitäts-Managementsystem zu vermeiden.

### 4.4 Fehlervermeidung-Qualitätsstrategie

Das unter Praxisbedingungen erhaltene Lackierergebnis muss zu beurteilen und zu beeinflussen sein. Nur so sind die für die Qualität sensiven Stellen des Prozesses aufzuspüren. Hierzu gehören Datensammlungen, Fehlerprotokolle und natürlich entsprechende Aktivitäten zur Analyse und Auswertung der Datenmengen mit dem Ziel, Fehlervermeidungsstrategien zu entwickeln. Diese beziehen sich auf den mit der Prüfung befassten Menschen genauso wie auf die Produktionsmittel. Dabei sind qualifiziertes Personal und konstante Prozessbedingungen die wichtigsten Voraussetzungen auf dem Weg zu einer konstanten Qualität [7].

Für die schnelle Information zum Abfragen der Daten in den einzelnen Stationen der Lackieranlage und zum Auswerten der Checklisten ist die Hilfestellung der elektronischen Datenverarbeitung eine notwendige Voraussetzung.

Moderne Qualitätssicherung geht dabei über das Registrieren und Beschreiben von Fehlern hinaus. Prozessoptimierung durch Regelkreise sind ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer gesicherten und konstanten Qualität.

#### 4.4.1 Prozesssteuerung

Die Prozesssteuerung ist ein Vorgang, bei dem eine oder mehrere Eingangsgrößen, wie z.B. Viskosität, Oberflächenspannung und Temperatur oder Spritzluft- und Materialdruck die Zielgrößen Verlauf, Glanz und Schichtdicke aufgrund einer bekannten Gesetzmäßigkeit beeinflussen.

Prozesssteuerung hat also die Aufgabe, Prozesse nach einem vorgegebenen Programm zu beeinflussen und – wenn gewünscht – konstant zu halten. Das Ergebnis wird dabei nicht von der Steuereinrichtung überprüft.

#### 4.4.2 Prozessregelung

Die Prozessregelung dagegen ist ein Vorgang, bei dem die zu regelnde Größe laufend erfasst wird, um dann entsprechend eingestellt zu werden. Der Gesamtablauf wird so ein geschlossener Regelkreis, in dem alle Störgrößen regelmäßig erfasst und korrigiert werden. Jede Art von Steuerung und Regelung beginnt generell mit der Prozessüberwachung in Form der messtechnischen Erfassung der prozessbeeinflussenden variablen Parameter.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Prozesskontrolle mit wirksamen Regelkreisen ist die Badsteuerung und Regelung von Elektrotauchbädern [8]. Für eine konstante

Beschichtungsqualität müssen beim Betreiben von Elektrotauchbädern zahlreiche Badparameter regelmäßig gemessen und angepasst werden [9]. Durch den Verbrauch des Materials während der Beschichtung der Lackierobjekte nimmt der Badfestkörper ab, wodurch auch Veränderungen im Pigment-Bindemittel-Verhältnis auftreten können. Auch der Neutralisationsgrad und damit der pH-Wert können sich durch das Einschleppen von Vorbehandlungsmaterialien und durch die Kompensation mit Nachfüllmaterial ändern. Veränderungen des Badzustandes müssen eventuell während der Kompensation durch Ultrafiltrat und durch Abführen von Analytflüssigkeit ausgeglichen werden. Derzeitig noch überwiegend manuell durchgeführt, existieren aber auch Anlagen, bei denen die steuerungsrelevanten Kennzahlen numerisch erfasst und für die Prozesssteuerung verwendet werden.

Da der Festkörper- wie auch der Pigmentgehalt nicht direkt erfassbar sind, haben sich Messungen der Dichte und der Schallgeschwindigkeit als brauchbar erwiesen. Sie sind genau, schnell und digital zu erfassen und besitzen eine direkte funktionelle Verknüpfung zu den gesuchten Größen Festkörper- und Filmbildnerverhältnis. Der Stromverbrauch ist eine weitere Basisgröße, die z.B. zur Kompensationssteuerung herangezogen wird.

Es ist davon auszugehen, dass die Erfahrungen mit der prozessgeregelten Spritz-Applikation und der entsprechend geregelten Elektrotauchlackieranlage zukünftig auch auf breiter Basis für den komplexen und verknüpften Gesamtdeckierprozess genutzt wird.

#### 4.4.3 Qualitätsmanagement

Die traditionelle Sicht der Qualität als Summe der Eigenschaften (Qualitätsmerkmale) eines Produktes in Relation zu den Eigenschaften anderer Produkte gleicher Bestimmung hat sich in die mehr ganzheitliche Definition der regelmäßigen Erfüllung der Anforderungen und Erwartungen der Kunden zur vollständigen und nachhaltigen Kundenzufriedenheit gewandelt. Dabei werden die Produkteigenschaften auch durch umweltrelevante Größen erweitert. Es manifestiert sich die Tendenz von der Produktqualität zur Leistungsqualität.

Wie erwähnt, bezieht sich bei moderner Interpretation des Qualitätsbegriffs dieser weniger auf das Produkt, als vielmehr auf die Erfüllung der Ansprüche und Erwartungen des Kunden. Gemeint sind dabei die Funktionstüchtigkeit des Produktes, die Dauerhaftigkeit, das Design, aber auch die Serviceleistungen und ökologischen Aspekte im Hinblick auf die Entsorgung und Ressourcenschonung.

Qualität ist somit die regelmäßige Erfüllung der Anforderungen und Erwartungen der Kunden zu seiner vollständigen und nachhaltigen Zufriedenheit.

Eine derartige Sichtweise erfordert die Beteiligung aller Abteilungen eines Unternehmens erfassenden Prinzips und letztlich die Entscheidungsgrundlage aller Mitarbeiter. Qualitätsmanagement ist somit die auf den Kunden ausgerichtete Strategie der Unternehmensleitung und muss in allen Einheiten des Unternehmens verwurzelt sein.

Zahlreiche Normen schlagen Qualitätsmanagementsysteme vor und enthalten Vorgaben zu deren Umsetzung im Unternehmen. Darüber hinaus definieren sie Kriterien zur Beurteilung des Grades der Implementierung. Verschiedene Qualitätsmanagementsysteme (QMS) der Unternehmen werden somit vergleichbar und auditierbar.

In diesem Zusammenhang kommt die DIN ISO 9000 zum Tragen, sie bezieht sich auf die Installation von Qualitätssicherungssystemen und Einzelheiten über

nachzuweisende Systemvoraussetzungen. Diese Norm befasst sich weiterhin mit den Unternehmenssegmenten Entwicklung, Konstruktion, Produktion und Kundendienst, konzentriert sich jedoch auf die Produktion und gibt Anweisungen für das Prüfwesen. Weiter werden in der DIN ISO 9000 auch Managementaufgaben und Mitarbeiter Schulungen angesprochen. Aber auch das Prüfwesen, die statistische Auswertung der Prüfergebnisse, die Dokumentation, die Prüfmittelüberwachung, die Vertragsvereinbarungen und die Kundenzufriedenheit sind nennenswerte Kapitel.

Aufbauend auf die DIN ISO- Normen hat sich die deutsche Automobilindustrie spezifische Regelwerke geschaffen, so hat der Verband der deutschen Automobilindustrie ein QM-System unter der Bezeichnung VDA 6.1 eingeführt.

Unternehmensziele sind jedoch nicht die Qualitätssicherung allein. Die Belastung der Umwelt durch technische Prozesse und eine zu verbessernde Ressourcenschonung führen zu weiteren wichtigen Unternehmenszielen, die sich konkret in der Reduzierung von Emissionen, der Abfälle und des Energieverbrauches ausdrücken.

Über die bereits existierenden Gesetze hinaus und zur Dynamisierung der Umsetzung ökologischer Grundsätze entwickelte sich parallel zu den QM- Systemen dann auch der integrierte Umweltschutz. Er wird mit einem Umwelt-Managementsystem (UMS) zum Standard moderner Unternehmen.

Hierbei handelt es sich um Richtlinien für die Aktivitäten zum Umweltschutz die mit einer abschließenden Betriebsprüfung dokumentiert werden. Analog zum Qualitäts-Managementsystem soll durch das Umweltmanagementsystem eine kontinuierliche, objektiv zu bewertende Verbesserung des Unternehmens auf dem Gebiet des Umweltschutzes dargestellt werden.

Die Automobilunternehmen, aber insbesondere auch die Lackierereien, haben also die permanente Aufgabe zwei Grundsatzziele in ihrem Management zu verankern.

Qualitätsbewusstes und gleichzeitig umweltgerechtes Handeln sind zwei unterschiedliche Ziele, die Methoden zur Einführung von Werkzeugen und Prinzipien zum Erreichen derselben sind jedoch ähnlich.

Fest steht, dass die Einhaltung von Umweltschutzauflagen, mit überwiegend gesetzlichem Hintergrund, zwingend zu befolgen ist. So ist es zweckmäßig und unternehmerisch sinnvoll QM- und UM-Systeme aufeinander abzustimmen und als integrierte Managementaufgabe anzusehen.

#### 4.5 Idealer Lackierprozess – Einleitung

In dem folgenden Gedankengut eines idealen Lackierablaufes in einer Großserien-Lackiererei eines Automobilherstellers gibt der Autor im Sinne der Qualität und der Wirtschaftlichkeit einen Paradigmenwechsel vor, der aus seiner Sicht nach einer gemeinsamen Zieldefinition und bei intensiver Verfolgung und Umsetzung zum Erfolg führt.

Der „Ideale Lackierprozess“ wird durch den Autor definiert als eine Lackier-Prozessfolge ohne jeglichen nicht werterhöhenden und lackierprozessfremden Prozessschritte oder Prozessoperationen.

An diesen idealisierten, gewissermaßen extrem schlanken Lackierablauf, müssen aus der Betrachtung und Erkenntnis des Autors alle realen Lackierabläufe in einer Automobil-Lackiererei gemessen werden.

Alle nicht werterhöhenden Prozessabschnitte in einer Lackierstrasse müssen einer intensiven Prüfung unterzogen werden. Die Ursachen dieser häufig kostenintensiven und teilweise sogar qualitätshemmenden Operationen sind aufzudecken und zu eliminieren.

Im Folgenden wird zunächst die Ausgangssituation in einer beispielhaften realen Automobillackiererei beleuchtet, um danach den Weg zum „Idealen Lackierprozess“ anhand konkreter Vorschläge und Empfehlungen aufzuzeigen.

#### 4.5.1 Ausgangssituation „Reale Lackierstrasse“

Die Basis einer realen Lackierstrassen-Planung ist die bereits erwähnte Vorgabe der typenbezogenen Lackierprozessfolge. Dieser Prozessfolgeplan enthält neben den typspezifischen Operationen auch grundsätzliche unternehmens-spezifische Qualitätsvorgaben, wie den Einsatz von Wasser-Basecoat und 2K-Klarlack, Wasserklarlack oder zum Beispiel die Verwendung von Pulverlacken.

Diese Prozessoperationen nach dem Prozessfolgeplan bilden gewissermaßen die qualitative Grundlage der Lackierstraßenplanung.

Im weiteren Planungsverlauf kommen dann Erfahrungswerte und Forderungen vor allem aus dem Bereich des Lackierbetreibers auf den Tisch, die in der Regel zu einer mehr oder weniger deutlichen Zunahme von Lackstrassenabschnitten führt.

Die Gründe für diese Forderungen liegen in der erlebten, und auch realen Unvollkommenheit bestimmter Prozessoperationen oder Prozessteilabschnitte.

Die Palette von Prozessunsicherheiten, die regelmäßig oder phasenweise auftreten können, ist mehr oder weniger umfangreich und reicht von Beschichtungsfehlern, wie Läufer, Krater oder Kocher bis zur Hauptstörquelle Schmutz. Schmutzpartikel sind in den einzelnen Lackschichten erst nach dem Trockenprozess als eingearbeitete und sichtbare Oberflächenfehler erkennbar und bedürfen in der Regel einer Behebung durch einen Schleifvorgang. Die Anzahl solcher eingelagerter Partikel kann je nach Gütegrad des jeweiligen Prozessabschnittes bei etwa 5 bis 20 Partikel pro Karosse liegen. Die übrigen genannten Fehler, die in der Regel sporadisch auftreten, werden ebenfalls durch manuelles Schleifen behoben.

Da die Automobillackiererei im Fertigungsfluss der Automobilfabrik eine exponierte Stellung zwischen dem Karosseriebau und der Fahrzeugmontage einnimmt, ist die gegenseitige Abhängigkeit im Rahmen des Fabrik- Materialflusses als besonders hoch einzustufen. Zeitliche Störungen im Lackierablauf führen diesbezüglich sehr schnell zum Rückstau in den Karosseriebau oder zu Fahrzeugausfällen in der Fahrzeug-Montage. Die tägliche Fahrzeugproduktion der Gesamtfabrik, die bei einer Größe von bis zu 1000 Fahrzeugen pro Tag liegt, wird durch eine phasenweise instabil laufende Lackiererei mehr oder weniger gefährdet.

In der Folge führen diese fabrikorientierten Zusammenhänge und Zwänge, gepaart mit den bekannten Schwächen bestimmter Lackierprozesse, zu einem Sicherheitsdenken, vor allem bei den für die Produktionsleistung verantwortlichen Lackiererei-Managern.

Um das verpflichtende Fahrzeugprogramm abzusichern werden dementsprechend Fehlerbeseitigungsbereiche in mehr oder weniger großem Umfang fest eingeplant, aufgebaut und auch betrieben. Diese Bereiche stellen sich üblicherweise als Schleifstrecken, als Polierstrecken oder als Nachlackierbereiche mit entsprechenden Vorbereitungsplätzen und Lackierboxen bzw. Kabinen dar.

Die Investitionen für diese Fehlerbeseitigungsbereiche inklusive der entsprechenden Förderstrecken und Nebenanlagen, wie z.B. Luftversorgung und Entsorgung, Pumpen, Schleifmaschinen und Lackerpistolen, betragen bei konservativer Betrachtung zwischen 15 und 20% der Gesamtinvestition.

Bei weitergehender Betrachtung werden dann, die so vorgesehenen und installierten Fehlerbeseitigungsbereiche besonders im direkten Lackierstraßenablauf auch personell besetzt, wobei sich die Höhe des Personaleinsatzes eher an dem größtmöglichen Fehleranfall orientiert. Damit werden Engpässe bei der seriellen Fehlerabarbeitung vermieden, um somit in jedem Fall Bandstops mit Karossen-Verlusten auszuschließen. Diese Vorgehensweise bietet zwar eine gewisse Sicherheit der Karossenausbringung bei einem Fehleranfall in einer gewissen Bandbreite; jedoch ist der Preis hoch, indem permanent zusätzliche nicht wertschöpfende Fertigungskosten und Betriebsmittelkosten die Produktentstehungskosten belasten. Aus fachlicher Sicht muss noch ergänzt werden, dass diese Operationen nach der Beseitigung des ohne Zweifel vorhandenen Oberflächenfehlers, durch einen Schleif- oder Polievorgang, wiederum mit neuen Risiken, wie zum Beispiel eines Schleif-Fehlers oder einer Schmutzpartikellast durch Schleifstaub oder Fasern in den nächsten Prozessabschnitt eintritt und dort weitere Fehler ausgelöst werden können.

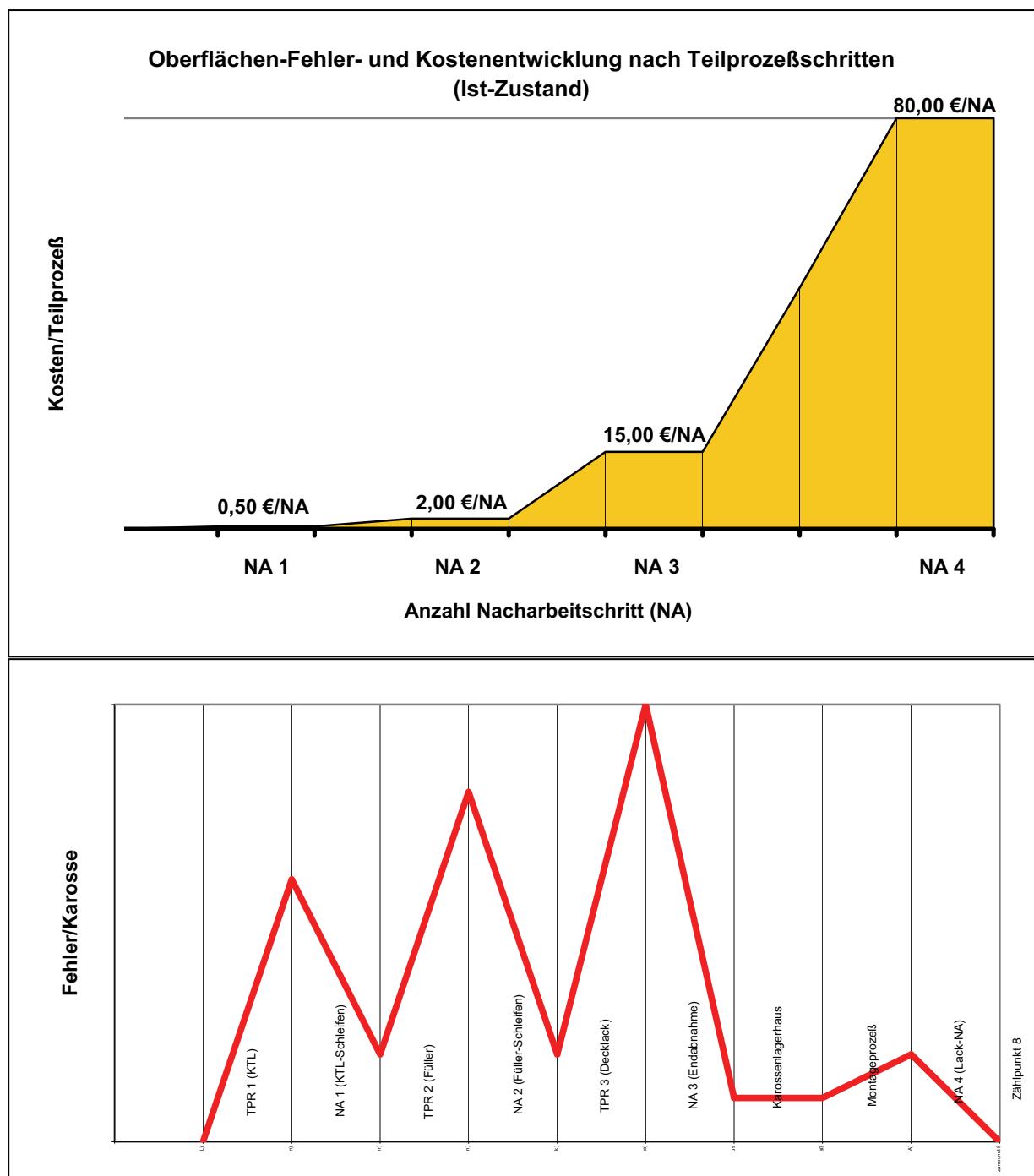


Abb. 4.5.1-1 Fehlerentwicklung nach Teilprozessschritten (Ist-Zustand)

Erkenntnisse:

- 1) Die Prozesssicherheit ist im Lackierprozess nicht ausreichend.
- 2) Der Fehleranfall nach den Teilprozessschritten (TPR's) ist zu hoch.
- 3) Der Qualitäts- und Prüfmaßstab steigt im Verlauf des Lackier- und Montageprozesses.
- 4) Die Fehlerbeseitigungskosten steigen überproportional mit jeden Prozessschritt.
- 5) Separate Nacharbeitsbereiche werden in der Regel auch mit Nacharbeiten versorgt!

Sicherlich spielt bei den überwiegend manuellen Zwischenoperationen die Qualifikation des Personals eine äußerst wichtige Rolle und bedarf der ständigen Beeinflussung durch die Mitarbeiter und die Vorgesetzten.

Trotz aller Bemühungen des Fachpersonals werden selbst bei gewissenhafter Bearbeitung nach Fertigstellung der Lackierung am Auslauf der Lackstrasse noch Fehler identifiziert, die einer mehr oder weniger aufwendigen Nacharbeit bedürfen.

Dieser Anteil liegt trotz der beschriebenen hohen personellen Aufwendungen im Prozessablauf immerhin noch in einer Größenordnung von durchschnittlich 5 %- 8% notwendiger Nachlackierungen, die dann einer Spotrepair-Nacharbeit oder einer Doppellackierung zugeführt werden müssen. Diese Nacharbeiten belasten die Herstellkosten zusätzlich und führen weiterhin zu Terminverzögerungen bei der Weitergabe der Karosserie an die Montage. Logistische Abläufe im Fabrikablauf („Perlenketten“-Fertigung) mit entsprechender zeitgenauer Bereitstellung von Teilen und Einbauten werden gerade durch nacharbeitsbedingte Zeitverzögerungen äußerst negativ beeinflusst.

Selbstverständlich wird durch Teiloptimierungen in den Kernprozessen eine ständige Verbesserung erreicht, die nach dem Erreichen eines konstanten geringeren Fehleranfalls, dann auch eine Reduzierung des Fehlerbeseitigungsaufwandes mit verringertem Personal- und Betriebsmitteleinsatz zur Folge hat.

Es bleibt dennoch festzustellen, dass in einer vorhandenen Lackierstrasse der Weg über die kontinuierliche Verbesserung ein guter Weg ist, jedoch sind gerade in den zum Teil älteren Lackieranlagen die Verbesserungspotentiale aufgrund gegebener anlagentechnischer Grundstrukturen nur begrenzt umsetzbar.

Häufig wurde und wird bei der Planung der ohnehin investitionsträchtigen Lackierereien zu stark auf die Reduzierung von kostenträchtigen Anlagendetails gedrängt, welches sich insbesondere bei den Kernprozessbereichen, wie z.B. Applikationsanlagen, Kabinen und Trockner, zum Teil negativ auf die Prozesssicherheit auswirkt.

Begrenzte anlagentechnische Optimierungen sind jedoch, wie durch mehrere Projekte bewiesen, äußerst sinnvoll und führen auch zu spürbaren Qualitäts- und Kostenverbesserungen.

Hinzu kommt, dass durch die realisierten Grundsatzuntersuchungen und durch die erreichten positiven Ergebnisse im Rahmen der Umsetzung, generell abgesicherte Erkenntnisse für Neuplanungen vorliegen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass beim Betreiben einer realen Lackierstrasse ein Teil der denkbaren Qualitätsverbesserungs- und Kostensenkungspotentiale zwar realisierbar sind, jedoch aufgrund der vorhandenen Anlagenstrukturen und bestehender Ablauforganisationen nur schrittweise und begrenzt erreicht werden. Der Abstand zu einem denkbaren Optimum ist dennoch beachtlich hoch.

Gewissermaßen muss der bekannte bisherige Kreis des Denkens (Sicherheits-Denken) sowie des Handelns und der sich daraus bisher abgeleiteten Abläufe verlassen beziehungsweise durchbrochen werden, und es müssen neue und innovative Ansätze gefunden werden, die im folgenden Abschnitt eines „Idealen Lackierprozesses“, entwickelt und aufgezeigt werden.(Paradigmen-Wechsel)

#### 4.5.2 Idealer Lackierprozess- Definition

Wie bereits im Abschnitt 4.5 beschrieben, besteht der „Ideale Lackierprozess“ lediglich aus den so genannten wertschöpfenden Lackierabschnitten, ohne lackierfremde Operationen und wäre im Idealzustand die 100%-Umsetzung des vorgegebenen schlanken Lackierprozessplans für das jeweilige Fahrzeugmodell. Alle nicht werterhöhenden und lackierfremden Prozessabschnitte sind eliminiert! Die Herstellkosten würden bei diesem Ablauf konkret dem geplanten Prozessplan entsprechen, alle Aufwendungen und Kosten für Schleifen, Polieren und Nachlackier-Umfänge können entfallen.

Für die lackierfremden Operationen, wie Abdicht-, Unterbodenschutz und Dämmstoffe müssen alternative Konzepte und Lösungen außerhalb der Lackiererei entwickelt, erprobt und umgesetzt werden.

Im Vergleich zu realen Herstellkosten können die Einsparungen mit ca. 20-30 % angesetzt werden.

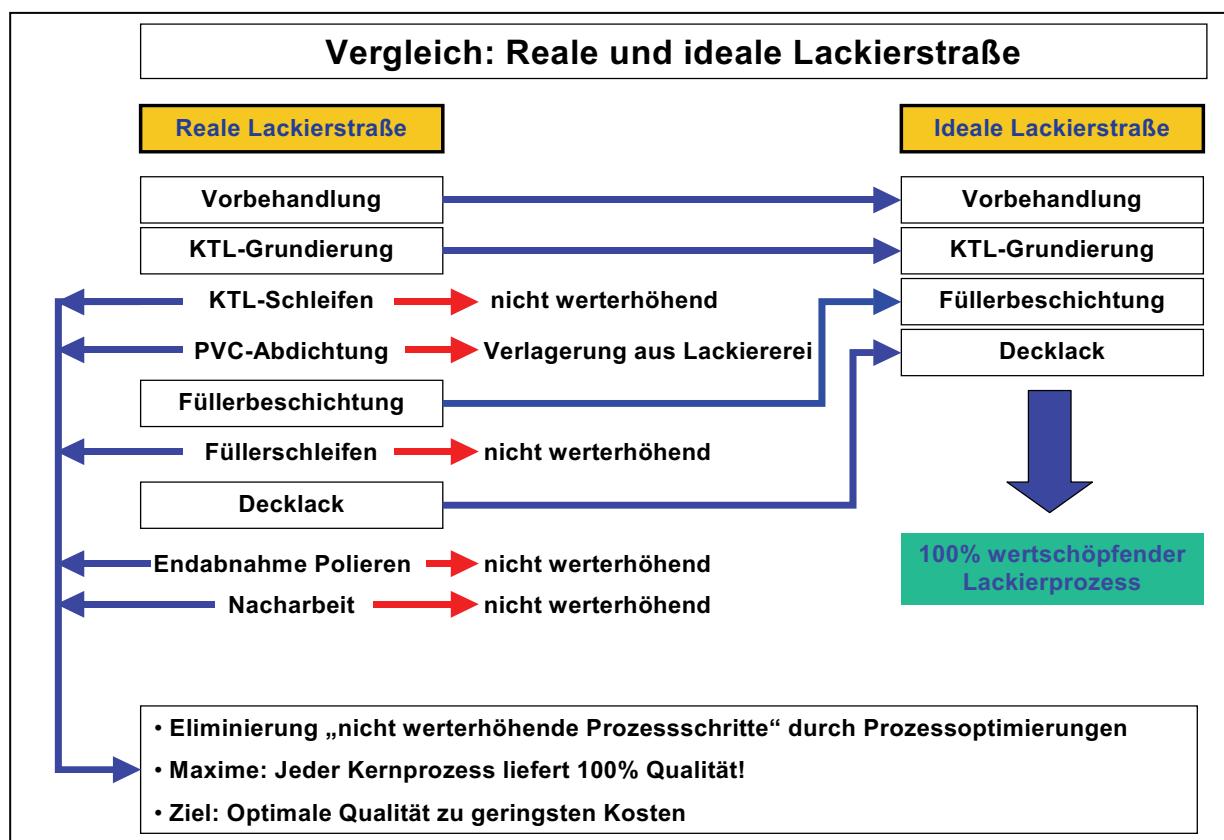


Abb. 4.5.2-1 Vergleich Reale -- Ideale Lackierstrasse

Wie erreicht man diesen idealen Lackierprozess?

Die einzelnen Lackierkernprozesse müssen mit einer 100%ige Prozesssicherheit ausgestattet sein. Das heißt anders ausgedrückt, dass die Beschichtungs-Qualität

nach jedem Kernprozessabschnitt fehlerfrei sein muss und ohne jegliche Korrektur oder Nacharbeit in den nächsten Prozessabschnitt einläuft.

Im Ansatz ist diese Idee nicht neu, denn dieses Ergebnis muss ja ohnehin das Ziel eines jeden Prozesses, beziehungsweise jeder Lackieranlage sein.

Dennoch müssen aus der Erfahrung besondere Wege gegangen werden um dieses hohe Ziel zu erreichen. Im Folgenden werden die einzelnen Ansätze strukturiert dargestellt.

#### 4.5.2.1 Lackierkernprozess – ohne PVC

Die „Ideale Lackierstrasse“ ist definiert als eine Lackierschrittfolge im kürzesten Zeitablauf ohne jegliche Beeinträchtigung durch lackierfremde Prozessschritte.

Im Schwerpunkt sind die zurzeit noch in vielen Lackierereien vorhandenen Abdicht- und Unterbodenschutzbereiche und Arbeitsstrecken mit der Verwendung und Applikation der verschiedensten PVC-Materialien, sowie Dämmmaterialien, generell zu eliminieren.

Belastend kommt hinzu, dass der überproportional hohe Personaleinsatz in diesen PVC-Bereichen aufgrund des geringeren Automatisierungsgrades im Vergleich zur Füller- und Lackapplikation zu weiteren Unsicherheiten im Lackierablauf führt. Intensive manuelle Arbeitsgänge im Innen- und Außenbereich der Karosserien führen trotz intensiver Vorkehrungen und Schulungen zwangsläufig zu zusätzlichen Staubbelastungen und Fremdstoffkontaminationen.

Die PVC-Bereiche, die überwiegend zwischen KTL- und Füllerbereich installiert sind, führen zu einer deutlichen Verlängerung der Verweilzeiten der Karosserien und weiter zu einer mehr oder weniger starken Belastung der Karosserien mit Staub- und PVC-Partikeln, die trotz aufwendiger maschineller und manueller Reinigungen dennoch Spuren hinterlassen und somit die Endlackierungsqualität negativ beeinflussen. Häufig führen diese zum Teil nicht sichtbaren Kontaminationen im Mikrobereich zu Störungen der Oberflächenspannungen im späteren Lackierablauf und in der Folge dann zu sichtbaren Oberflächenfehlern. Die Erkennung und Beseitigung der Erst-Fehler sind in der Regel lackiertechnisch problematisch und führen beim Schleifen nicht selten zu Durchschliffen und zu Folgefehlern.

Die Eliminierung aller PVC-Umfänge innerhalb des Lackierprozesses führt zwangsläufig zu veränderten Karosseriekonstruktionen und zu veränderten Fertigungsabläufen. So müssen bestimmte Umfänge, wie z.B. Türen- Bördelnaht-Verklebungen bereits im Karosseriebau durchgeführt werden. Andere Umfänge, wie z.B. Dämmmatten, müssen erst nach dem Lackierdurchlauf, ansatzweise im Bereich der Hohlraumkonservierung oder in der Endmontage, eingebracht werden.

Weitere Umfänge müssen konstruktiv gelöst werden, z.B. Ersatz des PVC-Unterbodenschutzes durch Unterboden- Verschalungen, die im Montagebereich einzubringen sind.

Die Eliminierung aller genannten lackierfremden Umfänge als Grundvoraussetzung für die ideale Lackierstrasse führt dann zu einem kurzen, höchst sauberen und effizienten Lackierablauf und ist aus der Gesamtsicht in Richtung Qualität, Kosten und Terminablauf unternehmerisch äußerst empfehlenswert.

#### 4.5.2.2 Einführung von Teamstrukturen

Zur Sicherstellung einer ganzheitlichen Vorgehensweise bei der Konzeption, der Planung und dem Betreiben eines idealen Lackierablaufes sind die fachlichen und zeitlichen Schnittstellen grundsätzlich aufzuheben.

Das zu schaffende Organisations-Teammodell ist so aufzustellen, dass alle Fachsäulen von den Entwicklungs- und Planungsabteilungen über einzelne Fachabteilungen, z.B. Controlling, Instandhaltungsabteilungen, Prozesstechnik, Technisches Büro sowie die eigentlichen Lackierbetreiber unter einem Dach in einer Teamstruktur arbeiten (Lack-Team-Center).

Der Teamleiter koordiniert die Teamaktivitäten unter dem gesetzten Ziel eines „Idealen Lackierprozesses“, er trifft letztendlich die erforderlichen Entscheidungen und vertritt diese nach außen gegenüber dem Top-Management und den sonstigen Bereichen, wie Betriebsrat, Behörden u.s.w.

Weiter muss die grundsätzliche Bereitschaft im Top Management bestehen, die volle Verantwortung dem Team zu übertragen und keine Teilbetrachtungen vorzunehmen und abzufragen, um nicht den ganzheitlichen Ansatz und das Erreichen des optimalen Ergebnisses zu gefährden. Aus den Erkenntnissen des Autors wird es mit Sicherheit dazu führen, in den Kernprozessen zur Erfüllung der maximalen Prozesssicherheit den investiven Aufwand zu erhöhen, auf der anderen Seite entfallen jedoch die Nacharbeitsbereiche und die Herstellkosten können wegen verringertem Personal- und Betriebsmitteleinsatz deutlich niedriger angesetzt werden. Unter dem Strich wird als Gesamtergebnis eine deutliche Kostensenkung bei konstanter Qualität und besserer Termintreue darstellbar und erreichbar sein.

Bei den Teammitgliedern sollte unbedingt die bisherige Abteilungszugehörigkeit dauerhaft aufgehoben werden, denn sowohl der Teamleiter als auch die Teammitglieder werden, abweichend zu früheren Ansätzen, dann nach der Planung und Errichtung dieser „Idealen Lackieranlage“ nahtlos in die Betreiberrolle wechseln. Dieser Ansatz hat nach der Meinung des Autors einen außerordentlich wichtigen Wert, da vom ersten Entwurf an klar ist, dass der Weg nur gemeinsam zum Erfolg führt. Auch die Motivation des Teams wird nach intensiver Vorbereitung und Planung durch die dann erfolgreiche Umsetzung dieses schlanken Prozesses sehr positiv beeinflusst.

Um es noch einmal deutlich zu machen, das Team muss per verbindlicher Absprache von der Stunde „0“ an zusammengeschweißt werden und weit über die Inbetriebnahme der Anlagen, die so aufgestellte Lackiererei über mindestens drei bis fünf Jahre gemeinsam und verantwortlich betreiben.

#### 4.5.2.3 Einzelbetrachtungen „Idealer Lackierprozess“

Aus der Sicht des Autors werden die wesentlichen Teilprozesse einer Automobil-Lackierstrasse detailliert betrachtet und die Änderungen und Verbesserungen aufgezeigt. Die Darstellungen enthalten zum Teil bekannte Erkenntnisse, jedoch in einer Gesamtbetrachtung ergeben sich bei konsequenter Umsetzung deutliche Verbesserungen. Wichtig ist die Erkenntnis, dass nur die lückenlose Aneinander-Reihung von optimierten Teilprozessen den Erfolg garantiert.

Beachte: „Die Kette ist nur so stark, wie das schwächste Glied“

#### 4.5.2.3.1 Qualität Rohkarosserie

Vor der Übergabe der Rohkarosserien vom Karosseriebau an die Lackiererei muss eine optimale Karosseriequalität definiert werden. Die diesbezüglichen Schwerpunkte liegen in der Einhaltung der definierten Blechrauhigkeit, der Einhaltung einer definiert glatten fehlerfreien Blechoberfläche sowie einer grundsätzlich gereinigten schmutzfreien und lackierfähigen Karosserie.

Mit dem Ziel, der Übergabe eines lackierfähigen Feinstfinish ist von Optimierungen im gesamten Blechprozess vom Presswerk bis in die einzelnen Karosseriebau-Bereiche auszugehen.

Technische Verfahren zur Oberflächenkontrolle dieser Kriterien sind in der Art von Bodywash-Anlagen, sowie entsprechenden Benetzungsmedien(z.B. Olium) bekannt, erprobt und wirksam. Vor der Übergabe der Rohkarosserien an die Lackiererei sollte entsprechend verabredeter Qualitätskriterien eine Abnahme und Freigabe der Karosserien durch Lackierereipersonal erfolgen. Eine Zurückweisung bei Nichteinhaltung der Qualitätsstandards ist vorzusehen.

#### 4.5.2.3.2 Reinraumkondition – Lackierstrasse

Für den gesamten Lackierstraßenablauf mit den einzelnen Teilprozessen und Anlagenkomplexen gilt das festgelegte Reinraumkonzept mit anlagentechnischen und organisatorischen Vorgaben und Festlegungen.

Hervorzuheben ist die komplette Einhausung aller Förderstrecken mit entsprechender Reinraumbelüftung, weiter die entsprechende Luftkonditionierung in den verschiedenen Lackieranlagen und die personenbezogenen Richtlinien zur faserfreien Bekleidung mit den entsprechenden Verhaltensrichtlinien. Logischerweise gelten die Organisationsregeln für alle Personen, ob im direkten Fertigungsbereich oder im indirekten Bereich über 24 Tagesstunden und 7 Wochentage.

Wie unter 4.5.2.1 beschrieben, geht der Autor von der Realisierung eines Lackierkern-Prozesses ohne lackierfremde Medien, wie PVC oder sonstige Materialien aus. Die Lackierschrittfolge hätte die kürzestmögliche räumliche Länge. Unter dieser Voraussetzung wäre der Reinigungsaufwand vor den jeweiligen Applikationsbereichen Füller und Decklack auf ein Minimum zu beschränken. Die Installation von automatisierten Reinigungsanlagen ohne weitere manuelle Reinigung würde vollkommen ausreichen. Von der Anlagentechnik kämen bewährte Techniken, wie der Einsatz von EMU- Anlagen und Blow-Off Anlagen in Frage.

#### 4.5.2.3.3 Vorbehandlung – Elektrotauchlackierung

Die Vorbehandlung und Elektrotauchgrundierung der Karosserien erfolgt entsprechend der chemischen Prozessfolge in den entsprechenden Anlagen, jedoch entsprechend der später dargestellten Erkenntnisse mit strömungstechnisch und filtertechnisch optimierten Bädern und der Behebung weiterer Schwachstellen.

Die strömungsmechanische Optimierung der Karosserievorbehandlungsanlagen ist Gegenstand dieser Dissertation und gibt sehr konkrete und abgesicherte Ergebnisse für die strömungstechnische Auslegung der Behandlungsbäder.

Bei Neuplanungen sind moderne Vorbehandlungssysteme, wie „Vario-Shuttle“ oder „Ro-Dip“ bezüglich ihrer Prozesssicherheit gegenüberzustellen und zu bewerten.

Die optimierte KTL-Oberfläche der grundierten Karosse bedarf dann keiner weiteren Nacharbeit in der Art von seriellen Schleifoperationen.

Bestenfalls wäre ein Prüfplatz vorzusehen, um die Oberflächengüte visuell zu kontrollieren sowie Schichtdicken zu messen und statistisch zu erfassen.

Die heute noch üblichen KTL-Schleifstrecken können bei diesem ganzheitlichen Vorgehen entfallen. Einsparungen der Investitionen, des Personals, der Fläche, des Energieverbrauches und sonstiger Hilfsmittel können entsprechend ausgewiesen werden.

Generell kommt der Grundierungsqualität ein hoher Stellenwert zu, denn, wenn es gelingt ohne Nachschleifoperationen in den nächsten Prozessabschnitt des Füller-Abschnittes einzutreten, sind die besten Voraussetzungen für eine optimale Fortsetzung der Lackierprozesses gegeben.

#### 4.5.2.3.4 Füllerbeschichtung

In den letzten Jahren sind immer wieder füllerlose Prozessfolgen(z.B. Eco-Concept) für die Automobillackierung in der Diskussion. Hierzu wurden umfangreiche Versuche und Untersuchungen seitens der namhaften Lackhersteller gemeinsam mit den deutschen Automobilherstellern, so auch mit der Volkswagen AG durchgeführt.

Es gibt positive Erkenntnisse, jedoch ist aufgrund bestimmter Qualitätskriterien noch keine Serienreife gegeben, sodass zurzeit von keiner generellen Entscheidung eines Entfalls des Füllers auszugehen ist.

Grundsätzlich wären natürlich sowohl aus der Kostensicht und aus der Sicht der Prozesssicherheit ein Entfall und die Reduzierung von Fehlern möglichkeiten ein sehr lukrativer Weg.

Der Autor geht also vom prozesstechnischen Stand einer notwendigen Füller-Beschichtung aus und empfiehlt diesbezüglich folgende Optimierungen.

Die Füllerbeschichtung sollte generell auf die Außenflächen begrenzt sein und die komplette Füllerkabine sollte ohne manuelle Operationen ablaufen, mit dem Vorteil keine weiteren Fehlern möglichkeiten durch manuelle Schwankungen und Verschmutzungsrisiken entstehen zu lassen. Die zu bevorzugende Variante für die Füller-Applikation sollte ein rein maschinelle Beschichtung mit ESTA- Anlagen oder noch besser mit den moderneren und flexibleren Lackierrobotern sein.

Aus Umweltschutzgründen sollte generell wasserverdünntbarer Füller mit abgesicherter Serienqualität zum Einsatz kommen.

Weiter sind alle Möglichkeiten einer automatisierten Qualitätserfassung und entsprechender Regelung vorzusehen und zu integrieren. (z.B. Schichtdicken-Regelung mit Robotertechnik)

Wie bereits unter 4.5.2.3.2 erwähnt, sind besonders im Füller- und im folgenden Lackbereich die Grundsätze der Reinraumphilosophie konsequent einzuhalten.

Weitere Einzeloptimierungen sind denkbar, diese sollten jedoch aus der Fachkenntnis der Teammitglieder abgeleitet werden.

Auf jeden Fall ist, wie bei der KTL-Beschichtung, eine fehlerfreie Füllerbeschichtung zu erreichen, um die bisher übliche Füllerkontroll- und Schleifstrecke entfallen zu lassen. Entsprechende Einsparungen analog zur KTL-Situation können auch hier wieder ausgewiesen werden.

#### 4.5.2.3.5 Decklackbeschichtung

Prinzipiell sind im Decklackbereich die Grundsätze der Reinraumphilosophie in der gleichen Konsequenz, wie im Füllerbereich anzuwenden. Da jedoch von manuellen Teillackierungen auszugehen ist, bekommen die personenbezogenen Verhaltens-Regeln für die Absicherung der Reinraumkonditionen eine besondere Bedeutung.

Als Applikationstechnik sollte der neuzeitlich eingesetzten Roboterlackierung mit ESTA-Glocken-Technik der Vorzug gegeben werden. Zum einen besteht eine verbesserte Möglichkeit mehrere Karosseriemodelle formgerecht optimiert zu lackieren und der Anteil einer größtmöglichen automatisierten Innenlackierung, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Handlingsrobotern, ist auszuschöpfen. Wie im Füller sollte auch hier eine kontinuierliche automatisierte Beschichtungs-Datenerfassung und Regelung vorgesehen werden.

Die Farbversorgung sollte über kürzestmögliche Ringleitungen erfolgen, im Idealfall sollte der Farbversorgungsraum im direkten Umfeld der Spritzkabine installiert sein. Damit werden Temperaturschwankungen und Viskositätsschwankungen oder auch sonstige Einflüsse auf das Farbmedium deutlich minimiert und eventuell notwendige Farbkorrekturen können deutlich schneller erfolgen.

Sonderfarben für kleinere Losgrößen sollten abweichend von den Serienfarben direkt in diesem Raum hergestellt werden.

Die gesamte dann nahe liegende Lackversorgung sollte aus Gründen der schnellen und direkten Kommunikation und Reaktion, dem verantwortlichen Decklackpersonal zugeordnet werden. Eine Teambildung direkt mit dem Lacklieferanten vor Ort wäre auch denkbar und bei entsprechender vertraglicher Ausgestaltung auch sinnvoll.

Die Decklacktrockner und eventuelle Zwischentrockner müssen bezüglich der Luftführung und Filterung dem neuesten technischen Stand entsprechen.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, technische Vorkehrungen zur Vermeidung von Schmutzeinschleppungen durch Karosserwarenträger (Lackschlitten) in die Trockner zu treffen.

Am Ende der Decklacklinie muss eine fehlerfreie Lackoberfläche erzeugt sein! So gesehen wird lediglich eine Kontrollstation für die Qualitätskontrolle und Datenerfassung erforderlich sein. Im Sinne einer Qualitätsoptimierung und Regelung kann von hier aus in den Lackierprozess hinein agiert werden.

#### 4.5.2.3.6 Entfall „Reparatur-Lackierung“

Im idealen Lackierstraßenablauf entfallen grundsätzlich alle Nacharbeitsbereiche! Sämtliche zusätzlichen Strecken, Plätze, Kabinen und die dazu gehörenden Fördereinrichtungen für eventuell anfallende Nacharbeit mit der entsprechenden personellen Vorhaltung sind zu eliminieren beziehungsweise bei Neuplanungen nicht vorzusehen.

Der kostenmäßige Vorteil einer derartigen bahnbrechenden Konzeption ist im Vergleich zu heutigen Konzeptionen mit Nacharbeitsanteilen von 10 bis 25 %, je nach technischem Stand, als äußerst lukrativ und wettbewerbsfördernd anzusehen. Weitere qualitative Vorteile ergeben sich durch Weitergabe der Lackierungs-Erstqualität aus dem Originallackierprozess. Obwohl die heutigen Lackiernacharbeiten prozesstechnisch abgeprüft sind, gibt es durch zum Teil minimale optische Erkennungsmerkmale einer Nachlackierung, in bestimmten Fällen bei sensiblen Kunden auch Beanstandungen.

#### 4.5.2.4 Zusammenfassung Kernelemente „Ideale Lackierstraße“

Die Zusammenfassung aller wesentlichen innovativen Kernelemente der „Idealen Lackierstrasse“ führt in einer ganzheitlichen Betrachtung zu einer qualitativ hoch anzusiedelnden Fahrzeuglackierung bei gleichzeitig deutlich optimierter Kostenstruktur und Verbesserung der Produktivität.

Im Einzelnen werden die wesentlichen Kernelemente zusammenfassend aufgezeigt:

- Feinstreinigung und Feinstfinish der Rohkarosserien mit Freigabe durch die Lackiererei
- Kürzeste räumliche Aneinanderreihung der reinen Lackierprozessschritte
- Minimalste Länge der Lackierstrasse, reine Perlenkettenfertigung
- Eliminierung sämtlicher lackierfremder PVC- und Abdichtoperationen, incl. der Dämmstoffe (Entwicklung alternativer Konzepte)
- Konsequente Anwendung der Reinraumphilosophie, im Prozess, in der Anlagentechnik und bei allen Lackierereimitarbeitern.
- Totale Einhausung aller Lackierbereiche und Förderstrecken
- Entfall von Nacharbeit innerhalb und außerhalb der Lackierlinie
- Keine Vorhaltung von Ausweichstrecken und Puffern
- Der Begriff „Nacharbeit“ wird aus dem Lackervokabular gestrichen und durch „Prozessoptimierung“ ersetzt.
- Hoher Automatisierungsgrad der Applikationsbereiche mit modernster Technik
- Option für füllerlosen Lackierprozess vorsehen
- Zielsetzung, keine manuellen Operationen an der Karosserieaußenfläche
- Hoher Ausbildungsgrad des gesamten Lackier- und Dienstleistungspersonals
- Hohe Fachkompetenz und Teamfähigkeit des Lackierereipersonals
- Einführung von durchgängigen Teamstrukturen in der Lackiererei
- Installation eines Steuerkreis auf der Ebene Lackierereileitung und Werkmanagement sowie Fachverantwortliche

Jedes einzelne Kernelement steht für das Gesamtergebnis, eine Teilrealisierung führt zu einer überproportionalen Einschnürung der gesamten Zielsetzung.

Der Autor empfiehlt im Sinne der Ausschöpfung aller positiven Effekte die komplette Umsetzung.

#### 4.5.2.5 Umsetzungsschritte „Ideale Lackierstrasse“

Die aufgezeigte „Ideale Automobil-lackiererei“, ohne jegliche Art von Nacharbeit in kürzester schlanker Aneinanderreihung reiner Lackierschritte, und in einer hermetisch abgeschlossenen Reinraumeinheit angeordnet, bedarf logischerweise einer umfangreichen und intensiven Vorbereitung.

Wegen der umfangreichen Auswirkungen auf die Fahrzeug-Konstruktion und auf den gesamten Fabrikablauf, sieht der Autor an erster Stelle das Bekenntnis des Vorstandes und des Top-Managements zu dieser grundlegend veränderten Fertigungsphilosophie. Im Fall einer positiven Bestätigung sollten Verantwortlichkeiten definiert werden und die Zielsetzung in einem Masterplan festgeschrieben werden.

Es empfiehlt sich ein Projektteam „Ideale Lackiererei“ zu benennen und regelmäßig den Fortschritt in einem Vorstandssteuerkreis zu berichten und notwendige Entscheidungen zu treffen. Die Einzelziele und zu erwartenden Ergebnisse müssen in einem Lastenheft festgelegt werden.

Neben den konstruktions- und fabrikorientierten Maßnahmen kommt der reinen Lackier- und Anlagentechnik eine wesentlich höhere Bedeutung zu. Diese Herausforderung bedeutet für die anlagenplanenden internen Bereiche und für die Lackieranlagenindustrie eine 100%ige Sicherstellung der Qualität nach jedem Lackier-Prozessschritt. Hierfür müssen eindeutig im Vergleich zu heutigen Anlagenkonzepten deutlich verbesserte Lackiersysteme mit wirkungsvollen Elementen der Prozess-Überwachung und Regelung entwickelt und erprobt werden. Hier reicht es nicht mehr eine Qualität in einer Ausschreibung zu definieren und ein Anlage nach dem günstigsten Angebot zu bestellen, sondern es muss die beste und innovativste Anlagenfirma benannt werden und in einem partnerschaftlichen Vertrag muss die „0-Fehler-Philosophie“ ausdrücklich verbrieft werden.

Der Autor empfiehlt nach einer Vorversuchphase in Technikumsanlagen der Anlagenhersteller und der Lacklieferanten, aber auch nach Einzelversuchen in vorhandenen Lackieranlagen in der Automobilindustrie, und dem Vorliegen abgesicherter Erkenntnisse, in einem weiteren Schritt die Erstellung einer Pilot-Lackierlinie. In dieser Pilotanlage mit einer begrenzten Stückzahl sollten alle Einzel-Optimierungen integriert sein und in einem Gesamtverbund betrieben und weiter optimiert werden. Diese Phase sollte bis zum Erreichen eines abgesicherten Produktionsreifegrades mit dem gewünschten Ergebnis fortgeführt werden.

Danach kann die schrittweise Umstellung einer Groß-Lackieranlage erfolgen.

Im Idealfall wäre dann bei der Errichtung eines neuen Werkes oder einer neuen Lackiererei dieser „Ideale Lackierprozess“ zu implementieren.

#### 4.6 Realisierte Optimierungsprojekte

Die näher dargestellten Optimierungsprojekte beziehen sich auf die Lackiererei des Volkswagen-Nutzfahrzeugwerkes am Standort Hannover.

Der Autor hat die unter 4.6.1 aufgeführten Projekte überwiegend persönlich initiiert. Der innovative Anteil sowie die Effekte auf den Gebieten der Qualität, der Durchlaufzeiten sowie des Produktivitäts- und Kostenfortschrittes sind hervorzuheben. Es gilt als abgesichert, dass die genannten Verbesserungen und Einsparungen nachhaltig sind und weitere „Scale-Effekte“, wie zum Beispiel die Stilllegung von Anlagen- und Nacharbeitsbereichen, eingetreten sind oder noch folgen werden. Die Umsetzung erfolgte in Teamstrukturen, die Teamleitung und die übergeordnete Terminverfolgung nahm der Autor wahr.

Das strategische Vorgehen einer permanenten Prozessoptimierung ergibt sich aus folgenden wesentlichen unternehmerischen Zielen:

- Ständige Verbesserung der Qualität mit dem Ziel „Best in Class“
- Produktivitätsverbesserungen, abgeleitet aus Benchmark-Daten
- Erreichen der Kostenreduzierungsziele in allen Kostenarten
- Niedrige und planbare Durchlaufzeiten „Perlenketten-Philosophie“
- Umsetzung von Umweltschutzzielen, wie Emissionsreduzierung, verringelter Energieeinsatz, Lösemittelreduzierung, Reduzierung von Lackverlusten, verringelter Frischwassereinsatz sowie Abwasser- und Abfallreduzierungen.

Aus den Erkenntnissen der umgesetzten Optimierungsprojekte kann eindeutig abgeleitet werden, dass Fortschritte in einem Schwerpunktziel in der Regel auch

Verbesserungen in weiteren Zielbereichen bewirken. Dieser positive Mehrfach-Effekt spricht für die Effizienz von erfolgreichen Prozessoptimierungen.

So führen beispielsweise qualitätsorientierte Verbesserungen zu einer verringerten Nacharbeitsquote, damit zu verringerter Durchlaufzeit und zu einer Verringerung der Herstellkosten und sogar zu einer Reduzierung der Emissionen. In einem anderen Beispiel führten Lösemittelreduzierungen nicht nur zu einer deutlichen Verringerung der Umweltbelastung sondern weiter zu einer wesentlichen Kostenreduzierung.

Eine weitere Erkenntnis ist die Einbindung der gesamten Lackierereimannschaft und aller Fachgruppen in die Prozessoptimierungsphilosophie. Es geht hierbei nicht nur um die größeren Projekte, die häufig einer längerer Vorbereitung und Umstellung bedürfen, sondern auch die kleineren und schnell umsetzbaren Verbesserungen haben ebenfalls einen positiven und nicht zu unterschätzenden Effekt auf die Verbesserung des Gesamtergebnisses und auf die Mitarbeitermotivation.

Die gesamte bisherige Optimierungsphase war mehrjährig angelegt, wobei in der frühen Phase die Ideenfindung, die Planung, die Beschaffung der Finanzmittel und die technische Umsetzung dominierte und in den nachfolgenden Jahren traten dann zunehmend Verbesserungen ein, und mit jedem weiteren Projekt war dann ein deutlicher Scale-Effekt zu verzeichnen.

Ausgehend vom damaligen Ist- Zustand in der Projektstartphase wurden neben den Kernlackierbereichen Vorbehandlung, Grundierung, Füller- und Lackbereich auch die Nachlackierbereiche intensiv auf mögliche Verbesserungen untersucht. Nachlackier-Bereiche befinden sich am Auslauf der Erstlackierung im Hauptlackiergebäude, aber auch im Bereich der Fahrzeugendmontage, beide Bereiche gehörten zu dieser Zeit zur Organisationseinheit der Lackiererei.

Als wichtige Erkenntnis möchte der Autor darauf hinweisen, dass die Erfolgs-Prognose von Prozessoptimierungsprojekten in einer vorhandenen Lackiererei-Struktur fachlich abgesichert sein muss, dennoch besteht von Fall zu Fall ein gewisses Restrisiko. Deshalb muss aus dem Fachwissen der Lackierspezialisten heraus und aus den Ergebnissen von Benchmark-Lackierereien eine gewissenhafte Abschätzung der Effizienz erfolgen. Die so vorbereitete und getroffene Entscheidung sollte dann mit Nachdruck vertreten werden und zur Umsetzung gebracht werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Projekte zur Prozess-Optimierung in der Lackiererei Hannover dargestellt:

#### 4.6.1 Gesamtüberblick Prozessoptimierungsprojekte

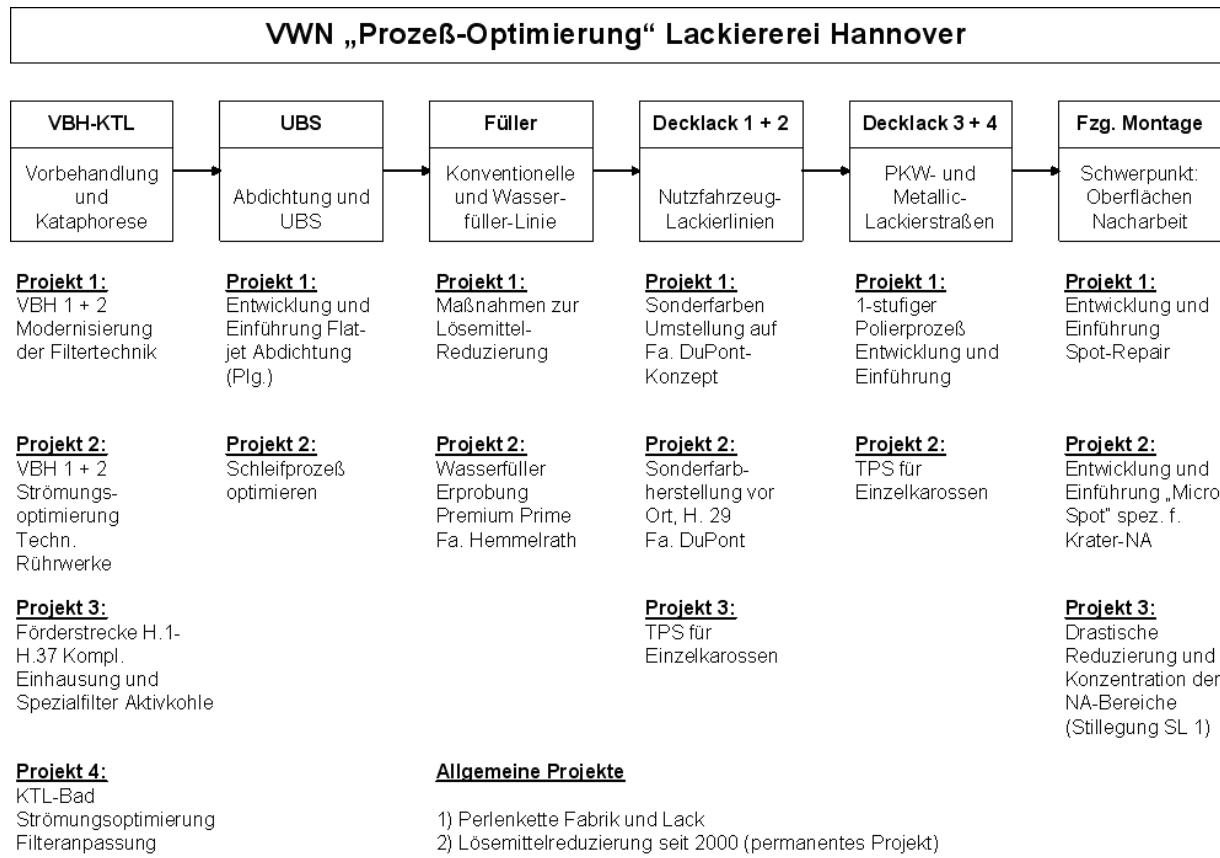


Abb. 4.6.1-1 VWN-Lackiererei Hannover - Prozessoptimierung

#### 4.6.2 Kurzbeschreibung der Einzelprojekte nach Fertigungsabschnitten

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Projekte strukturiert nach Anlagen oder nach übergeordneten Schwerpunkten dargestellt.

##### 4.6.2.1 Vorbehandlung-KTL

- Verbesserung der Strömungskonditionen in den Tauchbädern Entfettung und Phosphatierung durch Einbau von Tauchmotor-Rührwerken.

Ergebnis : Verbesserter Reinigungseffekt und optimale Ausbildung der Phosphatierschicht, sowie Vermeidung von Beschichtungs-Fehlstellen durch Luftblasenbildung (z.B. Dachunterseite)

- Optimierung der Badpflege in den Vorbehandlungszenen durch Einsatz von Magnetabscheidern zur Eliminierung von ferritischen Partikeln sowie Einsatz von Zentrifugalabscheidern zur Filtration von mineralischen Partikeln. Weiter Ölfrachtreduzierung durch Einsatz von Ölskimmern.

Ergebnis : Schmutzpartikelreduzierung in der KTL- Schicht um 30 %

- KTL-Team zur Reduzierung der KTL-Tropfen und KTL-Läufer an bestimmten Karosseriestellen, z.B. an Blechdoppelungen und an Falzen.

Ergebnis: Minimierung des Läuferanteiles um ca. 60 %, damit geringerer Schleifaufwand sowie Vermeidung von Folgefehlern.

- „Strömungsmechanische Optimierung der Vorbehandlungsanlagen“

Diese Optimierung ist der wissenschaftliche Schwerpunkt dieser Dissertation. Die theoretischen Grundlagen wurden erarbeitet und ein wissenschaftlich fundierter Lösungsweg wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Universität Rostock entwickelt. Die ermittelten Ergebnisse sind in die Optimierung des KTL-Bades in der Art einer umfangreichen Veränderung des gesamten Düsen- und Umwälz- und Filtrationssystems eingeflossen. Die detaillierte Beschreibung erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

Ergebnis: Verbesserte fehlerfreie Ausbildung der KTL-Schicht und Partikelreduzierung um weitere 35 %, besonders auf den waagerechten Flächen.

#### 4.6.2.2 Karosserieförderstrecke zwischen KTL- und Füllerbereich

Komplette geschlossene Tunneleinhausung zwischen dem KTL-Bereich in der Halle 1 und dem Füllerbereich in der Halle 29

Technische Beschreibung:

- Einhausung des gesamten Karosserieförderweges
- Separater Lufthaushalt zur Erzeugung eines Überdruckes im Tunnel
- Frischluftversorgung aus dem Außenbereich mit zweifacher Luftfiltration und Einsatz von Aktivkohlefiltern mit Silikonsperrfunktion
- Technische Daten :
  - Einhausungsvolumen : 30.000 m<sup>3</sup>
  - Zuluftleistung : 90.000 m<sup>3</sup>
  - Schnelllauftore : 9 Stück

Ergebnis: 

- Verringerte Staubbelastung im normalen Prozessdurchlauf
- Vermeidung von Schmutzeinbrüchen nach Stillstandzeiten, z.B. nach Wochenenden und Feiertagen
- Krateraufkommen KTL-Füller gegen „0“
- Deutliche Stabilisierung der Direktläuferquote
- Durchschnittliche Reduzierung der Nacharbeit um 10%

#### 4.6.2.3 Maßnahmen zur Lösemittelreduzierung

- Einsatz von Aerosoldüsen- Spülung beim Farbwechsel
- Verringerung der Farbwechselmenge durch Versetzen des Farbwechslers
- Einsatz von Kaskadenspülprozessen
- Veränderung des Spülmodus bei Farbdosierpumpen im Füller
- Diverse organisatorische Verbesserungen, initiiert durch Einsatz eines Arbeitsteams „Lösemittelreduzierung“

Beispiele:

- Verringerung der täglichen Ausgabemengen
- Aufzeichnung der Verbrauche pro Meisterschaft
- Mehrfachnutzung der Reinigungslösemittel

Ergebnis :

- Reduzierung der spezifischen Lösemittel-Einsatzmenge pro Karosserie um 50 % von 16 auf 8 kg/Karosse
- Deutliche Verringerung der Lösemittel- und Lackmaterial-Kosten ( Durchschnittliche Einsparung: 2 Mio. / Jahr )
- Weitere positiven Effekte im Hinblick auf Ressourcenschonung, Umweltschutz, Arbeitsschutz und Brandschutz.

#### 4.6.2.4 Sonderfarben- Innovationskonzept

##### 4.6.2.4.1 Einsatz TPS-System

Produktionsorientierte Optimierung und Einsatz eines programmgesteuerten TPS Systems (Tracking-Point-System) zur absoluten Minimierung von Lack- und Verdünnermengen bei Sonderfarblackierungen.

Mittels eines so genannten Molches wird vor einem anstehenden Farb-Wechsel die Restfarbmenge in der Farbleitung zum Sprühorgan nahezu vollständig für die Lackierung eingesetzt. Die Minimalspülung erfolgt dann über LM-Luft-Pulsation mit geringstem Lösemitteleinsatz.

##### 4.6.2.4.2 Einsatz „ DuPont- Lacksystem“

Umstellung auf ein LM-Lacksystem mit wesentlich höherer Deckkraft (Centari-Qualitätseffekt). Umfangreiche Versuche zum Freifahren und Absichern von mehr als 300 Sonderfarbtönen waren erforderlich.

##### 4.6.2.4.3 Einsatz Sonderfarben-Lackfertigung (Mini-Lack-Fabrik )

Sonderfarben werden nicht mehr angeliefert, sondern werden innerhalb der Lackiererei- Halle hergestellt und direkt an der Lackierlinie bereitgestellt.

Die Bestellung und Disposition der einzelnen Sonderlacke erfolgt innerhalb der Lackiererei auf kürzestem Weg.

Die Räume und das Equipment wurden von VW bereitgestellt und die Farbenfertigung erfolgt im Rahmen eines Überlassungsvertrages durch die Firma DuPont mit eigenem Personal.

Ergebnis :

- Direktlaufrate um ca. 20% erhöht, damit vergleichbar zur Serienfarbenlackierung
- Das Applizieren von separaten Vorlacken entfällt
- Deckkraftbedingte Doppel-Lackierungen sind entfallen
- Wesentliche Verkürzung der Durchlaufzeit in der Lackiererei damit positiver Effekt auf die „Fabrik-Perlenketten-Fertigung“
- Kundenfahrzeuge mit Sonderfarb-Lackierungen werden termingerecht ausgeliefert

- Keine Über- bzw. Unterdisposition von Lackmaterialien, damit keine Lackvernichtungsmengen
- Kundenfahrzeuge mit Sonderfarblackierung werden termingerecht ausgeliefert
- Verbesserung der optischen Lackqualität, bezüglich Struktur und Glanzgrad
- Deutliche Reduzierung der Herstellkosten (Materialkosten, Fertigungszeit, Nacharbeit- und Ausschusskosten)  
Gesamteinsparung Sonderfarb-Konzept : 800.000,- € / Jahr

#### 4.6.2.5 Produktoptimierung durch Reduzierung von Lackierumfängen (T5)

Reduzierung von Lackierumfängen in optisch untergeordneten Karosserie-Bereichen, wie Innenraum und Motorraum

Konkret:

- Entfall von Füller im Innenraum
- Entfall von Wasser-Basecoat und Klarlack im Motorraum

Ergebnis :

- Korrosionsschutzfunktion komplett gewährleistet
- Deutlicher Beitrag für Ressourcenschonung und Umweltschutz, Reduzierung an Lösemittel pro Jahr : 45.000 kg LM
- Kostenreduzierung um ca. 6,- € pro Karosse

#### 4.6.2.6 Stilllegung eines ESTA-Blockes (vorher Doppel ESTA)

Durch Optimierung der Fördergeschwindigkeit und der Applikationsorgane, bezüglich Drehzahl und Ausflussmenge, kann die geforderte Schichtdicke bei Beibehaltung des Struktur- und Glanzgradniveaus, mit nur einem ESTA- Block erfolgen.

Ergebnis :

- Stilllegung des zweiten ESTA-Blockes
- Mögliche Strategien mit dem freiwerdenden Block :
  - o Wechselnder Einsatz als Duplex-Anlage, zur Erhöhung der Verfügbarkeit und für parallele Wartung und Reinigung
  - o Ausbau des 2. ESTA- Blockes und Wiederverwendung
- Deutlicher Beitrag für Ressourcenschonung und Umweltschutz, Reduzierung an Lack und Lösemittel ca. 70.000 kg/a
- Kosteneinsparung an Lack, Lösemittel, el. Energie, Druckluft, Wartung und Reinigung ca. 100.000,- € / Anlage

#### 4.6.2.7 1-stufiger Polierprozess

Entwicklung und Einführung eines „Einstufigen Polierkonzeptes“ für den 2-Schicht-Decklackaufbau mit 2K-Klarlack

Ergebnis :

- Deutliche Reduzierung der Polieraufwendungen
- Abschluss des Polierprozesses innerhalb der Endabnahme
- Verbesserung der Lackqualität (keine Hologramme)
- Einsparung an Fertigungszeit und Materialkosten

#### 4.6.2.8 Großprojekt „Reduzierung Fertigwagen-Nachlackierung“

Gesetztes Ziel war die drastische Reduzierung der Nacharbeitskapazität mit der Freisetzung von Flächen und dem wertschöpfenden Einsatz des freiwerdenden Personals. Erster Ansatz : 50 % Reduzierung der Fertigwagen-Nachlackierung  
Schwerpunktaktivitäten :

- Umfangreiche Prozessoptimierungen innerhalb der Lackiererei, wie unter den Punkten 4.6.2.1 bis 4.6.2.7 näher beschrieben, sowie weiter nicht genannte Einzeloptimierungen über KVP-Workshops
- Einführung des so genannten „Scharfen Zählpunktes“, an den Endabnahmen der Lackierlinien, das heißt keinen Fehlerschlupf in die Fertigmontage
- Tägliche Abstimmung über die gesamte Fabrik-Prozesskette vom Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei bis zur Fertigmontage bezüglich Oberflächenfehler und deren schnellste ursächliche Abstellung
- Einsatz eines „Anti-Kratzer-Team“ in der Fertigmontage
- Einsatz eines „Nachlackier-Spezialisten-Team“ im Bereich Fertigwagen-Nachlackierung

Beispielhafte Optimierungen:

- Weitestgehende Umstellung von Teilflächen-Nachlackierung auf Spot-Repair-Nachlackierung
- Entwicklung und Einführung des Micro-Spot-Verfahrens zur Reparatur von Kleinstfehlern, wie Krater o.ä.

Ergebnis :

- Permanente Reduzierung des Nacharbeitsvolumens
- Nach der Stabilisierung der Prozessqualität konnten jeweils zuerst einzelne Schichten an den betroffenen Nacharbeits-Anlagen entfallen, später dann 50 % Stilllegung
- Meilensteine:
  - 4. Quartal 2004 Entfall Nachschicht
  - 2. Quartal 2005 Entfall Spätschicht
  - 3. Quartal 2005 Stilllegung Nacharbeit SL 1
- Einsparung Nacharbeitspersonal: 72 Mitarbeitern  
Diese Spezialisten konnten im Kernprozess der Lackiererei wertschöpfend eingesetzt werden.
- Weitere Einsparungen durch die Stilllegung in den Bereichen Energie, Wartung, Reinigung : ca. 90.000,- €/Jahr
- Verringerung der genutzten Fläche von 11000 m<sup>2</sup> auf 2500 m<sup>2</sup>, das entspricht einer Reduzierung um 77 %
- Restrukturierung eines verkleinerten neu gestalteten Nachlackierbereiches innerhalb des Finish- Bereiches der Fertigmontage ( 2. Quartal 2007 )  
siehe hierzu Bericht aus der VWN-Mitarbeiter Zeitung „News Transporter“ vom Mai 2007 mit dem Titel - Inbetriebnahme Zentraler Sonderlack - (siehe Abb. 11.5-1)

#### 4.6.3 Gesamtergebnis Prozessoptimierung – Projekte

Die aufgeführten Projekte zur Prozessoptimierung in der Lackiererei Kernfertigung und den Lackierumfängen in der Fertigmontage beziehen sich im Wesentlichen auf die Projektumsetzungen in den Jahren von 2000 bis 2005. Die kumulierende

Wirkung aller Maßnahmen, sowie die logische Fortsetzung der Prozess-Optimierungen in den Folgejahren, führen zu einer nachhaltiger Verbesserung aller Kosten- und Qualitäts- Kennzahlen und damit zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit.

Die bis zum Jahr 2005 umgesetzten Prozessverbesserungen bewirken eine nachhaltige Kostenreduzierung von 8 Millionen Euro pro Jahr.

Neben den aufgeführten monetären Verbesserungen wurden in den nachfolgenden Gebieten weitere Optimierungen erreicht:

- Stabilisierung und Verbesserung des Lackprozesses und der Lackqualität
- Verbesserung der Lackaudit- und Fahrzeugauditnoten
- Qualität vor Kunde spürbar verbessert (Auslieferungsqualität und Händler)
- Lackiererei- und Fabrikdurchlaufzeit deutlich verringert (Perlenkette)
- Verkürzung der Lieferzeit und Einhaltung der Liefertermine vor Kunde
- Resourcenschonung durch Energieeinsparungen, sowie Lack- und Lösemittelreduzierungen
- Reduzierung der Umweltbelastung durch Verringerung der Farb- und Lösemittelanteile
- Verbesserung der arbeitshygienischen Bedingungen durch Reduzierung beziehungsweise Entfall von manuellen Schleif- und Lackiertätigkeiten, besonders durch die deutliche Reduzierung von Lack-Nacharbeiten
- Freistellung von Fabrikflächen durch Reduzierung und Stilllegung von Nacharbeitsstrecken, beziehungsweise Nacharbeitsanlagen (Sonderlack 1)
- Insgesamt beruhigte und kontinuierliche Fertigung mit verlässlichen Schicht- und Tagesleistungen
- Das Meinungsbild über die Lackiererei stellt sich deutlich positiver dar
- Das Arbeitsklima und die Motivation der Mitarbeiter und der Vorgesetzten wurde sehr günstig beeinflusst

## 5 Grundlagen- Karosserievorbehandlung

### 5.1 Metallische Karosseriewerkstoffe

Für die Herstellung von Automobil-Karosserien kommen als Substrate überwiegend metallische Werkstoffe, wie Stahl, verzinkter Stahl und Aluminium zum Einsatz.

Bei diesen Metallen handelt es sich um chemische Elemente, die in der Natur nicht als reiner Stoff vorkommen, da sie als Metalle in einem thermodynamisch instabilen Zustand sind. Sie liegen deshalb als Oxide, Hydroxide, Karbonate oder andere stabile Metallsalze vor.

Der Prozess der Oxidation führt zu Oxidschichten, die je nach Art porös oder geschlossen sind. Während Zink und Aluminium in bestimmten pH-Bereichen stabile geschlossene Oxidhäute bilden und sich damit gegen einen Angriff durch Luftsauerstoff passivieren, entstehen bei der Oxidation von Eisen poröse Schichten. Wegen ihrer Durchlässigkeit für Sauerstoff und Wasser besitzen sie keine Schutz-Wirkung.

Da die beschriebenen Metalle als chemisches Element in der Natur nicht zur Verfügung gestellt werden, müssen sie künstlich hergestellt werden und später durch Schutzschichten vor dem Verfall bewahrt werden. Die Eigenschaften hängen dabei stark von der Zusammensetzung der Metalle ab. Je nach Reinheitsgrad besitzen sie eine unterschiedlich ausgeprägte Korrosionsanfälligkeit.

Von besonderem Interesse sind die Oberflächeneigenschaften der Metalle, die den Lackierprozess und damit die Qualität der Lackierung beeinflussen. Je nach der Art der Herstellung der Karosseriebleche, beziehungsweise anderer Metallteile, ist die Oberfläche unterschiedlich ausgeprägt. Dazu gehören Walzhäute und die unterschiedliche Rauigkeit der Werkstoffoberfläche.

Dabei können Korrosionsprodukte schon in Spuren die Schutzwirkung von Lackierungen erheblich beeinträchtigen. Es ist deshalb zwingend erforderlich bereits direkt nach dem Walzvorgang der Karosseriebleche einen temporären Oberflächen-Schutz, zum Beispiel mit speziellen Korrosionsschutzölen, durchzuführen. Nur so ist nach der späteren Karosserielackierung der dauerhafte und wirksame Korrosionsschutz zu garantieren.

Korrosionsschutz durch Beschichtung ist gerade im Automobilbau ein sehr wesentlicher Beitrag zur Werterhaltung des Fahrzeuges über die gesamte Lebens-Dauer. Durch den dauerhaften Korrosionsschutz werden gleichzeitig Ressourcen gespart, Energie eingespart und damit ein Beitrag zum Umweltschutz getätigert.

Aufgrund dieser hohen Wertigkeit im Automobilbau werden häufig weitere Absicherungen zur Vermeidung von späterer Korrosion beim Gebrauch des Fahrzeugs eingesetzt. So werden bereits bei der Substratauswahl höherwertige Werkstoffe, wie verzinkte Bleche oder sogar Aluminium entweder generell oder für gefährdete Bereiche eingesetzt.

Der Grund hierfür liegt darin, dass trotz einwandfreier Grundierung und Lackierung, die aufgebrachten Lackschichten nicht als total undurchlässiges System anzusehen sind und über die Gebrauchszeit auch von kleinen Durchbrüchen durch Steinschlag oder ähnlichen Lackverletzungen auszugehen ist.

Hinzu kommen sehr unterschiedliche Belastungen in verschiedenen Regionen und Jahreszeiten zum Tragen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Selbst bei einer kleinen Lackverletzung und einer Luftfeuchtigkeit über 60 % kommt es bereits beim Stahlblech zur Bildung von Korrosionsprodukten. Weitere Einflüsse

durch Luftverunreinigungen, wie z.B. Schwefeldioxid, katalysieren die Korrosion in hohem Maße.

Anders hingegen sind die Verhältnisse bei den amphoteren Elementen Aluminium und Zink. Im Gegensatz zum Eisen sind sie wegen der Ausbildung einer geschlossenen Oxidschicht im mittleren pH-Bereich passiviert und werden aus diesem Grund zunehmend eingesetzt. Zink wird in erster Linie als Überzug für Stahl, Aluminium in zahlreichen Legierungen als einheitlicher Werkstoff eingesetzt. Zink hat sich trotz seines gegenüber Eisen unedleren Charakter als schützender Überzug für Eisen bewährt. Der Schutz ist durch elektrochemische Vorgänge auch dann noch gegeben, wenn die Überzüge zum Teil mechanisch verletzt werden. Zink liefert durch den unedleren Charakter einen Schutz insofern, als die Bildung von Eisenionen bei korrosivem Angriff durch die Elektronenabgabe des Zinks an das Eisen verhindert wird. Das Zink wirkt als Anode und bietet dadurch dem Stahl einen kathodischen Schutz. Die verletzte Stelle füllt sich mit dem Zinkoxid, dem Weißrost. Das noch intakte Zink schützt mit seiner gesamten Fläche den Stahl vor Korrosion so lange, bis es völlig verbraucht ist.

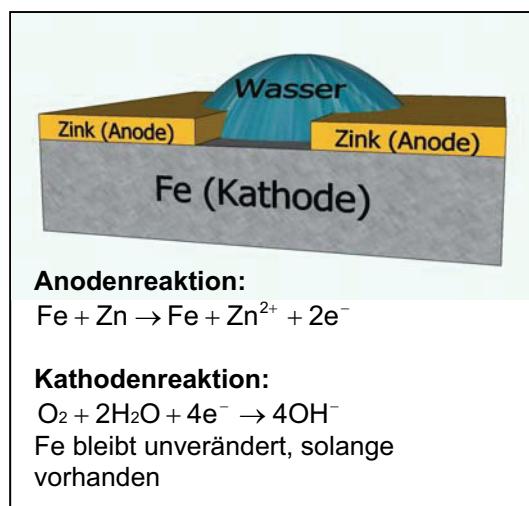


Abb. 5.1- 1 Zink als kathodischer Schutz von Eisen [2.10]

Ein weiteres zunehmend im Automobilbau eingesetztes Metall ist Aluminium. Es ist extrem unedel, aber es besitzt wegen seiner sauerstoffdichten Oxidhaut gegenüber Luftsauerstoff eine hohe Resistenz. Der Bereich der stabilen Passivierung hängt in hohem Maße von der Reinheit des Aluminiums ab.

Reinheitsgrad	Aufgelöste Menge in g/m <sup>2</sup> /Tag
99,999 %	6
99,990 %	112
99,970 %	6500
99,880 %	36000

Von den zum Teil recht dicken Oxidschichten ist die sauerstoffsperrende Haut direkt auf der Metalloberfläche mit 0,005 µm ausgesprochen dünn. Der Rest ist porös, beeinträchtigt die elektrische Leitfähigkeit und die Haftung von Lackierungen und muss deshalb unbedingt entfernt werden. Zur Förderung der Stabilität von Aluminium werden daher durch elektrochemische Oxidation definierte Oxidhäute, so genannte Eloxalschichten erzeugt. Aluminium wird wegen seiner niedrigen Dichte von

2,70 g/cm<sup>3</sup> und seiner hervorragenden physikalischen Eigenschaften unter anderem wegen der Gewichtsreduzierung im Automobilbau eingesetzt. Zur Erhöhung der Formbeständigkeit und der Härte wird das Grundmetall Aluminium mit Magnesium, Silizium, Kupfer und Zink legiert.

Die Zusammensetzung und die Bezeichnung wichtiger Legierungen sind in DIN EN 576 und DIN EN 573-1 und -4 festgelegt.

In den letzten Jahren haben sich ebenfalls im Automobilbau auch magnesiumhaltige Werkstoffe ergänzend etablieren können. Magnesium ist ähnlich dem Aluminium selbstpassivierend, ist aber auch gegenüber niedrigen und hohen pH- Werten sowie dem Einfluss von Chlorid- und ähnlichen Ionen nicht stabil. Als Reinsubstanz ist es zwar hervorragend verformbar, wird aber wegen zu geringer Härte als Werkstoff häufig nicht allen Ansprüchen gerecht und muss deshalb wie das Aluminium mit anderen Metallen legiert werden.

Im Vergleich zum Aluminium mit nur 1/3 der Dichte des Stahls ist Magnesium mit weniger als 1/4 bezüglich der Möglichkeit zur Gewichtsreduzierung ein noch günstigerer Werkstoff, sofern man eine zum Stahl vergleichbare Festigkeit erreicht. Der Einsatz von Magnesium mit einer Menge von ca. 5 kg/Karosse ist im Automobilbau noch bescheiden, während Aluminium bereits 100 kg/Karosse ausmacht. Der gesteigerte Einsatz von Magnesium hängt von seiner lackiergerechten Vorbehandlung ab, die noch weiter entwickelt werden muss.

## 5.2 Karosserievorbehandlung

Wegen der sich mehr oder weniger schnell bildenden Oxidschichten werden metallisch blanke Bleche sofort nach ihrer Fertigung für den temporären Korrosionsschutz mit Korrosionsschutzölen überzogen. Je nach Art der zu lackierenden Karosserien bezüglich verschiedener Substrate sind unterschiedliche angepasste Reinigungs- und Vorbehandlungsmaßnahmen dem eigentlichen Lackierprozess vorzuschenken. Dabei sind herstellbedingte Verunreinigungen wie Walzhäute, Zunder und Oxidschichten oder Korrosionsschutzöle aus dem Herstellprozess von Stahlbändern und Ziehfetten aus dem Verformungsprozess beim Rohbau der Karosserien zu beseitigen. In vielen Fällen wird durch Bürsten oder Schleifen mechanisch gereinigt.

Besondere Aufmerksamkeit wird im Rohbau auf die Art der verwendeten Korrosionsschutzöle und Ziehfette gelegt, die in Poren und durch den Ziehvorgang gebildeten Furchen der Karosseriebleche eindringt. Ihre leichte Entfernbartigkeit in den Vorbehandlungsbädern sowie eine gute Verträglichkeit mit den Lackmaterialien verbessern den Wirkungsgrad der Lackieranlagen erheblich.

Die Vorbehandlung der aus dem Rohbau in die Lackiererei abgelieferten Karosserien ist bei den verschiedenen Automobilherstellern unterschiedlich geregelt. Teilweise ist eine Reinigung Aufgabe des Rohbaus, teilweise komplett Aufgabe der Lackiererei. Die Reinigung und Phosphatierung erfolgt überwiegend in Tauchbädern, deren Grösse von der Anzahl der Karosserien pro Stunde abhängt. Bei Stückzahlen von mehr als 15 Karosserien pro Stunde werden Durchlaufbecken mit einem Inhalt von 150 bis 450 m<sup>3</sup> eingesetzt.

Zur Vermeidung von Luftblasen im Innenraum bzw. in den Hohlräumen werden bei Durchlaufanlagen durch die Förderbandführung Kippbewegungen innerhalb der Becken durchgeführt. Neuere Konzepte drehen die Karosserien während des Baddurchlaufs. (Rodip-Verfahren)

Organische Verunreinigungen der Karosserieoberflächen müssen in jedem Fall durch entsprechende Entfettungsmittel entfernt werden.

Im Unterschied zu diesen physikalischen Methoden der Reinigung und Entfettung wird nachfolgend eine chemische schichtbildende Vorbehandlung dem eigentlichen Grundier- und Lackierprozess vorgeschaltet.

### 5.2.1 Reinigung – Entfettung

In der automobilen Praxis hat sich die schwach alkalische Entfettung mit wässrigen Gemischen aus Salzen, Netzmitteln und Emulgatoren durchgesetzt. Die Anwendungstemperaturen liegen im Bereich von 40- 60 °C. Der Prozess ist üblicherweise eine Kombination aus Spritz- und Tauchbehandlung mit anschließenden Spülstufen mit deionisiertem Wasser zur Vermeidung von Salzrückständen. Der Tauchschnitt ermöglicht die beste Reinigung von Zieh- und Korrosionsschutzölen sowie eine gute Reinigung der Innenbereiche, erfordert aber im Vergleich zur Spritzreinigung längere Durchlaufzeiten.

Die Sauberkeit der gesamten Karosse ist eine wesentliche Voraussetzung für einen hohen Wirkungsgrad der Lackieranlagen. Mit Wirkungsgrad ist der so genannte „Geradeauslauf“ einer Karosse durch die gesamte Anlage ohne eine Korrektur-Tätigkeit zu verstehen.

#### 5.2.1.1 Parameter der Reinigung

- 1) Chemie : Reinigerzusammensetzung, Reinigerkonzentration, Badbelastung
- 2) Mechanik : Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in der Grenzschicht Reinigerlösung/ Metalloberfläche, Verringerung der Grenzschichtdicke, Unterstützung durch Elektrolyse, Bürsten, Kavitation
- 3) Temperatur : Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit, Herabsetzung der Viskosität von Fetten und Ölen
- 4) Zeit : Einhaltung der vorgegebenen Soll-Zeiten
- 5) Spüle : Badbelastung, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur, Zeit

#### 5.2.1.2 Verschmutzungsarten

- Schmierstoffe (Öle, Emulgatoren, Ester, EP-Additive = S- und P-Verbindungen, Metallseifen, Graphit, Molybdändisulfid)
- Korrosionsschutzöle (Öle, Petroliumsulfonat, Antioxidantien)
- Härteöle
- Ziehmittel (Mineralöl, native Öle/Fette)
- Flussmittel (Anorganische Salze)
- Polierpasten (Öle, Wachse, Metallocide)
- Pigmente = unlösliche, kleine Feststoffpartikel (Ca-Carbonate, Graphit, TiO<sup>2</sup>, Zn-Oxid, Eisenoxide, Metallspäne, Eisenabrieb)
- Staub
- Handschweiß
- Zunder, Korrosionsprodukte, Ölkarohle (Entfernung durch Beizen oder Strahlen)

### 5.2.1.3 Vorgänge bei der Reinigung

Moderne Lösungen wässriger Reiniger enthalten Tenside, sowie so genannte „Builder“ und Komplexbildner.

Die Tenside haben die Aufgabe, die hydrophoben Öle zu benetzen und zu emulgieren. Entsprechend ihrem chemischen Aufbau liegen die alkalischen Reiniger bei pH-Werten zwischen 9 und 12. Sie sind besonders aktiv und initiieren in Verbindung mit Phosphaten einen zusätzlichen Beizangriff bei der Reinigung von Aluminium. Alle Tenside besitzen einen polaren und damit hydrophilen und einen unpolaren hydrophoben Teil. Sie verbinden also die wässrige Phase mit der Oberfläche der unpolaren Fette und Öle und fördern bei entsprechender künstlicher Bewegung der Flüssigkeit die Emulgierung. Tenside und Builder umhüllen also Schmutz- und Ölpartikel und stabilisieren sie durch die Bildung abstoßender Kräfte.

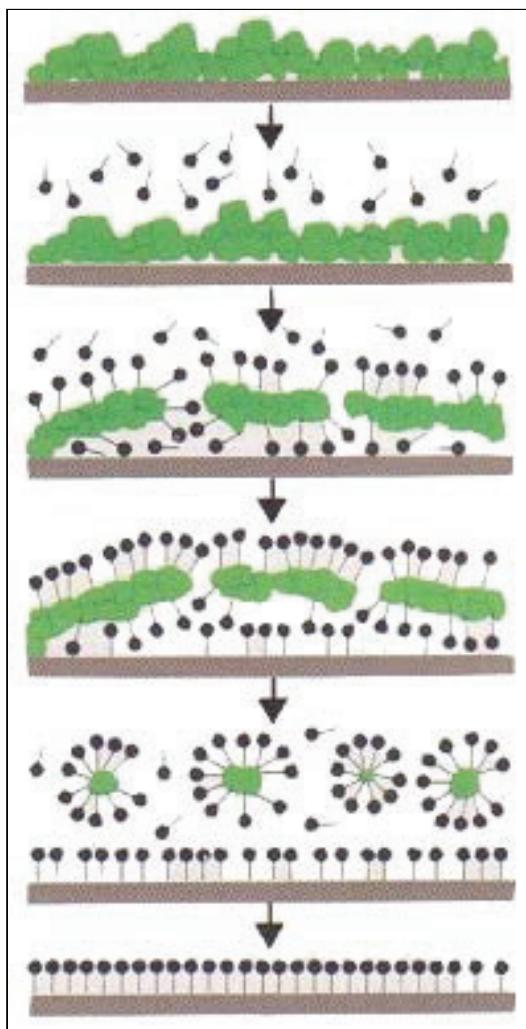


Abb. 5.2.1.3-1 Wirkungsweise der Tenside wässriger Reinigungsmittel [2.11]

„Builder“ sind anorganische Verbindungen, die die Wirkung der Tenside bei der Emulgierung der zu entfernenden Fette und Öle verstärken. Sie sind stark alkalisch, sodass sie den Verseifungsprozess der Fette und Öle fördern und damit ihre Emulgierbarkeit verbessern. Ihre Verwendung ist allerdings auf Stahl beschränkt. Aluminium und Zink als amphotere Elemente werden dadurch zu stark angegriffen.

Phosphate, Borate oder Karbonate sind dann zweckmäßiger. Um die Wirkung von anionischen Tensiden nicht zu beeinträchtigen, müssen Komplexbildner die störenden Kationen des Calciums und des Magnesiums inaktivieren.

Der Grad und die Geschwindigkeit der Reinigung hängen neben der geeigneten Auswahl der Tenside, der Komplexbildner und der „Builder“ auch von der Temperatur, der Dauer und der Umwälzung der Reinigerlösung ab.

Wegen der hohen Salzkonzentration sind mit wässrigen Reinigern behandelte Oberflächen anschließend intensiv mit vollentsalztem Wasser zu spülen. Dabei haben Spülzonen im Spritzverfahren Vorteile im Hinblick auf die Geschwindigkeit der Emulgierung. Sind jedoch, wie bei den Fahrzeug- Karossen, Hohlräume zu schützen, sind diese dem langsameren Tauchverfahren zu unterziehen.

#### 5.2.1.4 Übersicht Wirkungsprinzip Tensid-Builder

##### 5.2.1.4.1 Tenside (Wirkung auf flüssige Verunreinigungen)

- Adsorption der Verunreinigungen auf der Werkstückoberfläche
- Anreicherung von Tensiden an der Grenzfläche Öl/Wasser
- Ablösung des Öles von der Oberfläche in Form kleiner Tröpfchen
- Emulsion der Öltröpfchen in der Reinigungslösung, dadurch Entfernung von der Blechoberfläche
- Aufsteigen der Öltröpfchen an die Badoberfläche, dabei Bildung größerer Tröpfchen durch Vereinigung (Agglomeration)
- Bildung einer Ölphase durch Zusammenfließen der Öltröpfchen (Koaleszenz)

##### 5.2.1.4.2 Builder (Wirkung auf feste Verunreinigungen)

- Adhäsion der Verunreinigungen auf der Werkstückoberfläche
- Adsorption von „Builder“- Ionen an Werkstück- und Verschmutzungsoberfläche
- Trennung der negativ aufgeladenen Feststoffaggregate von der Werkstück- Oberfläche und Dispergierung zu kleinen Einheiten
- Suspension der dispergierten Feststoffe in der Reinigungslösung und Entfernung von der Blechoberfläche

#### 5.2.1.5 Technische Daten Reinigerprodukte

- KONZENTRATION IN WÄSSRIGER LÖSUNG : (flüssiges Produkt):
  - 10-30 g/l in Spritzanlagen
  - 30-80 g/l in Tauchanlage
- TEMPERATUR : 50 – 70 ° C
- ZEIT : 0,5 ... 3 min für Spritzanlagen  
... 5 min für Tauchanlagen
- ANLAGEN : Mehrzonen-Spritz-Tauch-Waschanlagen mit Nachspülen
- SPRITZDRUCK : 1 ... 2 bar
- TROCKNUNG : Heißluft-Blasen

### 5.2.1.6 Bestimmung der Reinigungsleistung

- Wasserbruchtest (Fette und Öle)  
saubere Oberfläche besitzt hohe Oberflächenenergie, das heißt Wasserfilm benetzt eine entfette Metallocberfläche zu 100 %
- Wischtest (Pigmentschmutz)  
weißes Tuch darf nach dem Abwischen einer gereinigten Metallocberfläche nicht verfärbt sein,  $< 20 \text{ mg Eisenabrieb / m}^2$
- Tesafilemtest (Pigmentschmutz)  
Klebeband wird auf gereinigte Oberfläche aufgeklebt, dann abgezogen und auf weißes Papier geklebt

### 5.2.1.7 Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von Reinigungsbädern

- physikalisch
  - Überlauf/Skimmer/Koaleszenzabscheider, Zentrifuge/Seperator, Elektrokoagulation/Elektroflotation, Membranfiltration, Bandfilter/Filterkerzen, Kratzband, Magnetabscheider, Lakos-Filter, Vakuumverdampfer, Kaskadenführung
- chemisch
  - Verwendung demulgierender Reinigersysteme für Spritzentfettung
  - Reduzierung der Öl- und Feststoffeinschleppung
  - minimale Beölung der Teile, Vorreinigungszone z.B. mit heißem Wasser

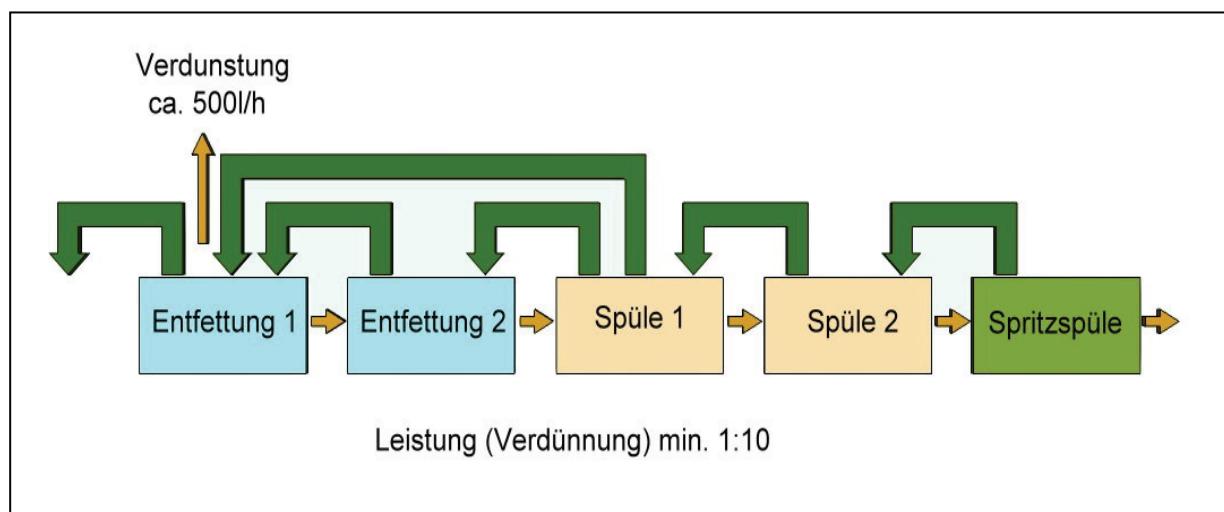


Abb. 5.2.1.7- 1 Kaskadenführung – Reinigungsbäder [10]

### 5.2.2 Phosphatierung

Das Phosphatieren ist ein bedeutender Schritt zur Erhöhung der Langlebigkeit einer Karosserielackierung unter den Gesichtspunkten Korrosionsschutz und Haftung. Die Gleichmäßigkeit des Auftrages der etwa 1-2 µm dicken Konversionsschicht ist dabei ein wichtiger Faktor für die Qualität der Gesamtlackierung. Die Schichtbildung erfolgt in zwei Schritten, nämlich zunächst der Aktivierung der Oberfläche, dann dem Aufbau der Konversionsschicht in Form von Phosphatkristallen. Heutige Materialien haben die Fähigkeit, verschiedene Substrate wie Stahl, verzinkter Stahl, Aluminium

und Magnesium in begrenztem Rahmen gemeinsam zu behandeln. Insbesondere bedarf der zunehmende Anteil von Aluminiumbauteilen verstärkte Berücksichtigung. Zum Stand der Technik zählen heute manganhaltige Zinkphosphatierungen. Sie haben die nickelhaltigen abgelöst. Darüber hinaus wird auf nitrat- oder nitrithaltige Beschleuniger zur Aktivierung der Oberfläche zunehmend verzichtet; sie werden durch umweltverträgliche, aktive Aminoverbindungen sowie Peroxide ersetzt. Bei Aluminiumoberflächen werden zusätzlich Fluoride eingesetzt.

Mit Rücksicht auf die nachfolgende Elektrotauchlackierung sind die sich den Phosphatierzonen anschließenden Spülzonen so dimensioniert, dass ein möglichst vollständiges Abspülen der Phosphatierlösung erreicht wird. Damit wird zum einen die Kontamination des Elektrotauchbades durch Salze oder andere Substanzen minimiert, zum anderen werden Störungen im abgeschiedenen Elektrotauchfilm vermieden, die durch Salzrückstände auf der Oberfläche der Blechoberfläche verursacht werden können. Dies ist besonders bei gleichmäßigen Oberflächen mit hohem Anspruch an das Erscheinungsbild von Nöten.

In der Regel ist den Spülzonen noch eine Passivierungszone vorgeschaltet. Diese verbessert die Haftungs- und Korrosionsschutzeigenschaften der Elektrotauch-Lackierung. Auch hier wurden die seinerzeit verwendeten chromhaltigen Materialien gegen umweltverträgliche und toxikologisch unbedenklichere Produkte, wie zum Beispiel Titane oder Zirkonfluorid ersetzt.

Nach dem letzten Spülkranz, der mit vollentsalztem Wasser betrieben wird, empfiehlt es sich alternativ, eine Warmblaszone zum Abtrocknen der Oberfläche einzusetzen. Es besteht sonst die Gefahr, dass sich beim Eintauchen unter Spannung im Elektro-Tauchbecken Markierungen bilden, die zu erheblichen Schleifaufwendungen im nachfolgenden Lackierprozess führen.

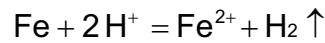
Das Tauchverfahren hat sich generell gegenüber dem Spritzverfahren durchgesetzt. Die bessere Ausbildung von Konversionsschichten in Hohlräumen hat dazu den Ausschlag gegeben.

### 5.2.2.1 Chemie Zinkphosphatierung

Das Phosphatierbad besteht aus einer wässrigen Lösung von Phosphorsäure, sauren Zinkphosphaten und speziellen Zusatzmitteln. Im Gleichgewicht liegt ein festes Mengenverhältnis zwischen wasserlöslichen Hydrogenphosphaten des Zinks und unlöslichem tertiären Zinkphosphat vor.



Während des Phosphatierens wird Phosphorsäure verbraucht und damit wird das Verhältnis in obiger Gleichung nach rechts verschoben. Tertiäres Zinkphosphat fällt verstärkt an und schlägt sich als feinkristalline Schutzschicht auf dem Metall nieder, das durch den vorausgegangenen Säureangriff metallisch blank gebeizt und angeraut wurde. Leider wirkt das durch den Beizangriff gebildete Wasserstoffgas inhibierend auf die Ausbildung der Phosphatschicht.



Zur Beseitigung des Wasserstoffs werden in aktuellen Produkten Wasserstoffperoxid oder Hydroxylamine als so genannte Beschleuniger eingesetzt und der Phosphatier-

Lösung zugesetzt. Diese oxydieren das Eisen zu dreiwertigen Eisenionen bei gleichzeitiger Bildung von Wasser.

Die Beschleuniger werden auch in Kombinationen angewandt. Dadurch lassen sich innerhalb von 60 – 180 Sekunden feinkristalline dichte Phosphatschichten mit Schichtgewichten von 1 – 3 g/m<sup>2</sup> erzeugen. Ohne beschleunigende Zusätze wären die Phosphatierzeiten 30 – 60 Minuten bei Badtemperaturen von 90 – 95° C erheblich länger.

Die sich in der Phosphatierlösung einfindenden Eisen(3) Ionen setzen sich mit Phosphationen zu schwer löslichem Eisenphosphat um. Die Entfernung erfolgt durch Sedimentation. Das Ausfällen der Eisenionen ist notwendig, da hohe Mengen von Eisenionen die Zinkphosphatschicht durch Mischkristallbildung in ihren korrosionsschützenden Eigenschaften beeinträchtigen würde.

Neben reinen Zinkphosphatschichten bewähren sich im Automobilbau zunehmend auch Phosphatierungen mit mehreren Kationen. Zink-Calcium- oder Zink-Mangan-Phosphate sind als Beispiele zu nennen. Die mikrokristallinen, fest verankerten Mischkristalle bieten einen ausgezeichneten Korrosionsschutz. Speziell für die kathodische Elektrotauchlackierung sind auch so genannte Niedrig-Zink-Phosphatierungen entwickelt worden. Die Bäder haben einen hohen Phosphorsäuregehalt. Dadurch können durch Beizreaktionen gebildete Eisenionen gezielt in die Phosphatschicht eingebaut werden. Der so entstehende Phosphophyllit zeigt in Verbindung mit kathodisch abgeschiedenen Grundierungen einen hervorragenden Korrosionsschutz.



Außerdem werden bei Gemischbauweise von Stahl und Zink, wie es üblicherweise im Automobilbau vorzufinden ist, durch den stärkeren Beizangriff des Niedrig-Zink-Verfahrens beide Werkstoffe in gleicher Weise nebeneinander geschützt. Während sich auf dem Stahl der eisenhaltige Phosphophyllit bildet, scheidet sich auf dem Zink tertiäres Zinkphosphat als Hopeit ab.



Zur weiteren Verbesserung des Korrosionsschutzes wurde das phosphophyllitbildende Niedrigzinkverfahren modifiziert. Zusätze von Manganionen werden in die Phosphatschicht eingebaut.

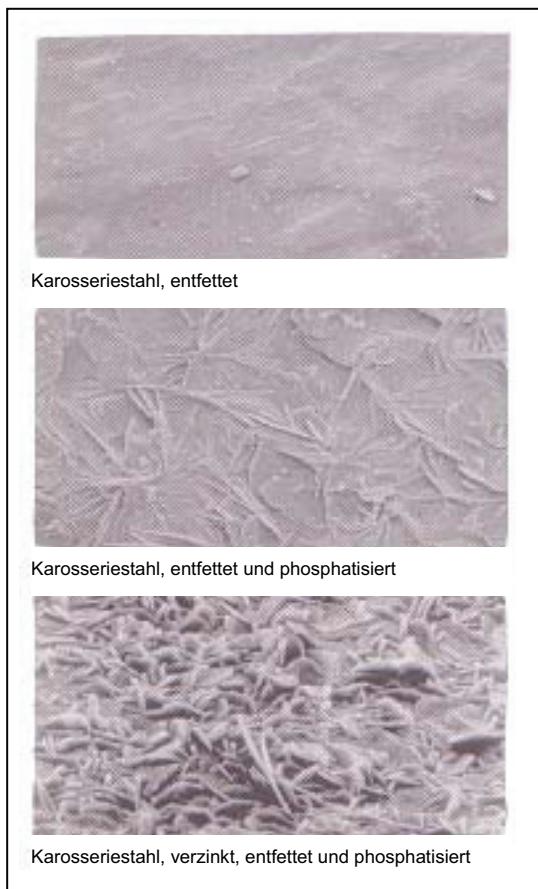


Abb. 5.2.2.1-1 Elektronenmikroskopische Aufnahmen von entfetteten und phosphatierten Oberflächen von Karosseriestählen“ [2.12]

Zur Verbesserung der Qualität von Phosphatierungen ist es üblich mittels einer Nachspülösung eine die Passivierung verstärkende Verdichtung der Konversionsschicht herbeizuführen. Als besonders effektiv haben sich dabei das Zirkonfluorid und Titanate gezeigt. Auch Polyphosphate verschließen die noch freie Stahloberfläche in den Poren und verhindern deshalb die Bildung von Mikrolokalelementen [11].

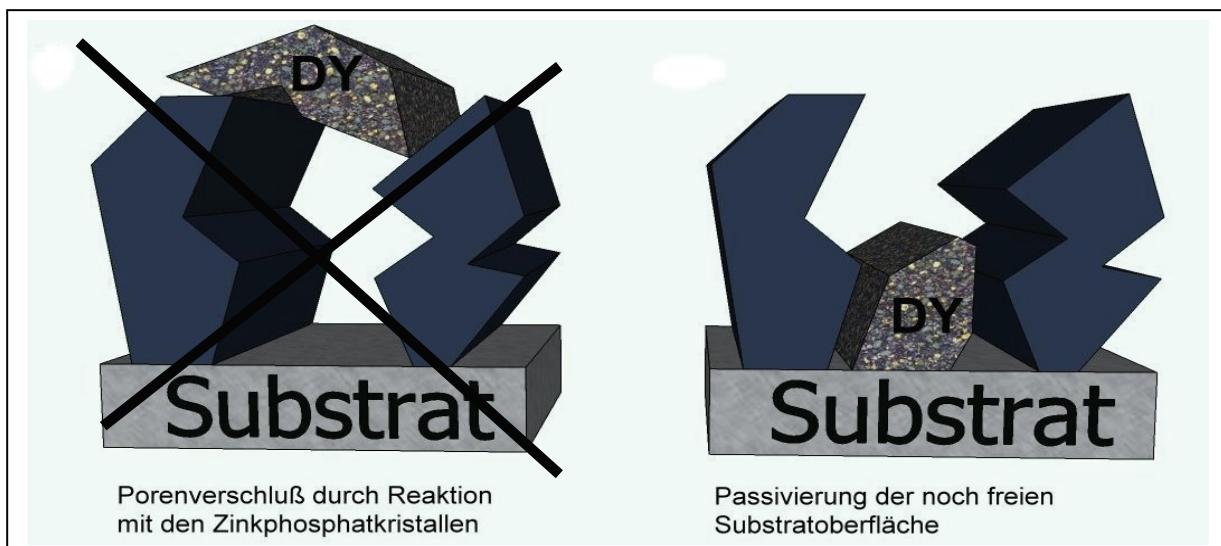


Abb. 5.2.2.1-2 Wirkungsweise von Passivierungsmitteln(DY) mit Zinkphosphatüberzügen [12]

Erwähnenswert ist auch der Einfluss der Oberflächenstruktur des metallischen Substrats auf die Gleichmäßigkeit der Phosphatierung. Rauhigkeitsprofile der Walzbleche für den Automobilbau werden deshalb entsprechend ausgewählt oder durch Nachbehandlung mit definiert abgetragenen Laserstrahlen gezielt erzeugt. Dieses Profil wird durch die Phosphatierung deutlich verändert. Ein Beispiel zeigt die nachfolgende Abbildung.

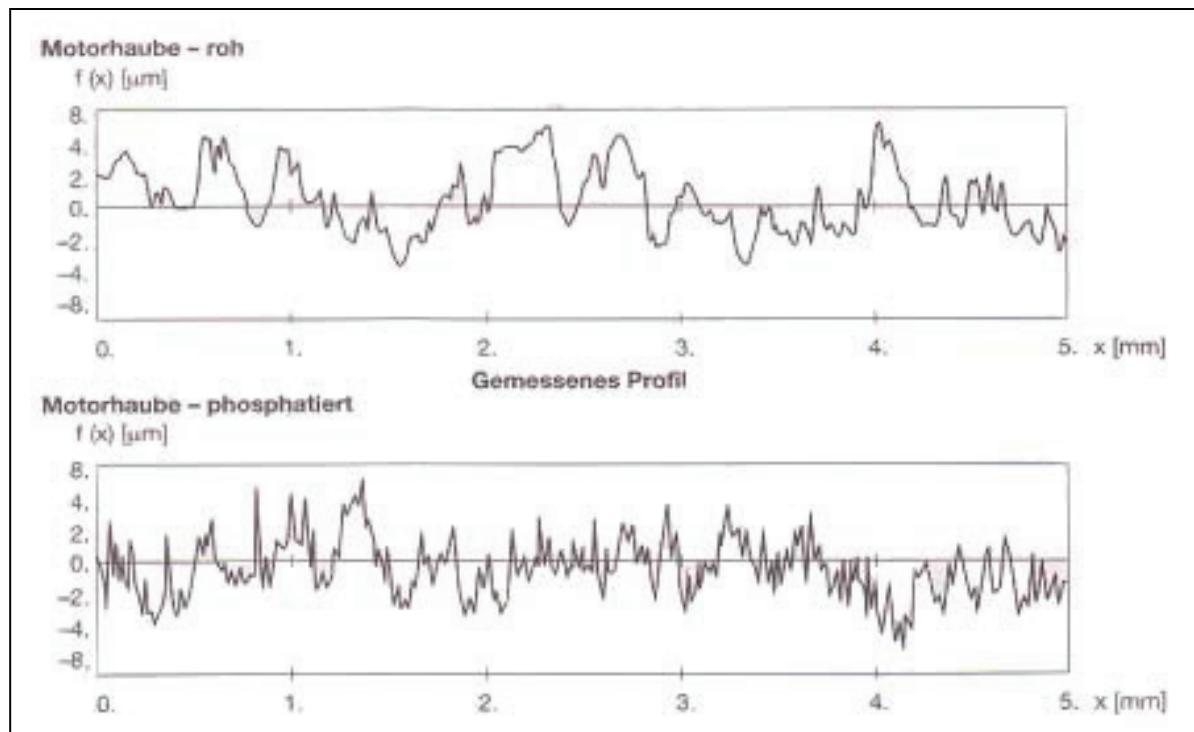


Abb. 5.2.2.1-3 Veränderungen im Rauhigkeitsprofil von Stahloberflächen durch die Phosphatierung [2.13]

Das Rauhigkeitsprofil nimmt gegenüber dem unbehandelten Blech zwar nicht in der Tiefe, wohl aber in der Anzahl der Spitzen zu. Damit verbunden ist auch eine Verbesserung der Benetzung und aufgrund der Erhöhung der Oberfläche die mechanische Verankerung und damit Haftung der Grundierung.

Für die Qualität der Phosphatierung ist auch die Schichtdicke entscheidend. Zu hohe Schichtdicken beeinträchtigen die Elastizität und damit die gesamten mechanisch-technologischen Eigenschaften. Auf der anderen Seite sind Phosphatschichten elektrische Isolatoren und damit chemische Inhibitoren, die den Angriff korrosiver Agenten auf das Metall verlangsamen.

## 5.2.2.2 Einfluss der Badparameter auf schichtbildende Phosphatierung

- Punkzahl „Freie Säure“
- Punktzahl „Gesamtsäure“
- Säureverhältnis
- Beschleunigung
- $(\text{PO}_4 / \text{NO}_3)$  – Verhältnis
- Temperatur
- Behandlungszeit
- Aktivierung

### 5.2.2.3 Beurteilung von Zinkphosphatschichten

- visuelle Begutachtung
- Ermittlung des Schichtgewichtes
- REM-Aufnahmen (Rasterelektronenmikroskop )
- EDX-Analyse (Energiedispersive Röntgenmikroanalyse; qualitativ)
- Schichtanalyse a) nasschemisch b) über Röntgenbeugungsanalyse

## 5.3 Elektrotauchlackierung

Die Elektrotauchlackierung hat sich als Beschichtungsverfahren zum gleichmäßigen Auftragen einer Korrosionsschutzgrundierung bei allen metallischen Massengütern wie Automobilen durchgesetzt. Es werden heute praktisch alle Automobile weltweit im Elektrotauchverfahren grundiert.

Die etwa um 1965 eingeführte anodische Elektrotauchlackierung war ein revolutionäres Verfahren zur Grundierung kompliziert geformter Teile mit großen Vorteilen der besseren Lackausnutzung und damit Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit gegenüber den bis dahin angewendeten konventionellen Tauchverfahren. Weitere Verbesserungen des Elektrotauchverfahrens gelangen durch die Einführung der Ultrafiltrationstechnik. Das in Ultrafiltrationsanlagen erzeugte Ultrafiltrat wird im Gegenstromprinzip als Spülmedium verwendet, um den an der Oberfläche anhaftenden Elektrotauchlack abzuspülen und dem Becken zurückzuführen. Auf diese Weise werden Materialnutzungsgrade von > 98 % erzielt.

Chemische Basis der ersten anodisch abscheidbaren Grundierungen war maleinisiertes Leinöl, das später durch maleinisiertes Polybutadien abgelöst wurde. Es waren selbstvernetzende Bindemittel, die mit Hilfe von Katalysatoren bei ca. 160°C gehärtet wurden. Etwa ab 1980 lösten dann die kathodisch abscheidbaren Elektrotauchlacke die anodischen Systeme ab und sind bis heute Stand der Technik. Die neuesten Generationen zeichnen sich durch sehr geringe Lösemittelgehalte, Bleifreiheit und hohe Zuverlässigkeit aus.

Parameter	Einheit (Bedingung)	Anodisch 1965	Anodisch 1975	Kathodisch 1975	Kathodisch 2000
Festkörper	(1h/130 °C)	8 – 15 %	12 – 18 %	15 – 20 %	15 – 20 %
Lösemittelgehalt		10 – 15 %	5 – 10 %	3 – 5 %	1 – 2 %
Schichtdicke	µm	30 – 40	25 – 35	15 – 20	18 – 22
Blei	Ja	Ja	Ja	Nein	
pH		7 – 9	7 – 9	6 – 8	5 – 7
Badtemperatur	°C	20 – 25	20 – 25	25 – 30	28 – 32
Beschichtungszeit	s	120 – 200	120 – 200	120 – 200	120 – 200
Spannung	V	150 – 250	150 – 250	250 – 350	300 – 450
Abscheideäquivalent	mg/C	60 – 80	50 – 70	30 – 50	30 – 40

Abb. 5.3-1 Technische Daten der Elektrotauchlackgenerationen [2.14]

Die Gründe für den zügigen Wechsel von anodisch zu kathodisch abscheidbaren Elektrotauchlacken waren folgende:

- Um den Faktor 3 – 4 verbesserter Korrosionsschutz in Verbindung mit einer geeigneten Vorbehandlung auf Stahl sowie das Vermeiden von Eisenauflösung und verbesserter Vernetzung durch neuartige Filmbildner
- Deutlich verbesserter Umgriff, damit höhere Beschichtung der Hohlräume
- Größere Prozesssicherheit durch Kompensation mit zwei Komponenten aus neutralisiertem und vordispersierten Bindemittel sowie einem Pigmentkonzentrat und einer größeren chemischen Stabilität der Komponenten in Wasser
- Niedrigere Schichtdicken
- Größere Alkalifestigkeit des Films bei Gemischtbauweise Zink/Eisen an den Kontaktstellen

Die Prozesssicherheit spielt eine herausragende Rolle, da für eine industrielle Großserienfertigung im Automobilbau die Gleichmäßigkeit der eingesetzten Produkte entscheidend ist.

Da durch die Grundieranlagen bis zu 1500 Karossen mit einer zu beschichtenden Fläche von ca. 60 – 90 m<sup>2</sup> pro Einheit laufen, stellt dies hohe Anforderungen an die Formulierung und die Fertigung der Beschichtungsstoffe. Dieses gilt auch für die Prozessführung und die Anlagentechnik beim Verarbeiter, das heißt in der jeweiligen Lackiererei des Automobilherstellers. Sowohl physikalische als auch analytische Parameter dienen als Steuerkriterien, um das Elektrotauchlackbecken stets auf gleichem Qualitätsniveau bezüglich des Beschichtungsergebnisses zu halten. So sind heute z.B. zur Aufrechthaltung des Badfestkörpers Regelkreise auf Basis des Stromverbrauches eingeführt. Einen wichtigen Beitrag zur Prozesssicherheit stellt die erwähnte Nachdosierung mit voll neutralisiertem Lackmaterial und der Aufteilung in zwei Komponenten dar. Die Nachdosierung mit dem schon dispersierten Material hat zur Folge, dass dieser Prozess sich auf ein einfaches Zumischen vereinfacht. Allerdings reichert sich im Laufe des Prozesses die nicht abgeschiedene Säure im Becken an und muss dem System über einen Analyt-Kreislauf entzogen werden.

Der Ablauf des Beschichtungsprozesses beim Elektrotauchlackieren fängt mit der Übergabe aus der Vorbehandlung an [13]. Die Karossen können nass oder auch getrocknet in das ETL-Tauchbad eintauchen. Bei Durchlaufanlagen wird das Spannungsprogramm mit wenigstens zwei Gleichrichtern eingestellt. Die Einlaufschiene wird von der Hauptschiene für den zentralen Tauchbereich versorgt und die Austauchzone wird getrennt versorgt. Dies ist notwendig zur Reduzierung großer Stromspitzen, die durch hohe lokale Wärmeentwicklung und zu starke Gasbildung dann Oberflächenfehler erzeugen können.

Um eine konstante Beschichtungsqualität zu erhalten, ist dafür Sorge zu tragen, dass die Badtemperatur vorgegebene Werte in engen Grenzen von ca.  $\pm 0,5$  °C einhält. Wärmetauscher sind so auszulegen, dass sie durch den Stromfluss erzeugte Wärme abführen können. Da im Eintauchbereich die größten Stromflüsse erreicht werden, ist dort eine hohe Strömungsgeschwindigkeit anzustreben, um so die Wärme schnell abzuführen. Dafür und um ein Absetzen der pigmentierten Tauchlacke zu vermeiden, ist der Badinhalt permanent in der Einsatz- und Ruhephase umzuwälzen.

Richtwert für eine Auslegung der Pumpen ist eine etwa 5-fache Umwälzung pro Stunde.

In vielen Lackierereien der Automobilindustrie gibt es aufgrund der Zuverlässigkeit des Elektrotauchlackprozesses nur noch ein Becken, das mehrere Füller- und Decklacklinien versorgt. Somit werden bis zu 1500 Karossen pro Tag grundiert.

Beispielhaft sei hier die VWN-Lackiererei Hannover mit einer Elektrotauchlack-Anlage für die gesamte Fertigung und einer Kapazität von 1000 Nutzfahrzeug-Karossen erwähnt. Die spezifischen Karosserienflächen pro Takt sind hierbei im Nutzfahrzeug-Bereich deutlich höher als im PKW-Bereich anzusetzen (> 50 %).

Dem durch elektroosmotische Effekte während der Abscheidung verdichteten und auf dem Substrat fest adhäsierenden Film haftet noch Lackmaterial an, das durch Spülen entfernt werden muss. Da dieses Material noch einsatzfähig ist, wird die Karosse mit dem aus dem Becken entnommenen und erzeugte Ultrafiltrat im Gegen-Stromprinzip gespült und das Spülmedium dann dem Beschichtungsbau zurückgeführt. Dies erfolgt in wenigstens zwei Kaskaden. Heutige Elektrotauchlacke benötigen nach dem Spülschritt mit reinem Ultrafiltrat keine weitere Spülung mit vollentsalztem Wasser mehr. Kostenreduzierung und besserer Umweltschutz durch reduzierte Abwassermengen sind positive Effekte.

Bei der Gestaltung der Spülzonen ist darauf zu achten, dass jegliche Antrocknung von Lackmaterial auf dem beschichteten Objekt vermieden wird. Der erste Spülvorgang sollte üblicherweise mit einem Spülkranz durchgeführt werden und sollte in weniger als einer Minute nach dem Austauchen der Karosse aus dem Becken erfolgen. Einmal angetrocknete Lackläufer sind nachträglich nur durch Schleifen zu entfernen und führen sonst zu erheblichen Störungen im Gesamtaufbau der Fahrzeuglackierung. Analog zu der Vorbehandlung sind die Hauptspülzonen als Tauchbecken angelegt. Je nach der Menge des eingespeisten Ultrafiltrats mit < 0,4 % Festkörper haben diese Bäder für eine effiziente Spülung Festkörpergehalte von weniger als 1%. Unter solchen Bedingungen werden Materialnutzungsgrade von mehr als 99 % erreicht.

An die Abscheidung des Elektrotauchlackes und den Spülvorgang schließt sich der Durchlauf durch den Einbrennofen an. Dort wird zunächst das im Lackfilm befindliche Restwasser von ca. 5 % entfernt und ein guter Verlauf sowie die Vernetzung zum korrosionsschützenden Film bewirkt. Das Einbrennen erfolgt je nach Typ des Elektrotauchlackes bei 20 - 30 Minuten und einer Objekttemperatur von 160 - 190 °C.

Der Elektrotauchlackprozess kann überwiegend im geschlossenen Kreis ohne nennenswerte Belastung der Umwelt durch Abfallstoffe gefahren werden. Unter dem Gesichtspunkt der Umweltbelastung sind vier Emissionsquellen zu berücksichtigen:

1. Emission von flüchtigen Verbindungen im Becken- und Spülzonenbereich
2. Emission von organischen Verbindungen im Trockner aufgrund von Vernetzungsreaktionen und erhöhter Lackfilmtemperatur
3. Abwasser als Ultrafiltrat oder Spülwasser
4. Anolytkreislauf mit organischen Säuren

Die Lösemittelgehalte des kathodisch abscheidbaren Badmaterials der neuesten Generation liegen bei weniger als 0,5 %. Zusammen mit der üblichen Luftführung über dem Becken führt dies dazu, dass die Konzentration an organischen Verbindungen unterhalb der MAK-Werte liegt. Diese Luft mit der geringen Belastung wird dann durch entsprechende Lüftführung zusammen mit den Spaltprodukten aus der Vernetzungsreaktion in den Einbrennöfen durch thermische Nachverbrennung behandelt.

Gelegentlich zu entsorgende Mengen an Ultrafiltrat können direkt den Kläranlagen zugeführt werden, da die Zusammensetzung in relativ kurzen Verweilzeiten biologisch einwandfrei abgebaut werden kann.

Das gleiche gilt für Substanzen im Anolytkreislauf. Zu beachten ist hier, dass der pH-Wert etwa 4 beträgt, während das Ultrafiltrat im Arbeitsbereich des Elektrotauchlackes bei einem pH-Wert von 5,8 liegt.

### 5.3.1 Prinzipien der Abscheidung

Die Elektrotauchlackierung ist ein komplexer Beschichtungsvorgang, er besteht aus drei Teilvergängen während der Beschichtung.

1) Elektrophorese	- Wanderung der Lackteilchen im elektrischen Feld
2) Elektrokoagulation	- Abscheidung der Lackteilchen im elektrischen Feld
3) Elektroosmose	- Dehydratisierung des Films im elektrischen Feld

Im elektrischen Feld wandern die Lackteilchen zu den Elektroden. (Elektrophorese) Durch die Bildung einer basischen Diffusionsschicht aus OH-Ionen koagulieren die Lackteilchen. (Elektrokoagulation)

Diese Diffusionsschicht wird unter anderem durch die Badströmung in der Grenzschicht Objekt-Bad beeinflusst. Hohe Strömungsgeschwindigkeit verringert und niedrige Geschwindigkeit erhöht die Diffusionsschicht. Durch die Karosse-Konstruktion und durch das Strömungsprofil kommt es zu unterschiedlicher Ausbildung der Diffusionsschicht und damit auch zu unterschiedlichen Schichtdicken.

Dies lässt sich an einem Modellversuch (nach Beck) verdeutlichen:

An einer rotierenden Scheibenelektrode mit konstanter Drehzahl ist die Geschwindigkeit vom Radius abhängig. Es bildet sich auch eine unterschiedliche Schichtdicke aus, welche von außen nach innen durch die Abnahme der Geschwindigkeit zunimmt.

Die Lackschicht ist anfänglich mit viel Wasser durchdrungen. Durch die weitere Abscheidung und unter Einwirkung des elektrischen Stroms erfolgt gleichzeitig eine teilweise Dehydratisierung des Lackfilms bis zu 80 % Festkörper. (Elektroosmose) Dieser so abgeschiedene Lackfilm haftet fest auf dem Substrat und lässt sich durch normale Spülprozesse nicht abspülen.

Da die Stromdichte im Bereich von Kanten und Durchbrüchen höher liegt als in der Fläche, beginnt die Beschichtung vorrangig dort.

### 5.3.2 Physikalische Kenngrößen

#### 1. Spannung

Angelegte elektrische Spannung während des Beschichtungsvorgangs (Angabe in Volt)

#### 2. Beschichtungszeit

Zeit in der die Beschichtung der Karosse erfolgt (Angabe in Minuten) Zu berücksichtigen ist der Unterschied der Gesamtzeit und der Zeit „Dach unter“. Bei der Zeit „Dach unter“ ist die komplette Karosse untergetaucht, diese Zeit sollte im Normalfall > 3 Minuten sein. Je länger diese Zeit ist, umso günstiger ist die Innenbeschichtung der Karosse bezüglich der Schichtdicke und des Umgriffs in den weiteren Hohlräumen.

3. Badtemperatur

Konstante Temperatur des Badmediums (Angabe in °C) Im Normalfall bewegt sich diese bei 28 – 32 °C.

4. Strommenge

Die Strommenge ist das Produkt aus der Stromstärke (Ampere) und der Beschichtungszeit (Sekunden). Die Strommenge wird auch als Coulomb bezeichnet. Da die Beschichtung ein dynamischer Prozess ist, die Stromstärke also während der Beschichtung abnimmt, lässt sich der Strommengenfluss als Integration des Strom-Zeitdiagramms betrachten.

5. Abscheide-Äquivalent

Diese Größe ist eine lackspezifische Kennzahl, da sie im Wesentlichen von den Neutralisationsäquivalenten des Bindemittels und dessen Lackformulierungen abhängig ist. Setzt man die Strommenge (Coulomb) bei einem spezifischen Material ins Verhältnis zur abgeschiedenen Lackmenge, so erhält man das Abscheideäquivalent in Coulomb/g Lack.

$$\text{Abscheide - Äquivalent} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{g Lackmenge}}$$

Beispiel : Eine Karosse hat durchschnittlich 2,7 kg Lack (Festkörper)  
Dazu war eine Strommenge von 815 Ampere x 120 Sekunden= 97800 Coulomb erforderlich.

$$\text{Abscheide-Äquivalent} : 97800 / 2700 = 36,2 \text{ Coulomb / g Lack fest}$$

6. Stromdichte

Die Stromdichte ist eine elektrische Größe, welche die Stromstärke in Ampere auf eine spezifische Fläche bezieht. Grundlage hierfür ist das Ohm'sche Gesetz.

Beispiel : Bei einer Karosse mit einer Gesamtfläche von ca. 80 m<sup>2</sup> fließen 320 Ampere. Die daraus resultierende Stromdichte beträgt dann 4 Ampere pro m<sup>2</sup>.

Für die Abscheidung der ETL ist eine Mindest- Stromdichte erforderlich. Unterhalb dieser Stromdichte werden zu wenige Ionen gebildet um eine ausreichende Elektrokoagulation sicherzustellen.

Die Stromdichte ist zu Beginn der Beschichtung an den Außenflächen höher als im Innenbereich der Karosse und in den Hohlräumen (Faraday'scher Käfig). Erst nach fortschreitender Außenbeschichtung und steigendem Filmwiderstand nimmt die Stromdichte außen ab und die Stromdichte in der Fahrgastkabine und in den Hohlräumen nimmt zu. Die Beschichtung wandert nach innen, man bezeichnet diesen Effekt als „Umgriff“.

Die maximal zulässige Stromdichte ist die „Grenzstromdichte“, darüber treten unkontrollierte Beschichtungszustände in Form von Filmdurchbrüchen auf. Die kritische Stromdichte für die Karosserienbeschichtung liegt bei etwa 10 Ampere/m<sup>2</sup> Oberfläche.

Die kritische Spannungsgröße wird auch als Durchbruchspannung bezeichnet. Unterhalb dieser Spannung dominiert die Elektrokoagulation und die Elektro-

lyse des Wassers läuft sekundär ab. Oberhalb der kritischen Spannung dominiert der Sekundärprozess Elektrolyse und es kommt zu übergroßer Gasbildung am Objekt, was zum „Durchbruch“ des Lackes führt.

#### 7. Filmwiderstand

Der Filmwiderstand ist eine lackspezifische Größe und beeinflusst den Schichtaufbau. Er wird auch als Nassfilmwiderstand  $R_n$  bezeichnet. Beeinflusst wird der Nassfilmwiderstand durch die Lackformulierung, Korrekturen am Becken durch Lösemittel, Bindemittel, Pigmentpaste etc. Entscheidend ist hier die Packungsdichte des Lackfilms durch Pigmente, aber auch eingebaute Lösemittelmoleküle im Bindemittel.

#### 8. Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist ebenfalls eine lackspezifische Größe. Das Bindemittel im ETL-Lack wird durch Neutralisation mit Säuren wasserlöslich gemacht, dabei werden Salze gebildet. In ihrem ionischen bzw. semipolaren Zustand führen diese Salze zu einer Leitfähigkeit des Lackes. Dadurch kann Strom fließen und damit eine Wanderung von Lackteilchen an das Objekt erfolgen. Je höher also der Lackfestkörper im Bad ist, umso höher ist auch die Leitfähigkeit des Bades. Die Leitfähigkeit wird in  $\mu\text{S}$  angegeben, es ist der reziproke Wert des Badwiderstandes.

#### 9. Schichtdicke

Die Schichtdicke ist definiert als Trockenschichtdicke nach dem Einbrennen auf dem Objekt und wird in  $\mu\text{m}$  angegeben.  $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$

Parameter der Schichtdicke :

- Badtemperatur
- Festkörper im Bad
- Beschichtungsspannung
- Beschichtungszeit

#### 10. Umgriff

Als „Umgriff“ wird das Eindringen von Lacken in Hohlräume definiert. Generell besteht die Problematik des „Faraday'schen Käfigs“. Deshalb müssen Hohlräume zur Ausbildung von Feldlinien entsprechend große Öffnungen besitzen. Bei geschlossen Hohlräumen sind Hilfselektroden einzusetzen.

#### 11. Badströmung

Als Badströmung ist die Strömung des Lackmaterials am Objekt, das heißt auf der Blechoberfläche zu verstehen. Durch das Eintauchen der Karosserien wird die Strömung stets unterbrochen und negativ beeinflusst. Die realen Strömungsverhältnisse in Tauchbädern sind häufig optimierungsbedürftig. Nähere Erläuterungen dazu im Kapitel 6. Die Badströmungsgeschwindigkeit sollte im Idealfall  $0,5 \text{ m/s}$  betragen und an der Badoberfläche  $0,2 - 0,4 \text{ m/s}$  nicht unterschreiten. schreiten.

### 5.3.3 Chemie der Kataphorese

#### 5.3.3.1 Epoxidharze

Unter den KTL-Bindemitteln dominieren im wesentlichen Epoxidharze als Grundierungen für den schweren Korrosionsschutz in der Automobilindustrie. Die Basis für Epoxidharze ist Epichlorhydrin umgesetzt mit Phenolen, wie z.B. Bisphenol A.

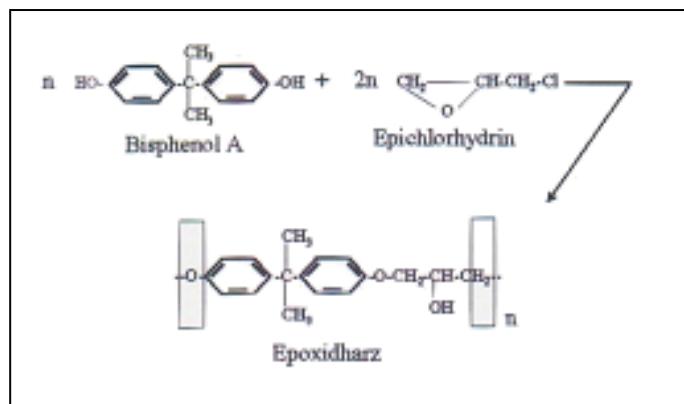


Abb. 5.3.3.1-1 Chemische Verbindung Epoxidharz [14]

Solche Epoxidharze werden dann mit Dialkoholen/Diaminen etc. umgesetzt. Diese Zwischenprodukte bezeichnet man als Epoxidaminaddukte, welche mit trifunktionellen verkappten Isocyanaten zu hochflexiblen und korrosionsfesten Filmen führen.

Der Vernetzungsmechanismus kann durch Zugabe von metallischen Katalysatoren, wie z.B. Zinn/Wismut unterstützt und forciert werden.

Epoxidaddukte lassen sich mit organischen Säuren neutralisieren und führen so zu wasserverdünnbaren Bindemitteln.

Im nicht eingearbeiteten Zustand liegen das Epoxidaminaddukt und das verkappte Isocyanat im stöchiometrischen Zustand vor. Durch Temperaturbelastung im Trockner deblockiert das Isocyanat und die freien Isocyanatgruppen reagieren mit den vorhandenen Hydroxylgruppen der Aminaddukte zu Urethangruppen.

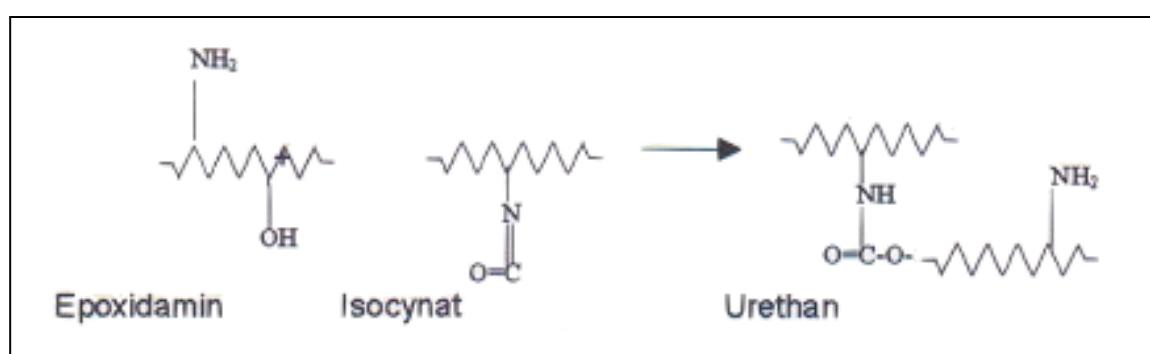


Abb. 5.3.3.1-2 Chemische Vernetzung Trockenprozess [15]

### 5.3.3.2 Pigmente

Hier kommen im Wesentlichen farbgebende, inerte und korrosionshindernde Pigmente zum Einsatz.

Beispielhafte Pigmente: - Titandioxid

- Ruß

- Extender  $\text{AlSiO}^2$

- Bleisilicate

### 5.3.3.3 Additive

Zu den Additiven zählen Zusatzstoffe die bestimmte Effekte beeinflussen.

Beispielhafte Beeinflussungen: - Lackverlauf = Additiv Lösemittel

- Absetzverhalten = Additiv Netzmittel

- Schaumverhalten = Additiv Entschäumer

### 5.3.3.4 Lösemittel

Bei einem Festkörperanteil von ca. 20% im KTL- Bad besteht der Hauptanteil der Lösemittel aus Wasser. Dieses ist auch notwendig um den elektrischen Abscheide-Mechanismus zu gewährleisten.

Weitere Lösemittel in kleineren Anteilen, beeinflussen den Lackverlauf und steuern die Schichtdicke. Dies sind im Wesentlichen wassernichtmischbare höhere Glykolether wie z.B. Hexylglykol, Butylglykol etc.

### 5.3.3.5 Neuralisationsmittel

Diese sind im Wesentlichen organische Säuren. Je polarer und kurzkettiger die Säuren sind, umso kolloidaler ist das Lacksystem. Ameisensäure/Essigsäure führen zum Beispiel zu einem kolloidal-dispersen System; Milchsäure führt dagegen zu einem mehr dispersem System.

### 5.3.3.6 2 – K System

2 – K Systeme sind in Bindemittel- und Pigmentpasten- Komponenten aufgeteilt. Die beiden Komponenten werden dem KTL-Bad zugeführt und gehen in Mischung. Die chemische Reaktion erfolgt erst im KTL-Trockner oberhalb der Deblockierungs-Temperatur.

## 5.3.4 Chemische Kenngrößen

### 1. Festkörper

Der Festkörper ist der feste Bestandteil der Badzusammensetzung. Er besteht aus dem Bindemittel und dem Pigment sowie nichtflüchtige Additive in der Lackformulierung. Die Bestimmung des Festkörpers (FK) erfolgt nach einer definierten Methode.

## 2. pH-Wert

Der pH-Wert ist der saure oder basische Wert des Tauchbades. Er definiert sich als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration. Im neutralen Wasser hält sich die Dissoziation von H<sup>+</sup> - Ionen und OH-Ionen die Waage. Durch Zugabe von Säuren verschiebt der pH-Wert durch Zunahme der H<sup>+</sup> Ionen in den sauren Bereich und der pH-Wert liegt unterhalb von pH 7. Durch Zugabe von Laugen oder sonstigen basischen Komponenten erhöht sich der pH-Wert durch Zunahme der OH-Ionen auf Werte oberhalb von pH 7.

## 3. PBV- Wert

Der PBV-Wert bezeichnet das Pigment-Bindemittel-Verhältnis. Hierbei wird der Bindemittelanteil = 1 gesetzt und ins Verhältnis zum Pigmentanteil gesetzt (z.B. PBV= 1: 0,43).

## 4. Lösemittel

Lösemittel liegen als organische, flüchtige Bestandteile in einer Lackformulierung vor. In der KTL kommen unterschiedliche Lösemittel zur Anwendung. Es wird unterschieden in wasserverdünnbare und wassernichtmischbare Lösungsmittel (sog. Coaleszenz-Lösungsmittel).

Erstere sind für die Badsteuerung unbedeutender, kommen meistens aus der Harzsynthese und fungieren lediglich unterstützend bei der Tauchlackierung, zum Beispiel bezüglich Fettlöslichkeit, Harzlöslichkeit etc. Sie gehen nicht in die Mizell-Struktur ein, sondern bilden lediglich ein oszillierendes beziehungsweise reversibles Verhältnis zu Wasser und Lackmolekül.

Die zweite Gruppe von Lösemitteln, die so genannten Coaleszenz-Lösemittel, sind von großem Einfluss auf die Abscheidung und die Filmausbildung. Sie gehen direkt in die Mizellstruktur ein und werden mit dem Lack abgeschieden. Beispiele für solche Lösemittel sind Texanol, Hexylglykol, Pheneoxipropanol und in geringem Umfang auch Butylglykol. Ein höherer Anteil an diesen Lösemitteln erniedrigt zum Beispiel den Filmwiderstand, erhöht damit die Schichtdicke und verringert den Umgriff.

## 6 Lackiertechnologie und Defizite

Unter Lackiertechnologie sollen alle verfahrenstechnische Vorgänge verstanden werden, die zur Herstellung einer funktionsfähigen und hochwertigen Lackierung erforderlich sind. Dabei stellen die Teilstationen der Vorbehandlung, der KTL-Elektrotauchlackierung und der anschließenden KTL-Trocknung die wichtigsten Anlagenteile des Grundierungsbereiches dar.

Die Auslegung der Lackier- und Anlagentechnologie und die gewünschte Qualität der Beschichtung können nur unter der Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Substrats zu einem optimalen Ergebnis führen. Die chemische Eigenart und die Morphologie der Werkstoffoberfläche sind in diesem Zusammenhang genauso hervorzuheben wie die Formgebung, die Fügetechnik und die Konstruktion des zu schützenden Objektes. Lackierobjekt, Vorbehandlung und der eigentliche Lackier-Prozess sind dabei optimal aufeinander abzustimmen.

Auf dem Wege zu einer dauerhaft schmückenden und schützenden Lackierung durchlaufen die zu beschichtenden Karossen entsprechend zahlreiche Stationen.

Zunächst sind die im Rohbau gefertigten Karossen durch geeignete Vorbehandlungsmaßnahmen lackierbar zu machen. Die damit verbundenen Verfahrensschritte konzentrieren sich auf physikalische und chemische Reinigungs-Methoden und auf das Aufbringen anorganischer Konversionsschichten. An die Vorbehandlungsanlage schließen sich die Stationen der Tauchlackierung sowie der Trocknung und Härtung des Beschichtungsstoffes an.

Das Ziel eines jeden Teilschrittes im Bereich der Grundierung ist die absolut fehlerfreie Übergabe an den nächsten Prozessabschnitt. Die Anlagentechnologie nach dem heutigen technischen Stand ist über die Weiterentwicklungen der letzten Jahrzehnte auf einem guten technischen Niveau. Dennoch führen noch vorhandene Defizite zu negativen Beeinträchtigungen der Prozessstabilität, die häufig nur durch Zusatzaufwendungen zu eliminieren sind.

Der Autor sieht hier beachtlichen Potentialen, die im Sinne einer weiter verbesserten Qualität und Kostenstruktur zu optimieren sind.

### 6.1 Vorbehandlungsanlagen

In der Automobilindustrie hat sich im Bereich der Vorbehandlung zunehmend das Tauchverfahren gegenüber dem Spritzverfahren durchgesetzt. Die bessere Ausbildung von Konversionsschichten in Hohlräumen hat dazu den Ausschlag gegeben. Ebenfalls bei der Reinigung der Karossen galt es zunehmend eine gute Reinigung und Entfettung der Hohlräume durch das Tauchverfahren zu erreichen.

Das so genannte „Slipper-Dip-Verfahren“ kombiniert das Tauchen und Spritzen, indem die Karosse bis zur Gürtellinie getaucht und der obere Teil gespritzt wird.

Aus Platzgründen ist eine Zeit lang das „Vertak-Verfahren“ zum Einsatz gekommen. Hierbei werden die Karossen in mehreren Taktbecken pro Schritt senkrecht in das Becken getaucht und behandelt.

Auch das „Rodip-Verfahren“ kann als Taktverfahren eingestuft werden, hierbei wird die Karosse in das Becken hineingedreht, um schließlich waagerecht, allerdings kopfüber vorbehandelt zu werden. Bei diesem Verfahren liegen die Vorteile darin, dass die zu lackierenden Sichtflächen, wie Haube und Dach, durch mögliche Sedimente der Bäder nicht belastet werden.

Eine ähnliche Technologie wird mit dem „Vario-Shuttle-Verfahren“ realisiert, nur erfolgt der Transport innerhalb einer Durchlaufanlage mit einer sich drehenden Karosse und einer optimierten Durchspülung der Karosse.

Wegen der Vielzahl der Behandlungsschritte und unter anderem wegen der hohen Anforderungen an die Sauberkeit der Karosse beim Eintauchen in das nachfolgende Elektrotauchlackbecken sind Vorbehandlungsanlagen von imposanter Größe. Je nach Auslegung sind es 5 – 9 Zonen und ein bis zu 100m langer Tunnel aus Edelstahl, die eine Karosse zu durchlaufen hat.

Die Abwässer einer Vorbehandlungsanlage bedürfen sorgfältiger Beachtung, sind allerdings meist in üblichen Kläranlagen zu entsorgen.

### 6.1.1 Defizite - Vorbehandlung

- Starke Beladung der ersten Reinigungsbäder mit Rohbauschmutz
- Verharzte Öle und Fette führen zu Benetzungsproblemen, bis zur KTL
- Rohbau-Eisenspäne belasten die Vorbehandlung Anlagentechnik
- Strömung zu gering auf der Oberfläche und in den Hohlräumen
- Verschmutzung durch Anlagen- und Fördertechnik in den Bädern (z.B. Kettenabrieb, Korrosion von Bauteilen)
- Belastung durch Kettenschmieröle und Fette
- Zum Teil keine Automatisierung der Verfahrenschemie – Handverfahren !!!
- Schwankende Badwerte durch diskontinuierliche Messung und Nachdosierung
- Zunehmende Mischbauweise Stahl/verzinkter Stahl/Alu (Schlammbildung)
- Wartung und Reinigung der Anlagen verbesserungsfähig
- Organisatorische Unzulänglichkeit durch zu viel Fachgruppen (Elektriker, Schlosser, Maschinisten, Anlagenführer, Prozesstechniker) und ungenügende fachliche Koordination

## 6.2 Elektrotauchanlage

Die Anwendung von Elektrotauchlacken erfolgt in der Automobilindustrie aufgrund der Größe der Karosserien und der erforderlichen stündlichen Kapazität in relativ großen Becken, mit Inhalten, die besonders in der Nutzfahrzeugindustrie bis zu 500 m<sup>3</sup> Beckenvolumen betragen können. Die größten Becken sind Durchlaufanlagen, die die größte Produktivität von bis zu 60 Karossen pro Stunde gewährleisten.

Die Beckengröße spielt eine entscheidende Rolle für die Austauschgeschwindigkeit des Badmaterials durch die Kompensation. Den einmaligen theoretischen Materialaustausch bezeichnet man als „Turnover“. Der „Turnover“ darf für die KTL nicht wesentlich größer als 12 Monate sein, da sonst aus Gründen abnehmender Stabilität die Qualität der Beschichtung nicht mehr gewährleistet ist.

Die für die Anlage zum Einsatz kommenden Werkstoffe sind bei KTL-Anlagen Edelstahl und Kunststoffe.

Außer dem Tauchbecken aus kunststoffbeschichtetem Stahl sowie dem gleich großen Lackablass- oder Gegenbehälter benötigt eine Elektrotauchanlage folgende weitere Anlagenelemente:

- Stromversorgung
- Wärmeaustauscher
- Ultrafiltrationsanlage
- Filter
- Lackdosierung
- Anolytkreislauf
- Spülzonen

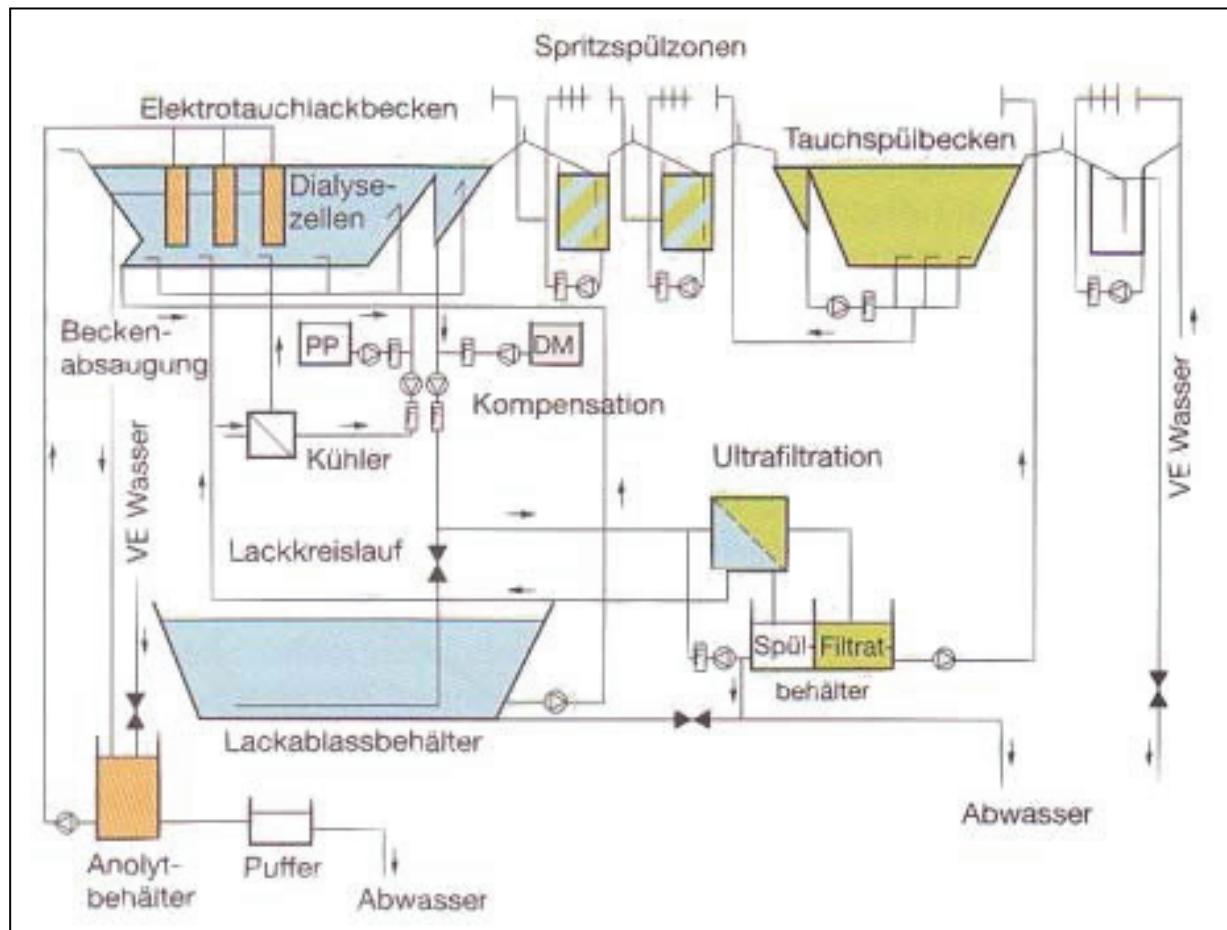


Abb. 6.2-1 Verfahrensschema der kathodischen Elektrotauchlackierung [2.15]

### 6.2.1 Stromversorgung

Für die Abscheidung von Elektrotauchlacken benötigt man gleichgerichteten Strom. Zur Vermeidung von zu hohen Stromdichten, wodurch Beschichtungsfehler entstehen können und das Lackmaterial sogar zerstört werden kann, wird ein Spannungsprogramm gefahren. Dieses dient dazu die Stromspitzen zu Beginn der Abscheidung zu reduzieren, indem die Spannung niedriger eingestellt ist als im späteren Verlauf des Beschichtungsprozesses.

In Durchlaufanlagen, wie sie üblicherweise im Automobilbau eingesetzt sind, befinden sich mehrere Karossen gleichzeitig im Elektrotauchbecken. Für die Stromversorgung sind hierfür zwei bis drei Gleichrichter- Anlagen notwendig.

Ein Gleichrichter ermöglicht die variable Einstellung eines separaten Spannungs-Programms für den Eintauchbereich, der zweite Gleichrichter versorgt die Hauptstromschiene im Becken und der dritte Gleichrichter den Auslaufbereich.

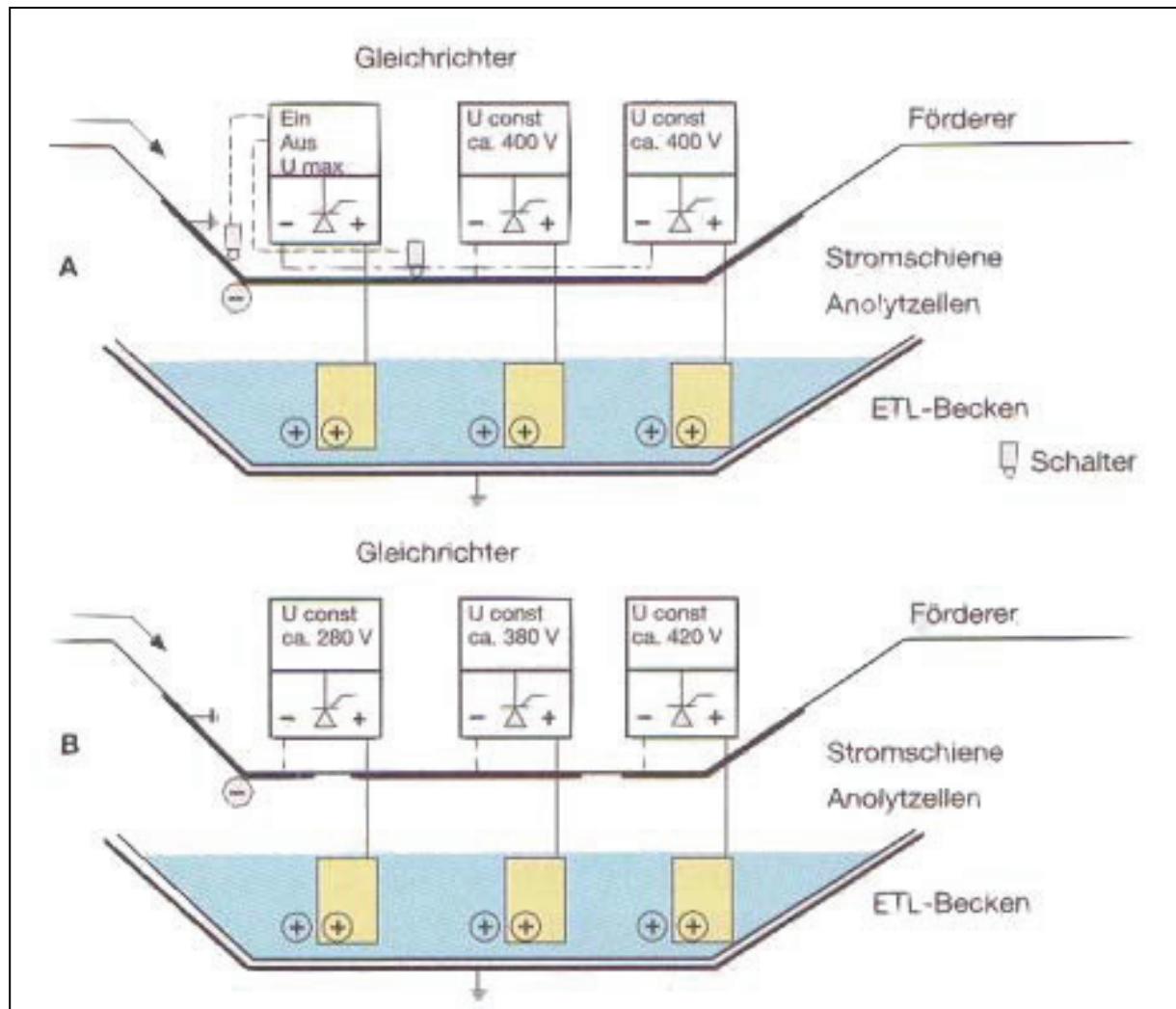


Abb.6.2.1-1 Prinzipien der elektrischen Schaltung in einer Karosserien-KTL-Anlage [2.16]

Bei der kathodischen Elektrotauchlackierung ist die Karosse als Kathode geschaltet und liegt im Beispiel A der Abbildung 6.2.1-1 auf Nullpotenzial, ist also geerdet, während die Anoden auf Pluspotenzial liegen. Das Spannungspotenzial wird im Beispiel B mit 3 Gleichrichtern aufgebaut und wird über die unterteilte Schiene über das Kathodenpotenzial aufgebaut.

Bei technischen Anlagen wird der Gleichstrom mit Thyristorgleichrichtern erzeugt. Um ein gutes Beschichtungsergebnis zu erreichen, sollte die Restwelligkeit der erzeugten Gleichspannung 5% nicht überschreiten. Die Beschichtungsspannungen betragen zwischen 300 und 450 Volt bei einer Beschichtungszeit von 2 bis 4 Minuten. Die Temperatur des Beckeninhalts liegt zwischen 25 und 35 °C.

## 6.2.2 Wärmeaustauscher – Lackkreislauf

Für den Betrieb des Wärmeaustauschers, der Ultrafiltrationsanlage und der Filter sind mehrere Kreisläufe mit Pumpen eingerichtet, die gleichzeitig dazu dienen, die Strömung im Becken so aufrecht zu halten, dass eine Sedimentation des Elektro-Tauchlackes vermieden wird. Dazu werden Strahldüsen in dem Becken so angeordnet, dass keine Strömungsträume entstehen. Bezogen auf den freien Querschnitt des Beckens soll die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von

0,3 – 0,5 m/s liegen. Dies bedeutet in etwa eine vier- bis fünfmalige Umwälzung des Beckeninhalts pro Stunde. Vor den Pumpen sollten in allen Kreisläufen Filter installiert sein.

Zu einer effektiven Filtration gehört die sorgfältige Auswahl der Absaugorte in dem Elektrotauchbecken. Es ist auf jeden Fall empfehlenswert, einen Teilstrom aus dem schmutzbelasteten Eintauchbereich abzusaugen.

Eine wichtige Rolle bei der Applikation spielt die Badtemperatur. Durch die eingetragene elektrische Energie während des Abscheideprozesses und der Reibungswärme der Umwälzpumpen erwärmt sich das Bad permanent und muss deshalb gekühlt werden. Abweichungen von mehr als 1 °C von der Soll-Temperatur wirken sich bereits auf die Schichtdicke und die Oberflächengüte des eingebrannten KTL-Films aus. Der Wärmeaustauscher muss so ausgelegt sein, dass selbst unter ungünstigen Bedingungen eines heißen Sommertages wie auch im Winter die empfohlene Badtemperatur eingehalten werden kann.

### 6.2.3 Ultrafiltration

Die Ultrafiltration ist eine Ergänzung zum Tauchprozess um eine hohe Material-Ausbeute zu erreichen. Unter Ultrafiltration versteht man einen Trennprozess, bei dem aus einer Dispersion oder kolloidalen Lösung niedermolekulare Bestandteile abgetrennt werden. Bei Elektrotauchlacken sind diese Bestandteile naturgemäß Wasser, organische Lösemittel, Elektrolyte und niedermolekulare Bestandteile des Bindemittels.

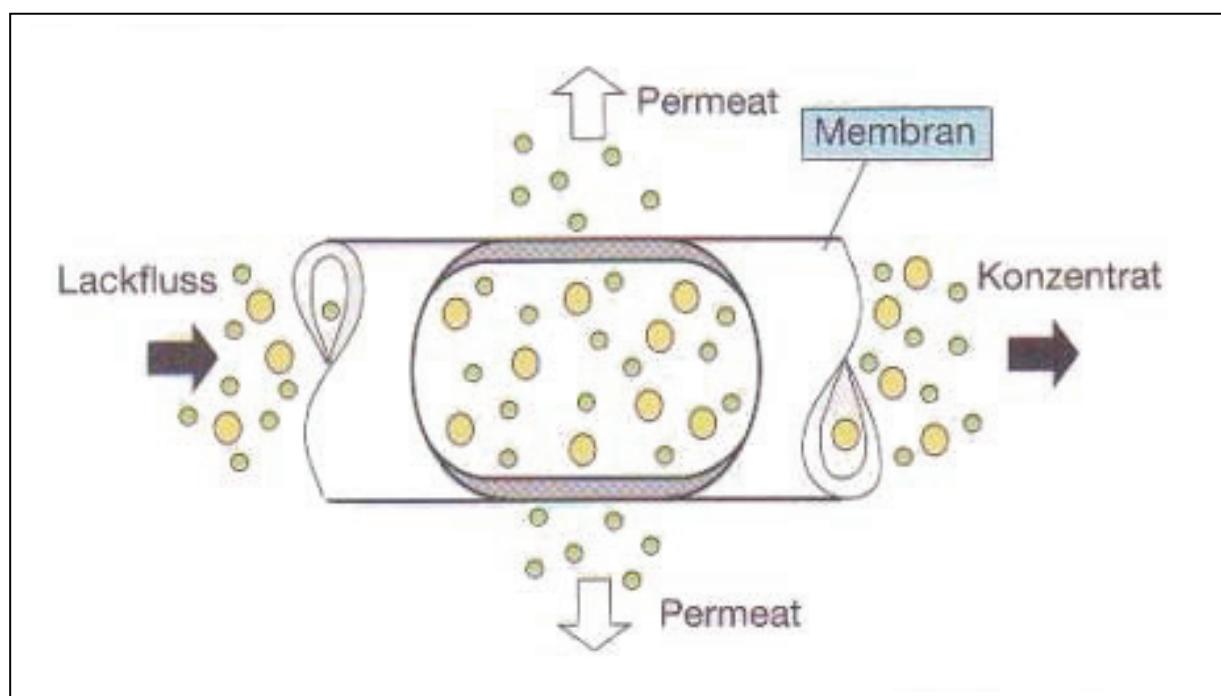


Abb. 6.2.3-1 Schema des Ultrafiltrationsprozesses [2.17]

Dazu wird der Elektrotauchlack mit hoher Geschwindigkeit an einer geeigneten Membran vorbeigeführt. Treibende Kraft zur Separierung an der Membran der Ultrafiltrationsmodule sind der Konzentrationsgradient zwischen der Innen- und Außenseite und ein Druckgefälle von einigen tausend hPa. Die Trengrenze bezogen auf Molekulargewichte gelöster Bestandteile und der Bindemittel-Dispersionen liegt je nach Membransystem zwischen 0,0015 und 1,0 µm.

Der Flüssigkeitsstrom, der die Membran passiert, wird als Permeat bezeichnet. Die beiden wichtigsten Größen für eine hohe Ausbeute an Permeat ist die Membranfläche und die Strömungsgeschwindigkeit des Elektrotauchlackes an der Membranoberfläche. Die Gesetzmäßigkeit verliert durch eine langsame Belegung der Membran mit Schmutz, instabilen Dispersionsteilchen und Pigmenten ihre Gültigkeit, so dass eine langsame Abnahme der spezifischen Ausbeute (Fluxrate) üblich ist. Durch Reinigung mit geeigneten Spülmitteln kann die Leistung wieder annähernd auf das ursprüngliche Niveau gebracht werden.

Das so erzeugte Ultrafiltrat wird als Spülmittel im Gegenstromprinzip in den letzten Spülkranz oder das Spülbecken der Anlage eingespeist. Das abfließende Spülmedium wird meist über zwei bis drei weitere Spülzonen in das Beckenmaterial zurückgeführt. Der Nutzungsgrad des Lackmaterials hängt naturgemäß von der Menge des in die Spülzone eingebrachten Ultrafiltrats ab.

Bei den Membranmodulen unterscheidet man je nach Systembauart zwischen einfachen Rohrmodulen, Hohlfasermodulen, Spiralmodulen und Plattenmodulen.

#### 6.2.4 Filter

Um defektfreie Oberflächen des Elektrotauchlackes bei einem Filmdicken von 20 bis 25 µm zu erzielen, dürfen keine Schmutz- oder sonstigen Partikel im Lack vorhanden sein, die einen Durchmesser in der Größenordnung der Schichtdicke besitzen oder diese überschreiten. Da die Bestandteile des Lackes bis zu etwa 5µm groß sind, gibt es Vorgaben für die Größe der Poren in den Filterbeuteln, die bei etwa 25 – 50 µm liegen. Als Filtermaterial wird bevorzugt Polypropylen in Nadelfilz-Ausführung verwendet. In der Regel werden alle Lackkreisläufe einer Filtration unterzogen.

#### 6.2.5 Lackdosierung

Die Nachfüllung durch Bindemittel und Pigmentpaste ist notwendig, um den zwangsläufig durch die permanente Abscheidung reduzierten Festkörpergehalt auf einem konstanten Sollwert zu halten.

In einem Nebenkreislauf werden über einen Rheinhüttemischer (inline-mixer) oder über ein Mischorohr (static-mixer) dem im Mischer strömenden Lackmaterial die Komponenten Pigmentpaste und Bindemittel zugesetzt.

#### 6.2.6 Anolytkreislauf

Die Installation eines Anolytkreislaufes ist für kathodisch abscheidbare Elektrotauchlacke und Kompensation mit zweikomponentigem, neutralisiertem Nachfüllmaterial notwendig, um die bei der Abscheidung freie Säure dem Lackbad zu entziehen. Andernfalls ginge das Säure-Basen-Gleichgewicht verloren. Der daraus resultierende niedrige pH-Wert würde zu mangelhaftem Abscheideverhalten des Lackmaterials u.a. wegen des Anstiegs der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit führen. Zwei Elemente zeichnen den Anolytkreislauf aus: Zum einen die semipermeable Anionenaustauschermembran vor der Anode, zum anderen die Wasser-Zuführung, die über eine Leitfähigkeitsmessung gesteuert wird.

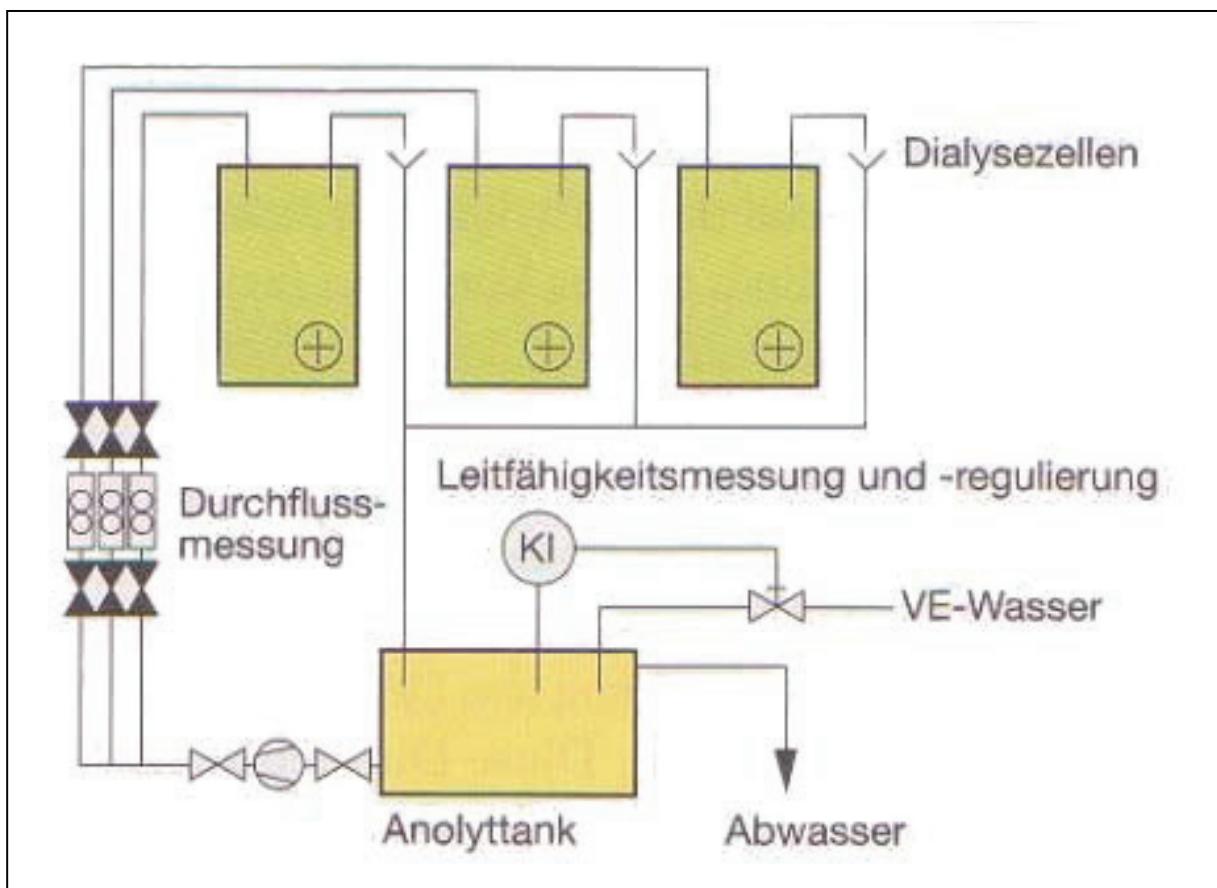


Abb. 6.2.6-1 Schema des Anolytkreislaufes [2.18]

Die Anionenaustauschermembran schließt die Box, in der die Anode untergebracht ist, zum Elektrotauchlackbecken ab. Sie ermöglicht es, dass bei Stromfluss und erfolgender Abscheidung des Elektrotauchlackes lediglich die zur Elektroneutralität notwendigen Anionen die Membran in Richtung Anode passieren können. Ist keine Spannung angelegt, wirkt sie als Elektrolytsperre.

Die Säurekonzentration wird mittels einer Leitfähigkeitsmessung und Regel-Einrichtung zur Absenkung durch Zugabe von vollentsalztem Wasser zum Anolyttank gesteuert. Die aufkonzentrierte Säure wird über einen Überlauf ausgeschleust. In den meisten Fällen handelt es sich um Essigsäure, gelegentlich Milch- und Ameisensäure, die zur Entsorgung durch einfache Neutralisation aufbereitet werden.

## 6.2.7 Spülzonen

Der auf der austauuchenden Karosse abgeschiedener Elektrotauchlack haftet fest auf dem Substrat und ist stark strukturiert bzw. porös. Auf seiner Oberfläche ist ein Flüssigkeitsfilm, bestehend aus Badmaterial und eingeschlossenen Gasblasen. Wird dieser Film nicht rechtzeitig entfernt, kommt es nach Antrocknung zu starken Oberflächenstörungen, die im Laufe des Einbrennvorganges nicht beseitigt werden können. Darüber hinaus würde es bei komplettem Ausfall einer Spülzone zu einem Materialaustrag von bis zu 60% (bezogen auf den abgeschiedenen Lackfilm) kommen. Die Spülzone dient somit der Optimierung der Oberflächenqualität und des Materialauftragswirkungsgrades und wird mit dem Ultrafiltrat im Gegenstrom beschickt.

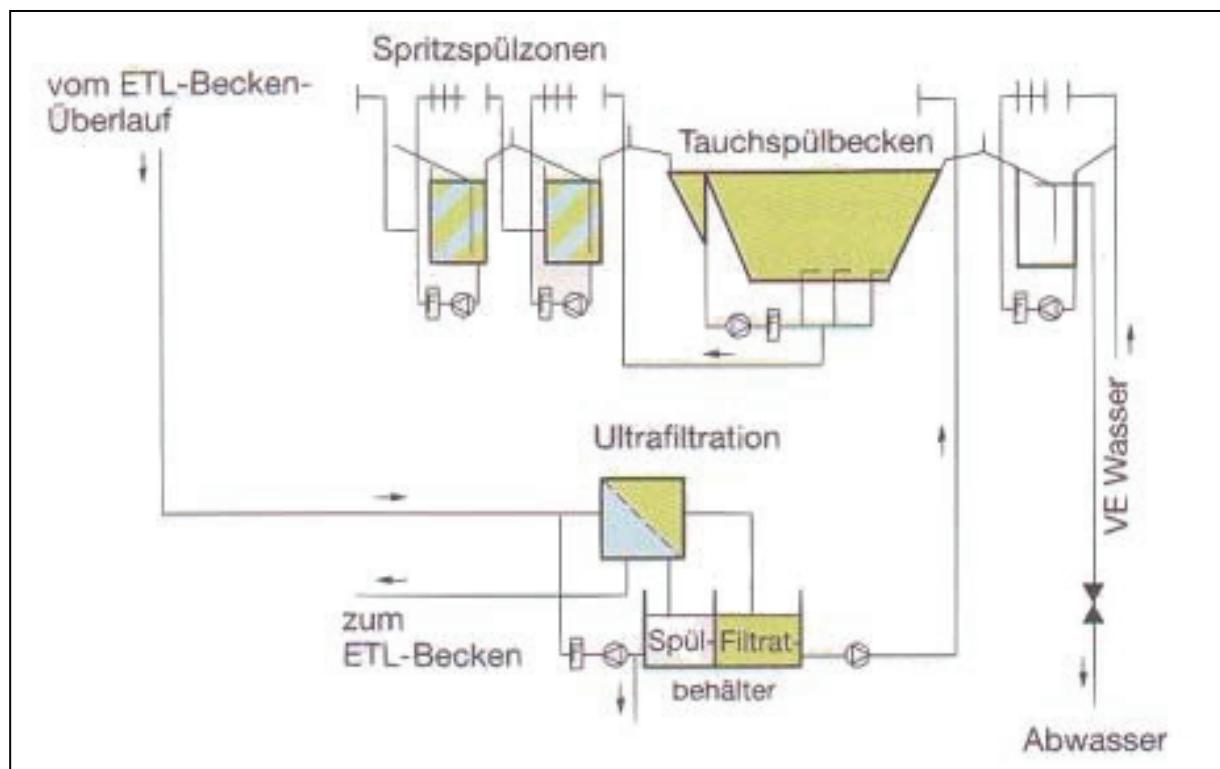


Abb. 6.2.7-1 Schema einer Spülzone mit Tauchspülbecken [2.19]

Üblicherweise hat die Spülzone 5 oder 6 Einzelstationen:

1. Spülung der Oberfläche kurz nach dem Austauchen
2. Zone 1 - Spritzen
3. Zone 2 - Spritzen (Tauchen)
4. Zone 3 - Tauchen
5. Spritzen mit reinem Ultrafiltrat
6. Optional : Spritzen mit vollentsalztem Wasser

Auf die letzte Spülung mit vollentsalztem Wasser wird in der Automobilindustrie weitgehend verzichtet, da die Ultrafiltratqualität durch Optimierung der Membranen und des Elektrotauchlackes dem Zustand des vollentsalztem Wasser sehr nahe gekommen ist und damit Kosten gespart werden.

Der Spülvorgang in Zone 1 muss in weniger als 1 Minute nach dem Austauchen erfolgen. Dies geschieht mit Sprühdüsen, die oberhalb und an den Seiten der Karosse noch über dem Auslaufbereich des Tauchbeckens installiert sind.

Es folgen drei Spülzonen, die aufgrund des Eintrages von anhaftendem Elektrotauchlack unterschiedliche Lackkonzentrationen besitzen und als Kaskade in Richtung Elektrotauchbecken verbunden sind.

Das reine Ultrafiltrat wird in der letzten Spülzone vor dem VE Wasser-Sprühkranz eingespeist.

Je nach der Menge des eingespeisten Ultrafiltrats und der Beschichtungsmenge stellen sich Festkörperanteile von 1 – 2% in Spülzone 1 und etwa 0,5 – 1,0% in Spülzone 3 ein. Dabei gilt als Faustregel für die Auslegung der Ultrafiltrationsanlage, dass pro m<sup>2</sup> zu beschichtende Oberfläche etwa 0,8 bis 1,5 l Ultrafiltrat zur Verfügung stehen sollen.

Aufgrund des kompletteren Spülvorganges werden in der Automobilindustrie fast nur noch Tauchbecken für die Spülzonen 2 und 3 benutzt.

Die mit solchen Kaskadenspülungen konzipierten Anlagen erreichen einen Materialauftragswirkungsgrad von mehr als 98 %.

### 6.2.8 Elektrotauchlack-Trockner

Nach dem KTL-Prozess durchlaufen die Karossen eine Auslaufstrecke mit integrierter Kippstation zur Vermeidung von Lack- bzw. Spülwasserverschleppungen. Diese Zeit sollte so lange wie möglich sein, Werte von 15 Minuten wären optimal.

In der Automobilindustrie werden üblicherweise Durchlauftrockner als Flachetrockner oder so genannte „A-Trockner“ eingesetzt. Der „A-Trockner“ hat wegen der besseren Warmluftführung energietechnische Vorteile.

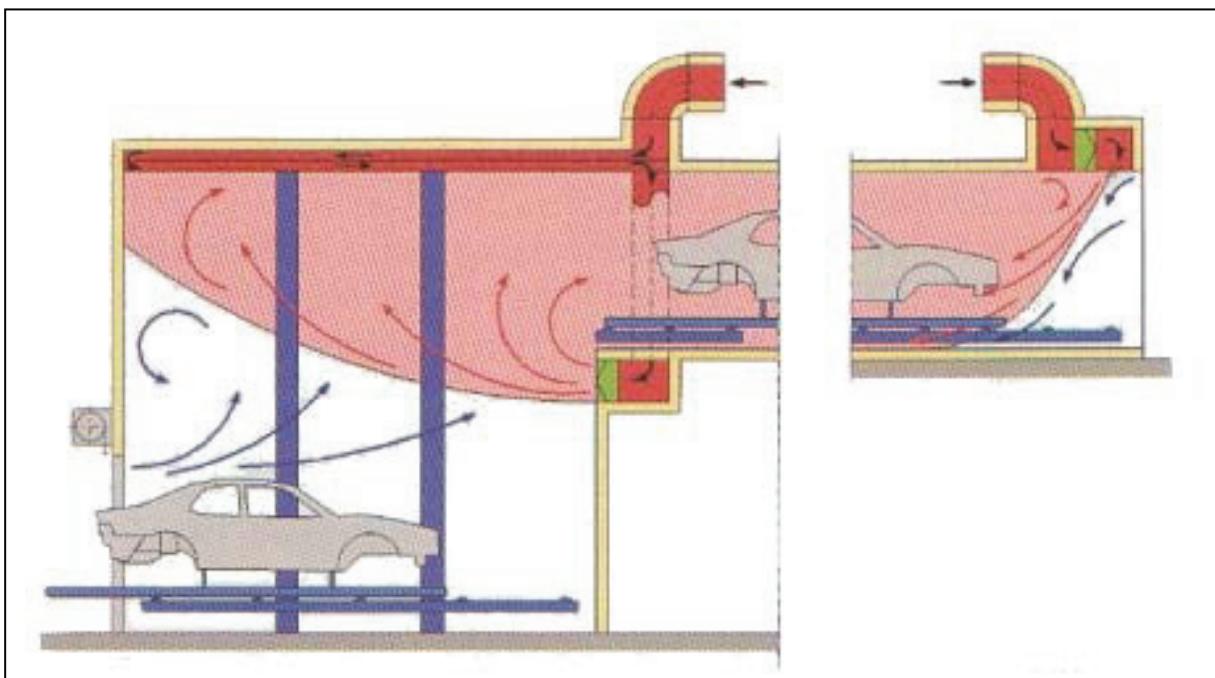


Abb. 6.2.8-1 Schema eines A-Trockners mit und ohne Luftschieleuse [2.20]

Wegen der sich beim Trocknerdurchlauf permanent ändernden Filmzustände bezüglich Objekttemperatur, Vernetzungsgrad und der Abgabe an Lösungsmittel und Spaltprodukte ist es nicht sinnvoll, den gesamten Trockner mit einem einzigen Aufheiz- und Luftführungssystem auszustatten. Üblich ist es, Trockner in 3 bis 5 Einzelaggregate zu teilen und diese separat mit Energie zu versorgen.

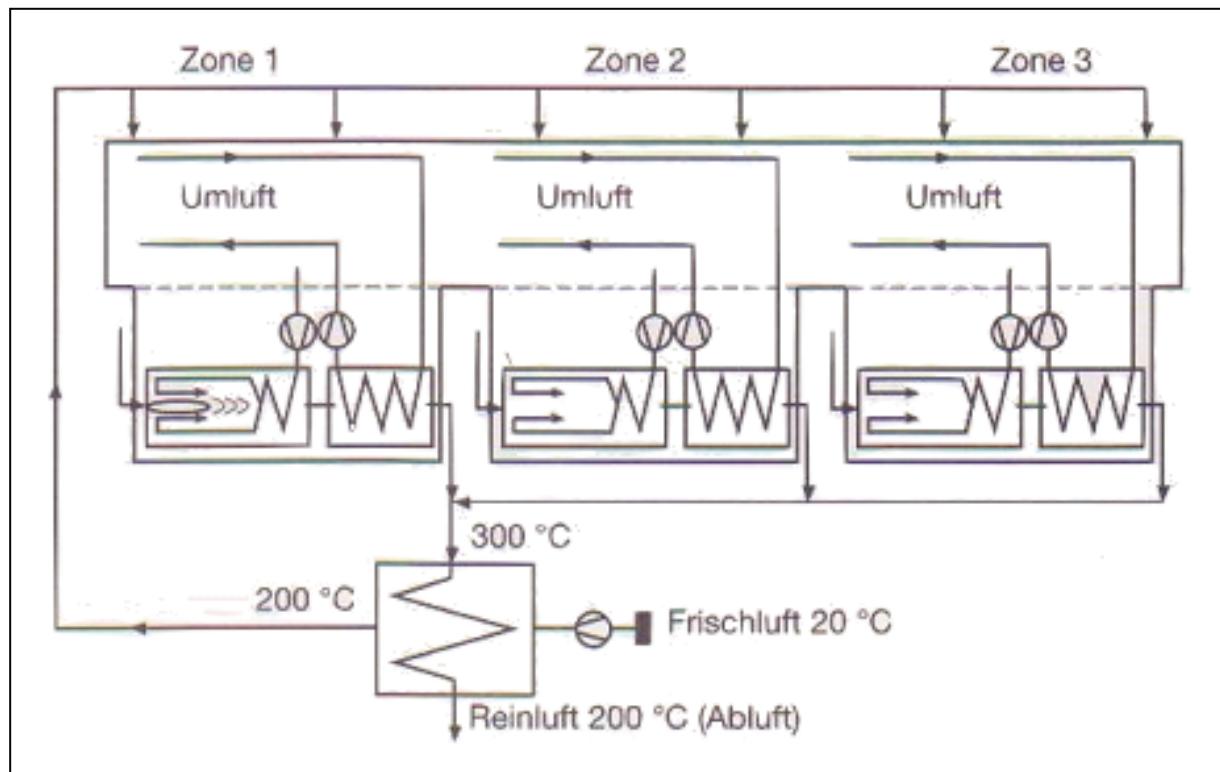


Abb. 6.2.8-2 Schema eines Mehrzonen-Trockners [2.21]

In der ersten Zone, der Aufheizzone, sind die Objekttemperaturen noch niedrig und der Lösemittel- und Wasserdampfgehalt entsprechend hoch. In der sich anschließenden Haltezone erfährt die Beschichtung starke Veränderungen bezüglich des Verlaufens und der Verfestigung durch Trocknung und Härtung. Der Hauptanteil an Spaltprodukten verlässt den Film in diesem Bereich. In den sich anschließenden Haltezonen ist die Lösemittelabgabe abgeschlossen. Trotz nur noch geringen Anstiegs des Vernetzungsgrades sind die qualitativen Veränderungen der Lackierung in diesen Bereichen aber noch erheblich. Die Filmeigenschaften erreichen erst im letzten Teil des Trockners ihre Zielwerte.

Die Trockner- Durchlaufzeit für eine Karosse beträgt im Durchschnitt 30 – 45 Minuten. Die Einbrenntemperaturen liegen für die Karosse bei 160 – 190 °C, die entsprechenden Umlufttemperaturen liegen ca. 30°C höher.

Chemisch erfolgen während des Einbrennvorganges die bereits beschriebene Deblockierung des verkappten Isocyanats und eine teilweise Kondensatbildung durch Spaltprodukte. Diese Kondensatbildung kann zu ungewollten Verschmutzungen der Karosse während des Einbrennvorgangs führen.

Zur Sicherstellung einer konstanten Einbrennqualität wird eine spezifische Soll-Temperaturkurve für den jeweiligen Karosserietyp vorgegeben. Danach wird der Trockner eingestellt und es erfolgt nach einer festgelegten Betriebszeit eine turnusmäßige Überprüfung und Protokollierung der Karosserien-Objekttemperatur-Kurve und bei Bedarf eine entsprechende Korrektur der Einstellwerte. Moderne Systeme arbeiten mit einer berührungslosen Infrarot-Messung entlang des Trocknerkanals und einer permanenten Temperatur erfassung und Regelung.

Für eine wirtschaftliche Fahrweise von Trockner sind unter Beachtung der aus Sicherheitsgründen vorgeschriebenen Grenzkonzentrationen möglichst hohe

Umluftanteile einzustellen. Dadurch liegen die Konzentrationen der organischen Emissionen in der Ofenluft bei mehreren g/m<sup>3</sup> und damit weit oberhalb der in der TA-Luft und der VOC-Richtlinie festgelegten Grenzwerte. Die Ofenabluft muss deshalb durch Nachreinigungsanlagen entsprechend den zulässigen Grenzwerten aufbereitet werden. Die übliche Technik ist hier die Thermische Nachverbrennung (Abkürzung: TNV). Da die durch die Nachverbrennung erzeugte Wärmeenergie sinnvoll zur Beheizung von Trockenöfen mit verwendet werden kann, sind TNV-Anlagen häufig ein integrierter Bestandteil von Trocknungsanlagen.

### 6.2.9 Defizite – Elektrotauchlackierung

Die häufigsten Defizite in der Elektrotauchlackierung liegen im Bereich der Lackier- Verschmutzungen und einem weiteren Feld von spezifischen Einzel-Fehlerarten.

#### 6.2.9.1 Defizit – Lackverschmutzung und Ursachen

Ursachen für Verunreinigungen von Elektrotauchlacken können sein:

- Einschleppen von Schmutz aus dem Rohbauprozess
- Schmutz aus dem Umfeld der KTL- Anlage
- Abrieb und Schmutz vom Fördersystem
- Angetrocknetes Lackmaterial von Gehängen/ Karossenträger
- Koagulation und Ablagerung des Elektrotauchlackes
- Elektrische Durchschläge/ zu hohe Spitzenspannung
- Verschmutztes Spülwasser/ vollentsalztes Wasser
- Koagulatbildung durch Scherkräfte z.B. in defekten Pumpen

#### 6.2.9.2 Defizit – Beckenströmung

Schmutzpartikel aus den genannten Ursachen haften aufgrund von Adhäsionskräften auf der Karossoberfläche und werden wegen nicht optimaler Strömungs- Verhältnisse in den Tauchbädern nicht von der Oberfläche gelöst und werden somit in die abgeschiedene Schicht eingebettet. Diese Schmutzpartikel sind in der Lackschicht fixiert und lassen sich in den Spülzonen nicht mehr abspülen und werden mit eingearbeitet.

Der Grund für diese negative Situation liegt nach Ansicht des Autors in der vereinfachten Auslegung der Düsenysteme und der zu geringer Pumpen- Umwälzleistung. Üblicherweise sind die Düsenysteme im Bodenbereich gegen die Laufrichtung gerichtet. Das heißt, im unteren Karosserbereich verläuft die Strömung gegen die Förderrichtung und im oberen oberflächentechnisch kritischen Bereich verläuft die Strömung parallel zur Karosser-Förderrichtung, sodass sich die Strömungsgeschwindigkeiten bezogen auf die Grenzschicht subtrahieren. Damit stellen sich extrem niedrige Strömungsgeschwindigkeiten (0,05 – 0,1 m/s) auf der Oberfläche ein, sodass Schmutzpartikel nur ungenügend abgelöst werden. Weiter besteht die Gefahr von Lacksedimentationen auf den horizontalen Flächen.

#### 6.2.9.3 Defizit – Einzelfehlerarten

Es ist zu beachten, dass Kontaminationen des Beckens aus dem gesamten Fertigungsprozess vermieden werden müssen. Die umweltfreundlichen Elektrotauchlacke mit niedrigen Lösemittelgehalten lassen sich durch hydrophobe Silikone im ppm-Bereich oder durch chlorierte Kohlenwasserstoffe sogar im

ppb- Bereich so kontaminieren, dass entweder Krater in der Beschichtung selbst auftreten oder auf Grund von Benetzungsstörungen sogar in der nachfolgenden Füllerschicht dann Krater erzeugt werden können.

Daneben gibt es einige sehr spezifische Störungen, die ihre Ursachen im Prozess, in der Badführung oder der Lackqualität haben können. Diese äußern sich in kleinen Pusteln oder Pieken, mit bis zu Zentimeter großen Störungen in Form von quasi zusammengeschmolzenen, koagulierten und örtlich begrenzten Flächen der Beschichtung. Ursachen können in zu hoher Spannung, Badtemperatur und Badleitfähigkeit in der Prozessführung liegen. Hier sind die entsprechenden Maßnahmen das Absenken der Spannung oder der Badtemperatur sowie das Verwerfen eines Teils des Ultrafiltrats und Ersatz durch vollentsalztes Wasser.

Ein weiterer, in Durchlaufanlagen auftretender Defekt sind Eintauchmarkierungen, die in Form von Wülsten und Pieken auf dem eintauchenden Teil zu finden sind. Ursache hierfür können Schaum auf der Badoberfläche sein oder zu hohe Stromdichten in der Eintauchzone. Auch Probleme bei der Benetzung des Substrats durch den Elektrotauchgrund können zu ähnlichen Defekten führen.

Beim Spülprozess treten Wassertropfenmarkierungen dann auf, wenn eine schlechte und eventuell zu späte Spülung im Austauchbereich erfolgt oder generell eine zu geringe Menge an Ultrafiltrat für den gesamten Spülprozess erzeugt wird.

Die Nadelstiche (Englisch: "pinholes") sind bei Elektrotauchlacken nicht nur auf die Wasser- und Lösemittelgehalte zurückzuführen, sondern eher auf die Badzusammensetzung bezüglich eines zu geringen Bindemittel-Pigment-Verhältnisses oder auf eine zu niedrige Badtemperatur. Großflächige Oberflächenstörungen können auch durch eine bakterielle Kontamination verursacht werden. Dies kann bakteriologisch untersucht und mit entsprechenden Bakteriziden bekämpft werden.

## 7 Strömungsmechanische Grundlagen zur Karossenvorbehandlung

Diesem Kapitel liegt das technische Problem zu Grunde, Automobilkarossen zu reinigen und auf die hochwertige Lackierung vorzubereiten. Insbesondere steht die strömungsmechanische Wirkung auf die Reinheit der Karosseriebeschichtung im Focus.

Das Reinigen und Vorbehandeln erfolgt, wie bereits beschrieben, in mehreren Arbeitsschritten. Hierbei werden die Karossen durch verschiedene Tauchbecken geführt, die mit unterschiedlichen flüssigen Chemikalien gefüllt sind. Zwischen den Tauchvorgängen werden die Karossen äußerlich mit Hochdruckdüsen abgespritzt.

Dabei tritt in vorhandenen Anlagen das Problem auf, dass bei jeder Beckendurchfahrt erneut Schmutzpartikel aus dem Karosserinnenraum ausgewaschen werden. Diese Schmutzpartikel setzen sich vornehmlich auf den horizontalen Oberflächen der Karossen ab, lagern sich in nachfolgenden Lackschichten ein, und müssen in späteren Arbeitsschritten unter großem finanziellem Aufwand abgeschliffen werden.

Da es zunächst nicht möglich ist, die Schmutzpartikel vollständig aus dem Karosserinnenraum zu entfernen, muss es das Ziel sein durch entsprechende Strömungsoptimierungen das Anhaften dieser Partikel auf der Karossoberfläche zu verhindern. Dieser Effekt könnte durch eine günstige Globalströmung in jedem Becken erreicht werden. Die Idee beinhaltet, durch eine technische Modifikation die Strömung im Becken in der Art zu beeinflussen, dass an den kritischen Stellen des Beckens und der Karossen die Strömungsgeschwindigkeit bzw. Turbulenz so hoch gehalten wird, dass dort Sedimentationen und Partikelanhaltungen nahezu ausgeschlossen werden. Zur Vorbereitung solcher Modifikationen wird im folgenden Abschnitt eine numerische Simulation einer solchen Beckenströmung durchgeführt.

### 7.1 Modell „Tauchbecken – Karosse“ in Vorbehandlungsbädern

Für die Modellbildung stand ein Tauchentfettungsbecken „Bremer Bauart“ zur Verfügung, welches nach fachlicher Einschätzung des Autors in den wesentlichen konstruktiven Details durchaus mit anderen Becken in der europäischen Automobil-Industrie vergleichbar ist.

In der Simulation des Beckens galt es Zonen zu identifizieren, in denen Gefährdungen für Schmutzablagerungen vorliegen. Dabei wird zwischen der reinen Beckenströmung, ohne Karosse, und der Beckenströmung mit Umströmung der Karossen unterschieden.

Der erste Punkt, die Untersuchung der reinen Beckenströmung, dient der Grundlagenforschung. Es wird dabei speziell untersucht, ob die aktuelle Anordnung und Ausrichtung der Einströmdüsen bereits im leeren Becken ungünstige Strömungs-Verhältnisse erzeugt.

Der zweite Punkt beschäftigt sich mit den Strömungskonditionen in einem Tauchbecken mit darin befindlichen Karossen unter Produktionsbedingungen. Zu diesem Zweck werden einfache Modellkarossen in das zu berechnende Volumen eingearbeitet, die aus quasistatischen Wänden zusammengesetzt sind.

Bei dieser Untersuchung steht die Frage im Mittelpunkt, wie die horizontalen Oberflächen der Karossen umspült werden. Aber auch das Entstehen neuer Verschmutzungszonen im Becken durch Reflexion und Umlenkung des Fluids an den Hindernissen wird erforscht.

## 7.2 Vorgehen bei der numerischen Simulation von komplexen Geometrien

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise lässt sich grundsätzlich auf beliebige Strukturen und Volumen übertragen.

Für die Durchführung der Simulation waren fünf Teilschritte erforderlich.

### 7.2.1 Konstruktion des zu berechnenden Volumens mit Pro/Engineer

Die geometrischen Daten des Vorbehandlungsbeckens Bremer Bauart wurden von der Daimler Chrysler AG zur Verfügung gestellt. Es wurde mit Hilfe des CAD-Programms Pro/Engineer detailliert nachkonstruiert. In Längsrichtung wurde die Symmetrie ausgenutzt, ohne die eine Berechnung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich gewesen wäre. Das halbe Becken ist ca. 15m lang, 3m hoch und 3m breit. (siehe Abbildung 7.2.1-1) Knapp über dem Boden befinden sich zehn Rohre, die Düsenstöcke, mit jeweils 6 Düsen. Ein weiterer Düsenstock befindet sich am oberen Ende der Schräge, dieser ist mit 11 Düsen bestückt. Durch diese Düsen wird gefiltertes Fluid in das Becken gepumpt. Gut zu erkennen sind weiterhin der so genannte "Tankbug" mit runder Öffnung und der an der Seite angebrachte Kasten, in dem mehrere Siebe eingebaut sind. Die Austrittsfläche des Kastens ist 1060 mm hoch und 1700 mm breit. Am Tankbug und am Kasten wird jeweils Fluid abgesaugt.

Folgende Vereinfachungen wurden getroffen:

- Die Düsen selber wurden nicht modelliert. Das Fluid strömt aus Flächen, die direkt auf die Düsenstöcke selbst projiziert wurden und einen Durchmesser von 70 mm haben.
- Das runde „Outlet 1“ im Tankbug sitzt normalerweise direkt auf dem Boden auf.
- Um die spätere Vernetzung zu vereinfachen, wurde es um 10 mm angehoben. Das „Outlet 1“ hat einen Durchmesser von 200 mm.
- Über dem schrägen Bereich des Tauchbeckens werden die Karossen beim Ein- bzw. Austrauchen außerhalb des Tauchbeckens von Hochdruckdüsen abgespritzt. Da dieser Vorgang nicht zu simulieren war, wurde davon ausgegangen, dass die gleiche Menge Fluid direkt in der Fläche über der Schräge in das Becken hinein sickert. Auf diese Weise konnte die Massenbilanz des Originals korrekt dargestellt werden.

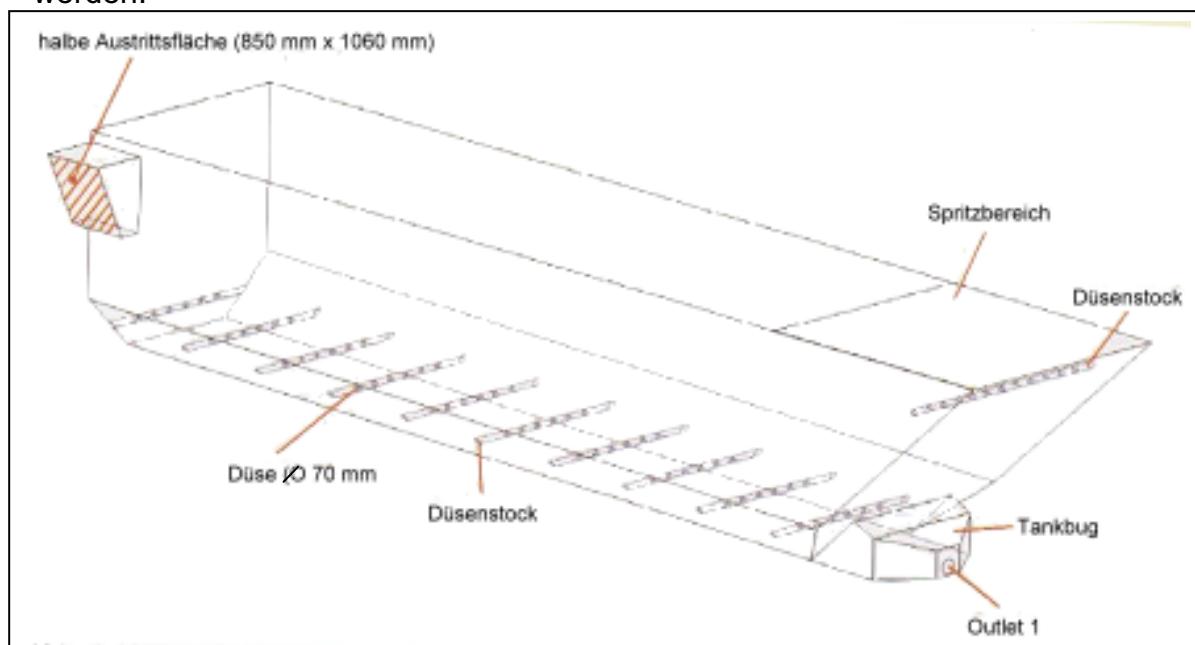


Abb. 7.2.1-1 Halbes Becken ohne Karossen und Seitendüsen [16]

### 7.2.2 Festlegung der „Familiennamen“ mit dem ICEM CDF Mesher Interface

Nachdem man eine beliebige Geometrie konstruiert hat, ist es absolut notwendig, ihre Bestandteile für nachfolgende Anwendungen identifizierbar zu machen. Zu diesem Zweck werden „Familiennamen“ verteilt. Ohne diese Namensgebung wäre es später unmöglich, bestimmten Flächen spezifische Eigenschaften (z.B. Einlass, Öffnung, Wand) zuzuordnen.

### 7.2.3 Vernetzung der Geometrie mit ICEM CFD

Zunächst werden die vom Mesher Interface generierten TETIN- Daten eingelesen. Sie werden als Kurven sichtbar. Anschließend muss man sich für eine Art der Vernetzung entscheiden. Für diese Untersuchung wurde das Unterprogramm ICEM Hexa ausgewählt, da TASCflow nur Hexagone als Volumenelemente akzeptiert.

Die Vernetzung mit ICEM CFD beruht auf folgendem Prinzip:

Jede Geometrie wird zunächst als quaderförmiger Block dargestellt. Durch Unterteilung des Gesamtvolumens in viele kleinere Abschnitte und die Projektion der entstehenden Kanten auf Kurven und Flächen der wahren Geometrie, werden die Blöcke dieser angeglichen. Die Abbildung 7.2.3-1 zeigt diesen Zustand, wobei in diesem Bild noch nicht das fertige Netz dargestellt ist. Erst wenn jeder Kante eine physikalisch sinnvolle Anzahl von Knoten zugeordnet wurde, kann man einen Schritt weiter gehen und die Daten exportieren. Das Multiblockgitter wird mit dem Befehl MULTIBLOCK vom Unterprogramm Hexa ins Hauptprogramm ICEM CFD geschrieben. Es entsteht daraus ein vollständiges Netz für das komplette Tauchbecken.

Das Koordinatensystem wurde so gewählt, dass die Fluidoberfläche parallel zur xz-Ebene verläuft. Der Beckenboden ist zum Bug hin abschüssig und daher nicht parallel zur xz-Ebene. Das halbe Becken ohne Karossen wurde mit ca. 430.000 Knoten vernetzt. Das fertige Gitter wird über den Menüpunkt OUTPUT im ICEM- Hauptprogramm exportiert.

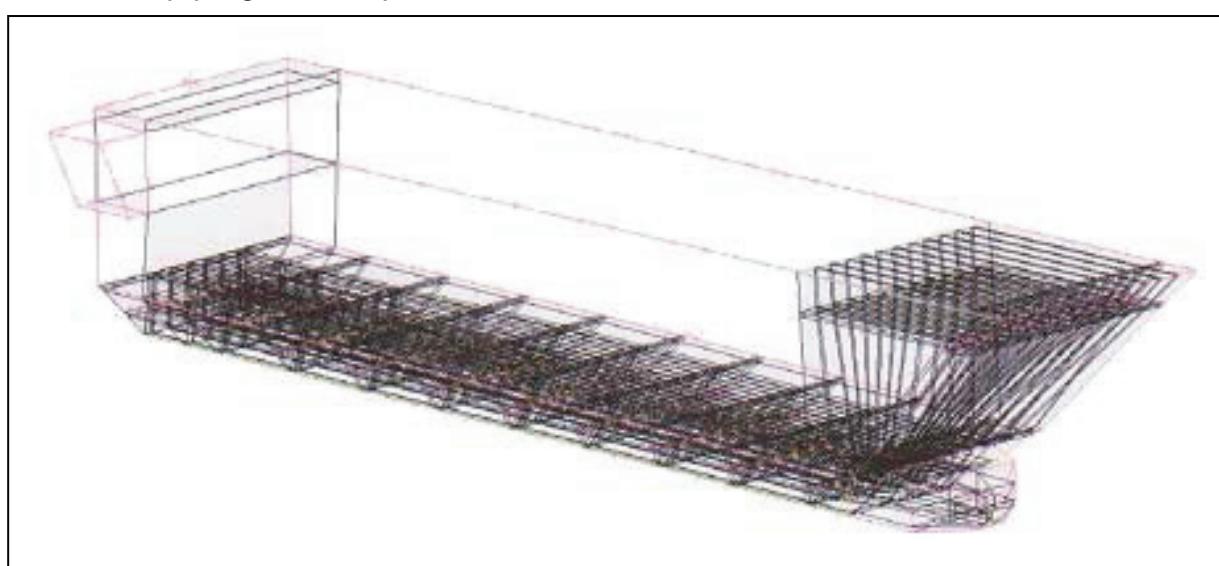


Abb. 7.2.3-1 Blockweise Anpassung des Berechnungsvolumens an die wahre Geometrie mit ICEM CFD [17]

### 7.2.4 Berechnung mit dem Löser CFX-TASCflow3D

Die mit ICEM CFD erstellten Gitterdaten sind im Unterverzeichnis TRANSFER auf unterstem Niveau der Modellverzeichnisstruktur wieder zu finden. In demselben Verzeichnis wird TSAKflow gestartet, entweder das Graphical User Interface (GUI) oder nacheinander die verschiedenen Unterprogramme(z.B. TASKbob3D, TASCTool).

Als nächstes wurden die Eigenschaften des Fluids festgelegt. Die Daten sind sehr ähnlich, wie bei Wasser:

$$\begin{aligned} \text{Zähigkeit} \quad \mu &= 0,050 \quad \text{Ns/ m}^2 \\ \text{Dichte} \quad \rho &= 998,20001 \quad \text{kg/ m}^3 \end{aligned}$$

Der letzte Punkt der Berechnungsvorbereitung beinhaltet das Festlegen der Rand- und Anfangsbedingungen. Eine Übersicht über die Randbedingungen für das halbe Becken zeigt Tabelle 7.2.4-1

Zur Festlegung der Randbedingungen wurden die Ergebnisse der Studie „Experimentelle Analyse der Ausbreitungscharakteristik eines Düsenfreistrahls mittels Laser-Doppler Anemometrie“ verwendet. Der Forschungsbericht verdeutlicht, dass die im Bremer Becken verwendete Körtingdüse eine Strömungsablösung aufweist. Da das numerische Gitter nicht so fein gemacht werden konnte, um die Strahlcharakteristik im Simulationsmodell detailliert wiedergeben zu können, wurde der experimentell ermittelte Impulsstrom der Körtingdüse auch in dem numerischen Projekt übernommen und die Annahme getroffen, dass der Impulsstrom gleichmäßig über den Düsenquerschnitt A Düse = 0,00385 m<sup>2</sup> (D=70mm) verteilt ist. Zur Impulserhaltung, ausgedrückt über die verwendeten Navier-Stokes-Gleichungen, wurde daher für Inlet 1, Inlet 2 und Inlet 3 eine mittlere Düsen-Austrittsgeschwindigkeit von 2,04 m/s ermittelt.

Jedem Einlass muss außerdem eine Turbulenzstärke zugewiesen werden.

Es wurde jeweils die Einstellung MEDIUM mit folgenden voreingestellten Werten verwendet:

Intensity = 0,05 (Turbulenzintensität = 5%)

Eddy Viskosity Ratio = 10 (turb./molekular)

Randbedingung	Geschwindigkeit (m/s)
Inlet 1(6 Bodendüsen, Nähe Symm.Ebene)	2,04
Inlet 2 (54 Bodendüsen)	2,04
Inlet 3 (11 Düsen im oberen Düsenstock)	2,04
Inlet 4 (Fläche über der Schrägen)	0,0045241
Opening 1 (im Tankbug)	wird berechnet
Outlet 2 (Seitenkasten)	0,03792
Symmetrie 1	0
Symmetrie 2 (freie Oberfläche)	0
Wall (alle übrigen Wände)	0

Tabelle 7.2.4-1 : Randbedingungen für das halbe Becken [16]

Als Anfangsbedingung wurde eine uniforme Geschwindigkeit, also für jede Zelle des Beckens geltend, von 0,1 m/s in Richtung der x-Achse angenommen. Der Vorbereitungsprozess wird durch den Befehl WRITE PREPROZESS abgeschlossen. Anschließend kann der SOLVER MONITOR gestartet werden.

### 7.2.5 Auswertung der Daten mit TecPlot

Tecplot ist ein multifunktionelles Auswertungsprogramm, mit dem sowohl Diagramme als auch Graphiken in 2D oder 3D erstellt werden können. Um die Gitter- und Ergebnisdateien vom TASCflow-Format in das von TecPlot zu konvertieren, stand das Tool TASC2TPL.exe zur Verfügung.

## 7.3 Grundgleichungen der Strömungsphysik zur numerischen Simulation

Bei TASCflow handelt es sich um einen 3D-Navier-Stokes-Solver, das heißt das Programm löst die reibungsbehafteten Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichungen. Als Basis werden sie in der Form für laminare Strömungen verwendet. Im Falle von Turbulenz werden die Grundgleichungen entsprechend des verwendeten Turbulenzmodells ergänzt. Grundlage für die Berechnung ist ein strukturiertes Multiblockgitter, das das Rechengebiet in hexaederförmige Zellen unterteilt. In jeder dieser Zellen werden die Gleichungen von Navier und Stokes gelöst. Man spricht deshalb von der Finite-Volume-Methode [16].

Für das hier zu lösende Problem wird die Strömung als stationär, inkompressibel und turbulent angenommen. Die inkompressiblen Formen der Gleichungen wurden zusätzlich mit dem Verfahren des Reynolds-Averaging behandelt, bei dem davon ausgegangen wird, dass sich jede Strömung aus einem konstanten und einem stochastischen Teil zusammensetzen lässt. Nach dem Prinzip besteht die Geschwindigkeit  $U$  z.B. aus folgenden Elementen:

$$U = \bar{U} + U'$$

Dabei beschreibt  $\bar{U}$  den konstanten und  $U'$  den stochastischen Teil der Geschwindigkeit.

Folgende Gleichungen werden von TASCflow gelöst :

Kontinuitätsgleichung (allgemeine Form) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

Inkompressible und stationäre Strömung (Reynolds-Mittelung)

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

Impulserhaltungsgleichung (allgemeine Form)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (3)$$

mit

$$\tau_{ij} = -\mu_b \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

## Inkompressible und stationäre Strömung (Reynolds-Mittelung)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\partial \bar{U}_i \bar{U}_j) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \quad (5)$$

mit

$$\bar{\tau}_{ij} = -\mu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

**Turbulenzmodell:**

Da es sich bei dem hier vorliegenden Problem um eine turbulente Strömung handelt, war die Erweiterung der Grundgleichungen um ein Turbulenzmodell nötig. Es wurde ein Standard  $k-\varepsilon$ -Modell [17] verwendet, das für inkompressible Strömungen entwickelt wurde. Das  $k-\varepsilon$ -Modell wird in die Berechnung integriert, indem in jedem Volumen-Element zusätzlich die Transportgleichungen für  $k$  (turbulente kinetische Energie) und  $\varepsilon$  (Dissipationsrate) gelöst werden und anschließend die turbulente Viskosität errechnet wird.

## 7.4 Strömungskonditionen Tauchbecken mit Karossen

Die Modellkarossen wurden prinzipiell von den aktuellen C-Klasse-Limousinen des Modelljahres 2000/ 2001 abgeleitet. Das Karosseriemodell wurde in einigen Punkten im Vergleich zur realen Karosse aus Gründen der Netzstruktur angepasst, so wurde die Karossenlänge gekürzt und die verbindenden Säulen vom Karosserirumpf zum Dach entfielen.

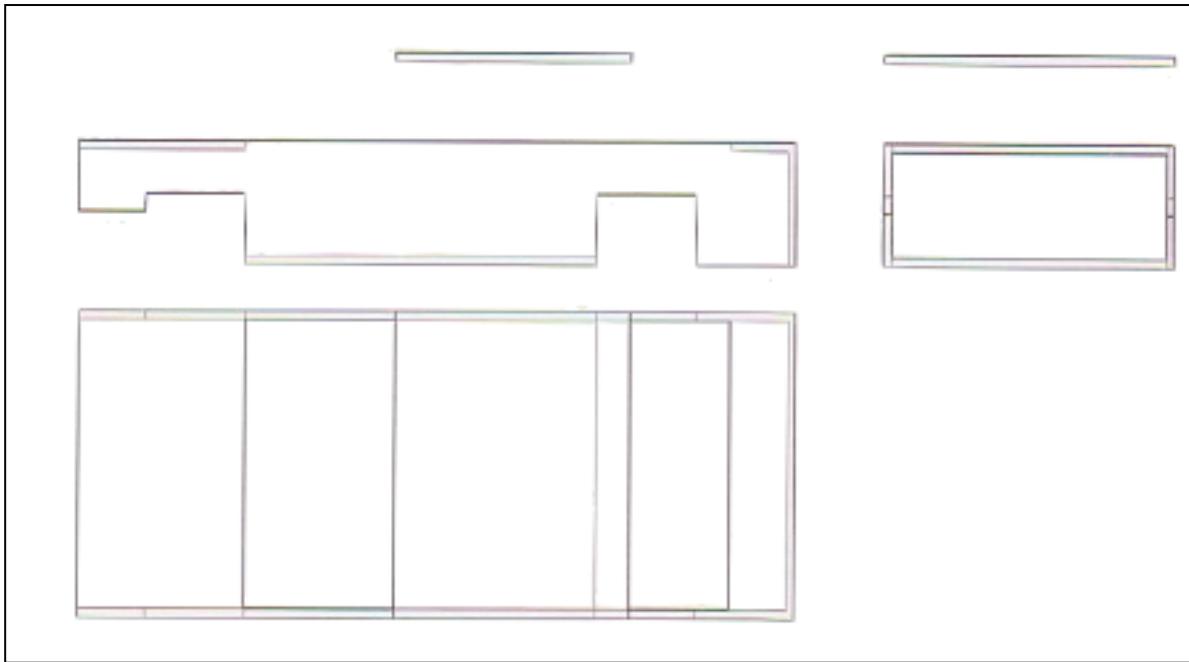


Abb. 7.4-1 Modellkarosse in drei Ansichten [16]

Bei den Berechnungen mit Karosse handelt es sich im Gegensatz zum „leeren“ Becken (stationäre Rechnung) um eine quasistatische Analyse. In der Praxis werden die Karossen mit 8 Metern pro Minute durch das Tauchbecken gezogen. Eine solche Bewegung war mit den gegebenen Mitteln nicht simulierbar. Stattdessen wurde eine Art Momentaufnahme berechnet, indem die Karossen aus mehreren waagerechten und senkrechten Flächen zusammengesetzt wurden, die wiederum jeweils die Randbedingungen von 8 m/min erhielten.

Für die Berechnung mit Karosse konnte das Netz des Modells ohne Karosse nicht weiter verwendet werden. Es ist zu kompliziert, so dass ein Einfügen der Karossenwände nicht möglich gewesen wäre. Stattdessen wurde ein neues Netz entwickelt, dass aus sechs Einzelteilen besteht.

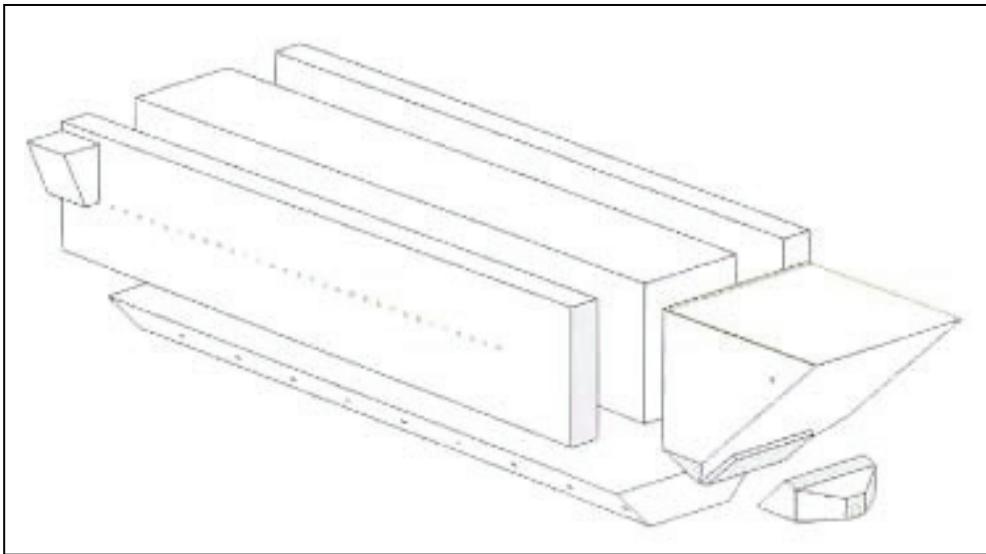


Abb. 7.4-2 In sechs Bereiche aufgeteiltes Beckenmodell [16]

Es hat den Vorteil, dass jeder Bereich für sich optimal vernetzt werden konnte. Anschließend werden die verschiedenen Teile in TASCflow mit Hilfe von interpolierten Übergängen, so genannte Interfaces (Arbitrary GGI), miteinander verbunden. Dabei können völlig unterschiedliche Netzstrukturen verwendet werden. Bei der Berechnung mit Karosse wurden zwei Fälle, der Einlaufbereich und der Auslaufbereich, unterschieden. Die beiden Fälle unterscheiden sich nur hinsichtlich der Ausrichtung der Karosse inklusive der Randbedingungen. Die Auswertung bezieht sich auf den Einlaufbereich. Wie sich zeigen wird, stimmen die meisten Merkmale der Strömung in beiden Fällen überein.

## 8 Strömungsmechanische Untersuchungen im KTL- Bad

Ausgehend von den grundlegenden Strömungsuntersuchungen in einem Karosse Vorbehandlungsbad im Rahmen einer Forschungsarbeit (siehe Kapitel 6) sollte an einem weiteren Karosse Vorbehandlungsbad im Volkswagen- Konzern die gesamte Problematik der Karosserieverschmutzung und der Anlagenkonfiguration wissenschaftlich untersucht und bewertet werden. Der Autor löste die Initiative einer Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Strömungsmechanik an der Universität Rostock aus und beteiligte sich aktiv an der wissenschaftlichen Abarbeitung. Konkret ist hier die Untersuchung zur Wechselwirkung runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden bei verschiedenen Auftreffwinkeln zu nennen. Es folgte ein intensiver Dialog zwischen den beteiligten Mitarbeitern des Lehrstuhls für Strömungsmechanik an der Universität Rostock und dem Autor als persönlichen Promoter innerhalb von Volkswagen-Nutzfahrzeuge. Regelmäßige Abstimmungen in der Art von Teamsitzungen wurden vom Autor einberufen. Das Ziel war es, konkrete anlagenbezogene Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten und nachfolgend an der dafür ausgewählten KTL-Anlage zu realisieren.

Zur Problematik der Reinigungswirkung durch eingeleitete Strömungsenergie können aus den gewonnenen Erkenntnissen bereits eingangs folgende grundsätzlichen Anmerkungen gemacht werden [18]:

- Hohe Reinigungswirkung tritt bei hoher Wandschubspannung  $\tau_w$  auf
- Hohe Wandschubspannung  $\tau_w$  bedeutet physikalisch hohen Impulsaustausch
- Impulsaustausch und Massenaustausch korrelieren miteinander

### 8.1 Ergebnisse aus der CFD-Simulation im Tauchbecken

Wie bereits darauf hingewiesen, sind die Strömungsverhältnisse im Becken „Bremer Bauart“ generell vergleichbar und anwendbar auf das KTL- Becken im VW-Werk Hannover.

#### 8.1.1 CFD-Simulation: Beckenströmung „ohne Karosse“ in Mittelebene

Nachfolgend werden in zwei Darstellungen die Strömungs-Geschwindigkeitsprofile in der Symmetrieebene des halben Beckens dargestellt, um daraus wichtige Erkenntnisse abzuleiten.[19]

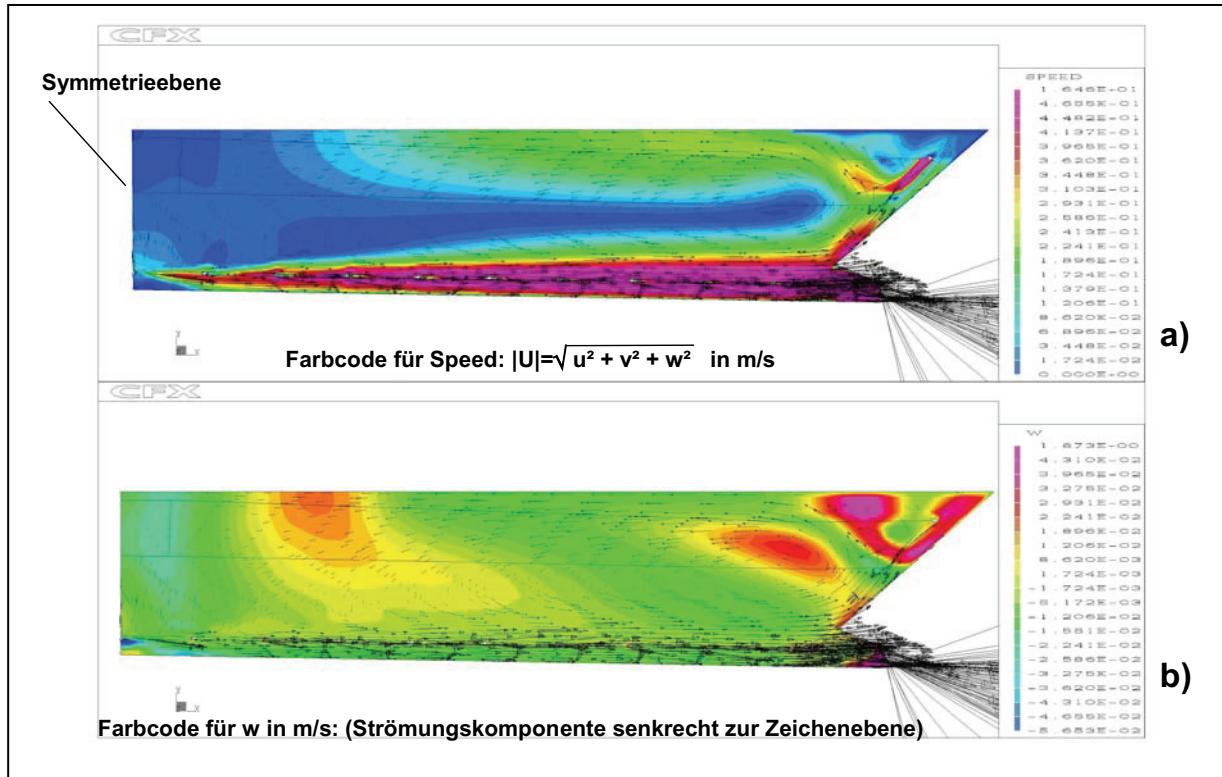


Abb. 8.1.1-1 CFD-Simulation: Beckenströmung in Mittelebene, ohne Karosse, für „Speed“ und „w“ in m/s [19.1]

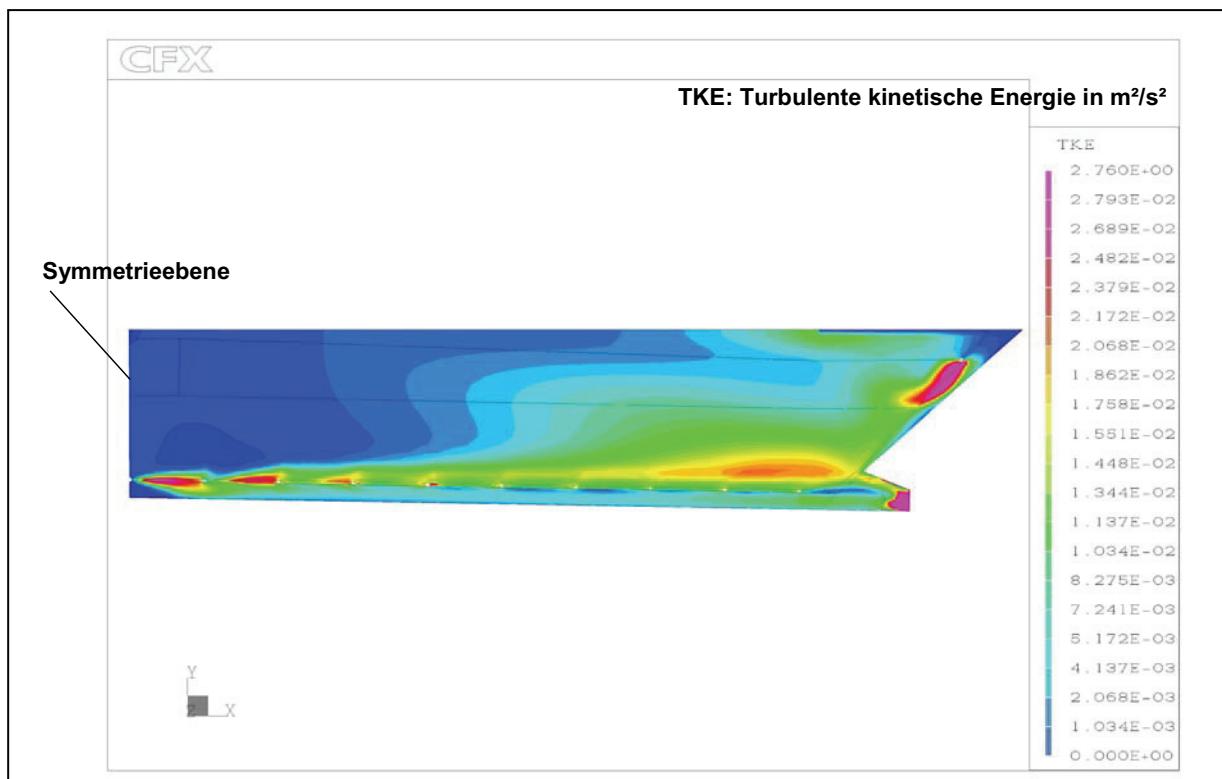


Abb. 8.1.1-2 CFD-Simulation: Beckenströmung in Mittelebene, ohne Karosse (TKE) [19.2]

### 8.1.1.1 Fazit der CFD-Simulation „ohne Karosse“

- Die Strömung bildet sich in Form einer großräumigen Wirbelwalze aus. Sie wird durch das Bodenflutsystem angetrieben.
- Am Boden entsteht eine hohe Strömungsgeschwindigkeit in positiver x-Richtung.
- Im oberen Beckenbereich strömt ein Fluid entgegen der x-Achse mit Maximalwerten von ca. 0,2 m/s.
- Der obere Düsenstock arbeitet gegen die Walzenbewegung und reduziert dadurch die Zirkulation innerhalb des Beckens.
- Ein Teil des Fluids fließt von den Bodendüsen direkt wieder aus dem Becken. Dadurch geht der Beckenströmung ein Teil der eingebrachten Energie verloren.
- Es ist zu erwarten, dass sich im Scherschichtbereich der durch die Düsen angetriebenen Strömung Wirbel ausbilden, die zu einem Partikeltransport aus dem Bodenbereich heraus führen. Dies verdeutlichen die erhöhten Turbulenzwerte in der Bugzone.
- In der Region der Symmetrieebene des Beckens besteht aufgrund sehr geringer Geschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten hohes Verschmutzungspotential.

### 8.1.2 CFD-Simulation Beckenströmung „mit Karosse“ in Mittelebene

Nachfolgend werden folgende Strömungs-Geschwindigkeitsprofile dargestellt:

- zwei Profile „Einlaufbereich“
- zwei Profile „Auslaufbereich“
- ein Profil „Turbulente kinetische Energie - TKE“

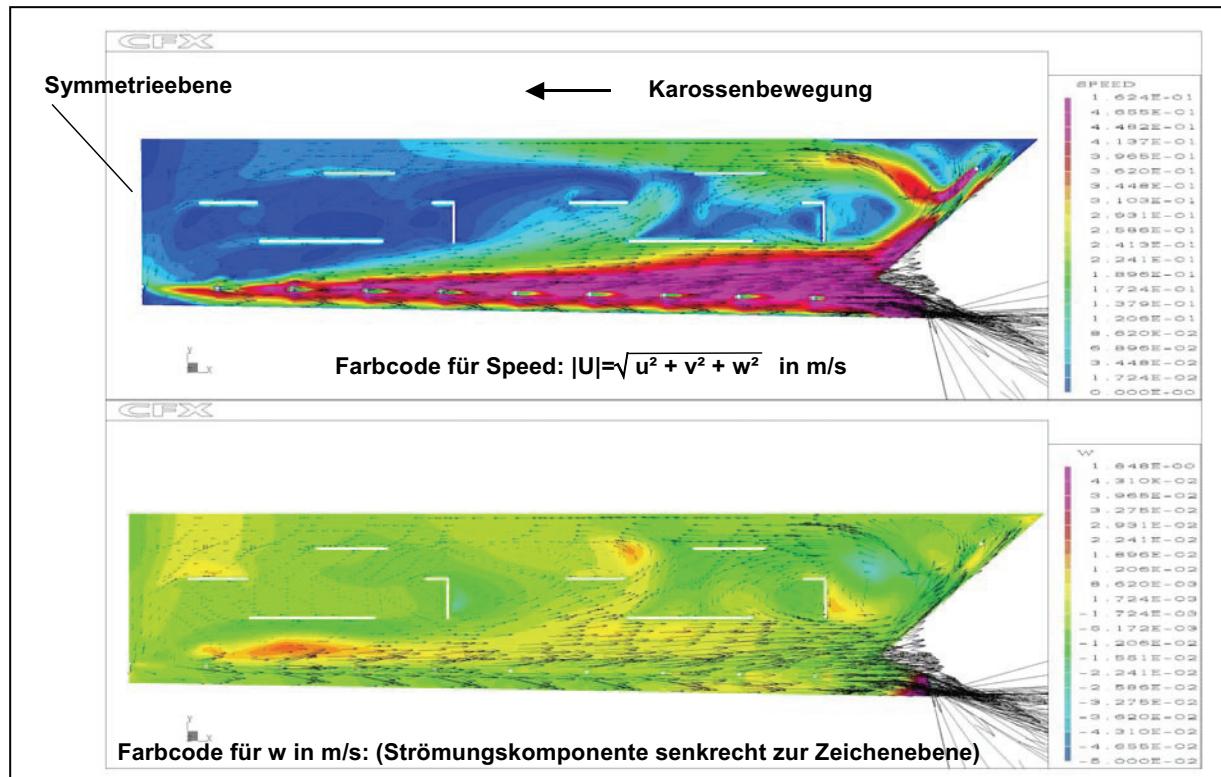


Abb. 8.1.2-1 CFD-Simulation: Beckenströmung mit Karosse, Einlaufbereich [19.3]

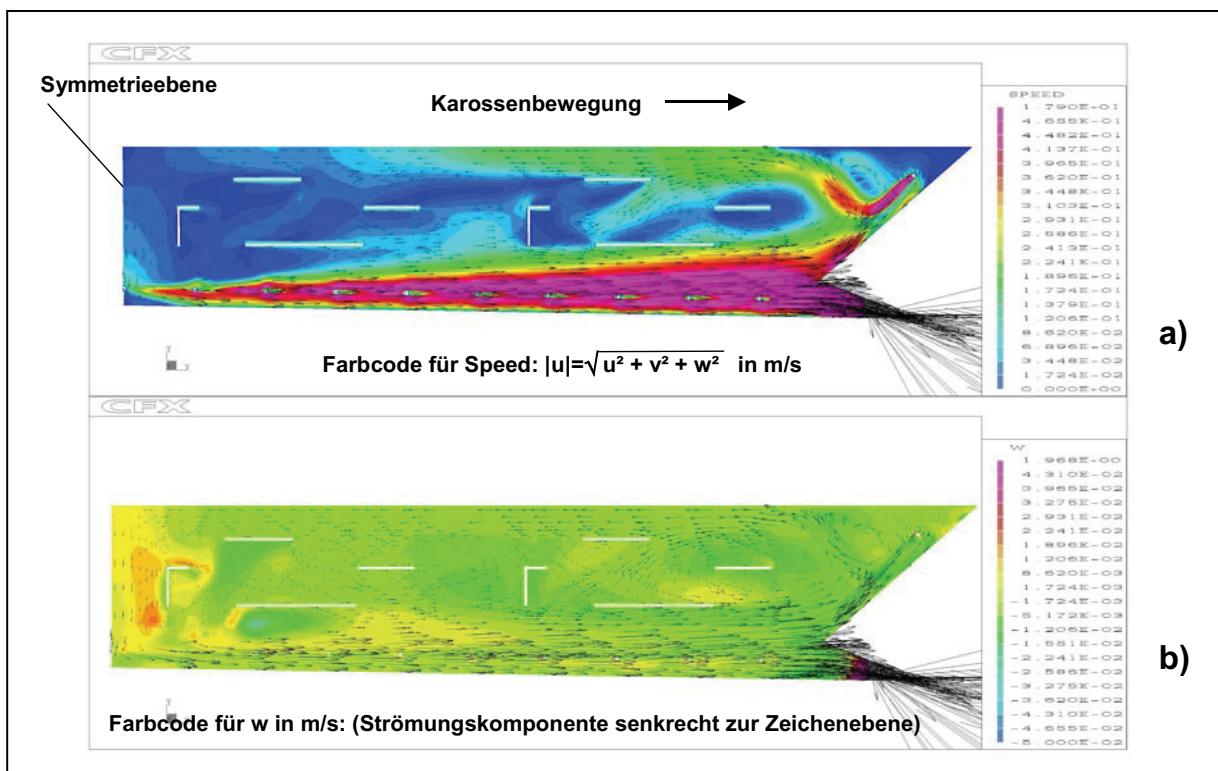


Abb. 8.1.2-2 CFD-Simulation: Beckenströmung mit Karosse, Auslaufbereich [19.4]

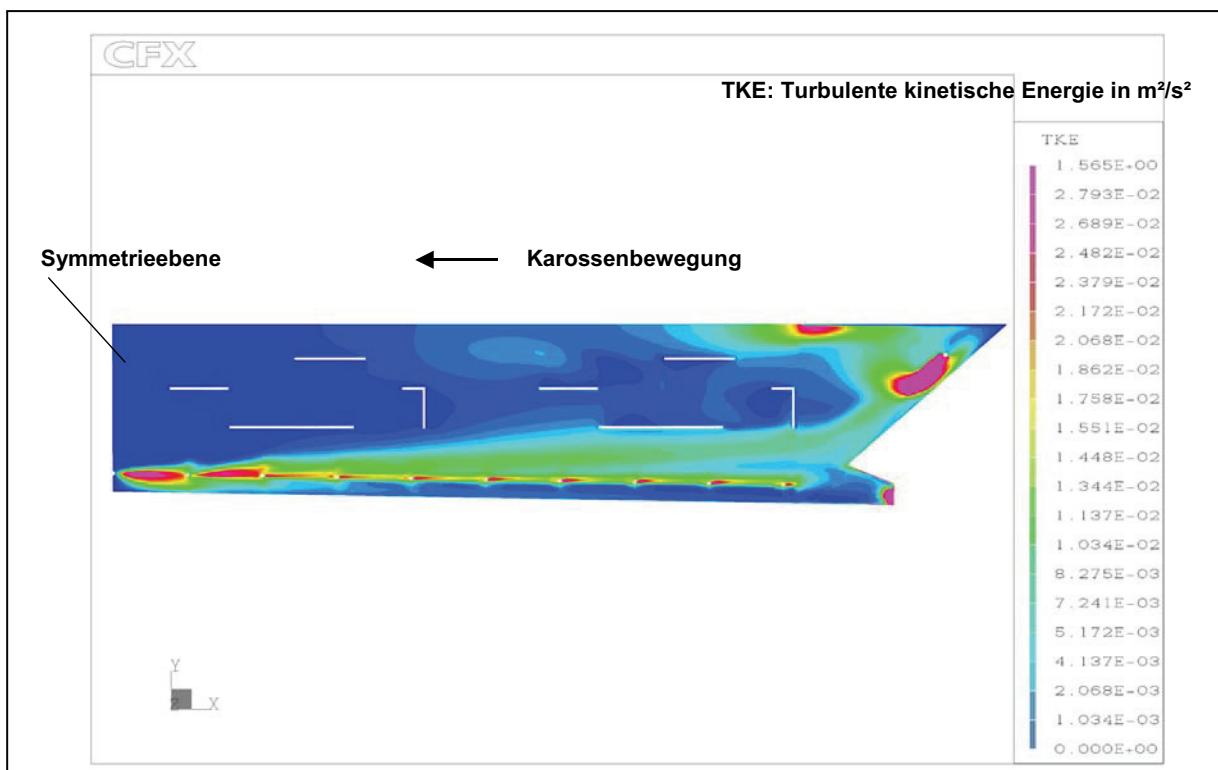


Abb. 8.1.2-3 Beckenturbulenz mit Karosse im Einlaufbereich (TKE ) [19.5]

### 8.1.2.1 Fazit der CFD-Simulation , Tauchbecken mit Karosse

- In dem mit Karossen ausgestatteten Behandlungsbad bildet sich eine durch Wirbelbewegung gestörte großräumige Strömungswalze aus.
- Die Bodenströmung ist in Richtung „Tankbug“ gerichtet, wird aber durch Wechselwirkung mit dem Karossenboden stärker zur Badoberfläche hin aufgeweitet als im Behandlungsbecken ohne Karossen.
- Die Strömungsgeschwindigkeit erreicht in der Nähe der horizontalen Oberfläche Maximalwerte von nur ca. 0,2 m/s.
- Im Bereich des Tankbugs befindet sich die Unterseite der Karosse in der von den Bodendüsen generierten Scherschichtströmung mit hoher Turbulenz-Energie, nahe der Symmetrieebene befindet sich die gesamte Karosse in einer Zone mit geringer Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz.
- Im Inneren der Karossen bilden sich Wirbel aus, die Geschwindigkeiten sind gering und die Turbulenzbewegungen sinken auf ein Zehntel des Umgebungs-Niveaus.
- Das Fluid aus dem oberen Düsenstock strömt direkt zum „Tankbug“ und hat damit keinen positiven Einfluss auf die globale Beckenströmung

### 8.1.3 Zusammenfassung: Strömungsstruktur im Tauchbecken

#### 8.1.3.1 „Tauchbecken ohne Karosse“

- starke Strömung am Boden
- hohe Strömungsgeschwindigkeit im Tankbug
- großräumige Umwälzung
- geringe Turbulenz im gesamten Tauchbecken
- geringe Strömung im Bereich der Symmetrieebene

#### 8.1.3.2 „Tauchbecken mit Karosse“

- starke Strömung am Boden
- hohe Strömungsgeschwindigkeit im Tankbug
- keine großräumige Umwälzung
- hohe Turbulenz im gesamten Tauchbecken
- geringe Strömung in der oberen Beckenhälfte - Bereich Symmetrieebene
- geringe Strömung und Turbulenz im Karosse-Innenraum

#### 8.1.4 Strömungsmechanische Folgerungen aus den CFD- Simulationen

Bei der CFD- Simulation ohne Karosserien im Tauchbecken bildet sich eine starke Strömung am Beckenboden aus, diese bewirkt einen guten Selbstreinigungseffekt für sedimentierende Partikel.

Ein deutlicher Energieverlust entsteht im Tankbug durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit.

Im Tauchbecken selbst bildet sich eine großräumige Badumwälzung aus, sodass ein gewisses Reinigungspotential für die Karosserien zu erwarten ist. Nachteilig ist jedoch in diesem Zusammenhang die großräumige Verteilung der Schmutzpartikel.

Im Bereich der Symmetriearchse ist die Strömung geringer ausgebildet, damit verbunden ist ein geringeres Reinigungspotential für die in diesem Bereich befindlichen Karosseriepartien. Es ist zu erwarten, dass die Haftkraft der Schmutzpartikel auf diesen Oberflächenabschnitten größer ist als die in diesem Bereich vorhandene strömungsmechanische Trennkraft.

Bei der CFD- Simulation mit Karosserien im Tauchbecken verändert sich die positive Situation am Beckenboden nicht, die starke Strömung am Beckenboden sorgt für einen guten Selbstreinigungseffekt bezüglich sedimentierender Schmutzpartikel. Negativ ist jedoch wie bei der Simulation ohne Karosserien der Energieverlust im Tankbug zu erwähnen.

Aufgrund der wesentlichen Abdeckung des Badquerschnittes durch die im Becken befindlichen Karosserien wird jedoch die großräumige Umwälzung im Tauchbecken deutlich reduziert und es kommt in der Folge zu einer Behinderung des Partikeltransportes und damit zu einem verringerten Reinigungspotential.

Am Beckenboden ergeben sich aufgrund der veränderten geometrischen Situation hohe Turbulenzen zwischen den vorhandenen Düsenstöcken und dem Karosserieboden. Damit verbunden ist zwar eine gute Reinigungswirkung am Karosserieboden, gegenteilig wirkt sich jedoch die Aufwirbelung von Partikeln vom Beckenboden aus.

Die bereits bei der Simulation ohne Karosse erwähnte geringe Strömung und Turbulenz in der oberen Beckenhälfte und hier insbesondere in dem Bereich der Symmetrieebene wirkt sich nunmehr in der erwarteten Form einer geringen Reinigungswirkung in diesen Karosseriebereichen aus. Die strömungsmechanische Kraft liegt wie erwartet zu niedrig, um die Haftkraft der Partikel aufzuheben.

Im Karosserinnenraum ist die Strömung und die Turbulenz zu gering um anhaftende und abgesetzte Schmutzpartikel zu lösen beziehungsweise abzuführen. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit ist auch eine reduzierte KTL- Beschichtung zu verzeichnen.

## 8.2 Charakteristischer KTL-Schmutz

Üblicherweise werden Schmutzpartikelanalysen an Motorhauben durchgeführt, da dieses Bauteil einerseits aufgrund der fast waagerechten Einbaurlage geradezu Partikelablagerungen provoziert und andererseits die Motorhauben aus Kundensicht eine hohe Priorität bezüglich der wahrnehmbaren Oberflächengüte zuzuordnen ist.

Die Analyse des charakteristischen KTL- Schmutzes auf Motorhauben weist zum überwiegenden Anteil mit ca. 75% so genannte „Metallperlen“ aus, die im KTL- Film eingebettet sind. Der verbleibende Anteil von 25% setzt sich aus Metallspänen, Fasern und sonstigen Verunreinigungen zusammen.

Die Metallperlen bestehen metallurgisch aus Eisenoxid und sind magnetisch. Die Verursachung ist in den diversen Schweißvorgängen im Rohbau, und hier insbesondere beim Punktschweißen, zu suchen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass diese Schweißperlen im Zentrum hohl sind und die Wanddicken 4 µm bis 10 µm betragen, der Durchmesser der Schweißperlen bewegt sich von 20 µm bis 250 µm. Diese Metallperlen als Hohlkugeln können durch eingeschlossene Luft und zum Teil durch Anlagerung von Gasblasen auch schwimmen und eine teilweise Ansammlung an der Badoberfläche ist zu beobachten.

Mikroskopische Untersuchungen zeigen eine „scheinbar unkontrollierte“ Ablagerung der verschiedenen Schmutzpartikel auf der Karosseroberfläche.

Durchgeführte Querschliffe der KTL-Schicht im Zentrum der Verschmutzungspartikel zeigen jedoch eindeutig auf, dass insbesondere die Schweißperlen aufgrund ihrer Größe aus dem KTL-Film herausragen. Bei einem mittleren Durchmesser der Metallperlen von 50-60 µm und einer KTL-Schichtdicke von 20 µm ragen diese Verschmutzungen zum Teil 30-40 µm aus dem eingearbeiteten KTL-Film heraus und werden damit optisch als Oberflächenstörungen wahrgenommen. Wegen der schlechten Erkennbarkeit auf dem einfarbig grauen KTL-Tauchgrund ist die Beseitigung im manuellen Schleifverfahren generell nicht fehlerfrei. Hinzu kommen bei seriellen Fertigungen und großen Flächen physiologisch bedingte Ermüdungserscheinungen, die die Güte derartiger manueller Prozesse weiter einschränken.

Aus den genannten Gründen erhebe ich bereits an dieser Stelle die Forderung durch intensive Analysen und entsprechende gezielte Prozessoptimierungen, wie in dieser Arbeit aufgezeigt, auf das manuelle Fehlerschleifen generell zu verzichten.

### 8.3 Haftkraft: Eisenoxid- Partikel auf phosphatisierter Blechoberfläche

**Schwerpunkte: Adhäsion und Trengeschwindigkeit**

#### 8.3.1 Definition der Adhäsionszahl $\gamma_F$

Die *Adhäsionszahl*  $\gamma_F$  ist das Verhältnis zwischen der *Anzahl*  $N$  der *restlichen Partikel* nach der Einwirkzeit einer bestimmten Trennkraft und der *Gesamtzahl*  $N_0$  der Partikel, die ursprünglich auf der Testoberfläche vorhanden waren:

$$\text{Es gilt folgende Beziehung: } \gamma_F = \frac{N}{N_0} \cdot 100$$

#### 8.3.2 Experimentelle Haftkraftuntersuchungen

Die Haftkraftuntersuchungen wurden mit klassifizierten Teilchensorten bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt, dabei wurden die entsprechenden Adhäsionszahlen ermittelt.

Es wurden drei Messreihen mit unterschiedlich großen Eisenoxid- Partikeln durchgeführt:

1. Eisenoxid- Teilchensorte < 100 µm
2. Eisenoxid- Teilchensorte < 150 µm
3. Eisenoxid- Teilchensorte < 250 µm

Als vierte Messreihe wurde ein Glaskugelmischung mit einem Durchmesserspektrum von 2 µm bis 60 µm eingesetzt.

### 8.3.3 Fazit der Haftkraftuntersuchungen bei ebener Platten-Grenzschichtströmung

Aus der ermittelten Abhängigkeit zwischen der Adhäsionszahl  $\gamma_F$  als Funktion der Anströmgeschwindigkeit  $U_\infty$  lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten [21]:

- Die Adhäsionszahl  $\gamma_F$  ist weitgehend unabhängig von der Teilchensorte. Alle drei Teilchensorten unterscheiden sich nicht in der Charakteristik des Adhäsionsverhaltens. Das heißt, die Haftkraft ist weitgehend unabhängig von der Größe des Eisenoxidpartikels.
- Die Haftkraft von Eisenoxid- Partikeln ist wesentlich größer als von Glaskugeln mit Durchmessern von  $d = 2 \mu\text{m}$  bis  $d = 60 \mu\text{m}$ . Es ist festzustellen, dass die Adhäsionszahlen  $\gamma_F$  für Glaskugeln bei gleicher Anströmgeschwindigkeit wesentlich geringer sind.
- Durch eine Anströmgeschwindigkeit von  $U_\infty = 0,24 \text{ m/s}$  erreicht man eine 50%-ige Abreinigung der Partikel. Bei einer Geschwindigkeit von  $1,3 \text{ m/s}$  befinden sich lediglich noch 5% der ursprünglichen Partikel auf der Blechoberfläche. Diese Aussage gilt jedoch nur bei einer Grenzschichtströmung längs einer ebenen Platte.

### 8.3.4 Adhäsionszahl $\gamma_F$ als Funktion der Wandschubspannung $\tau_w$

Bei dieser Untersuchung sollte die Abhängigkeit des Abreinigungsgrades als Funktion der Wandschubspannung  $\tau_w$  ermittelt werden. Wie bereits unter 8.3.3 erwähnt, gab es bezüglich der Partikelgröße keine wesentlichen Unterschiede.

### 8.3.5 Fazit der Haftkraft-Untersuchung hinsichtlich der Wandschubspannung $\tau_w$

Die Güte der Abreinigung hängt von der durch die Grenzschichtströmung aufgeprägten Wandschubspannung  $\tau_w$  ab. Je höher die Wandschubspannung ist, desto besser ist die Partikelabreinigung auf der Blechoberfläche.

Die Messungen führten zu dem konkreten Ergebnis, dass bei einer durch eine Grenzschichtströmung aufgeprägten Wandschubspannung von  $0,2 \text{ Pa}$  noch 50% der Partikel auf der Blechoberfläche verbleiben. Bei einer weiteren Erhöhung der Wandschubspannung auf einen Wert von  $3,5 \text{ Pa}$  verbleiben dann nur noch 5% der Ausgangspartikel auf der phosphatierten Blechoberfläche.

## 8.4 Düsenstrahlausbreitung: Wurfweite unterschiedlicher Düsen

Die Düsenfreistrahlen lassen sich hinsichtlich ihrer Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen durch halbempirische Formeln berechnen [22]. Aus den so ermittelten Grundgleichungen lassen sich unter anderem die Wurfweiten unterschiedlicher Düsen ermitteln.

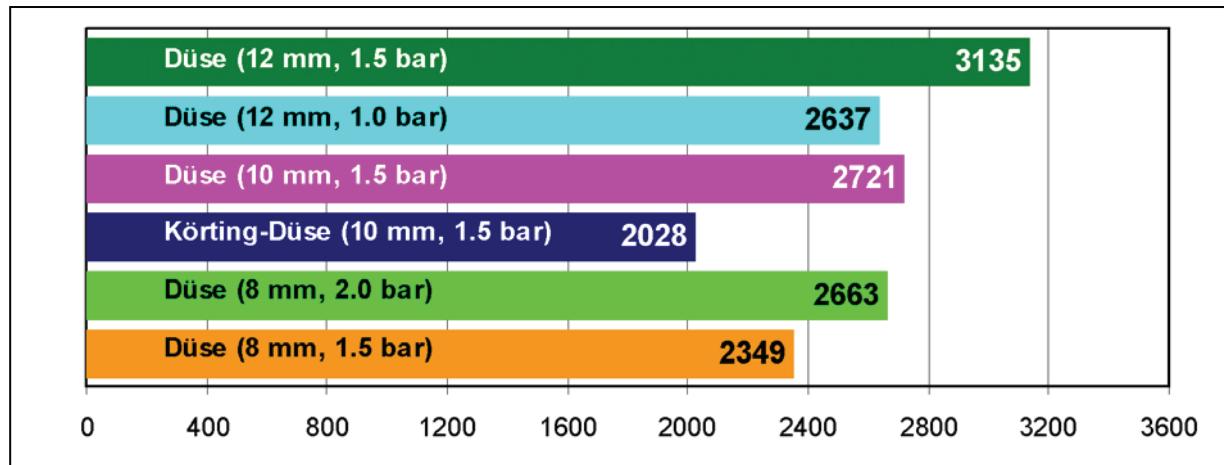


Abb. 8.4-1 Berechnete Wurfweiten von Düsenfreistrahlen ( $U_{\text{limit}} = 0,4 \text{ m/s}$ ) [22]

## 8.5 Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen bei verschiedenen Auftreffwinkeln

Die Ausbreitung eines runden Düsenfreistrahles bei unterschiedlichen Auftreffwinkeln auf eine ebene Wand wird in einem großen Wasserbecken experimentell untersucht. Die Wechselwirkungen zwischen Freistahl und Wand werden bei den unterschiedlichen Parametern anhand des mit einer tauchbaren 3D-LDA-Sonde gemessenen Strömungsfeldes bestimmt. Das radiale Ausbreitungsverhalten sowie der Volumenstrom über die jeweiligen Wandquerschnitte stehen im Mittelpunkt der Auswertung [23].

### 8.5.1 Einleitung

Der turbulente Freistahl wird in technologischen Prozessen in der Automobilindustrie zum Reinigen von Karosserien eingesetzt. In den Karosserie-Vorbehandlungsbädern ergeben sich aufgrund unkontrollierbarer Partikelanhäufungen auf der Oberfläche in den Folgeprozessen eindeutige Qualitätseinbußen. In den Karosseriebädern ist für die Abreinigung von Partikeln von der Oberfläche eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit des Fluids erforderlich. Hierfür werden unter anderem innerhalb der Bäder gezielt Düsenfreistrahlen eingesetzt. Die Kenntnis des Ausbreitungsverhaltens von Freistrahlen und die Untersuchung der Wechselwirkungen mit ebenen Wänden ermöglicht die Optimierung und Dimensionierung wirkungsvollerer Düsensysteme und Anlagenkomponenten. Damit trägt das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Freistrahlen und ebener Wand zur Sicherung der Produktqualität und zur Verbesserung der Prozessstabilität bei.

### 8.5.2 Grundlegende Betrachtungen

Ein runder Freistrahrl wird im Allgemeinen als drallfrei und vollkommen turbulent betrachtet. Der konstante statische Druck in der Umgebung des Freistrahls wirkt auf den Strahl ein. Die maximale Geschwindigkeit ist auf der Strahlachse zu finden. Der Impulsaustausch an den Stahlrändern bewirkt einen Entrainmentprozess, das heißt aus der Umgebung wird Fluid in den Freistrahrl transportiert. Ein Düsenfreistrahrl lässt sich in ein Nah- und Fernfeld unterteilen, wobei das Fernfeld durch einfache empirische Ansätze analytisch beschrieben werden kann [24],[26].

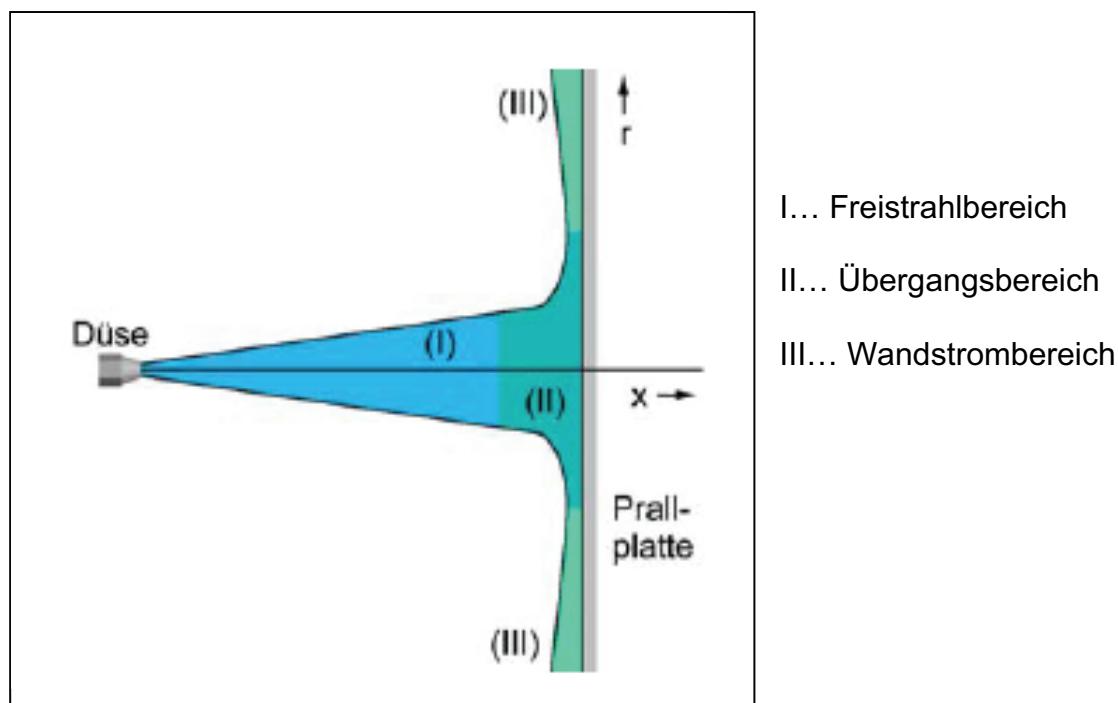


Abb. 8.5.2-1: Schematische Darstellung des auf einer ebenen Wand (Prallplatte) treffenden Freistrahles

Das Geschwindigkeitsfeld eines Prallstrahles, also eines auf eine ebene Wand treffenden Düsenfreistrahles, kann in drei Bereiche unterteilt werden. (vgl. Abb. 8.5.2-1) Im Freistrahlbereich ( I ), der sich im Bereich vor der Düse und bis ca.  $10 d$  vor der Prallplatte befindet, ist die Strömung identisch mit dem eines sich ungehindert ausbreitenden Freistrahles (vgl. Abb. 8.5.2-1). Im anschließenden Übergangsbereich ( II ) bildet sich eine Staupunktströmung aus. In diesem Bereich sinkt die Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung mit der Annäherung an die Prallplatte kontinuierlich und unmittelbar vor der ebenen Wand wird der Strahl radial umgelenkt. Im Wandstrombereich ( III ) ist der Übergang von der axialen zur radialen Strömung abgeschlossen und die Strömung verläuft tangential zur ebenen Wand. Dabei bildet sich eine Wandgrenzschicht aus [24],[26].

### 8.5.3 Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen am runden Freistrahrl werden im Rundlaufkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik an der Universität Rostock durchgeführt. Ein großes Wasserbecken mit einem Volumen von  $860 \text{ m}^3$  und ein Laser-Doppler-Anemometer (LDA) mit einer tauchbaren Sonde garantieren eine störungsfreie Ausbildung des Freistrahles [25]. Eine

frequenzgesteuerte Kreiselpumpe dient zum Einstellen der für den Volumenstrom  $\dot{V}_0$  notwendigen Druckdifferenz  $d_p$  am Düsenaustritt. Die Druckdifferenz  $d_p$  und der Volumenstrom  $\dot{V}_0$  werden mit geeigneten Messgeräten kontrolliert. Mit der tauchbaren 3D-LDA-Sonde wird das räumliche Strömungsfeld im und um den Düsenfreistrahl sowie dessen Wechselwirkung mit einer ebenen Wand bei unterschiedlichen Konfigurationen vermessen (vgl. Tab. 8.5.3-2)

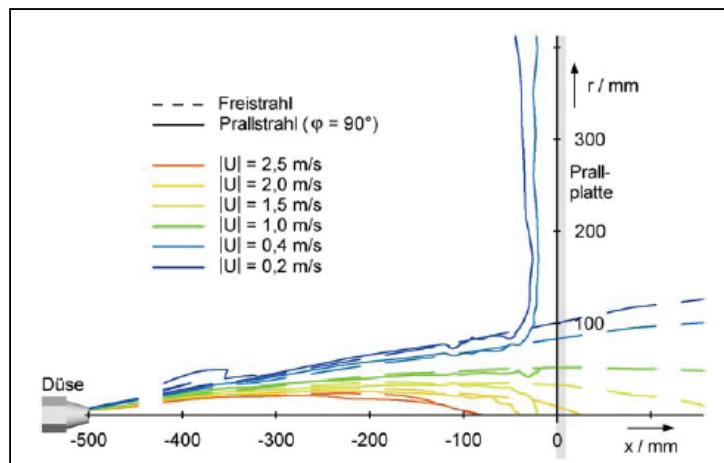


Abb. 8.5.3-1 : Vergleich zwischen Freistrahl und Prallstrahl (Düse:  $d = 10 \text{ mm}$ ;  $d_p = 1,5 \text{ bar}$ ;  $\varphi = 90^\circ$ )

Durchmesser $d$	Druckdifferenz $\Delta p = p_A - p_0$	Austrittsgeschwindigkeit $U_{max,0} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$	Volumenstrom $\dot{V}_0 = U_{max,0} \frac{\pi}{4} d^2$	Prallstrahlwinkel $\varphi$
10 mm	1,5 bar	17,3 m/s	4,90 m <sup>3</sup> /h	30°, 60°, 90°

Tab. 8.5.3-2 : Konfiguration zur Untersuchung von Frei- und Prallstrahlen

Die ebene Wand ist eine quadratische Prallplatte mit einer Seitenlänge  $L = 750 \text{ mm}$ . Der Abstand zwischen Düsenaustrittsöffnung und dem Schnittpunkt der Strahlachse mit der Prallplatte ist mit  $l = 500 \text{ mm}$  immer gleich.

Den Messungen wird ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Zentrum der Prallplatte zugrunde gelegt. Die x-Achse steht senkrecht auf der ebenen Wand, die y-Achse verläuft tangential in horizontaler Richtung und die z-Achse verläuft ebenfalls tangential in vertikaler Richtung. Der x-Achse ist die Geschwindigkeitskomponente  $u$ , der y-Achse die Komponente  $v$  und der z-Achse die Komponente  $w$  des Geschwindigkeitsvektors  $U$  zugeordnet. Im Fall des Auf treffwinkel  $\varphi = 90^\circ$  fällt die x-Achse mit der Strahlachse zusammen. (vgl. Abb. 8.5.3-3 )

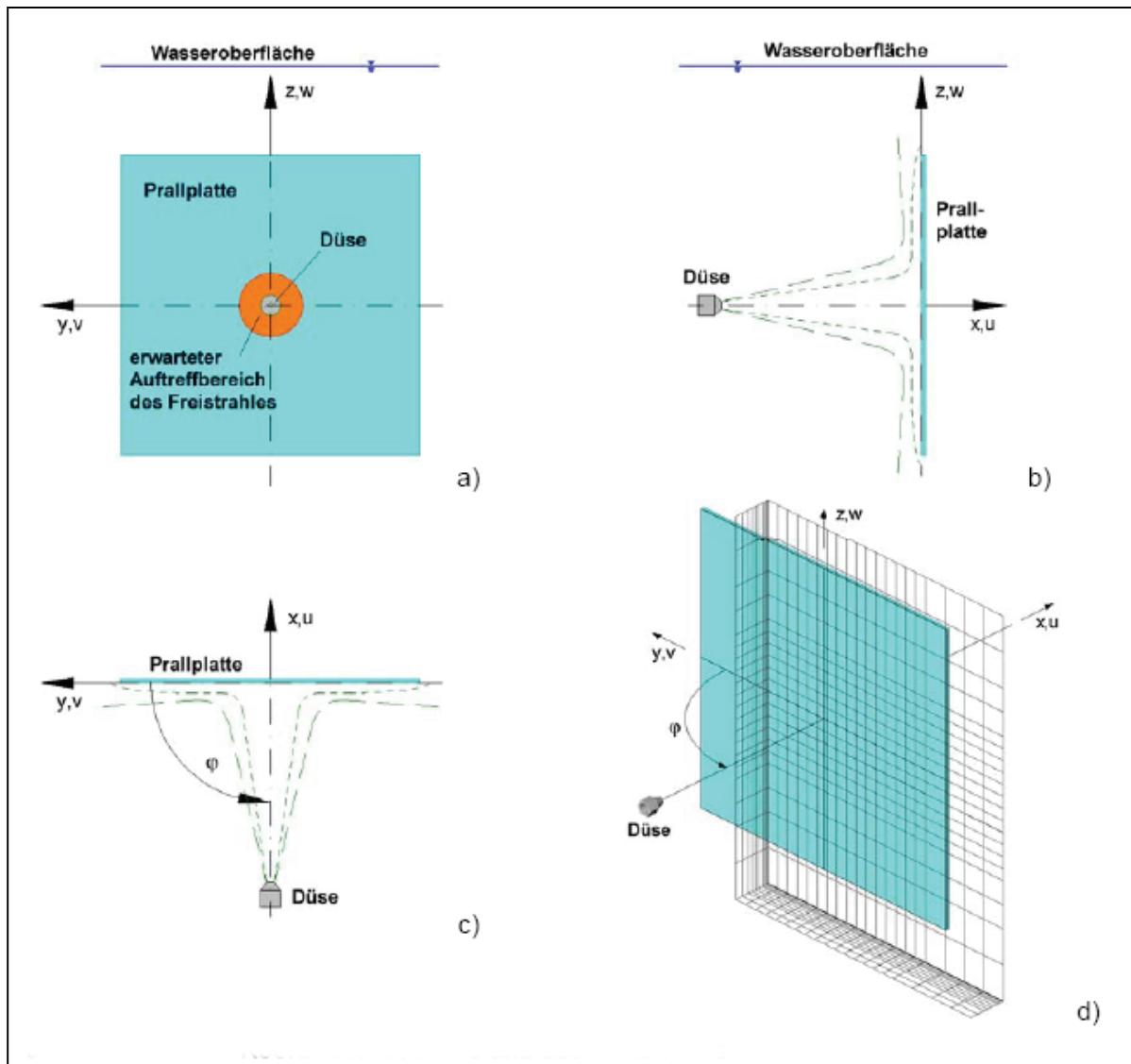


Abb. 8.5.3-3 : Definition des Koordinatensystems und des Messgitters  
 a) y-z-Ebene, b) x-z-Ebene, c) x-y-Ebene und  
 d) Messgitter für die LDA- Messung

Für die Messung des Geschwindigkeitsfeldes vor der Prallplatte sind sehr große Messgitter erforderlich, da die Strömung an der Platte quer zur Strömungsrichtung abgelenkt wird. Mit jeweils 21 Punkten in y- und in z-Richtung entsteht in jeder Ebene parallel zur Prallplatte ein Messgitter von 441 Messpunkten. Die maximalen Verfahrwege des Positioniersystems der tauchbaren LDA-Sonde führen zur einen Ausdehnung der Messebenen von 720 mm in y-Richtung und 960 mm in z-Richtung. Es werden zwölf Messebenen in einem Bereich von  $x = -1$  mm bis  $x = -100$  mm vor der Prallplatte angeordnet, sodass das Messgitter die Umlenkung des Düsenfreistrahles im Übergangsbereich abdeckt. Die Abstände zwischen den Messebenen vergrößern sich mit zunehmender Entfernung von der ebenen Wand (vgl. Abb. 8.5.3-3d)

Damit ist eine Darstellung des Strömungsfeldes vor der Prallplatte durch dreidimensionale Isoflächen des Geschwindigkeitsvektors und der Turbulenzgrößen möglich.

### 8.5.4 Ergebnisse

Unabhängig vom Auftreffwinkel  $\varphi$  des Düsenfreistrahles auf die ebene Wand sind der Freistrahlabereich, der Übergangsbereich und der Wandstrombereich in den Messergebnissen wiederzufinden. (vgl. Abb. 8.5.4-1) Der Freistrahlabereich, in dem sich Rückwirkungen der ebenen Wand im Geschwindigkeits- und Turbulenzfeld nicht bemerkbar machen, endet winkelunabhängig im Bereich von ca. 10 d vor der Prallplatte. Dagegen zeigen der Übergangsbereich und der Wandstrombereich deutliche Abhängigkeiten vom Auftreffwinkel  $\varphi$  des Düsenfreistrahles. Bei einem Auftreffwinkel  $\varphi = 90^\circ$  bildet sich im Übergangsbereich eine axialsymmetrische Staupunktströmung aus. Die Strömungsgeschwindigkeit sinkt mit der Annäherung an die Prallplatte kontinuierlich ab und direkt vor der ebenen Wand wird der Strahl radial umgelenkt. Der Auftreffpunkt des Freistrahles auf der Prallplatte fällt mit dem Schnittpunkt der Strahlachse mit der ebenen Wand zusammen.

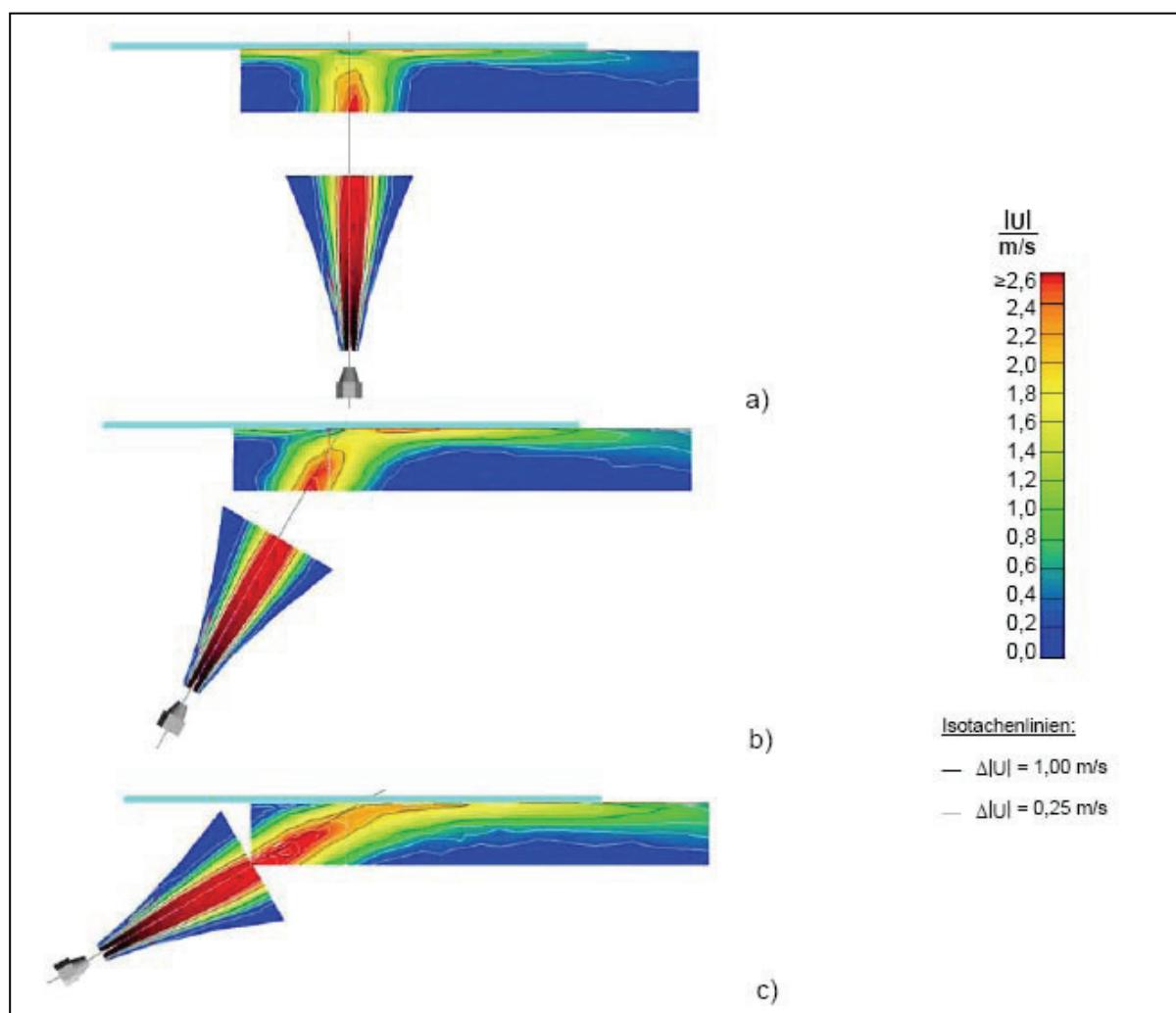


Abb. 8.5.4-1: Zeitlich gemitteltes Geschwindigkeitsfeld eines auf eine ebene Wand treffenden Freistrahles a)  $\varphi = 90^\circ$ ; b)  $\varphi = 60^\circ$ ; c)  $\varphi = 30^\circ$ ;

Mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  verändert sich das Umlenkungsverhalten auf der ebenen Wand. Je flacher der Düsenfreistahl auf die Prallplatte trifft, desto weniger wird das Fluid des Freistrahles in die Richtung tangential zur Platte umgelenkt, aus welcher der Freistahl auftrifft. Ab einem Grenzwinkel von  $\varphi_{\text{limit}}$  zwischen  $60^\circ$  und  $30^\circ$  erfolgt keine

Umlenkung entgegen der Freistrahlerichtung. Mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  verlagert sich der Auftreffpunkt des Strahles in negative y-Richtung. (vgl. Abb. 8.5.4-1)

Im Wandstrombereich ist der Übergang von der axialen zur tangentialen Strömung abgeschlossen. Es bildet sich entlang der Prallplatte eine Wandgrenzschicht aus. Diese erreicht am Ende der Platte bei  $y = -375$  mm eine Dicke von  $\delta \approx 15$  mm.

Die dreidimensionale Isotachenflächen  $|U|$  besitzen eine diskusartige Form. Beim senkrechten Auftreffen des Freistrahles auf die Wand mit  $\varphi = 90^\circ$  ist der Diskus kreisförmig. Mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  nimmt der Diskus die Gestalt einer immer flacher werdenden Ellipse an. (vgl. Abb. 8.5.4-2 )

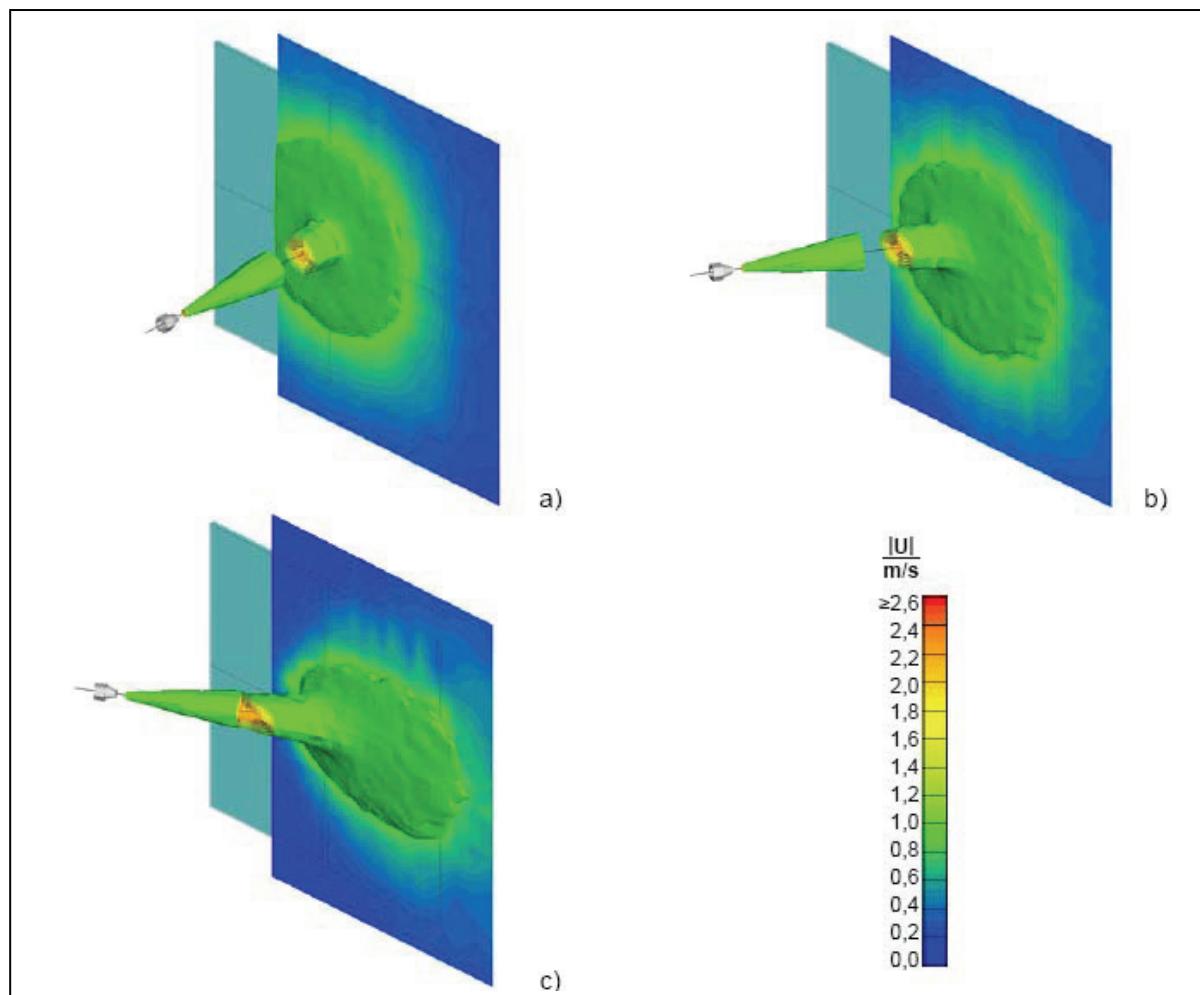


Abb. 8.5.4-2 : Vergleich der zeitlich gemittelten Isotachenfläche  $|U| = 1,00$  m/s  
 a)  $\varphi = 90^\circ$ ; b)  $\varphi = 60^\circ$ ; c)  $\varphi = 30^\circ$ ;

In allen untersuchten Fällen schmiegt sich die Prallstrahlströmung an die Plattenfläche an. Eine Reflexion des Freistrahles an der Plattenoberfläche, vergleichbar mit der Reflexion eines Lichtstrahles an einer Spiegeloberfläche, ist nicht festzustellen. (vgl. Abbildungen 8.5.4-1 und 8.5.4-2) Bei schräg auf die Platte treffenden Freistrahlen ( $\varphi = 60^\circ$  und  $\varphi = 30^\circ$ ) geht die Axialsymmetrie im Übergangs- und Wandstrombereich in eine Symmetrie bezüglich der x-y-Ebene über, in welcher der Auftreffwinkel  $\varphi$  liegt.

## 8.6 Fazit zur Strömungsmechanik des KTL-Tauchbeckens „VWN Hannover“

- Die Grundströmung eines Tauchbeckens sollte aus einer einzigen großräumigen Strömungswalze bestehen.
- Ziel hierbei ist: Vermeidung von Zonen mit geringer Strömungs-Geschwindigkeit und Turbulenz.
- Die Düsenstöcke im Eintritts- bzw. Austrittsbereich sollten so angeordnet sein, dass sie die Ausbildung der großräumigen Strömungs-Walze unterstützen.
- Die Relativgeschwindigkeit von mindestens 0,4 m/s zwischen Fluid und Karossernoberfläche sollte konsequent umgesetzt werden, damit eine Wandschubspannung von ca.  $\tau_w = 1$  Pa zur Überwindung der Haftkraft von Schmutzpartikeln vorhanden ist.
- Zur Aufprägung einer erhöhten Wandschubspannung auf die Karossern-Oberfläche sind Seitenflutsysteme geeignet. Neben der Reinigungs-Wirkung eines Prallstrahls ist dabei zu beachten, dass die Seitenflut-Systeme die Ausbildung der großräumigen Strömungswalze unterstützen und die Prallstrahlen nicht untereinander interferieren. Eventuell ist diesbezüglich ein getakteter Ersatz der Flutdüsen sinnvoll.
- Mit Seitenflutsystemen lassen sich die Strömungs- und Turbulenz-Bewegungen im Karosserinnenraum intensivieren.

### 8.6.1 Schematische Darstellung der Freistrahlanordnung, li. und re. Seite

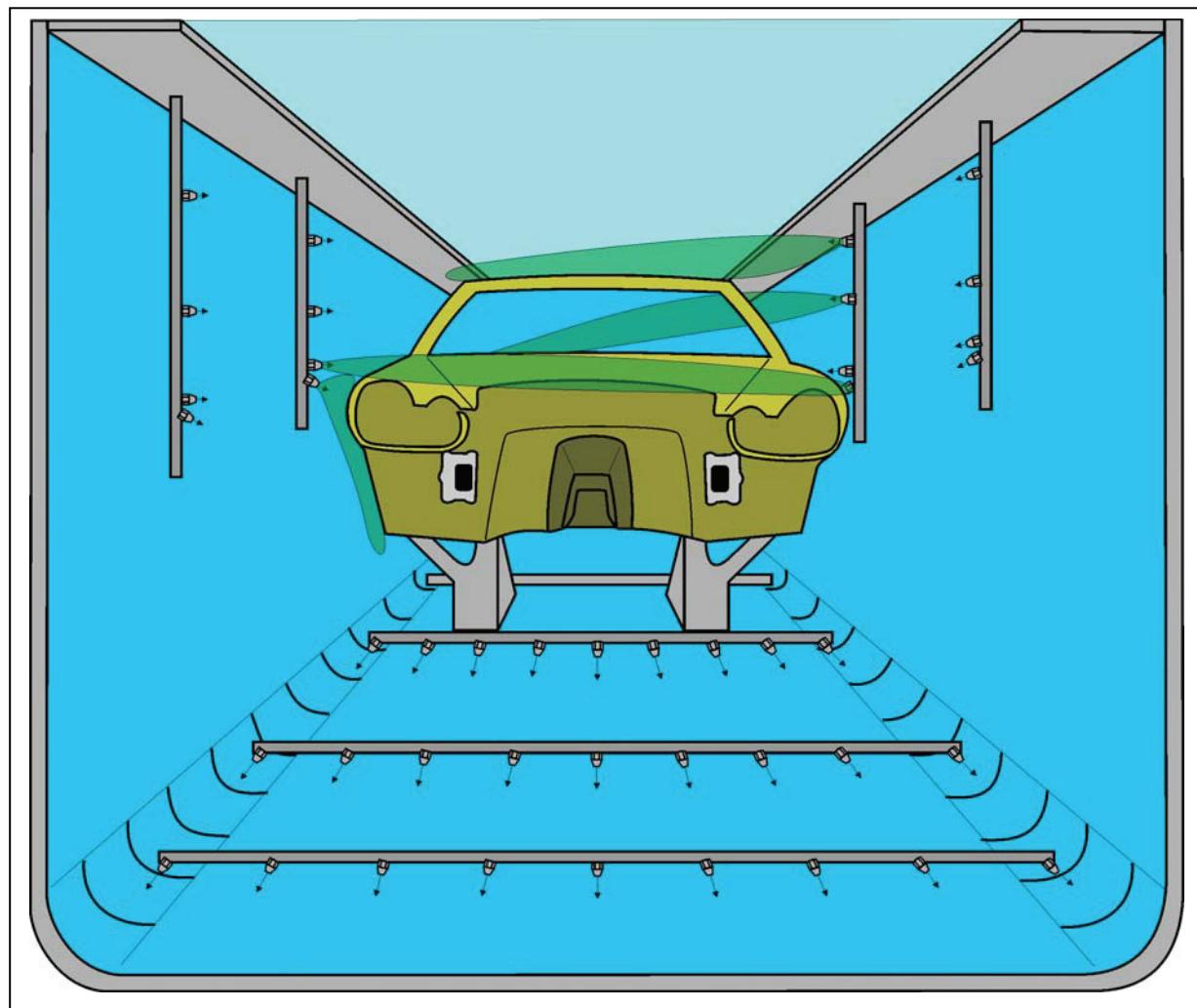


Abb. 8.6.1-1 Schematische Darstellung der Freistrahlanordnung linke und rechte Seite [19]

## **9 Anlagentechnische Realisierung der strömungsanalytischen Ergebnisse**

Das Volkswagenwerk Hannover ist das Leitwerk der Marke „Volkswagen-Nutzfahrzeuge“ (VWN) innerhalb des Konzerns der Volkswagen AG.

Insbesondere die Verbesserung der Prozesssicherheit war und ist einer der wichtigsten unternehmerischen Schwerpunkte des VW-Konzerns zur Verbesserung der kundenorientierten Qualität und zur langfristigen Absicherung der Wettbewerbsfähigkeit und der Standorterhaltung.

Dieser Prämissen folgend wurde durch den Autor nach Abschluss der wissenschaftlichen Untersuchungen die anlagentechnische Umsetzung betrieben.

### **9.1 Kurzbeschreibung der KTL-Anlage „VWN- Hannover“**

Die ausgewählte KTL-Anlage befindet sich im Zentrum der Fabrikstruktur des Werkes Hannover in der Fertigungshalle 1.

Im Gegensatz zu den vorgelagerten Doppelanlagen der Vorbehandlungslinien 1+2, von den Verfahrensschritten Reinigung bis Phosphatierung, sowie den nachgelagerten Trocknungslinien 1+2, wurde die KTL-Anlage in Einlinien-Struktur aufgebaut, sodass als Konsequenz aus dieser Entscheidung das komplette Fertigungs-Volumen über diese Anlage gefahren werden muss.

Aus dieser Anlagenkonfiguration resultiert für die KTL-Anlage der herausragende Stellenwert bezüglich der technischen Verfügbarkeit, der Prozesssicherheit und damit der Herstellung einer konstanten und exzellenten Oberflächenqualität.

Die KTL-Anlage wurde im Rahmen einer generellen Erneuerung der Karossen-Vorbehandlung im Jahr 1995 nach dem damaligen technischen Stand aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Kapazität der Anlage wurde aus der maximalen Fabrik-Kapazität dieses Zeitraums abgeleitet und wurde mit 1000 Karossen pro Tag fixiert. Unter Zugrundelegung der damaligen Schichtmodelle ergab sich daraus eine Takt-Folgezeit von rund 1 Minute pro Takt.

Bei der Auslegung der KTL-Anlage mussten die im Nutzfahrzeug-Segment größten Karosserien mit der T-Baureihe und der LT-Baureihe baulich berücksichtigt werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium, bezüglich einer abgesicherten Beschichtungsdauer für die Außen- und Innenbereiche, war die Vorgabe einer Mindestbeschichtungszeit von 3 Minuten, bei voll untergetauchter Karosserie.

Dieses Lastenheft für die Auslegung führte im Ergebnis zu einer erheblichen Anlagendimension, sodass diese Anlage mit zu den größten KTL- Anlagen im europäischen Vergleich gehört.

Einige Anlagedaten der KTL-Anlage:

- Beckenlänge : 44913 mm
- Beckenbreite : 3812 mm
- Beckenhöhe : 3760 mm
- Beckeninhalt : 468 m<sup>3</sup> ( Farbvolumen)
- Badumwälzung : 2x pro Stunde

## 9.2 Generelles Vorgehen „KTL-Anlagenoptimierung“

Das Ziel der Gesamtoptimierung nach einer Laufzeit der KTL-Anlage von mehr als zehn Betriebsjahren waren die deutlich gestiegenen Anforderungen an die KTL-Oberflächenqualität mit den Schwerpunkten einer spürbaren Reduzierung der Verschmutzungsrate und der Verbesserung der Prozessstabilität, im Hinblick auf die Vermeidung weiterer KTL-Fehler, wie Krater, Läufer, Markierungen etc.

Im Vergleich zum heutigen technischen Stand bei der Neuplanung von KTL-Anlagen mit einer Soll- Badumwälzung von annähernd 4 Umwälzungen pro Stunde sollte eine 50 %-ige Anhebung auf einen Wert von 3 Badumwälzungen pro Stunde erfolgen.

Parallel zu der beträchtlichen Nachinstallation von Umwälzpumpen und entsprechenden Verrohrungen sollte eine analoge Erhöhung der Filterkapazität um ebenfalls 50% verbunden sein.

Diese zuerst einmal vereinfachte Aufgabenstellung, hätte bei konservativer Ausplanung und Umsetzung sicherlich die reine Badumwälzung und Filtration verbessert, jedoch die Chance einer Strömungsoptimierung direkt an Karossern-Oberfläche außer Acht gelassen.

Durch den Autor wurde an dieser Stelle die Initiative ausgelöst eine wissenschaftliche Untersuchung durchzuführen, um die Wechselwirkungen der Partikelhaftung auf der Karossernoberfläche zu den wirkenden Strömungskräften eindeutig zu ermitteln. Die Untersuchungen wurden nach der Entscheidung durch VWN und nach intensiver Abstimmung mit dem Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock durchgeführt. Die im Kapitel 8 im Detail dargestellten Ergebnisse führten zu quantifizierbaren Vorgaben sowie technischen Empfehlungen für die dann anstehende technische Realisierung.

Nach dem Vorliegen dieser hochwertigen Ergebnisse konnte folgende optimierte Wirkungskette zum Tragen kommen:

- Optimierung der Strömungsgeschwindigkeit an der Karosse
- Verbesserung des Abreinigungseffektes von anhaftenden Partikeln
- Gelöste Partikel befinden sich im Fluid (KTL-Lack)
- Erhöhte Transportgeschwindigkeit über Badumwälzung
- Verstärkter Partikelaustrag über erhöhte Filterkapazität

## 9.3 Technische Realisierung der KTL- Strömungsoptimierung

Die technische Realisierung erfolgte in folgenden Schritten:

- Erstellung einer technischen Ausschreibung zur Angebotseinholung
- VW- interne Beantragung und Genehmigung der Finanzmittel
- Auftragsvergabe und technische Abstimmung mit dem Lieferanten
- Technische Realisierung durch beauftragte Fachfirma
- Umbau nach Terminplanung
- Inbetriebnahme mit Fachfirma und den VWN- Fachabteilungen
- Ergebniskontrolle und gegebenenfalls Korrekturen

### 9.3.1 Technische Ausschreibung

In der VWN Lackiererei- Hannover- ist in dem Produktionsbereich Kataphores-Tauchlackierung KTL (Halle 1, Feld V30-V42) eine Optimierung der Strömungs-Verhältnisse im KTL-Becken und eine Erweiterung der Filterkapazität geplant.

Ziel des Vorhabens ist die Verbesserung des Austrages der Schmutzfracht aus dem KTL-Becken und eine den steigenden Qualitätsanforderungen der Oberfläche entsprechenden Abreinigungsqualität der an der Karosse anhaftenden Schmutzpartikel sicherzustellen.

Angeboten und realisiert werden soll ein Ausbau der Umwälz- und Filterleistung zur Erreichung einer 3-fachen Badumwälzung pro Stunde und entsprechende Maßnahmen zur Beeinflussung der Strömungssituation.

Die zu diesem Zweck erforderlichen anlagentechnischen Umrüstarbeiten sind Gegenstand der vorliegenden Ausschreibung.

Hierbei war abgestimmt, die Ergebnisse und Empfehlungen der wissenschaftlichen Grundlagen- Untersuchung zur Strömungsoptimierung des KTL-Bades zu berücksichtigen. Die konkreten Maßnahmen dazu wurden nachfolgend direkt zwischen dem Vertreter der Universität Rostock (Herrn Prof. Leder), dem Autor dieser Arbeit (Herrn Majohr) sowie der Fachfirma und den VWN Fachleuten abgestimmt.

#### 9.3.1.1 Wesentliche technische Details

- Filterstation

Im Rahmen der Erhöhung der Filterkapazität soll eine separate Filterstation aufgebaut werden. Es werden jeweils 4 einzelne Beutelfilterkessel zu einer Station zusammengefasst. Das KTL-Medium wird aus dem Becken angesaugt, durchströmt die Filterstationen und wird anschließend dem Becken wieder zugeführt. Volumenstrom für 4 Beutelfilter: 450 m<sup>3</sup>/h

- Mediumförderpumpe

Zur Förderung des Mediums ist eine geeignete Kreiselpumpe mit hydrodynamischer Abdichtung einzusetzen.

Fördervolumen : 450 m<sup>3</sup>/h

Pumpenleistung : 55 KW

- Ansaugstutzen

Das KTL-Becken ist an dem Ort der Ansaugung mit 2 zusätzlichen Ansaugstutzen zu versehen. Hierbei wird ein Stutzen zur Realisierung des aktuellen Vorhabens genutzt. Der zweite Ansaugstutzen verbleibt als Blindstutzen für spätere Nutzung.

- Bodenflutdüsen

Das filtrierte KTL-Medium wird nur teilweise über die entsprechenden Bodenflut-Düsen zurück in das KTL- Becken geleitet.

Die vorhandenen Bodenflutdüsen (so genannte „Körtingdüsen“ , Anzahl: 253 Stück, verteilt auf 23 Bodenverteilern mit je 11 Düsen) sind zu demontieren. Es sind geeignete Düsen ohne Injektorfunktion auszuwählen und einzubauen.

(*Maßnahme aus wissenschaftlicher Untersuchung, siehe Kapitel 8.4*) Der Austausch erfolgt in einer nachgeschalteten Umbauphase.

- Oberflächen-Seitenflutdüsen

An den beiden Längsseiten des KTL-Beckens sind zur optimalen Strömungs-Gestaltung Seitenflutdüsen auf der gesamten Beckenlänge in mehreren Ebenen anzuordnen. Die erste Ebene Seitenflutdüsen ist zur Unterstützung der Strömungswalze ca. 30 Grad schräg zur Förderrichtung anzuordnen. Die weiteren Ebenen sollen kritische Beschichtungsstellen an der Karosse erfassen.

Ziel: Relativgeschwindigkeit mind. 0,4 m/s auf der Oberfläche.

(*Maßnahme aus der wissenschaftlichen Untersuchung, siehe Kapitel 8.4 und 8.5*)

- Zusätzliche Düsen im Beckeneinlauf

Der Beckeneinlauf ist mit zusätzlichen Düsen zu versehen, die zwischen den vorhandenen platziert werden sollen. Gespeist werden diese durch die neu zu installierende Pumpeneinheit. (*Maßnahme aus der wissenschaftlichen Untersuchung, siehe Kapitel 8.6*)

### 9.3.2 Technischer Umbau, Fa. IAM, Industrieanlagenmontage GmbH

Zur Realisierung der 3-fachen Badumwälzung des KTL-Beckens wurde eine neue Filterstation mit Pumpe und einem Düsensystem, das aus einem neuen Seitenflutsystem und geänderten Bodenflutdüsen besteht, installiert. Zur Erfassung der gefilterten Mengen, die in die linke und rechte Seite des Seitenflutsystems gespeist werden, dient jeweils ein Durchflussmesser.

#### 9.3.2.1 Technische Daten der Düsen (Seitenflut- und Bodenflutsystem)

- Seitenflutsystem

linke Seite : 22 Düsenrohre mit je 6 Düsen  
rechte Seite : 22 Düsenrohre mit je 6 Düsen

Düsendaten : Zungendüse, Fa. Lechler  
Literleistung : 31,5 l/min bei 2 bar  
Strahlwinkel : 45°

- Bodenflutsystem

Bodenflutdüsen : 300 Stück  
Literleistung : 97,4 l/min bei 3 bar  
Bohrung : 10 mm  
Länge : 50 mm

#### 9.3.2.2 Umbau und Inbetriebnahme

Im 2. Halbjahr 2006 erfolgte ab August parallel zum Anlagenbetrieb der Aufbau aller neuen Aggregate, wie Filterstationen, Verrohrungen, Pumpenstation usw.

Im Dezember 2006 wurde an zwei Wochenenden das KTL-Becken in die Reserve-Tanks abgelassen, sodass die Anschlüsse der Einspeisungen sowie die Einbauten im KTL-Becken erfolgen konnten.

Da besonders der Einbau der Seitenflutdüsenrohre zeitaufwendig war, musste der Einbau stundengenau geplant und überwacht werden.

Nach der zügigen Durchführung der Ein- und Umbauten und dem Hochpumpen des KTL-Lackes wurde noch vor dem Produktionsbeginn am Montag ein Probelauf mit Testkarossen gefahren.

Die gefahrenen Testkarossen wurden begutachtet und für gut befunden, sodass die Anlage zur Produktion freigegeben werden konnte.

Insgesamt erfolgte der Anlagenumbau durch die Firma IAM äußerst zufriedenstellend und die vorgegebenen Termine wurden eingehalten.

#### **9.4 Ergebnisse nach Anlagenoptimierung**

Der vergleichende visuelle Eindruck der Oberflächenströmung im KTL-Bad zur Situation vor dem Umbau zeigt, ohne Karossen im Bad, eine deutlich höhere Strömungsintensität. In der Ableitung dieses Bildes kann man von einer wesentlich stärkeren Ausbildung der Strömungswalze mit verbesserter Grundströmung ausgehen.

Beim Betrieb mit eingefahrenen Karossen steigt die Strömungsintensität nochmals mit der deutlichen Bildung eines turbulenten Strömungsbildes auf der Badoberfläche.

Die KTL-Beschichtung zeigt ein vollkommen gleichmäßiges und optisch einwandfreies Bild, sodass man von einer Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Karossoberfläche zwischen 0,3 und 0,35 m/s im Maximum ausgehen kann.

Der verbesserte Partikel-Abreinigungseffekt auf der KTL-Oberfläche zeigte sich erst nach dem Einschwingen des Gesamtsystems und wurde mit fortschreitender Betriebszeit immer deutlicher. Der Grund hierfür liegt erfahrungsgemäß trotz aller Vorkehrungen an den Partikelbelastungen aus den Ablassaktionen und gewissen Unsicherheiten aus dem neuen Aggregat-Umfeld.

Ein jüngster Vergleich mit Fachleuten aus anderen VW-Werken bestätigt nach der Optimierung eine sehr gute KTL-Qualität im VWN-Werk Hannover, sowohl im Gesamtbild als auch bezüglich der Verschmutzungsrate.

Ein positives quantifizierbares Ergebnis kann weiter aus den kontinuierlichen internen Qualitätsdaten abgeleitet werden. Aus einem 3-Monatsvergleich des 4. Quartals 2006 (vor der Optimierung) zum 1. Quartal 2007 kann folgende Verbesserung bestätigt werden:

- Verbesserung der Schmutzpartikelrate pro Karosse um 35 %
- Verbesserung der Metallpartikelrate pro Karosse um 60 %

Der unter 9.3.1.1 erwähnte Austausch der Bodendüsen sollte nach diesen positiven Ergebnissen realisiert werden (Realisierung durch den Autor vorgeschlagen).

Eine weitere Erhöhung der Umwälzleistung auf einen Wert von 4 Badumwälzungen pro Stunde, der durch bauliche Optionen bereits vorbereitet ist, sollte nach diesem ersten sehr positiven Schritt in Erwägung gezogen werden.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Gesamtoptimierung der VWN-Lackiererei Hannover stand insbesondere die strömungsmechanische Optimierung der Karosserievorbehandlungsanlagen im Mittelpunkt dieser Arbeit.

In den Vorbehandlungsanlagen werden Automobilkarosserien in diversen Verfahrensschritten überwiegend im Tauch- oder Spritzverfahren gereinigt, phosphatiert und kataphoretisch beschichtet. Diese Prozesse laufen nahezu vollständig in geschlossenen Anlagen ohne direktes manuelles Eingreifen ab, sodass das jeweiligen Qualitätsergebnisse nach den Prozessabschnitten ausschließlich durch die chemischen- und anlagentechnischen Parameter bestimmt und beeinflusst werden.

Ausgehend von vorhandenen Schwächen in der Prozesssicherheit der Karosserievorbehandlung galt es im Rahmen der Arbeit durch fundierte theoretische Ansätze und experimentelle Untersuchungen die Ursachen-Wirkungskette tiefer gehend zu erforschen, um daraus im nächsten Schritt Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

Die Untersuchung bezog sich auf Verschmutzungspartikel, die durch geeignete Strömungskräfte von der Karosseroberfläche gelöst werden sollten und über das Fluid (KTL-Lack) den Filtern zugeführt und abgeschieden werden.

Die Simulation der strömungsmechanischen Situation in einem realen Karosseriebecken war in diesem Kontext eine fundamental wichtige Basisuntersuchung.

Bereits hier stellten sich einige Details und Effekte in einem nicht so erwarteten Bild dar, indem zum Beispiel nur ein Bruchteil der kinetischen Energie der Oberflächen-Grenzschicht zugeführt wird. Damit wurde ein nur sehr geringer Abreinigungseffekt für Verschmutzungspartikel erreicht.

Allein aus dieser Erkenntnis ist abzuleiten, dass die bisherige technische Auslegung des KTL-Tauchbeckens zwar brauchbare aber keine optimalen Ergebnisse erwarten lässt.

Zusammenfassend wurden folgende Kernelemente innerhalb dieser Arbeit untersucht:

- Verteilung und mikroskopische Untersuchung charakteristischer KTL-Verschmutzungspartikel
- Wechselwirkung runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden bei verschiedenen Auftreffwinkeln
- Haftkraft: Eisenoxidpartikel auf phosphatisierter Blechoberfläche
  - Adhäsion und Trenngeschwindigkeit
- CFD- Simulation der Strömung in einem typischen Tauchbecken
  - Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenzverteilung
- Düsenstrahlausbreitung
  - Wurfweite unterschiedlicher Düsen

Die Gesamtheit der gefundenen Ergebnisse führte zu einem grundlegend neuen und fundiertem Kenntnisstand der strömungsmechanischen Zusammenhänge in einem Karosserienbehandlungsbade.

Weiter war der Autor aus den Ergebnissen heraus in der Lage konkrete technische Daten bezüglich einer Optimierung der Strömungsmechanik vorzugeben, die eine abgesicherte positive Auswirkung auf die Beschichtungsqualität erwarten lässt.

Wesentliche technische Vorgaben aus dieser Arbeit waren:

- Anhebung der Strömungsgeschwindigkeit in der Grenzschicht „Fluid-Blechoberfläche“ auf mindestens 0,4 m/s, mit dem Ziel eine Wand-Schubspannung von mindestens  $\tau_w = 1\text{Pa}$  zur Überwindung der Haftkraft von anhaftenden Schmutzpartikeln zu erreichen.
- Einbau von seitlichen Flutsystemen zur Aufprägung einer erhöhten Wandschubspannung auf die seitlichen und waagerechten Karosserieflächen und zur Intensivierung der Strömungs- und Turbulenzbewegungen im Karosserie-Innenraum.
- Ausbau der uneffektiven Körting-Düsen und Ersatz gegen geeignete Düsen ohne Strömungsverluste (Vorgeschlagene Maßnahme).

Diese technischen Vorgaben wurden vom Autor in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock erarbeitet und in der späteren Phase im Rahmen seiner Funktion als Projektleiter für die Prozessoptimierung der Lackiererei konkret in die Optimierung der KTL-Anlage aufgenommen und umgesetzt.

Da in der Gesamtheit umfangreiche Änderungen an der Anlage realisiert werden sollten, war der Überzeugungsaufwand bei den betrieblichen Fachleuten und Entscheidungsträgern erheblich, da eine gewisse Skepsis bezüglich der Effektivität nicht ganz auszuräumen war.

Hinzu kam der deutliche finanzielle Aufwand von rund 380.000,- € für den gesamten Änderungsumfang; dieser musste durch den Autor logischerweise mit einer prognostizierten Einsparung und Qualitätsverbesserung belegt werden.

Desto erfreulicher waren und sind die eingetretenen Verbesserungen bereits nach einer Betriebszeit von 8 Monaten.

Die direkten Qualitätsergebnisse der KTL-Beschichtung weisen einen deutlichen positiven Trend mit einer durchschnittlich 50 %-igen Verbesserung der Partikel-Belastung aus.

In der Praxis werden damit die Ergebnisse dieser Arbeit und die Prognose der Qualitätsverbesserung bestätigt.

Mit dieser Optimierung der KTL-Qualität ist in der Folge ein wesentlicher Beitrag zur Prozessoptimierung des gesamten Lackierprozesses mit einem deutlichen Einspareffekt durch Reduzierung des Schleifaufwandes (Personalkosten) sowie eine weitere Anhebung der i.O. Rate im Füller und Decklack und dementsprechender Reduzierung von Lacknacharbeiten verbunden. Die Herstellkosten werden sich aus jetziger Sicht um mindestens 3 Euro pro Karosse reduzieren, sodass die vorgegebene interne Amortisationszeit eingehalten wird.

Aus Sicht des Autors haben die Erkenntnisse und nachgewiesenen Ergebnisse dieser Arbeit damit den Charakter einer allgemeingültigen technischen Vorgabe für die Strömungskonditionen bestehender und zukünftig zu definierender Karosserien-Vorbehandlungsbäder. Des Weiteren wurde ein Vorgehen aufgezeigt um die tieferen Ursachen von Beschichtungsfehlern eindeutig aufzudecken und abzustellen.

Im Rahmen eines Ausblickes zeigen die durchgeführten Optimierungsprojekte am Beispiel der VWN-Lackiererei Hannover, dass eine kontinuierliche Verbesserung des Lackierprozesses durchführbar und sinnvoll ist. Parallel reift aber auch die Erkenntnis, dass die praxisorientierten Schritte zu klein und zu langsam für das Erreichen eines optimalen oder sogar idealen Lackierprozesses sind, zumal die Potentiale häufig aus Unkenntnis der tieferen Ursachen nur unvollkommen ausgeschöpft werden können.

Die bisher geübte Praxis bei der Prozessoptimierung durch Einschaltung und Beteiligung der Lieferanten, als Anlagenlieferant oder Farblieferant, hat in einem gewissen Rahmen jeweils positive Effekte bewirkt, jedoch stehen häufig aus wirtschaftlichen, fachlichen und unternehmenspolitischen Gründen nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung.

An dieser Stelle ist ein Sprung aus den eigenen internen Fachgremien heraus, in eine Zusammenarbeit der Automobilindustrie mit entsprechend wissenschaftlich orientierten Universitäten unbedingt zu empfehlen. Bei diesem Vorgehen ist besonders die „Neutralität“ zu erwähnen, sodass die gefundene Ergebnisse auf rein fachlicher Ebene ohne Rücksicht auf Sensibilitäten von Fachleuten und Fachfirmen dargestellt und weiterverfolgt werden können.

Parallel dazu ist der Zuwachs an Fachwissen der entsprechenden Spezialisten in der Automobilindustrie, hier in der Lackiererei, hervorzuheben. Mit diesem fundierten Wissen erhalten die Fachleute eine höherwertige Kompetenz, bei der zukünftigen Ausplanung und dem Betreiben von Prozessen und Anlagen.

## 11 Anhang

### 11.1 Bildliche Darstellungen „KTL- Becken“ vor dem Umbau (Januar 2004)

5 Bilder aus Bericht „Strömungsmechanische Optimierung: KTL- Becken VWN“



Abb. 11.1-1 Übersicht KTL-Becken Pendelförderer und Bodenflutsystem mit Körtingdüsen



Abb. 11.1-2 Ausrichtung der Körtingdüsen im Bugbereich



Abb. 11.1-3 KTL-Becken, Bodenbereich



Abb. 11.1-4 Ansicht des Bodenflutsystems im KTL-Becken



Abb. 11.1-5 Ansicht des Bodenflutsystems im KTL-Becken

**11.2 Bildliche Darstellungen „KTL-Becken“ nach dem Umbau (April 2007)**

Abb. 11.2-1 Pumpenstation mit 5 Filtereinheiten



Abb. 11.2-2 Gesamtansicht seitliche Freistrahl-Düsen, rechte Seite



Abb. 11.2-3 Detailansicht seitliche Düsenrohre mit Lechler-Düsen



Abb. 11.2-4 Zusätzliche Bodenflutdüsen Bugbereich



Abb. 11.2-5 Detailansicht Optimierung Bodenflutung

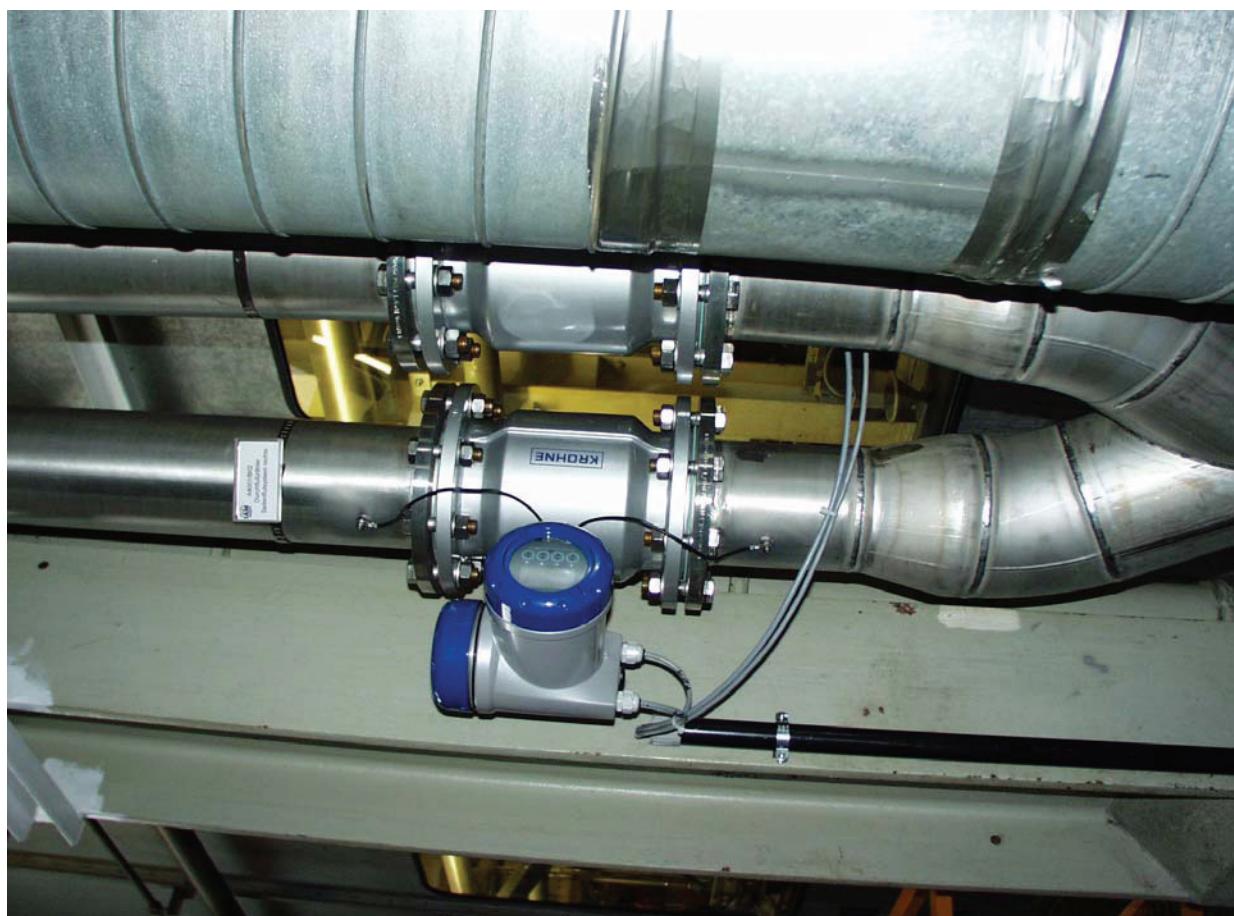


Abb. 11.2-6 Durchflussmengen-Überwachung Seitenflutsystem

### 11.3 Dokumentation „Technischer Umbau“ Fa. IAM Industrieanlagen GmbH

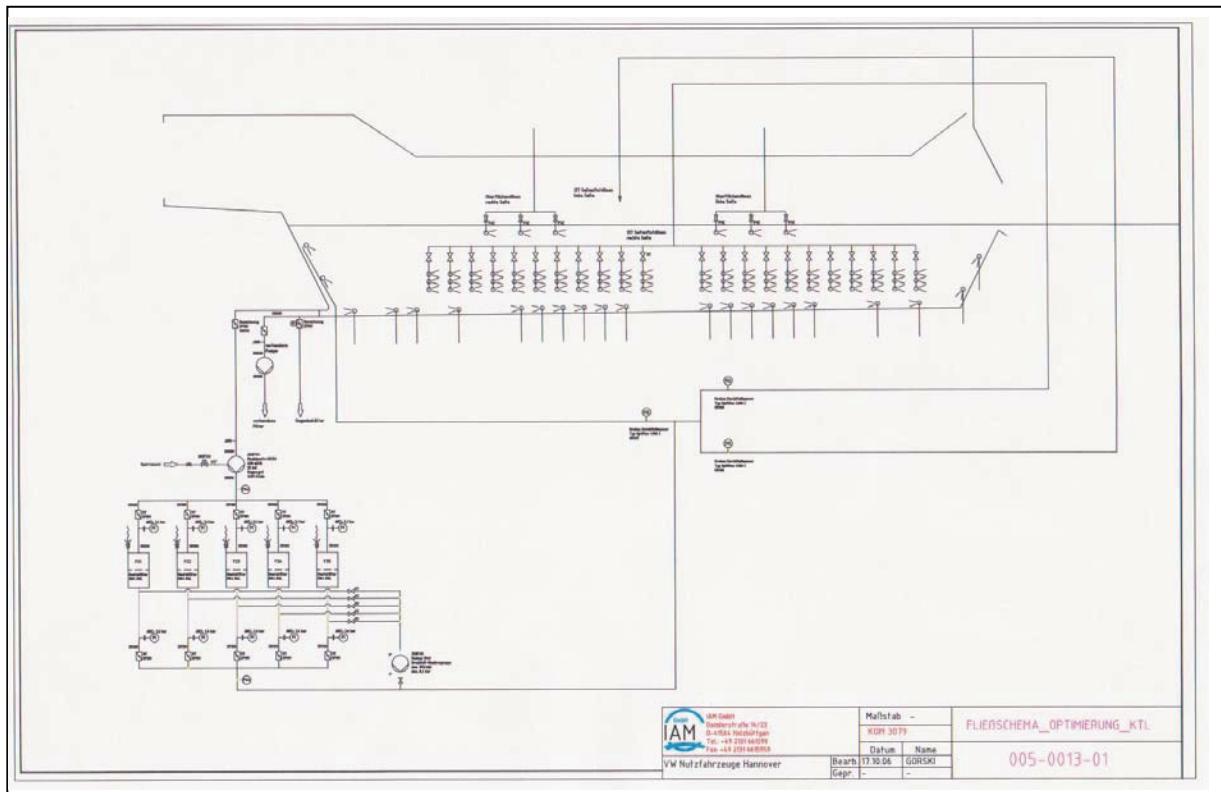


Abb. 11.3-1 Fließschema Optimierung KTL

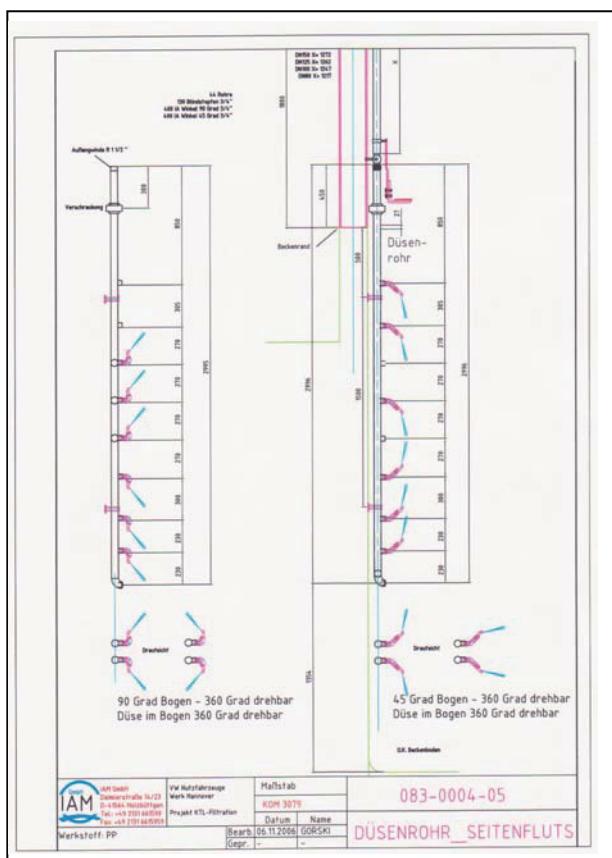


Abb. 11.3-2 Düsenrohr-Seitenflutsystem

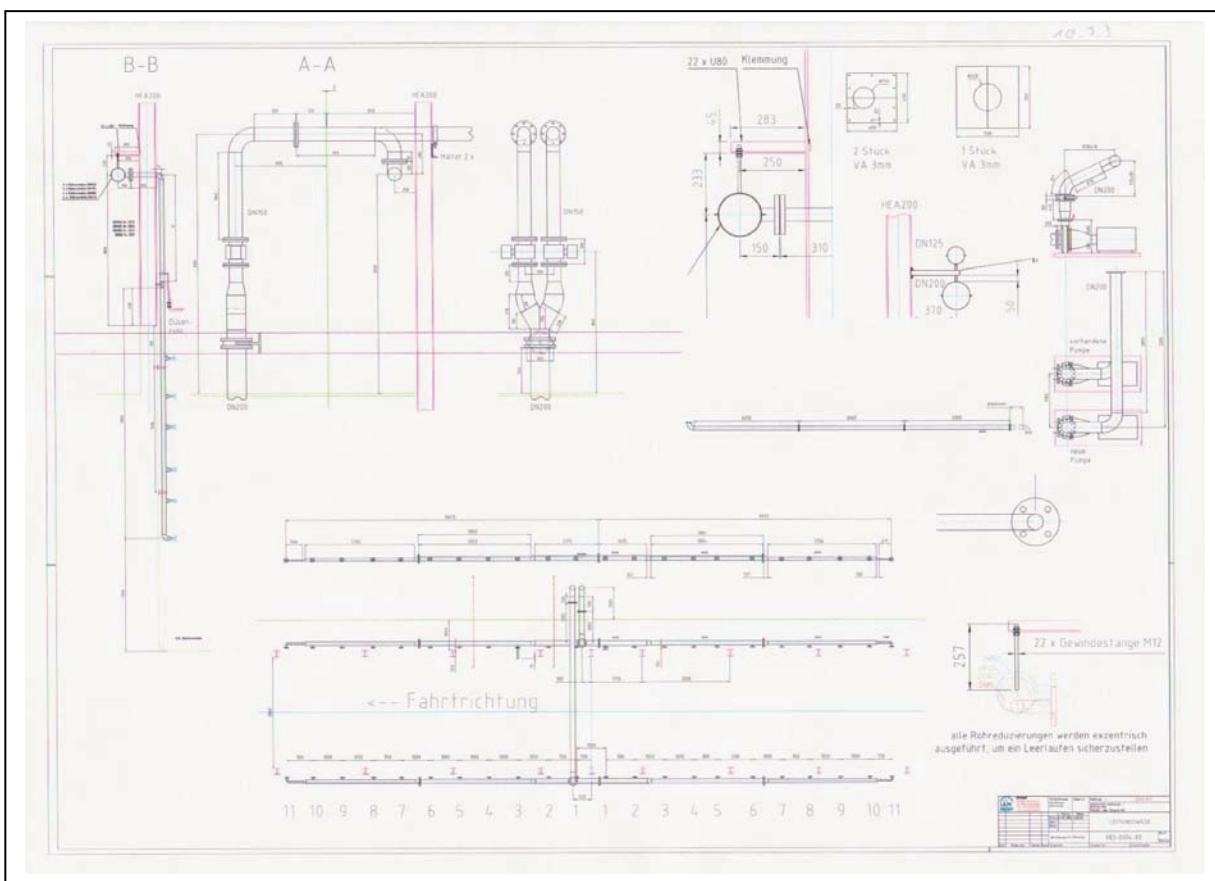


Abb. 11.3-3 Leitungswege

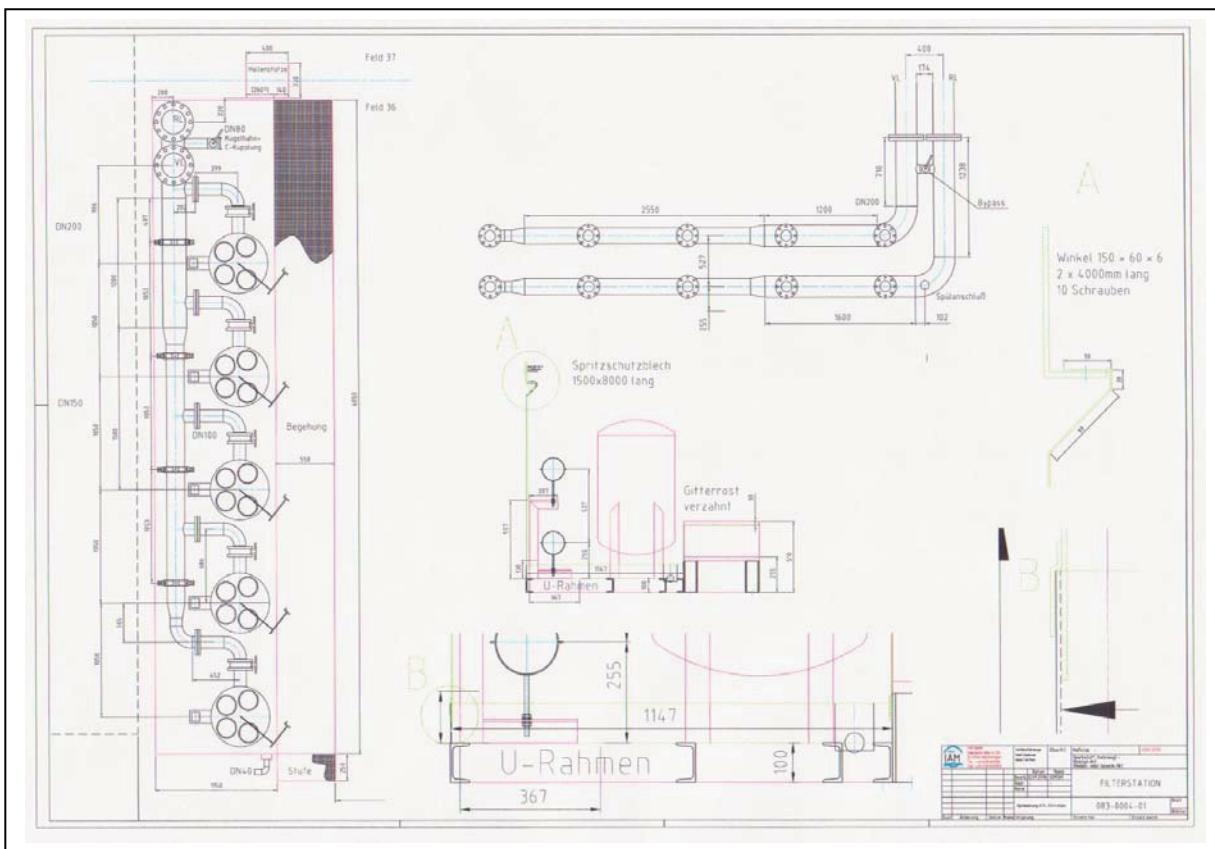


Abb. 11.3-4 Filterstation

## 11.4 Sonderfarben-Innovationskonzept



Abb. 11.4-1 Vortrag „Dupont-Farbmischraum“ VWN-Hannover (26./27.09.2005)

A slide from a presentation titled "Hintergrund". The top right corner shows "DuPont Coating Solutions" and the number "5". The main text is "● Suche nach Verbesserungspotential bezüglich Qualität und Logistik" with a list of 10 items. The bottom right corner shows the DuPont logo. On the left side, there is a vertical strip showing a car's front end and a color calibration strip.

Abb. 11.4-2 Verbesserungspotentiale des Ist-Prozesses

DuPont Coating Solutions 7

## Anforderungen an ein neues Produkt- und Logistiksystem

- Reduzierung der Doppelläufer
- Reduzierung des Einsatzes von Vorlacken
- Erhöhung der First Run Rate
- Lieferung just in Time (max. 10 Tage)
- Lieferung von Kleinstmengen ab 1 kg
- Erhöhte Flexibilität
- Kosteneinsparung

DU PONT

Abb. 11.4-3 Zielkatalog für Sonderfarben-Innovationskonzept

DuPont Coating Solutions 12

## Prinzip Centari Mischsystem

88\* Mischpasten + \*incl. Effektpigmente

Spezifische Bindemittel

```
graph TD; A([88* Mischpasten + *incl. Effektpigmente]) --> B([Spezifische Bindemittel]); B --> C[Decklack KH 140]; B --> D[Decklack Reparatur]; B --> E[Decklack Anbauteile]; B --> F[Decklack Chassis]; B --> G[Decklack 80° C]
```

DU PONT

Abb. 11.4-4 Neuartiges Sonderfarben-Mischsystem



Abb. 11.4-5 Verbesserungspotentiale des Centari-Mischsystems

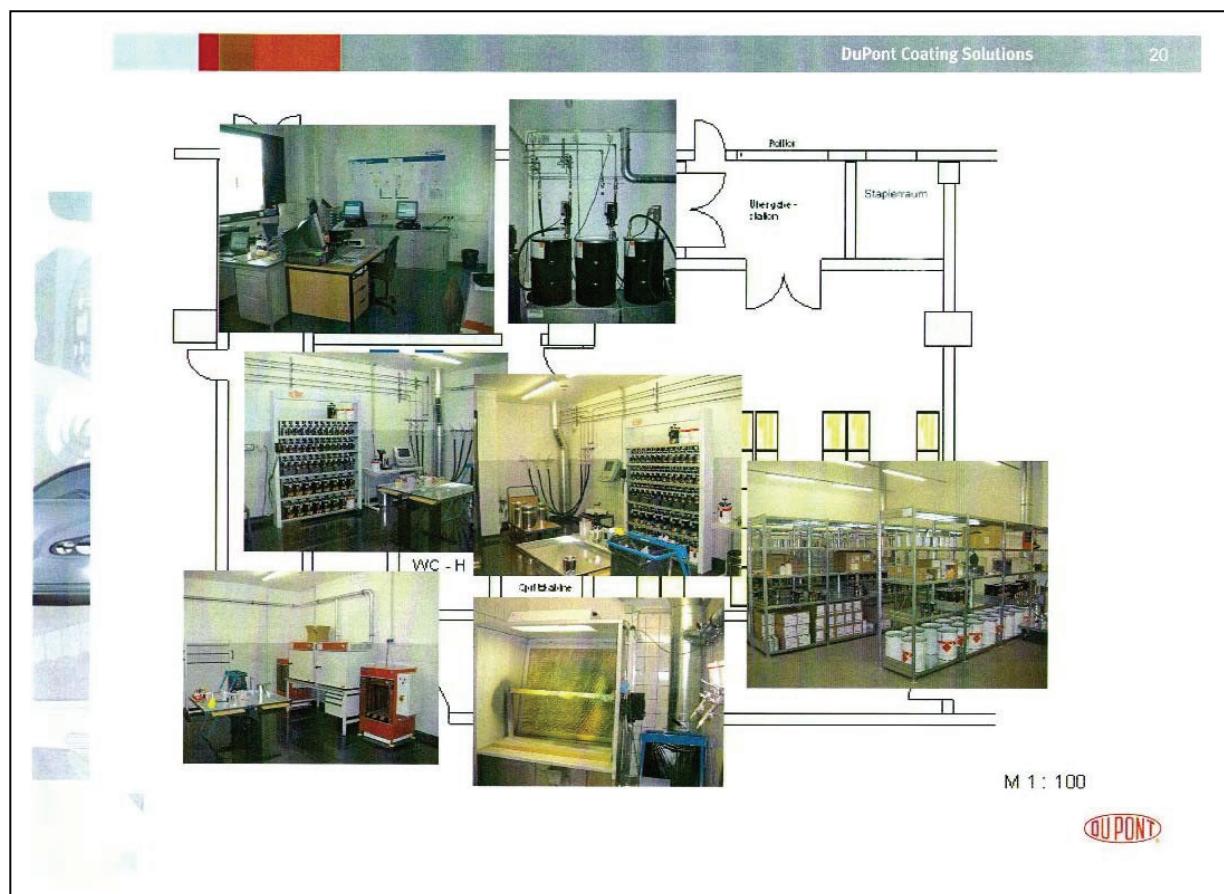


Abb. 11.4-6 Bildliche Darstellungen „Neuer Sonderfarben-Mischraum“



Abb. 11.4-7 Bestell-Lieferkonzept mit kurzer Reaktionszeit

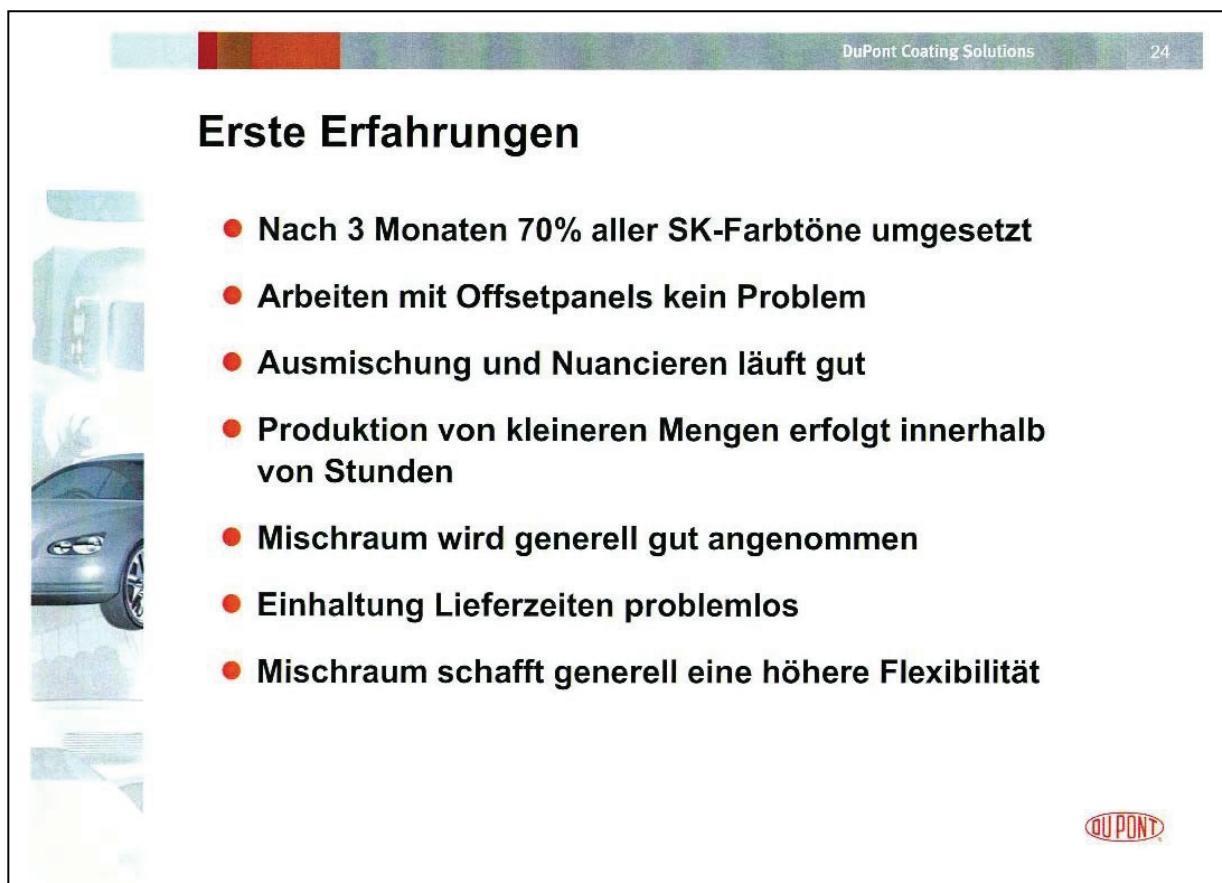


Abb. 11.4-8 Umgesetzte Verbesserungspotentiale

DuPont Coating Solutions 27

## Einsparpotential

- **Einsparungen p.a. (lt. Projektberechnung)**

● Nacharbeits- und Ausschussreduzierung	240.000,- Euro
● Materialeinsparungen (Vorlack, Doppellackierung, NA, u.s.w.)	205.000,- Euro
● Fertigungszeitreduzierung	130.000,- Euro
● Gesamteinsparung p.a.	575.000,- Euro

DU PONT

Abb. 11.4-9 Realisierte Einsparungen pro Jahr

DuPont Coating Solutions 28

## First Run Ginstergelb / SK 9161

Jahrgang 04	5a	FST	i.O. - Quote
Jan.	17	43	40
Feb	25	44	57
Mrz	10	25	40
Apr	8	18	44
Mai	11	18	61
Jun	30	60	50
Jul	19	41	46
Aug	13	34	38
Sep	45	95	47
Okt	37	68	54
Nov	31	59	53
Dez	84	149	56
Summe 04	330	654	50

Jahrgang 05	5a	FST	i.O. - Quote
Jan.	49	75	65
Feb	27	32	84
Mrz	10	12	83
Apr	19	28	68
Mai	61	72	85
Jun	17	30	57
Jul	122	176	69
Aug	531	615	86
	836	1040	80



**Verbesserung**  
**First Run 30%**

DU PONT

Abb. 11.4-3 Großauftrag „Deutsche Post“ mit neuem Sonderfarben-Konzept

### 11.5 Großprojekt Reduzierung Fertigwagen-Nachlackierung



Abb. 11.5-1 Inbetriebnahme „Minimalisierter Nachlackierbereich“ in der Montage

## 11.6 „Von Kindheit an dem Auto treu“

### Detlef Majohr geht in den Ruhestand

*Schon immer stand das Automobil im Lebensmittelpunkt von Detlef Majohr. Es zieht sich wie ein roter Faden durch das Leben des Abteilungsleiters für Prozesstechnik, Sonderlacke und Technisches Büro in der Lackiererei bei VWN. 38 Jahre war er im VW-Konzern tätig, seit 1994 in Hannover. Für den Ruhestand hat er sich einiges vorgenommen. „Der Lack“, so Majohr, „ist noch lang nicht ab.“*



Seit seiner Kindheit hat der 61-jährige Kontakt zum vierrädrigen Gefährt – zunächst in einer Berliner Hinterhofwerkstatt. Das änderte sich auch nicht, als er 1959 in den Westen kam. In Hannover machte er eine Lehre zum Kfz-Mechaniker und schloss parallel die Fachhochschulreife ab. Das Studium zum Maschinenbau-Ingenieur ebnete dann den Weg für seinen Werdegang bei Volkswagen. Dort war er zunächst Unterabteilungsleiter für Anlagen und Wartung in der Lackiererei Wolfsburg, danach Abteilungsleiter für die Lack-Fertigung des Käfers und des VW1600. 12 Jahre später ging Majohr dann in die Lackiererei nach Puebla, Mexiko. Nach seiner Rückkehr ins Werk Wolfsburg wechselte Majohr 1994 zu VWN. Hier leitete er zuerst die Bereiche Vorbehandlung, kataphoretische Tauchlackierung (KTL) und Unterbodenschutz des T4. Später war er zuständig für den Sonderlack, die Prozesstechnik und das Technische Büro. Detlef Majohr weiß, dass ohne Spezialisten im Lack eine kundengerechte Qualität unmöglich wäre. Daher gilt Majohrs Aufmerksamkeit nicht nur dem Auto, sondern insbesondere den Kollegen und Mitarbeitern. Für diese wünscht sich Majohr, dass Volkswagen wettbewerbsfähig bleibt.

Auf die Frage, wie die Zukunft aussehen soll, antwortet der Hobby-Walker: „Der Lack ist noch lange nicht ab. Für meinen Körper sorge ich nach wie vor, aber auch das Gehirn muss weiterarbeiten.“ So überlegt der 61-Jährige, sich sozial oder politisch zu engagieren, würde aber auch vor einem neuen Studium nicht zurückschrecken. Und er möchte sich einen langjährigen Traum erfüllen: Eine Harley Davidson. (md)

## 12 Literaturverzeichnis

### 12.1 Zitate

[1] Kreis, W.  
Automobilackierung der Zukunft:  
„Neue Lösungen für moderne Fahrzeugkonzepte“  
Journalisten und Wissenschaftler im Gespräch-  
Chemie für eine nachhaltige Mobilität  
6./7.10.2003 in Münster  
Seiten 2-4 und 8-10

[2] A. Goldschmidt; H.J. Streitberger  
BASF-Handbuch Lackiertechnik  
Hannover, Vincentz Verlag, 2002  
[2.1] S.372; [2.2] S.366; [2.3] S.19; [2.4] S.717; [2.5] S.657; [2.6] S.690;  
[2.7] S.697; [2.8] S.699; [2.9] S.700; [2.10] S.466; [2.11] S.473; [2.12] S.478;  
[2.13] S.479; [2.14] S.721; [2.15] S.509; [2.16] S.510; [2.17] S.511;  
[2.18] S.514; [2.19] S.515; [2.20] S.628; [2.21] S.629

[3] Die Lack Story, 100 Jahre Farbigkeit zwischen Schutz, Schönheit und Umwelt,  
Verband der Lackindustrie aus Anlass seines 100- jährigen Bestehens

[4] C.K. Schoff, JCT 71 (888), S.57 (1999)

[5] R. Döring u. U. Schernau, F+L 99, S.321 (1993)

[6] A. Benninghofen, J. Vac. Sci. Technol A3, S.451 (1985)

[7] U. Hoffmann, „besser lackieren!“, Taschenbuch für Lackierbetriebe, S.342,  
Vincentz Verlag, Hannover, (1993)

[8] O. Baumgärtner, „besser lackieren!“, Taschenbuch für Lackierbetriebe, S.341,  
Vincentz Verlag, (1993)

[9] W.M. Liv, I- Lack 66, S.222 (1998)

[10] D. Bohnhorst, „Chemische Vorbehandlung von Automobilkarossen“,  
Fa. Henkel Technologies, Kapitel 7-12 (2006)

[11] J. Halbartschlager, I-Lack. 66, S.672 (1998)

[12] D. Bohnhorst, „Chemische Vorbehandlung von Automobilkarossen“  
Fa. Henkel Technologies, Kapitel 5-2 (2006)

[13] W.Kolten u. A. Madessi, JOT 38(8), (1998)  
D. Milojevic u. N.Heckmann, I-Lack 63, S.428 (1995)

[14] S. Kuphal; Burgmann, „Trainingshandbuch KTL-Technologie“,  
Fa.DuPont/Hellac, S.29 (2000)

[15] S. Kuphal; Burgmann, „Trainingshandbuch KTL-Technologie“, Fa.Dupont/Hellac, S.31 (2000)

[16] H. Einhorn, „Numerische Simulation der Strömungsverhältnisse in einem Tauchbecken zur Vorbehandlung von Automobilkarossen“, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Rostock,(2001)

[17] H. Oertel jr.; M. Böhle (Hrsg.) „Strömungsmechanik“ Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele (2. Auflage) Vieweg-Verlag, Braunschweig-Wiesbaden, S. 188-191 (2002)

[18] A. Leder, „Strömungsmechanische Optimierung, KTL-Becken VWN-Hannover“ Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock (2006)

[19] A. Leder; M. Brede; H. Einhorn; V. Nikonorov „Numerische Simulation der Strömungsverhältnisse in einem Tauchbecken zur Vorbehandlung von Automobilkarossen“ Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock, (2003)  
[19.1] S.25; [19.2] S.26; [19.3] S.29; [19.4] S.30; [19.5] S.31  
(Seitenangaben aus Gesamtbericht unter [18])

[20] A. Leder; A.Jianu „Ermittlung von Haftkräften zwischen Partikeln und Karossooberflächen“ (Literaturstudie)  
Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2001)

[21] A. Leder; H. Kleist „Experimentelle Ermittlung von Haftkräften zwischen Schmutzpartikeln und Karossoberflächen“  
Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2001)

[22] A. Leder; F. Richter; S. Maisch „Experimentelle Analyse der Ausbreitungscharakteristik eines Düsenfreistrahles mittels Laser-Doppler-Anemometer“  
Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2002)

[23] F. Hüttmann<sup>1</sup>; A. Leder<sup>1</sup>; M. Michael<sup>1</sup>; D. Majohr<sup>2</sup>  
„Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden bei verschiedenen Auftreffwinkeln“  
<sup>1</sup> Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Rostock  
<sup>2</sup> Volkswagen AG, Nutzfahrzeuge, Hannover

[24] M. Michael: „Experimentelle Untersuchungen von Strömungsstrukturen an schräg auf eine ebene Platte treffenden Düsenfreistrahlen“; Studienarbeit, Universität Rostock (2007)

[25] F. Richter; A. Leder : „Tauchbare LDA-Schleppsonde für hydrodynamische Untersuchungen“; in W. Merzkirch; F. Peters; B. Ruck; D. Dopheide; A. Leder(Hrsg.)

[26] F. Richter; A. Leder : „Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden; in: D.Dopheide; H. Müller; V. Strunk; B. Ruck; A.Leder (Hrsg) „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik- 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006, PTB Braunschweig, S.13.1-13.6, 2006

## 12.2 Allgemeine Literatur

- D. Bohnhorst, „Chemische Vorbehandlung von Automobilkarossen“ Fa. Henkel Technologies (2006)
- H. Einhorn, „Numerische Simulation der Strömungsverhältnisse in einem Tauchbecken zur Vorbehandlung von Automobilkarossen“, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Rostock (2001)
- A. Goldschmidt; H.J. Streitberger, „BASF-Handbuch Lackiertechnik“, Hannover, Vincentz Verlag (2002)
- S. Kuphal; H. Burgmann, „Trainingshandbuch KTL-Technologie“ Fa.DuPont/Hellac
- A. Leder „Strömungsmechanische Optimierung: KTL-Becken- VWN-Hannover“, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock (2006)
- Leder, „Reinigen und Phosphatieren in Mischbauweise mit über 20% Al-Anteil“ : Teil 1: Strömungstechnische Untersuchungen zum Reinigen und Phosphatieren von Automobilkarossen; 19. Arbeitstagung des 1.Deutschen Automobilkreises, 11.und 12.11.2002 in Bad Nauheim, S. 177-194 (2002)
- Leder; A. Jianu, „Ermittlung von Haftkräften zwischen Partikeln und Karossoberflächen“ (Literaturstudie) Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2001)
- Leder; H. Kleist, „Experimentelle Ermittlung von Haftkräften zwischen Schmutzpartikeln und Karossoberflächen“, Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2001)
- Leder; M. Brede; H. Einhorn; V. Nikonov „Numerische Simulation der Strömungsverhältnisse in einem Tauchbecken zur Vorbehandlung von Automobilkarossen“, Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2003)
- Leder; F. Richter; S. Maisch „Experimentelle Analyse der Ausbreitungscharakteristik eines Düsenfreistrahls mittels Doppler-Anemometrie“, Forschungsbericht der Ism, Universität Rostock (2002)

- F. Hüttmann<sup>1</sup>; A. Leder<sup>1</sup>; M. Michael<sup>1</sup>; D. Majohr<sup>2</sup>  
„Wechselwirkung runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden bei verschiedenen Auftreffwinkeln“  
Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“  
4.-6. September 2007 Universität Rostock  
<sup>1</sup>Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Rostock  
<sup>2</sup>Volkswagen AG, VWN Nutzfahrzeuge, Hannover
- European Automotiv Coatings, 8. DFO- Automobiltagung, Dresden (2001) (ISBN 3-932287-47-9)
- H. Frieling, „Das Gesetz der Farbe“ Muster-Schmidt-Verlag, Göttingen  
3. überarbeitete Fassung 1990
- O. Lückert, „Prüftechnik bei Lackherstellung und Lackverarbeitung“ Vincentz Verlag, Hannover (1992)
- J. Eisenlohr u. J. Feßmann, „Aufgaben und Verfahren der Oberflächenbehandlung“, Expert Verlag, Renningen (2000)
- „Lackier- und Prüfkosten senken - Qualität verbessern“, Tagungsband DFO, Köln (1997) (ISBN 3- 932287-32-0)
- „Neue Prüfverfahren und Maßnahmen zur Kostensenkung bei der Qualitätsprüfung in der Lackiertechnik“, Tagungsband DFO, Nürnberg (1996) (ISBN 3-932287-29-0)
- „Schäden am Autolack“, Vincentz Verlag, Hannover (1995)