

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Schiffbau



Automatische Erzeugung der Panelnetzdiskretisierung eines Schiffsrumpfes

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

dem Fakultätsrat der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock vorgelegt
von

Dipl.-Ing. Gernot Knieling
geboren am 17.10.1976 in Waren (Müritz)

Rostock, September 2008

urn:nbn:de:gbv:28-diss2009-0090-8

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Fluideodynamik und Schiffstheorie

Prof. Dr.-Ing. Robert Bronsart
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Schiffbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Nikolai V. Kornev
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Tag der Verteidigung: 09.04.2009

Abstract

Wave resistance codes based on the potential flow theory are extensively used in early ship design. For calculation of the wave resistance the ship's surface and the free water surface have to be discretized using quadrilateral or triangular panels. The sizing and distribution of these panels have a significant impact on the accuracy of the resistance prediction.

Professional grid generation programs are at best semi-automated, thus generating the panel mesh is a labour-intensive task which requires most of the total time needed for wave resistance calculations. This thesis presents a fully automatic method for the generation of panel meshes at ship hulls.

At first the potential flow codes used in the shipbuilding industry are investigated. The main focus is on the requirements on the configuration of the panel meshes. Calculations are carried out for the comparison of the influences on the accuracy of the results of different mesh parameters. Furthermore some software programs actually used for manual mesh generation are analysed in detail for their advantages and disadvantages.

The presented mesh generation method is based on a three dimensional ship hull description in the widely used IGES format. A part of this thesis deals with the preparation of such hull definition data. Because IGES ship hull descriptions normally consist of a high number of single surfaces without any topology information, the topology has to be recovered automatically. Methods for automatic repair of incorrect surface descriptions are discussed. The topology information is important for an automatic detection of knuckles in the ship hull which have to be considered for high quality panel meshes. Different methods for an automatic identification of knuckle lines are presented.

The main task of an automatic mesh generation method is the analysis of special features of the ship hull. Different details like the shape of the bow or the stern have to be considered carefully for panel meshes of high quality. Several methods for the identification of characteristic regions of the ship hull are presented together with a data model for the storage of this information.

For the creation of panel meshes two different methods are described in detail. One of these methods uses as much information as possible about special regions of the ship hull. For each characteristic region a special mesh generation method creates structured quadrilateral panel meshes. An alternative method creates an unstructured quadrilateral mesh. This method needs much less shape information and is able to mesh nearly arbitrarily shaped regions of the ship hull.

The presented solutions have been implemented and tested with different ship hulls. Examples of automatic created panel meshes are demonstrated and their usability is proved by comparison of wave resistance calculation.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 CFD-Methoden und Panelnetze	3
2.1 Entwicklung und Grundlagen der Panelverfahren	3
2.2 Diskretisierung der Schiffsform	7
2.2.1 Klassifizierung von Rechennetzen	7
2.2.2 Geometrischer Aufbau der Panelnetze	9
2.2.3 Einfluss der Diskretisierung auf das Rechenergebnis	11
2.2.4 Auswirkungen von Panelnetzparametern auf die Ergebnisgenauigkeit	12
3 Stand der Technik von Panelnetzgenerierungsmethoden	19
3.1 Literatur	19
3.1.1 Überblick über Netzgenerierungsmethoden	20
3.2 Software	23
3.2.1 Hypermesh	23
3.2.2 Gid	25
3.2.3 Napa	25
3.2.4 Kelvin	27
3.2.5 Shipflow	28
4 Erzeugung und Austausch von Schiffsformbeschreibungen	30
4.1 Grundlagen parametrischer Flächen	30
4.2 Erstellung von Schiffsformbeschreibungen	33
4.3 Datenaustauschformate für Schiffsformdefinitionen	34
4.4 Der IGES-Standard	36
5 Verarbeitung einer IGES-Schiffsformbeschreibung	40
5.1 Implementierung	40
5.2 Topologieanalyse	41
5.3 Automatische Reparatur fehlerhafter Flächen	43
5.4 Geometrische Berechnungen	46
5.5 Triangulierung	48
6 Automatische Knickerkennung	52
7 Identifikation charakteristischer Schiffsformbereiche	57
7.1 Ausgangsmodell und Wasseroberfläche	59
7.2 Erstellung von Teilregionen	61
7.2.1 Hauptspant	62

7.2.2	Spiegelheck	62
7.2.3	Bugwulst	63
7.2.4	Sonardom	67
7.2.5	Heckwulst	69
7.2.6	Stevenrohrrendfläche	70
7.2.7	Skeg	71
7.2.8	Zusammenfassung	74
7.3	Automatische Integration von Knicken	76
8	Netzerstellung	79
8.1	Verteilung der Panelgröße	79
8.1.1	Schiffslänge	80
8.1.2	Oberflächenkrümmung	81
8.1.3	Länge von Regionenrändern	83
8.1.4	Gesamtverteilung	83
8.2	Strukturierte Vernetzung	84
8.2.1	Unterteilung von Randkurven	85
8.2.2	Flächeninterpolation	86
8.2.3	Netzgenerierung	89
8.2.4	Ergebnisse	92
8.3	Unstrukturierte Vernetzung	95
8.3.1	Randunterteilung	96
8.3.2	Auswahl der Randkanten	98
8.3.3	Berechnung neuer Punkte und Kanten	98
8.3.4	Lokale Elementoptimierung	102
8.3.5	Ergebnisse	102
8.4	Panelnetze und Rechenergebnisse ausgewählter Beispielschiffe	103
9	Zusammenfassung und Ausblick	115
Literatur		119

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Ablauf einer Berechnung des Wellenwiderstandes	2
2.1	Einordnung der Rechennetze	7
2.2	Beispiele strukturierter und unstrukturierter Rechengitter	8
2.3	Elementgrößenverhältnisse nach [9]	10
2.4	Containerschiff <i>Ville de Mercure</i>	13
2.5	Vergleich von c_t aus Modellversuchsergebnissen und Rechnungen mit unterschiedlichen Panelzahlen	14
2.6	Einfluss unstrukturierter Dreieckelemente auf das Rechenergebnis	15
2.7	Einfluss unstrukturierter Viereckelemente auf das Rechenergebnis	16
2.8	Wellenhöhen des Ausgangsnetzes und der Variante mit unstrukturierten Viereckelementen	17
2.9	Druckverteilung des Ausgangsnetzes und der Variante mit unstrukturierten Viereckelementen	17
2.10	Einfluss inkonsistenter Teilnetze auf das Rechenergebnis	18
3.1	Schematische Gruppierung wichtiger Vernetzungsmethoden	20
3.2	Quadtree-Vernetzungsalgorithmus	21
3.3	Delaunay-Triangulierung	21
3.4	Beispiel eines Advancing Front-Algorithmus	22
3.5	Beispiel eines mit Hypermesh erstellten Panelnetzes aus Viereckelementen	24
3.6	Beispiel eines mit Hypermesh erstellten Panelnetzes aus Dreieckelementen	25
3.7	Beispiel eines mit Napa erstellten Panelnetzes	27
4.1	Beispiel einer parametrischen Kurvendarstellung	31
4.2	Definitionskurven für die Beschreibung des Rumpfes eines Containerschiffes in Napa	34
4.3	Parametric Spline Surface	37
4.4	Getrimmte parametrische Flächen	38
5.1	Schematische Darstellung eines B-Rep-Modells	41
5.2	Beispiel der Speicherung eines B-Rep-Modells	41
5.3	Typische Erscheinungsformen von Toleranzfehlern in IGES-Schiffsformbeschreibungen	44
5.4	Detailvergrößerung des Schiffsrumpfes des KVLCC2-Tankers	45
5.5	Flächenreparatur durch Neainterpolation	46
5.6	Vergleich der Approximationsgenauigkeiten einfacher Dreiecks- und Panelnetze	47
5.7	Datenmodell zur Speicherung und Manipulation eines Dreiecksnetzes	48
5.8	Dreiecksnetz zur Approximation der Schiffsform	51

6.1	Knickidentifikation durch Vergleich von Flächennormalen	53
6.2	Knickidentifikation durch Vergleich der Tangenten von Schnittkurven	54
6.3	Verschiedene typische Knicke im Hinterschiffsbereich	55
6.4	Für Netzgenerierung nicht relevanter Knick parallel zum Steven	56
7.1	Beispiel der Aufteilung einer Schiffsform in Teilbereiche für die Panelnetzerzeugung	57
7.2	Auszug des Datenmodells zur Speicherung der Regionen	59
7.3	Geometrische Beschreibung einer RegionEdge: Kurven oder Polygone	59
7.4	Ausgangsregionenmodell: Stevenkontur und Wasserlinie	61
7.5	Ausgangsregionenmodell mit Hauptspant und Spiegelheck	62
7.6	Charakteristische Punkte zur Identifikation eines Bugwulstes	63
7.7	Bugwulstabmessungen	64
7.8	Beispiele verschiedener Bugwulstformen	65
7.9	Regionenmodelle für verschiedene Bugwülste	65
7.10	Verlängerung von Knicklinien	66
7.11	Spantschnitt durch einen Normalbugwulst und einen Sonardom	67
7.12	Schnittkurven zur Bestimmung der größten Breite eines Sonardoms	68
7.13	Spantschnitte eines Sonardoms zur Ermittlung des hinteren Endes	68
7.14	Obere Begrenzungen der Region des Sonardoms	69
7.15	Regionenmodell eines Sonardoms	69
7.16	Regionenmodell eines Einschrauber-Heckwulstes	70
7.17	Regionenmodell für Propellerwelle	71
7.18	Spantschnitt zur Identifizierung eines Center-Skegs	71
7.19	Schematische Kontur eines Skegs, Seitenansicht	72
7.20	Regionenmodell eines Skegs mit Knicken	73
7.21	Regionenmodell eines Skegs ohne Knicke	74
7.22	Neue Bugform eines bulk carriers	75
7.23	Automatisch in das Regionenmodell eingefügte Knicke	78
8.1	Verteilung der Panelgröße über die Schiffslänge	80
8.2	Verteilung des Panelgrößenfaktors der Krümmung	82
8.3	Logistische Funktion (Sigmoidfunktion)	82
8.4	Verteilung der Panelgröße in Abhängigkeit der Oberflächenkrümmung	83
8.5	Reduktion der Panelgröße an ausgewählten Stellen	83
8.6	Gesamte Panelgrößenverteilung	84
8.7	Unterteilung der gemeinsamen Ränder verschiedener Blöcke	86
8.8	Parameterwerte und zugehörige Punkte auf einer parametrischen Kurve	87
8.9	Überlappung bei Punktprojektion	89
8.10	Strukturiertes Ausgangsnetz	90
8.11	Anpassung an Regioneneckpunkte	90
8.12	Einstellung unterschiedlicher Randunterteilungen und Vereinigung von Panelpunkten auf Regionenrändern gleicher Unterteilung	91
8.13	Panelnetz eines Tankerbugwulstes	92
8.14	Panelnetz eines normalen Bugwulstes, mit Knick	92
8.15	Panelnetz eines Sonardoms	93
8.16	Panelnetz bei Propellerwelle	93
8.17	Panelnetz eines Skegs ohne Knick	94

8.18	Panelnetz eines Skegs mit Knick und ebenem Boden	94
8.19	Ablaufschema eines Advancing Front-Vernetzungsalgorithmus	96
8.20	Edge flipping-Schema	97
8.21	Status einer Front-Edge	98
8.22	Berechnung einer neuen Seiten-Edge	99
8.23	Edge recovering	100
8.24	Ear cutting	100
8.25	Spezielle Bearbeitungen von Front-Edges	101
8.26	Varianten zum Schließen des Panelnetzes	101
8.27	Unstrukturiertes Panelnetz und zugehöriges Regionenmodell	103
8.28	DTMB 5415: strukturiertes, nicht konsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse . .	105
8.29	DTMB 5415: strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse	106
8.30	DTMB 5415: unstrukturiertes Panelnetz (fein) und Rechenergebnisse	107
8.31	DTMB 5415: unstrukturiertes Panelnetz (grob) und Rechenergebnisse	108
8.32	Gegenüberstellung der mit unterschiedlichen Panelnetzen ermittelten Gesamt widerstandsbeiwerte c_t des Zerstörers DTMB 5415	109
8.33	<i>Ville de Mercure</i> : strukturiertes, inkonsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse .	110
8.34	<i>Ville de Mercure</i> : strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse	111
8.35	Zweischraubenfährschiff mit Center-Skeg: strukturiertes, nicht konsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse	112
8.36	Zweischraubenfährschiff mit Center-Skeg: strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse	113
8.37	Anpassung eines strukturierten und unstrukturierten Panelnetzes an unterschiedliche Wasseroberflächen	114
(a)	strukturiertes Panelnetz, $v = 3 \text{ kn}$	114
(b)	strukturiertes Panelnetz, $v = 9 \text{ kn}$	114
(c)	strukturiertes Panelnetz, fiktive Sinuswellenform	114
(d)	unstrukturiertes Panelnetz, $v = 3 \text{ kn}$	114
(e)	unstrukturiertes Panelnetz, $v = 9 \text{ kn}$	114
(f)	unstrukturiertes Panelnetz, fiktive Sinuswellenform	114
9.1	Labormuster zur Untersuchung der automatischen Vernetzungsmethoden	116

Symbole und Abkürzungen

c_p	Druckbeiwert
c_t	Gesamtwiderstandsbeiwert
c_w	Wellenwiderstandsbeiwert
g	Erdbeschleunigung
p	Druck bzw. Grad einer Kurve oder Fläche
p_0	Luftdruck
\mathbf{p}	Punkt bzw. Ortsvektor eines Punktes
R_t	Schleppwiderstandskraft
R_w	Wellenwiderstandskraft
$s, t; u, v$	Parameter einer Kurve oder Fläche
v	Schiffsgeschwindigkeit
x, y, z	Koordinatenrichtungen
B	Schiffsbreite
C^n	Differentiationsordnung einer Kurve oder Fläche
\mathbf{F}	Kraft
Fn	Froudezahl
L	Länge
L_{oa}	(Schiffs)Länge über alles
L_{pp}	(Schiffs)Länge zwischen den Loten
S	Körperoberfläche
T	Tiefgang
\mathbf{U}_∞	ungestörte Anströmgeschwindigkeit
Φ	Geschwindigkeitspotential, Gesamtpotential
ϕ	Geschwindigkeitspotential, Einzelpotential
φ	Geschwindigkeitspotential einer Singularität
λ	Maßstabsfaktor
ρ	Dichte
σ	Stärke einer Potentialquelle
ζ	z-Koordinate der Wasseroberfläche
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Development

CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
DXF	Drawing Interchange Format
HSVA	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt
IDF	IMSA Definition File
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IMSA	International Maritime Software Accociates
IT	Information Technology
FE	Finite Elemente
NURBS	Non Uniform Rational B-Spline
SVA	Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam
RANS(E)	Reynolds Averaged Navier-Stokes (Equations)
SAT (ACIS SAT)	Standard ACIS Text
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
UML	Unified Modeling Language
VDAFS	Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle
XML	Extended Markup Language

Einige Symbole werden in verschiedenen Abschnitten mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Hier nicht aufgeführte Bezeichnungen werden nur lokal verwendet und an der Stelle ihres Auftretens erklärt.

1 Einleitung

Schon in der frühen Entwurfsphase eines neuen Schiffes besteht der Bedarf an einer genauen Vorhersage der benötigten Antriebsleistung. Für eine erste Abschätzung stehen verschiedene Näherungsverfahren für die Ermittlung des Schiffswiderstandes oder der Antriebsleistung zur Verfügung. Diese Verfahren sind sehr einfach anzuwenden, liefern aber keine verlässlichen Aussagen. Die einzige heute verfügbare Methode zur genauen Vorhersage des Schiffswiderstandes ist der Modellversuch. Mit Hilfe von Schlepp- und Propulsionsversuchen mit einem Modell des zu bauenden Schiffes können ausreichend genaue Aussagen über den zu erwartenden Widerstand und die erforderliche Antriebsleistung getroffen werden. Modellversuche sind jedoch sehr zeitaufwendig und kostenintensiv, was einen systematischen Einsatz zur Verbesserung der hydrodynamischen Eigenschaften eines Schiffes in der Entwurfsphase verhindert.

Die bestehende Lücke wird durch numerische Verfahren zur Berechnung der Strömungsverhältnisse um den Schiffsrumpf geschlossen. Ein wichtiges Werkzeug ist hierbei die Berechnung des Wellenwiderstandes nach der Potentialtheorie. Derartige Verfahren werden als Panel¹-Verfahren bezeichnet, da sie auf einer Approximation der Schiffsform durch kleine drei- oder viereckige Teilflächen (Panels) beruhen. Mit Hilfe einer solchen numerischen Beschreibung des Schiffsrumpfes kann unter Vernachlässigung von Reibungseinflüssen die Druckverteilung auf dem umströmten Unterwasserschiff berechnet werden. Aus dieser Druckverteilung wird der Widerstand des Schiffes in einem reibungsfreien Fluid berechnet, dieser Widerstand wird als Wellenwiderstand bezeichnet. Die Genauigkeit von potentialtheoretischen Berechnungsmethoden ist nicht ausreichend, um den Modellversuch zu ersetzen. Dennoch bieten sie eine kostengünstige Möglichkeit, die hydrodynamischen Eigenschaften eines Schiffes zu optimieren. Durch Variation globaler Formparameter und lokaler Formdetails können verschiedene Varianten hinsichtlich ihres Wellenwiderstandes verglichen und ggf. in Optimierungsverfahren optimiert werden.

In den letzten Jahren haben diese Berechnungsmethoden stark an Bedeutung gewonnen. Dies liegt einerseits an den kontinuierlich steigenden Schiffsgeschwindigkeiten (der Anteil des Wellenwiderstandes am Gesamtwiderstand nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu), andererseits an den immer größeren Rechenkapazitäten, die zur Verfügung stehen. Die reine Rechenzeit ist auf heutigen PCs auf wenige Minuten gesunken, so dass die potentialtheoretische Wellenwiderstandsberechnung als „Handwerkszeug“ des Entwurfsingenieurs bezeichnet werden kann. In Abbildung 1.1 ist der Ablauf eines Panelverfahrens zur Berechnung des Schiffswellenwiderstandes dargestellt.

Das Problem bei diesen Rechnungen besteht in der Aufbereitung der Schiffsformbeschreibung, dieser Schritt wird im allgemeinen als Preprocessing bezeichnet. Potentialverfahren stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Panelapproximation, weshalb die Erstellung solcher Elemente auf dem komplex geformten Schiffsrumpf viel Erfahrung des Anwenders und vor allem Zeit benötigt. Schätzungen gehen davon aus, dass das Preprocessing einen Anteil von 30 % bis 90 % an der insgesamt für eine CFD-basierte Widerstandsanalyse benötigten Zeit ausmacht. Die

¹Die deutsche Bezeichnung *Paneel* wird selten gebraucht, deshalb wird im Folgenden die international gebräuchliche englische Bezeichnung *Panel* verwendet.

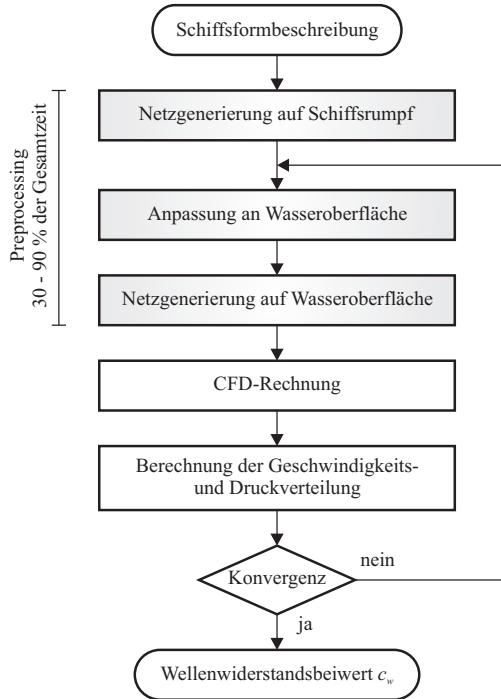


Abbildung 1.1: Schematischer Ablauf einer Berechnung des Wellenwiderstandes

Netzgenerierung auf der Wasseroberfläche und auch die Anpassung eines Ausgangsnetzes auf dem Schiffsrumpf an die sich über die Iterationen der Rechnung ändernde Form der Wasseroberfläche erfolgt automatisch, so dass der größte Aufwand des Preprocessing auf die Erzeugung des Panelnetzes auf dem Schiffsrumpf entfällt. Bisher gibt es keine Verfahren zur Automatisierung dieses wichtigen Arbeitsschrittes: „Completely automatic procedures for complex geometries such as ships are not available and do not seem realistic in the future.“ [7, S. 21].

Eine Automatisierung der Panelnetzgenerierung bietet ein großes Potential zur Einsparung von Bearbeitungszeit bei einer Schiffsformoptimierung. In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur vollautomatischen Erzeugung von Panelnetzen zum Zwecke potentialtheoretischer Wellenwiderstandsberechnungen beschrieben.

Im zweiten Kapitel werden die CFD-Methoden und die zu deren Anwendung nötigen Panelnetze untersucht. Insbesondere werden die Ursachen für die speziellen Anforderungen an die Qualität der Panelnetze ermittelt. In Kapitel 3 wird ein Überblick über die heute verfügbaren Methoden zur Erstellung der Rechennetze gegeben. Es wird gezeigt, dass die wichtigste Aufgabe bei der Automatisierung der Netzgenerierung weniger in den Vernetzungsmethoden als vielmehr in der Auf- und Vorbereitung der Schiffsgeometrie liegt. Entsprechend umfangreich wird dieser Aspekt beschrieben, Kapitel 4 bis 7 befassen sich mit diesem Thema. Es werden Probleme wie die Beschreibung eines Schiffsrumpfes, die Identifikation spezieller Merkmale einer Schiffsform und die Vernetzungsvorbereitung diskutiert. Anschließend werden in Kapitel 8 zwei grundsätzlich verschiedene Methoden zur Generierung der Paneelemente präsentiert. Wichtige Zwischenergebnisse werden in den jeweiligen Abschnitten der Arbeit vorgestellt. Im Kapitel 8.4 werden zusammenfassend Beispiele verschiedener Panelnetze mit Informationen zu ihrer Erstellung und Ergebnissen von Rechnungen mit diesen Netzen dargestellt.

2 CFD-Methoden und Panelnetze

Neben einem kurzen Überblick über die Entwicklung der Methoden zur Berechnung des Wellenwiderstandes und ihre mathematischen Grundlagen werden die für die Berechnung nötigen Panelnetze betrachtet. Es werden die geometrischen Anforderungen an die Panelnetze und deren Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse untersucht.

2.1 Entwicklung und Grundlagen der Panelverfahren

Alle potentialtheoretischen Verfahren zur Berechnung des Wellenwiderstandes gehören zur Gruppe der Randelementverfahren. Bei diesen Methoden werden die Integrale zur Beschreibung des Problems statt über das ganze Fluidgebiet nur über die Ränder des Berechnungsgebietes erstellt. Dies vereinfacht die Erzeugung der Rechengitter, da nicht Volumen, sondern „nur“ Oberflächen vernetzt werden müssen. Die Rechenzeiten und der Speicherbedarf sind durch die geringere Anzahl an Elementen kleiner.

Einen Überblick über die Entwicklung derartiger Methoden geben Bertram [7], Raven [93] oder Janson [53]. Hier sollen lediglich einige bedeutende Entwicklungsschritte dargestellt werden.

Einer der ersten wichtigen Schritte war die Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der Potentialströmung um beliebige dreidimensionale Körper von Hess und Smith [44]. Dieses Verfahren, 1964 ursprünglich für die Flugzeugindustrie entwickelt, wurde auch zur Berechnung der Umströmung von Schiffen eingesetzt und war Ausgangsbasis für die Entwicklung weiterer, speziell an den Schiffbau angepasster Methoden.

Mit einem solchen Panelverfahren kann die stationäre, rotationsfreie, inkompressible und reibungsfreie Umströmung eines ruhenden Körpers in einer parallelen Anströmung \mathbf{U}_∞ berechnet werden.

$$\mathbf{U}_\infty = \begin{Bmatrix} U_{\infty_x} \\ U_{\infty_y} \\ U_{\infty_z} \end{Bmatrix}$$

Die Fluidgeschwindigkeiten werden als die Ableitungen eines Geschwindigkeitspotentials Φ berechnet.

$$\mathbf{U} = \nabla \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \mathbf{e}_z$$

Das Geschwindigkeitspotential Φ muss drei Randbedingungen erfüllen: die Laplace-Gleichung, die aus der Kontinuitätsbedingung stammende Grundgleichung jeder Potentialströmung,

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

die Bedingung, dass die Fluidgeschwindigkeiten normal zur Körperoberfläche verschwinden

$$\mathbf{n} \nabla \Phi = 0 \quad (2.2)$$

und die Abklingbedingung, die aussagt, dass in großer Entfernung zum umströmten Körper die Störungen der Parallelströmung \mathbf{U}_∞ verschwinden müssen.

$$\lim_{x^2+y^2+z^2 \rightarrow \infty} \nabla \Phi = \mathbf{U}_\infty \quad (2.3)$$

Aufgrund der Linearität der Laplace-Gleichung kann das Gesamtpotential Φ der Strömung in das Potential der ungestörten Anströmung ϕ_∞ und das Potential der Körperumströmung ϕ aufgeteilt werden.

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_\infty + \phi \\ \phi_\infty &= -(x U_{\infty_x} + y U_{\infty_y} + z U_{\infty_z}) \end{aligned}$$

Auch ϕ muss die drei Randbedingungen (2.1), (2.2) und (2.3) erfüllen.

Zur Beschreibung der Körperumströmung wird das Potential ϕ durch eine Überlagerung der bekannten Geschwindigkeitspotentiale mehrerer Singularitäten ausgedrückt. Eine einfache Singularität ist z. B. die Punktquelle an der Position \mathbf{q} mit dem Geschwindigkeitspotential

$$\varphi(\mathbf{p}) = -\sigma_q \frac{1}{4\pi r_{p,q}}$$

σ_q ist die Quellstärke und $r_{p,q}$ der Abstand zwischen der Position der Quelle und dem Punkt \mathbf{p} .

Ein Beispiel ist die Umströmung eines einfachen Rotationskörpers, dessen Gesamtpotential Φ durch die Überlagerung des Potentials der ungestörten Anströmung ϕ_∞ mit dem Potential einer einzigen Quellsingularität $\varphi(\mathbf{p})$ beschrieben werden kann. Die Stärke σ der Quelle kann so bestimmt werden, dass die Randbedingungen eingehalten werden. Mit σ ist auch das Potential $\varphi(\mathbf{p})$ bekannt und aus Φ können an jeder Stelle der Strömung die Fluidgeschwindigkeiten bestimmt werden.

Bei Erweiterung dieses Beispiels auf beliebige Körper ergibt sich das Potential der Körperumströmung bei einer Verteilung der Quellstärke über die gesamte Körperoberfläche S als

$$\phi(\mathbf{p}) = \int_S \varphi(\mathbf{p}) dS \quad (2.4)$$

Zur numerischen Berechnung dieses Integrals wird die Körperoberfläche in eine Anzahl kleiner ebener Teilflächen diskretisiert, die als Panels bezeichnet werden. Diese Panels approximieren die Oberfläche des zu berechnenden Körpers. Die kontinuierlich über die Oberfläche verteilte Quellstärke σ wird diskretisiert, indem sie als konstant über der Fläche eines Panels angenommen wird. Das Geschwindigkeitspotential eines solchen z. B. viereckigen Quellpanels kann beschrieben werden durch

$$\varphi(\mathbf{p}) = \frac{-\sigma_q}{4\pi} \int_0^h \int_0^l \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta$$

wobei h und l die Abmessungen des Panels in den beiden lokalen Koordinatenrichtungen ξ und η des Panels sind. Die Randbedingungen werden nur an einem speziellen Punkt auf dem Panel erfüllt, dem Kollokationspunkt, der z.B. in der Mitte des Panels liegen kann. Statt nur einer unbekannten Quellstärke wie im obigen einfachen Beispiel sind nun so viele Quellstärken zu bestimmen, wie Panels verwendet wurden, um die Körperoberfläche zu approximieren. Die Integration aus (2.4) wird durch eine einfache Summation über alle Panels ersetzt. Es entsteht ein lineares Gleichungssystem zur Bestimmung der unbekannten Quellstärken.

Nach Lösung dieses Gleichungssystems kann die Geschwindigkeitsverteilung und mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung auch die Druckverteilung im Strömungsgebiet berechnet werden:

$$\frac{1}{2}\rho(\nabla\Phi)^2 + \rho g z + p = \text{konst.}$$

Die auf den umströmten Körper wirkende Druckkraft ergibt sich aus

$$\mathbf{F} = \int_S p \mathbf{n} dS$$

Eine Verbesserung des Verfahrens von Hess und Smith wurde 1977 von Dawson [21] entwickelt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Wellenbildung bei der Berechnung der Umströmung von Schiffen vernachlässigt. Es wurde eine ungestörte Wasseroberfläche angenommen und das Schiff an dieser Wasseroberfläche gespiegelt (Doppelkörper). Die Ungenauigkeiten durch diese Doppelkörper-Methode können bei kleinen Wellenhöhen vernachlässigt werden, bei schnelleren Schiffen sind die Fehler jedoch zu groß. Dawson führte eine Methode ein, bei der auch ein Teil der freien Wasseroberfläche durch Panels diskretisiert wird. Auch die heute verwendeten Methoden funktionieren nach diesem Prinzip. Für die freie Wasseroberfläche sind drei zusätzliche Randbedingungen nötig:

- der Druck unmittelbar an der Oberfläche muss dem Luftdruck entsprechen:

$$\frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + g z = \frac{1}{2} \mathbf{U}_\infty^2 \quad \text{bei } z = \zeta \quad (2.5)$$

ζ ist die z -Koordinate der Wasseroberfläche. Diese Randbedingung wird auch als dynamische Randbedingung bezeichnet.

- die Wasserteilchen in der Oberfläche müssen sich genau so bewegen, wie die Oberfläche selbst bzw. die Wasseroberfläche darf nicht durchströmt werden (kinematische Randbedingung):

$$\nabla\Phi \nabla \zeta = \Phi_z \quad (2.6)$$

- Wellen dürfen in großer Entfernung zum Schiff nur hinter dem Schiff auftreten (Strahlungs- oder Radiationsbedingung).

Die Randbedingungen an der Wasseroberfläche werden mit Hilfe einer Taylorreihenentwicklung linearisiert. Die Lösung des Strömungsproblems geschieht iterativ. Zuerst wird eine Rechnung mit einer als ungestört angenommenen Wasseroberfläche ausgeführt, mit den daraus resultierenden Drücken wird die Form der Wasseroberfläche angepasst. In den weiteren Iterationen werden die Randbedingungen an einer verformten Wasseroberfläche des vorherigen Iterationsschrittes

erfüllt, deren Form nach jeder Iteration angepasst wird. Die Iteration wird abgebrochen, wenn das Ergebnis (Wellenwiderstandsbeiwert, Schwimmlage) konvergiert. Der Wellenwiderstand des Schifffes wird als Summe der dynamischen Druckkräfte aller Panels nach Abzug des hydrostatischen Druckanteils berechnet.

Schon 1975 wendete Webster [120] ein Verfahren an, das als Desingularisierung bezeichnet wird und auch heute in den meisten Panelverfahren verwendet wird. Bei der Desingularisierung werden die Singularitäten um einen kleinen Betrag von den Kollokationspunkten weg geschoben, am Schiff ins Innere des Schiffes, an der Wasseroberfläche nach unten. Die Größe dieser Verschiebung muss sorgfältig gewählt werden und hängt von der Panelgröße ab. Durch die Desingularisierung kann die Genauigkeit der Ergebnisse verbessert und die Rechenzeit verringert werden. Bei Verschiebung von Kollokationspunkten im Verlauf der Rechnung (z. B. bei Änderung der Wasseroberfläche) müssen die Singularitäten nicht zwingend mit verschoben werden. Dadurch muss der Einfluss dieser nicht verschobenen Singularitäten auf alle anderen Kollokationspunkte nicht neu berechnet werden.

Darüber hinaus wird durch die Desingularisierung die Geschwindigkeitsverteilung geglättet. Durch die Diskretisierung der Potentialverteilung sind auch die berechneten Geschwindigkeiten nicht mehr gleichmäßig verteilt. Wenn die Singularitäten weiter von den Kollokationspunkten entfernt sind, vergrößert sich der Einflussbereich der einzelnen Singularität auf die Kollokationspunkte, wodurch die Glättung der berechneten Geschwindigkeitsverläufe verursacht wird.

Ein weiterer Versuch zur Verbesserung der Wellenwiderstandsberechnungen wurde 1993 von Söding [110] beschrieben. Er entwickelte eine Methode, die in Abgrenzung zu den Panel-Verfahren Patch-Methode genannt wird. Mit dieser Methode kann der Fehler in der Berechnung des Wellenwiderstands um eine Größenordnung verringert werden, es ist aber erheblich mehr Aufwand zur Berechnung höherer Ableitungen des Geschwindigkeitspotentials nötig. Im Unterschied zu den Panel-Methoden wird die Bedingung, dass die Schiffsoberfläche nicht durchströmt werden darf, nicht nur in einem Kollokationspunkt auf dem Panel erfüllt, sondern auf der gesamten Panelfläche. Die Geschwindigkeitspotentiale werden an den Patch-Ecken berechnet, was eine quadratische Approximation der Geschwindigkeiten und Drücke über ein Patch ermöglicht. Die Patch-Methode verwendet die gleichen Rechennetze wie die Panel-Verfahren.

1995 wurde von Hughes und Bertram [48] eine Methode mit Panels höherer Ordnung entwickelt, um die Rechengenauigkeit weiter zu verbessern. Auch die Panels dieser Methode verwenden die gleichen Rechengitter wie Methoden mit Panels erster Ordnung. Der Unterschied besteht darin, dass die Form eines Panels nicht durch die dem Panel zugeordneten Punkte, sondern durch Interpolation über die benachbarten Punkte bestimmt wird. Hughes und Bertram verwenden Panelflächen zweiten Grades, wodurch die Genauigkeit der Approximation des Schiffsrumphes verbessert wird. Die Quellstärken sind bilinear über die Panelfläche verteilt. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfachen Berechnung höherer Ableitungen des Geschwindigkeitspotentials, allerdings stellt die Methode höhere Anforderungen an die Qualität der Panelnetze. Die Genauigkeit der Ergebnisse bei einfachen, analytisch beschreibbaren Körpern wird deutlich verbessert, bei Schiffen sind die Vorteile geringer.

2.2 Diskretisierung der Schiffsform

Für die numerische Lösung von Feldproblemen muss das physische Rechengebiet in diskreter Form dargestellt werden. Dadurch können kontinuierliche Größen durch diskrete Funktionen beschrieben werden. Für Randelementmethoden wie die Berechnung des Wellenwiderstandes bedeutet dies eine Aufteilung der geometrisch beschreibbaren Körperoberflächen in kleine, diskrete Teileflächen. Die Gesamtheit aller diskreten Teilelemente wird als Netz oder Gitter bezeichnet. Jedes numerisch zu lösende Problem stellt eigene spezielle Anforderungen an die zu verwendende Diskretisierung, so dass in der Vergangenheit eine Vielzahl von unterschiedlichen Gitterformen entwickelt wurde. In diesem Abschnitt werden zunächst die verschiedenen Arten von Rechengittern charakterisiert, bevor anschließend auf die speziellen Anforderungen an Rechennetze für die Wellenwiderstandsberechnung eingegangen wird.

2.2.1 Klassifizierung von Rechennetzen

In der Literatur (z.B. [114], [61] oder [84]) haben sich zwei grundlegende Merkmale zur Unterscheidung der verschiedenen Rechennetze durchgesetzt: die räumliche Anordnung des gesamten Netzes und die Struktur der einzelnen Elemente. In Abbildung 2.1 ist diese Gliederungsstruktur dargestellt.

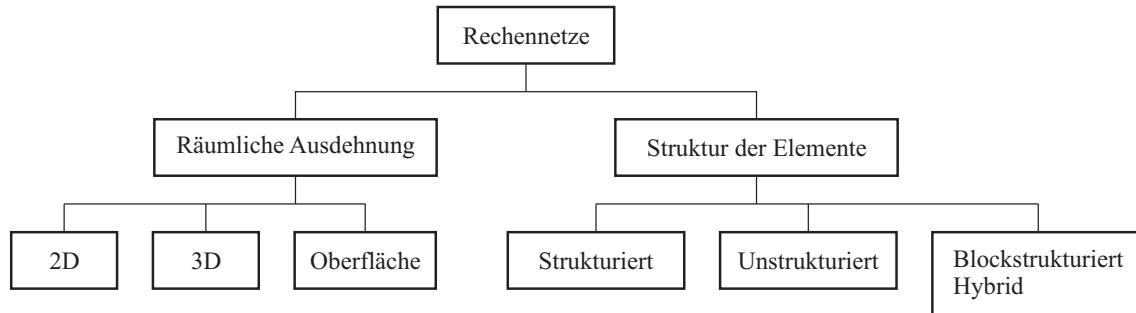


Abbildung 2.1: Einordnung der Rechennetze

Viele Rechenprobleme können mit zweidimensionalen, ebenen Gittern berechnet werden, in denen auch die einzelnen diskreten Teilelemente ebene Flächen sind. Dem gegenüber stehen die dreidimensionalen Netze, durch die Volumen diskretisiert werden. Hier bestehen die einzelnen diskreten Elemente aus einfachen räumlichen geometrischen Körpern wie z.B. Tetraedern oder Hexaedern. Eine dritte Unterteilung und gleichzeitig eine Zwischenform stellen die Oberflächennetze dar. Oberflächennetze können weder ausschließlich den zweidimensionalen noch den dreidimensionalen Rechengittern zugeordnet werden. Sie beschreiben nur die Berandung dreidimensionaler Volumenkörper, besitzen aber dennoch eine räumliche Ausdehnung. In den meisten Fällen sind die einzelnen diskreten Elemente ebene Flächen, es werden aber auch räumliche, gekrümmte Flächenelemente verwendet. Die Rechengitter für die potentialtheoretische Wellenwiderstandsrechnung gehören zu den Oberflächennetzen. Das die Wasseroberfläche darstellende Netz kann aber speziell im ersten Iterationsschritt auch den zweidimensionalen Netzen zugeordnet werden.

Eine weitere Unterscheidung der Rechennetze kann anhand der lokalen Organisation der einzelnen Elemente vorgenommen werden. Hierbei werden zwei Hauptgruppen unterschieden: die

strukturierten und die unstrukturierten Netze. Beide Gruppen können sowohl 2D- und 3D-Gebiete als auch Oberflächen diskretisieren. Abbildung 2.2 zeigt Beispiele dieser Netzgruppen.

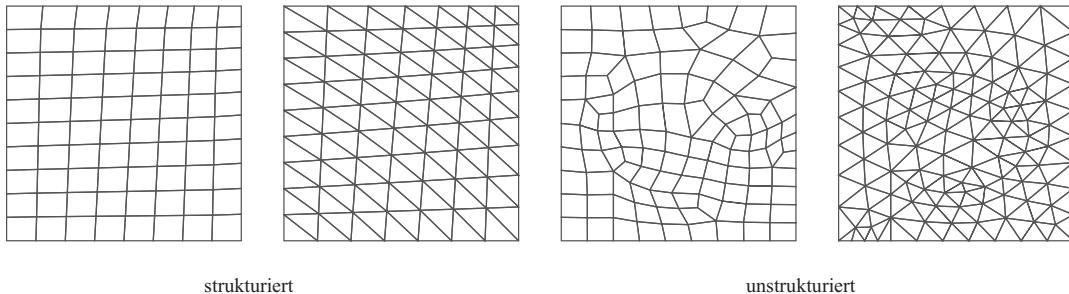


Abbildung 2.2: Beispiele strukturierter und unstrukturierter Rechengitter

Strukturierte Netze sind dadurch gekennzeichnet, dass die lokale Organisation der Gitterpunkte unabhängig von der Position des Punktes ist. Solche Netze werden meist durch einheitliche, für alle Elemente gleichermaßen gültige Regeln erstellt. Strukturierte Netze sind unflexibel und wenig robust bei der Beschreibung komplizierter Formen. Stark gekrümmte Berandungen des Rechengebietes führen oft zu einer schlechten Qualität einzelner Elemente. Erkennbar sind strukturierte Netze daran, dass jeder Gitterpunkt (mit Ausnahme von Randpunkten) zur gleichen Anzahl von Elementen gehört.

Bei unstrukturierten Netzen hingegen variiert der lokale Anschluss der Elemente aneinander von Element zu Element. Die einzelnen Gitterpunkte sind unregelmäßig über das Rechengebiet verteilt. Solche Netze bieten die größte Flexibilität bei der Geometrieapproximation. Sie erlauben eine einfache Anpassung des Netzes an lokale Besonderheiten. Nach Liseikin [61] ist die Rechenzeit zur Erzeugung unstrukturierter Netze deutlich geringer als für strukturierte Rechengitter, was aber durch größere Komplexität der Algorithmen, die solche Netze verwenden, kompensiert würde.

Die Einteilung der Rechennetze nach ihrer Struktur lässt Raum für Sonderfälle. So wird allgemein zwischen zwei weiteren Formen unterschieden: den blockstrukturierten Netzen und den hybriden Netzen. Hybride Rechennetze kombinieren strukturierte Bereiche mit unstrukturierten Bereichen zu einem Gesamtnetz. Blockstrukturierte Netze werden für CFD-Rechnungen häufig verwendet. Ein Beispiel wird in Abbildung 3.7 auf Seite 27 gezeigt. Bei diesen Netzen ist das Gesamtgebiet in Unterregionen aufgeteilt, die einzeln vernetzt werden. Blockstrukturierte Netze erlauben die Erzeugung eines bestmöglichen Gesamtnetzes auch bei komplizierten Formen des zu vernetzenden Rechengebietes und sind somit deutlich flexibler als strukturierte Netze. Neben der Netzstruktur in den einzelnen Blöcken kann der Anschluss der einzelnen Regionen aneinander unterschiedlich gestaltet werden: die benachbarten Elemente unterschiedlicher Regionen können konsistent oder inkonsistent aneinander grenzen. Bei Konsistenz verwenden die benachbarten Elemente identische Punkte. Das Beispielnetz in Abbildung 3.7 ist überwiegend inkonsistent. Das Problem bei blockstrukturierten Netzen ist die fast immer erforderliche Nutzerinteraktion zur Definition der Blockgrenzen.

Die Struktur der für potentialtheoretische Berechnungen verwendeten Panelnetze und die Form der einzelnen Elemente werden im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben.

2.2.2 Geometrischer Aufbau der Panelnetze

Die berechnete Wellenwiderstandskraft ist sehr empfindlich gegenüber numerischen Ungenauigkeiten. Sie ergibt sich aus der Druckintegration über die diskretisierte Unterwasserschiffsform, indem von der Gesamtkraft der Anteil des hydrostatischen Drucks abgezogen wird. Während dieser Integration werden wiederholt Kräfte gleicher Größenordnung voneinander subtrahiert, wodurch sich der relative Fehler der Subtraktion stark vergrößern kann. Dieser relative Fehler liegt in der Größenordnung der Wellenwiderstandskraft [7].

Die resultierende hydrostatische Druckkraft muss Null sein bei einem Schiff in Ruhe. Diese Tatsache kann bei linearen Rechnungen (glatte Wasseroberfläche) genutzt werden, um das Ergebnis zu korrigieren. Bei nichtlinearen Rechnungen müssen dagegen die hydrodynamischen Drücke und die sehr viel größeren hydrostatischen Drücke gemeinsam berechnet werden, was zu den genannten numerischen Problemen führt. Wenn die Integration der Druckverteilung eines nicht angeströmten Schiffsrumpfes eine Kraft $\neq 0$ ergibt, liegt dies nach Bertram, Janson oder Raven an einer unzulänglichen Diskretisierung des Schiffsrumpfes durch das Panelnetz [7, 53, 93].

Fehlerhafte Panelnetze sind oft erst nach der Rechnung an unplausiblen Geschwindigkeiten oder starken Sprüngen in der Geschwindigkeitsverteilung zwischen benachbarten Elementen zu erkennen [8].

Die Qualität des Panelnetzes hat demnach einen Einfluss auf die Genauigkeit der Rechenergebnisse. Diese Tatsache ist unter Anwendern potentialtheoretischer Wellenwiderstandspogramme bekannt, in der Literatur ist jedoch wenig zum Aufbau der Panelnetze zu finden. Die Veröffentlichungen zu den einzelnen Rechenmethoden geben selten Hinweise zu den Rechennetzen, die über die Erwähnung der Art der Elemente (viereckig, dreieckig) hinausgehen. Eine Ausnahme ist [44], dort wird zumindest erwähnt, dass die Genauigkeit der Rechnung von Anzahl und Verteilung der Panels abhängt.

Im Folgenden sollen die in der Literatur beschriebenen Anforderungen an die Rechennetze zusammengefasst werden.

Die erste wichtige Berechnungsmethode für Potentialströmungen von Hess und Smith [44] verwendet ebene Vierecke als Rechenelemente. Dies wird damit begründet, dass sich Viereckelemente leichter aus Schnittkurven durch den zu berechnenden Körper erzeugen lassen. Außerdem gäbe es Schwierigkeiten mit der systematischen Organisation von Dreieckelementen, sowie Probleme mit dem leicht höheren Speicherbedarf bei der Speicherung von Dreiecksnetzen (die Veröffentlichung stammt aus dem Jahr 1964, die Speicherprobleme existieren heute nicht mehr). Dreieckige Elemente würden zudem zusätzliche Probleme bei der Wahl eines geeigneten Kollokationspunktes bereiten. In jedem Fall aber sollen die Elemente im Bereich größerer Krümmungen und stärkerer Änderungen in der Quellstärkenverteilung kleiner sein.

Auch Dawson verwendet viereckige Elemente in seiner Methode [21]. Er schreibt zusätzlich, dass die Rechenergebnisse genauer sind, wenn plötzliche Änderungen der Elementgröße um einen Faktor $> 1,5$ vermieden werden und die Panels am Bug kleiner sind.

Webster [120] entwickelte eine Methode, die dreieckige Panels mit einer linearen Quellstärkenverteilung über das Panel verwendet. Auch die Methoden von Jensen, Söding und Bertram [8, 54, 55] verwenden dreieckige Elemente wie Webster. Die Abbildungen der Panelnetze lassen vermuten, dass diese dreieckigen Elemente erstellt worden sind, indem viereckige Elemente geteilt wurden. Die Methode von Bertram und Jensen [8, 9] gibt die genauesten Hinweise zu den erforderlichen

Panelnetzen:

- Das Seitenverhältnis eines Dreiecks soll nicht größer sein als 4/1, siehe auch Abbildung 2.3 links.
- In Strömungsrichtung liegende Abmessungen benachbarter Dreiecke sollen sich nicht zu stark unterscheiden (Abbildung 2.3 rechts).
- Der Winkel zwischen benachbarten Elementen an einer quer zur Strömungsrichtung liegenden Kante soll $< 135^\circ$ sein. Da das Netz nicht beliebig verfeinert werden kann, sollen bei Bedarf derartige Kanten durch lokale Netzverfeinerung abgerundet werden.

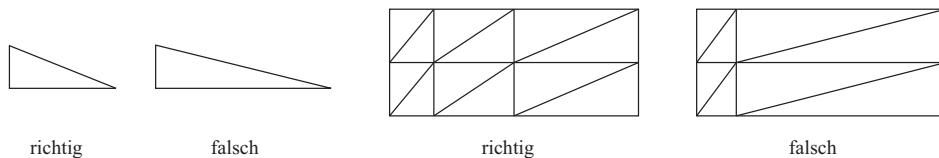


Abbildung 2.3: Elementgrößenverhältnisse nach [9]

Die Methode mit Panels höherer Ordnung von Hughes und Bertram [48] erfordert keine anderen Panelnetze als Methoden mit Panels erster Ordnung, allerdings reagieren derartige Methoden empfindlicher auf die Qualität des Panelnetzes. Es können genauere Geschwindigkeiten berechnet werden, wenn die einander gegenüber liegenden Seiten eines Panels möglichst parallel sind.

Zur Ergänzung dieser in der Literatur gefundenen Angaben zum Aufbau der Panelnetze sollen abschließend die Anforderungen eines kommerziell verfügbaren Panelverfahrens zitiert werden. Das Programm *v-Shallo* [55, 67, 116] stellt folgende Anforderungen an die Diskretisierung des Schiffsrumpfes:

- drei- oder vierseitige Elemente
- gute Auflösung der Geometrie und der Strömungsverhältnisse
- Größenverhältnis benachbarter Panels ≤ 2
- Seitenverhältnis aller Panels ≤ 4 , bei benachbarten Panels ≤ 2
- geringe Torsion viereckiger Elemente, alle Eckpunkte sollen möglichst in einer Ebene liegen
- keine Elemente über Knicklinien
- Vermeidung von Klaffungen und Überlappungen
- Netz kann unstrukturiert sein
- Konsistenz bei Kombination von Teilnetzen ist nicht erforderlich

Alle zuvor beschriebenen geometrischen Parameter lassen sich mit einem Begriff zusammenfassen. Unter Anwendern potentialtheoretischer Wellenwiderstandsberechnungsprogramme ist bekannt, dass die Rechenergebnisse umso genauer sind, je „schöner“ das verwendete Panelnetz aussieht. Damit ist gemeint, dass ein gutes Panelnetz besonders gleichmäßig und regelmäßig aussieht, mit nicht zu großen Elementgrößenänderungen und einheitlicher Ausrichtung der Elemente. In der Praxis werden Panelnetze hauptsächlich durch visuelle Betrachtung beurteilt.

Neben der Art der Elemente (drei- oder viereckig) ist die Struktur der Elemente ein wichtiges Merkmal eines Panelnetzes. Für die Einhaltung der geometrischen Anforderungen an ein Panelnetz,

besonders die je nach Position am Schiffsrumph unter schiedlichen Elementgrößen, ist es oft nötig, das Panelnetz mit einer Blockstruktur zu erstellen. Das bedeutet, dass in unterschiedlichen Bereichen der Schiffsform unabhängige Teilnetze erstellt werden. An der Grenze zwischen zwei benachbarten Teilnetzen können die in den Anforderungen des Programms ν -Shallow erwähnten Klaffungen oder Überlappungen entstehen, wenn die Verbindung beider Teilnetze inkonsistent ist. Solange diese Klaffungen und besonders die Überlappungen klein sind, stellen sie kein Problem für die Rechnung dar, da die Randbedingungen nur in einzelnen Punkten (Kollokationspunkte) auf den Elementen erfüllt werden.

Die heute überwiegend verwendeten Panelnetze bestehen aus viereckigen Elementen, besitzen eine Blockstruktur, die bevorzugt konsistent ist, und die einzelnen Blöcke sind strukturiert diskretisiert. Die Blockstruktur ist in der Art der Erzeugung der Panelnetze begründet, dies wird in Kapitel 3 näher beschrieben. Die Bevorzugung von Viereckelementen und eines strukturierten Aufbaus könnte einerseits historisch begründet sein, ist aber auch durch die verwendeten Netzgenerierungsmethoden zu erklären. Ein weiterer Grund ist die einfachere visuelle Beurteilung der Netzqualität (Gleichmäßigkeit der Elemente) bei strukturierten Viereckelementen. Trotzdem bieten auch unstrukturierte oder dreieckige Elemente Vorteile, insbesondere bei der Erzeugung der Panelnetze und bei der Einhaltung der geometrischen Anforderungen.

2.2.3 Einfluss der Diskretisierung auf das Rechenergebnis

Die Abhängigkeit des Rechenergebnisses von der Panelform erschließt sich nicht ohne Weiteres aus der Art des Rechenverfahrens. In der Literatur sind kaum Untersuchungen des Einflusses der Panelnetze zu finden. Veröffentlichungen zu Panelverfahren konzentrieren sich überwiegend auf die mathematischen Rechenmethoden. Die wenigen gefundenen Hinweise auf mögliche Ursachen für die Auswirkungen des Rechennetzes auf das Ergebnis sollen hier kurz beschrieben werden.

Das Panelnetz diskretisiert das zu berechnende Strömungsproblem. Dazu muss es nicht nur die Form des Schiffes, sondern auch den Zustand der Strömung um den Schiffsrumph möglichst genau approximieren. Das bedeutet, dass sich neben der Flächennormale des Schiffsrumphes auch die Fluidgeschwindigkeiten bzw. der Druck nur wenig über die Fläche eines Panels ändern dürfen. Raven [93] bezeichnet die unvermeidbaren kleinen Fehler in den Panelnormalen und bei der Berechnung der Panelmittelpunkte oder nicht von Panels bedeckte Bereiche des Schiffsrumphes, also die Approximationsgenauigkeit, als verantwortlich für die Ungenauigkeiten bei der Druckintegration. Diese Ungenauigkeiten führen dazu, dass auch bei einem nicht angeströmten Schiff eine Widerstandskraft berechnet wird.

Hess und Smith [44] beschreiben ausführlich verschiedene Methoden zur Berechnung der von einem Panel mit konstanter Quellstärke in einem Punkt induzierten Geschwindigkeiten. Der Abstand des interessierenden Punktes zum Quellpanel sowie die Größe des Panels entscheiden darüber, welche der Methoden verwendet wird. Hierbei bleibt offen, wie die Größe eines Panels bestimmt wird. In vielen Verfahren werden zum Vergleich der Panelgrößen einzelne Kanten oder Diagonalen eines Panels genutzt. In diesen Fällen besteht bei ungünstig geformten Elementen die Möglichkeit, dass die Panelgröße falsch eingeschätzt wird und durch Verwendung einer unpassenden Methode zur Berechnung der induzierten Geschwindigkeit Ungenauigkeiten entstehen.

Hughes und Bertram [48] schreiben, dass aufgrund der Verwendung von Singularitäten numeri-

sche Probleme entstehen, wenn der Kollokationspunkt zu nah an den Kanten eines Panels liegt. Die Bestimmung der Lage des Kollokationspunktes ist in jedem Fall von der Panelform abhängig. Bei ungünstigem Seitenverhältnis eines Panels könnte der Kollokationspunkt zu dicht am Panelrand liegen, was die numerischen Probleme verstärken würde. Die größere Empfindlichkeit der Rechenmethoden mit Panels höherer Ordnung auf die Qualität des Panelnetzes erkläre sich damit, dass die Koeffizienten des zu lösenden Gleichungssystems ausschließlich von der Form der einzelnen Elemente abhängen. Bei Panels höherer Ordnung hängen die Koeffizienten nicht nur von der Form des zugehörigen Panels ab, sondern auch von der Form der benachbarten Elemente. Ein ungünstig geformtes Element würde demzufolge bei Panelmethoden höherer Ordnung einen größeren Teil des Gleichungssystems ungünstig beeinflussen.

Söding [persönl. Kommunikation, 2007] weist darauf hin, dass bei Methoden mit Desingularisierung der Betrag der Verschiebung der Quellpunkte von der Panelgröße abhängig sei. Bei großen Seitenverhältnissen sei unklar, welche Abmessungen des Panels für die Bestimmung des Verschiebungsbetrages verwendet werden. Eine weitere Folge zu großer Seitenverhältnisse sei die Vergrößerung der Rundungsfehler des Computers bei der Berechnung des Geschwindigkeitspotentials und seiner Ableitungen. Dies führe zu schlecht konditionierten Gleichungssystemen, die wiederum Probleme bei der Verwendung von iterativen Lösern verursachen.

2.2.4 Auswirkungen von Panelnetzparametern auf die Ergebnisgenauigkeit

In Abschnitt 2.2.2 wurden die Anforderungen der Rechenverfahren an den geometrischen Aufbau von Panelnetzen dargestellt. Bei Einhaltung dieser Forderungen sollten keine Einschränkungen der Ergebnisqualität zu erwarten sein. Dennoch werden in der Praxis nicht alle der zulässigen Netzparameter genutzt. Obwohl z.B. das Programm *v-Shallo* die Verwendung dreieckiger Elemente und unstrukturierter Netze erlaubt, werden Panelnetze nur selten so erzeugt. Auch die ausdrücklich zulässige Inkonsistenz zwischen Teilnetzen wird oft vermieden. Es ist zu vermuten, dass dies u.a. durch die eingeschränkten Möglichkeiten der im schiffbaulichen Umfeld verwendeten Netzgenerierungsmethoden begründet ist (Details zu den Netzgenerierungsmethoden werden im Abschnitt 3.2 auf Seite 23 betrachtet).

Die selten verwendeten, aber laut Rechenverfahren zulässigen Gestaltungsmerkmale der Panelnetze können die Möglichkeiten einer automatischen Netzerstellung erheblich erweitern. Deshalb sollen im Folgenden die Auswirkungen dieser speziellen Parameter auf die Ergebnisse von Wellenwiderstandsrechnungen untersucht werden.

Als Testschiff wurde das 1986 von der Bremer Vulkan AG gebaute Containerschiff *Ville de Mercure* gewählt. Mit diesem Schiff wurden umfangreiche Probefahrtmessungen durchgeführt und es war Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten. Unter anderem wurden von Kracht [59] Modellversuche durchgeführt. Das Schiff gehört seit 2003 der spanischen Reederei Contenemar SA und fährt unter dem Namen *Teresa Del Mar*. In Abbildung 2.4 ist das Testschiff mit den Einzelflächen der Schiffsformbeschreibung dargestellt. Zu beachten ist das im Schiffbau verwendete Koordinatensystem und die Ausrichtung des Schiffes. Alle Programmsysteme zur Schiffsformmodellierung erzeugen bei symmetrischen Schiffen nur die Backbordseite des Rumpfes, die nach außen gerichteten Flächennormalen zeigen also überwiegend in die positive y-Richtung. Bei Darstellung der Außenseite des Rumpfes muss also die x-Achse und damit der Bug nach links zeigen. Obwohl es im Schiffbau aus historischen Gründen üblich ist, die Schiffe mit nach rechts zeigendem Bug

darzustellen, wird in dieser Arbeit ausschließlich die Außenseite des Schiffsrumpfes dargestellt, der Bug zeigt also in allen weiteren Abbildungen nach links.

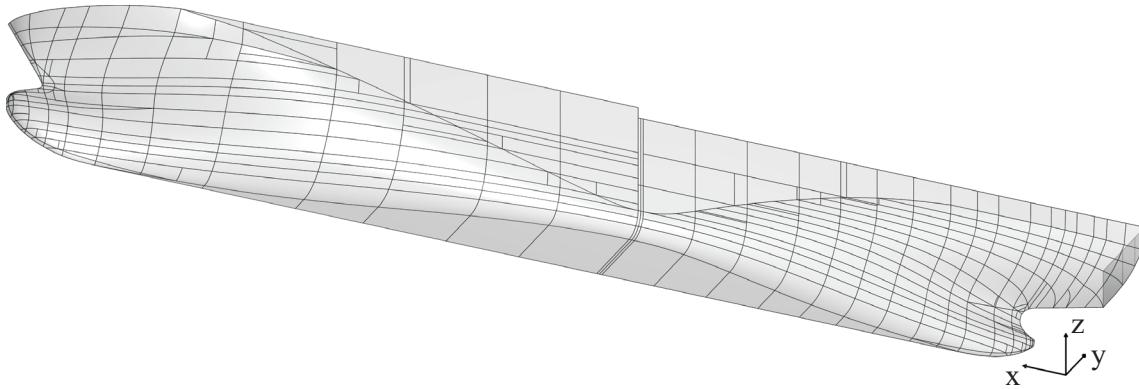


Abbildung 2.4: Containerschiff *Ville de Mercure*,
 1600 TEU , $L_{pp} = 153,7 \text{ m}$, $B = 27,5 \text{ m}$, $T = 10,8 \text{ m}$, $v = 18 \text{ kn}$,
die Schiffsform ist mit 469 Einzelflächen beschrieben

Für die Untersuchung der Abhängigkeit des berechneten Wellenwiderstandes von einzelnen Netzparametern wurde das Programm ν -Shallo in der Version 1.1 verwendet. Das Testschiff ist eines der mit dem Programm mitgelieferten Beispielschiffe. Für die Netzerstellung wurde das Programm *Hypermesh* (siehe Abschnitt 3.2.1) verwendet.

Bei der realen Umströmung eines Schiffes würde der Druckanstieg am Hinterschiff durch den Einfluss der Viskosität des Wassers begrenzt. Dieser Effekt kann durch Potentialverfahren, die mit einem idealen Fluid rechnen, nicht wiedergegeben werden. Bei einem Vergleich der mit einem Potentialverfahren und einem viskosen Rechenverfahren berechneten Druckverteilungen würden die Potentialverfahren im Hinterschiffsbereich immer die höheren Druckbeiwerte c_p berechnen [67].

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho \mathbf{U}_\infty^2}$$

ν -Shallo bietet die Möglichkeit einer künstlichen Begrenzung des maximalen Druckbeiwertes c_p am Hinterschiff, was sich auf den berechneten Wellenwiderstand und den Trimm auswirkt. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen des in [67] als zulässig angegebenen Bereiches genutzt, um die Rechenergebnisse möglichst genau an die Modellversuchsdaten anzupassen.

In Abbildung 2.5 ist der vordere Teil des gewählten Ausgangsnetzes sowie die Gegenüberstellung der dimensionslosen Gesamtwiderstandsbeiwerte

$$c_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2} \rho \mathbf{U}_\infty^2 S}$$

aus dem Modellversuch und den Rechnungen mit verschiedenen Netzfeinheiten dargestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse mit dem von ν -Shallo mitgelieferten Beispielnetz zu sehen.

Die Abweichung der Rechenergebnisse von den Ergebnissen des Modellversuchs bei den gewählten unterschiedlichen Netzfeinheiten ist gering. Der Unterschied zwischen dem groben Netz mit 1532 Panels und den feineren Netzen ist größer als der zwischen den feineren Netzen mit 2272

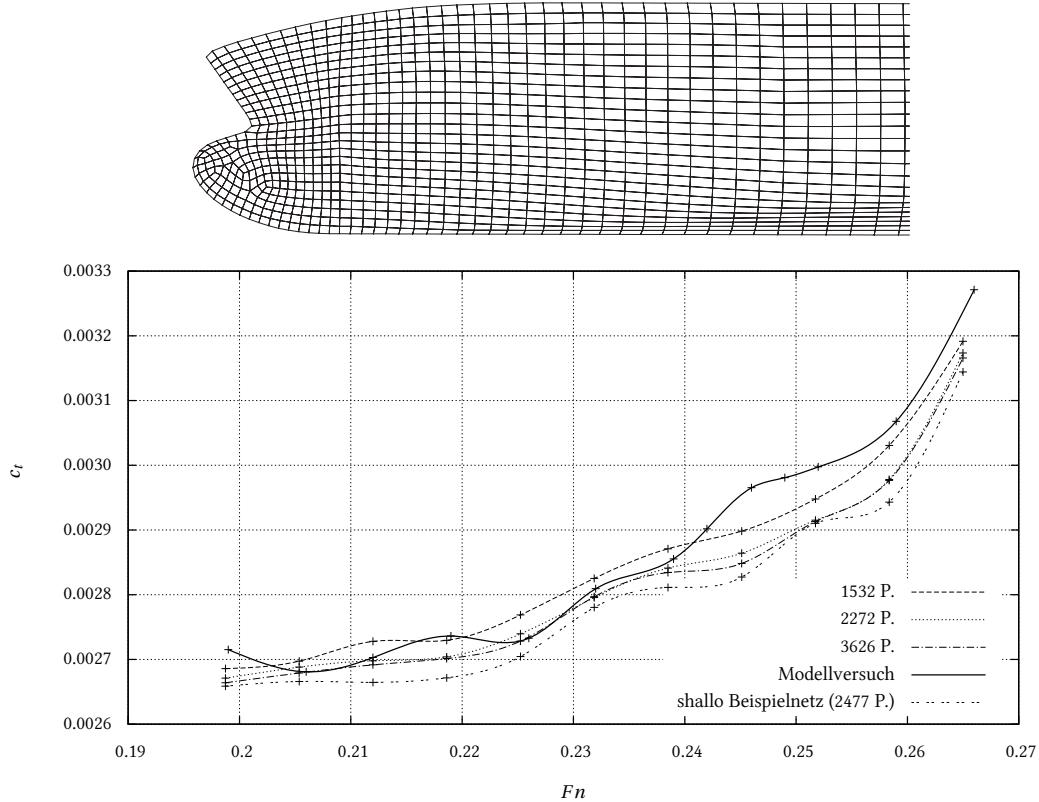


Abbildung 2.5: Vergleich von c_t aus Modellversuchsergebnissen und Rechnungen mit unterschiedlichen Panelzahlen, abgebildetes Beispielnetz: 2272 Panels

und 3626 Panels. Bei einer Verfeinerung des Netzes über eine Panelzahl von 2272 hinaus ändert sich das Ergebnis kaum. Aus diesem Grund wurde das mittelfeine Netz als Ausgangsnetz für die weiteren Untersuchungen gewählt. Die Rechenergebnisse mit diesem Netz weichen nur wenig von den Ergebnissen des Beispielnetzes aus ν -Shallo ab.

Im Folgenden werden im Bereich der vorderen Schulter des Ausgangsnetzes die Elemente verändert, um die Auswirkungen auf das Rechenergebnis zu beurteilen. Der Grund für die Wahl dieses Bereiches liegt in der größeren Empfindlichkeit des Rechenergebnisses (des Wellenwiderstandes) gegenüber Änderungen im vorderen Teil des Schiffes. Die Ursache hierfür ist in der Ablösung der Strömung am Hinterschiff und der dadurch gegebenen Einschränkung der Anwendbarkeit der Potentialtheorie begründet. Die Rechenergebnisse des geänderten Netzes werden den mit dem Ausgangsnetz aus Abbildung 2.5 ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Da zwei Rechnungen miteinander verglichen werden, können statt des Gesamtwiderstandsbeiwertes c_t direkt die Wellenwiderstandsbeiwerte

$$c_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho \mathbf{U}_\infty^2 S}$$

für den Vergleich genutzt werden.

Zuerst werden die Auswirkungen unstrukturierter Dreiecksnetze untersucht. Dazu wird ein Teilbereich des Ausgangspanelnetzes durch unstrukturierte Dreiecke ersetzt. Das neue Teilnetz

grenzt konsistent an das bestehende Netz an und enthält ungefähr doppelt so viele Dreieckelemente wie viereckige Panels im Ausgangsnetz vorhanden sind. Das Programm ν -Shallo teilt viereckige Elemente für die Rechnung in zwei dreieckige Elemente, so dass die effektive Panelzahl verdoppelt wird. Zur Beibehaltung der Approximationsgenauigkeit sollten also dreieckige Elemente etwa halb so groß wie viereckige Elemente sein.

In Abbildung 2.6 ist das verwendete Rechengitter dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf des Wellenwiderstandsbeiwertes c_w des Ausgangsnetzes (durchgezogene Linie)¹ und des Netzes mit den Dreieckelementen (markiert mit +). Die Abweichung des Rechenergebnisses bei Verwendung unstrukturierter Dreieckpanels ist sehr gering.

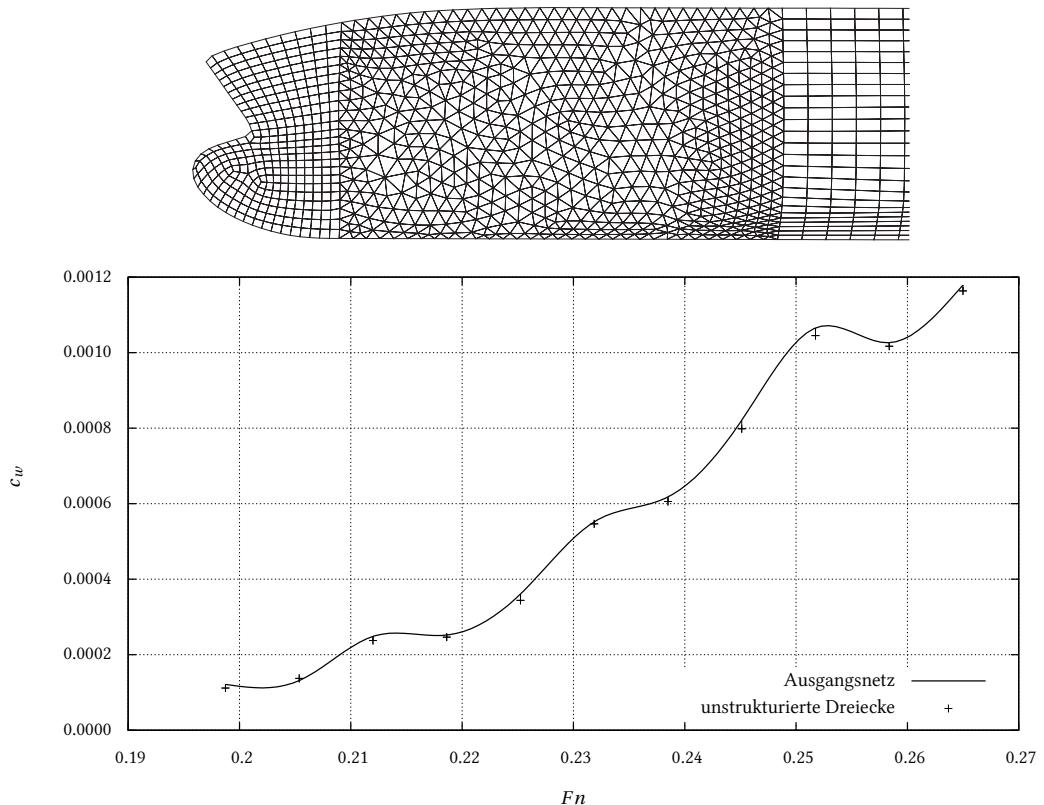


Abbildung 2.6: Einfluss unstrukturierter Dreieckelemente auf das Rechenergebnis

In einem weiteren Test wird untersucht, welche Auswirkungen unstrukturierte viereckige Elemente auf das Rechenergebnis haben. Hierzu wird der gleiche Netzbereich mit viereckigen Panels vernetzt. Die Panelzahl ähnelt der des Ausgangsnetzes. Auch dieses Teilnetz ist konsistent zu den Elementen in den angrenzenden Regionen. In Abbildung 2.7 ist das Panelnetz dargestellt und die berechneten Wellenwiderstandsbeiwerte denen des Ausgangsnetzes gegenübergestellt.

Der Wellenwiderstandsbeiwert weicht über den gesamten Froudezahlbereich um einen Betrag von ca. $3,5 \cdot 10^{-5}$ von dem des Ausgangsnetzes ab. Die Abweichung ist in etwa gleicher Höhe auch in den Gesamtwiderstandsbeiwerten c_t zu finden. Bezogen auf die Dienstgeschwindigkeit

¹Für eine bessere Erkennbarkeit der Ergebnisabweichungen werden in dieser und den folgenden Abbildungen die diskreten Rechenergebnisse des Ausgangsnetzes als Kurve dargestellt.

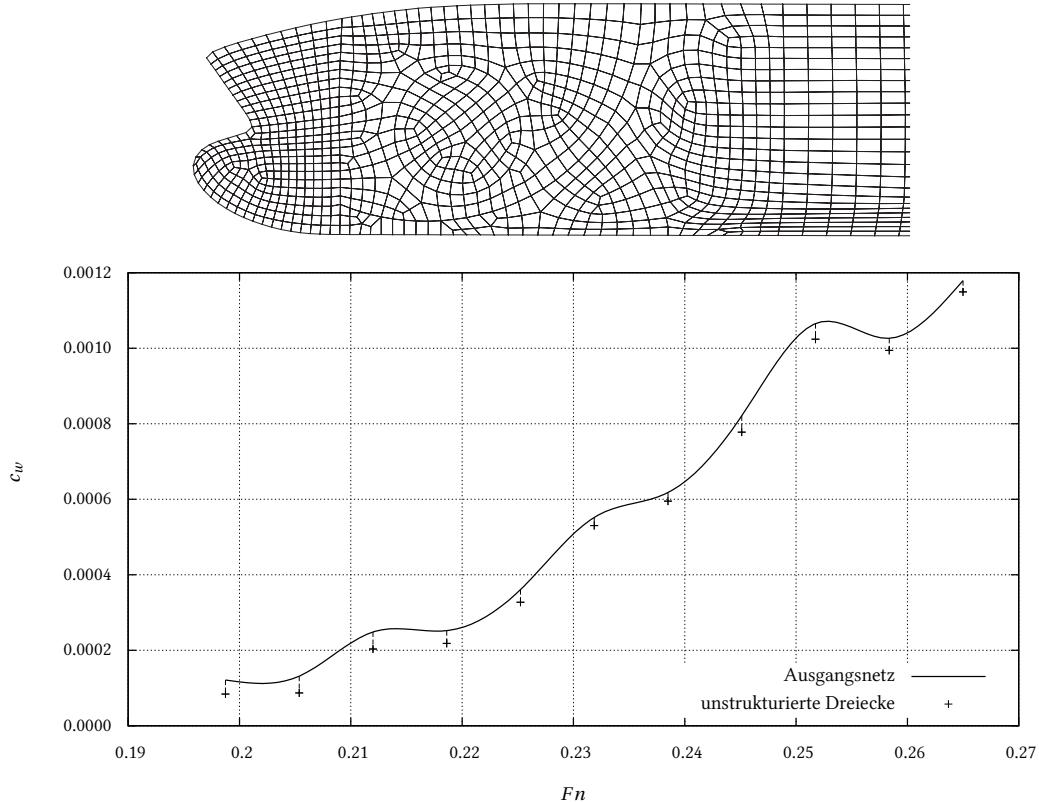


Abbildung 2.7: Einfluss unstrukturierter Viereckelemente auf das Rechenergebnis

von 18 kn macht diese Abweichung ca. 1,2 % des gemessenen Gesamtwiderstandsbeiwertes aus und ist somit sehr gering. Da sie jedoch etwa dreimal so groß wie die Abweichung mit den zuvor betrachteten unstrukturierten Dreieckelementen ist, sollen weitere Rechenergebnisse verglichen werden.

In den Abbildungen 2.8 und 2.9 sind das berechnete Wellenfeld und die Druckverteilung beider Panelnetze dargestellt. Die Abweichungen in den Wellenhöhen sind sehr gering und die Druckverteilung wird von beiden Netzen gleich gut aufgelöst. Die unstrukturierten Viereckpanels haben also ausschließlich Auswirkungen auf den berechneten Wellenwiderstandsbeiwert, ein Einfluss auf die berechneten Strömungsverhältnisse am Schiff ist nicht feststellbar.

In einem letzten Test wird der Einfluss inkonsistent aneinander grenzender Teilnetze untersucht. Das verwendete Rechennetz ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Der gleiche Bereich wie bei den vorherigen Rechnungen wird durch neun Teilnetze dargestellt, die an ihren Rändern inkonsistent zu den benachbarten Teilnetzen sind. Die dadurch hervorgerufene Abweichung im Wellenwiderstandsbeiwert ist sehr gering.

Mit den drei untersuchten Panelnetzkonfigurationen können keine verstärkten Abweichungen der Rechenergebnisse festgestellt werden. Die Unterschiede liegen in einem Bereich, der bei Potentialverfahren zwischen verschiedenen Rechennetzen üblich ist. Die größten festgestellten Abweichungen des Netzes mit unstrukturierten viereckigen Elementen sind z.B. genau so groß wie die Abweichungen zwischen dem hier verwendeten Ausgangsnetz und dem Beispielnetz des Programms ∇ -Shallow. Die betrachteten Netzvarianten können also ohne Einschränkungen für die

Berechnung des Wellenwiderstandes verwendet werden. Dadurch werden die Möglichkeiten einer automatischen Panelnetzgenerierung erheblich erweitert.

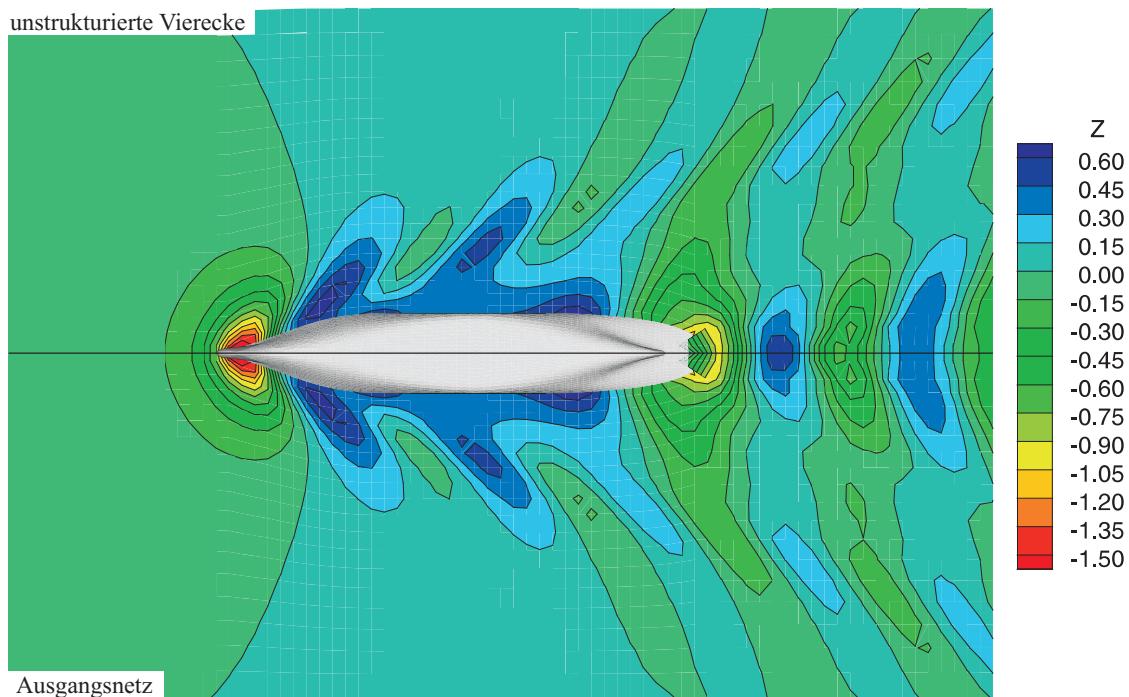


Abbildung 2.8: Wellenhöhen des Ausgangsnetzes und der Variante mit unstrukturierten Viereck-
elementen bei $Fn = 0,232$

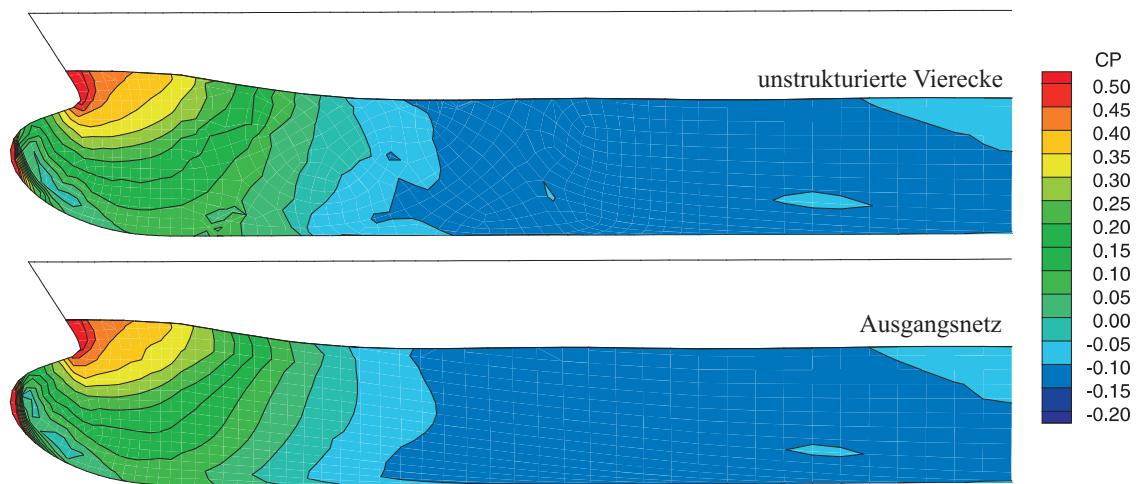


Abbildung 2.9: Druckverteilung des Ausgangsnetzes und der Variante mit unstrukturierten Viere-
ckelementen bei $Fn = 0,232$

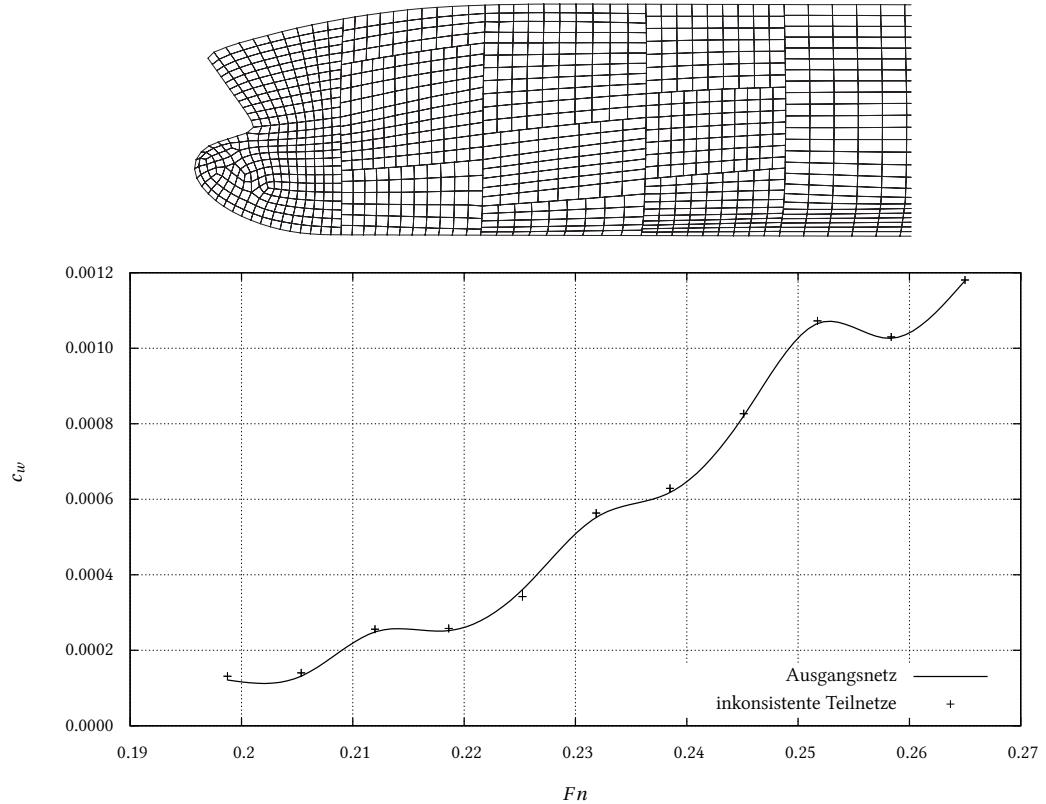


Abbildung 2.10: Einfluss inkonsistenter Teilnetze auf das Rechenergebnis

3 Stand der Technik von Panelnetzgenerierungsmethoden

In diesem Kapitel wird der aktuelle Entwicklungsstand von Netzgenerierungsmethoden beschrieben. Der Schwerpunkt ist hierbei auf die Erzeugung von Panelnetzen für Berechnungen des Wellenwiderstandes gelegt. Zu Beginn wird ein Überblick über Literatur zum Thema Panelnetzgenerierung im Umfeld des Schiffbaus gegeben. Anschließend wird eine allgemeine Übersicht der in der Literatur beschriebenen Techniken zur Erzeugung von Rechennetzen betrachtet. Ein weiterer Abschnitt untersucht eine Auswahl von Softwarelösungen zur Netzgenerierung.

3.1 Literatur

Das Thema Panelnetzgenerierung ist in der Literatur aus dem Umfeld des Schiffbaus nur selten zu finden. Das Problem des hohen Zeitaufwandes zur Erstellung von Panelnetzen wird zwar genannt, aber Lösungsansätze zur Automatisierung der Netzerzeugung fehlen weitgehend. Beim Thema der automatischen Formoptimierung nach hydrodynamischen Aspekten wird auf die Netzgenerierung nur am Rande eingegangen. Birk et al. [10] beschreiben die hydrodynamische Formoptimierung einer offshore-Struktur. Die während einer solchen Optimierungsrechnung notwendige automatische Erstellung des Panelnetzes wird kurz erwähnt, aber nicht beschrieben. Die berechnete offshore-Plattform ist aus einfachen geometrischen Grundformen zusammengesetzt, die zudem parametrisch definiert sind. Diese spezielle Formbeschreibung vereinfacht eine automatische Panelnetzgenerierung, ist aber nur für derartige Spezialanwendungen möglich. Marzi [68] beschreibt die automatische Formoptimierung einer schnellen RoPax-Fähre. Es werden automatisch verschiedene Formvariationen einer Ausgangsform des Schiffsrumphes untersucht und bewertet. Dabei wird unter anderem auch der Wellenwiderstand berechnet. Auf eine Änderung des geometrischen Modells der Ausgangsform mit automatischer Erzeugung eines neuen Panelnetzes wird jedoch verzichtet; statt dessen wird ein ursprünglich manuell erstelltes Netz verzerrt. Harries [38, 40] schreibt ebenfalls über automatische Formoptimierungen von Schiffen, aber auch hier wird die automatische Netzerstellung nur durch eine spezielle Methode der Schiffsformbeschreibung ermöglicht, die nicht allgemein gültig auf beliebige Schiffe anwendbar ist.

Ein häufig zu findender Ansatz für eine automatische Netzgenerierung auf Schiffen wird von Jensen [57] beschrieben. Hier wird ein Panelmodell aus Spantschnittkurven und der Stevenkurve erzeugt. Auf den Spantschnitten und den vertikalen Teilen der Stevenkurve werden Punkte erzeugt, die zu einem Netz aus Dreieckelementen verbunden werden. Durch Löschen einzelner Dreiecksseiten werden vierseitige Elemente erzeugt. Leider versagt ein solcher Ansatz regelmäßig im Heck- und Bugbereich. Jensen sieht dafür eine manuelle Bearbeitungsmöglichkeit der Elemente vor.

3.1.1 Überblick über Netzgenerierungsmethoden

In nahezu allen technischen Disziplinen werden komplexe physikalische Vorgänge durch mathematische Modelle beschrieben, die numerische Lösungen und damit Diskretisierungen erfordern. Auch im Bereich der Computergrafik werden Netzgenerierungsmethoden zu Visualisierungszwecken genutzt. Regelmäßig werden neue Vernetzungsmethoden, neue Rechenverfahren mit neuen Anforderungen oder neue Anwendungsprogramme entwickelt. Es gibt eine große Zahl von Veröffentlichungen zu Vernetzungstechniken.

Viele Vernetzungsverfahren lassen sich in Gruppen von ähnlich arbeitenden Methoden einordnen, siehe Abbildung 3.1. Einen guten Überblick hierzu gibt Liseikin [61]. Die wichtigste Unterscheidung ist die zwischen Methoden zur Erzeugung strukturierter Netze und denen zur Erzeugung unstrukturierter Netze. Die Dimension der erzeugten Netze ist dabei weniger interessant; prinzipiell können die meisten Verfahren sowohl zur Erzeugung ebener als auch dreidimensionaler Netze verwendet werden.

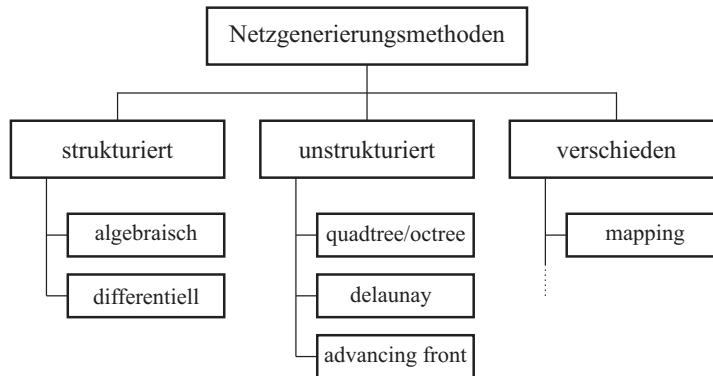


Abbildung 3.1: Schematische Gruppierung wichtiger Vernetzungsmethoden

Die Methoden zur Generierung strukturierter Rechennetze lassen sich in zwei Untergruppen gliedern. Die erste Gruppe sind die *algebraischen* Methoden, die in drei Stufen arbeiten. Zuerst wird der Rand des Vernetzungsgebietes diskretisiert. Anschließend werden innere Gitterpunkte durch verschiedene Interpolationsverfahren berechnet [35, 36, 109]. Die meisten dieser Methoden erfordern einen dritten Schritt, in dem das erzeugte Netz optimiert wird. Algebraische Methoden sind einfach und schnell, haben aber Probleme mit komplizierten Geometrien, bei denen häufig degenerierte Elemente oder Überlappungen erzeugt werden. Durch die Interpolationsverfahren zur Berechnung innerer Punkte werden Unstetigkeiten der Berandung ins Innere des Netzes übertragen.

Die Methoden der zweiten Gruppe strukturierter Netzgenerierungsmethoden werden als *differenzielle* Methoden bezeichnet. Sie sind für Vernetzungsgebiete mit beliebigen Rändern geeignet und basieren auf der Optimierung eines Ausgangsnetzes (welches z. B. durch algebraische Methoden erzeugt wurde) durch Lösen eines Systems von Differentialgleichungen. Die Grundlagen für diese Methode wurden unter anderem von Thompson [113] entwickelt; einen guten Überblick geben auch Liseikin [61] oder Spekreijse [111]. Spezielle Eigenschaften des Netzes, wie z. B. rechtwinklige Elemente, werden durch besondere Randbedingungen realisiert [100].

Die Verfahren zur Erzeugung unstrukturierter Netze lassen sich in drei größere Gruppen einteilen.

Ein guter Überblick mit noch genauerer Unterteilung ist in [84] zu finden. Zur ersten Gruppe gehören Verfahren wie die *Quadtree*- bzw. *Octree*-Methode für dreidimensionale Netze. Bei diesen Methoden wird das zu vernetzende Gebiet in ein regelmäßiges Gitter aus Rechtecken oder Quadern geteilt, die rekursiv weiter unterteilt werden. Dieser Ansatz ist einfach, hat aber auch Nachteile: eine vordefinierte Randunterteilung kann nicht berücksichtigt werden, es kommt zu stark unterschiedlichen Elementgrößen und das erzeugte Netz ist abhängig von der Lage des Rechengebietes in Bezug auf das Koordinatensystem, in dem die Unterteilungsgitter definiert werden. In [123], [31] oder [79] sind diese Methoden beschrieben. In Abbildung 3.2 ist ein *Quadtree*-Verfahren schematisch dargestellt.

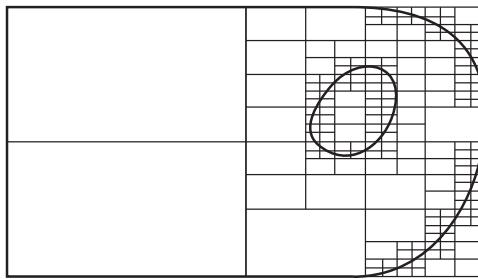


Abbildung 3.2: Quadtree-Vernetzungsalgorithmus

Die *Delaunay*-Verfahren bilden eine weitere Gruppe von Vernetzungsmethoden. Das *Delaunay*-Kriterium sagt aus, dass der Umkreis dreier Punkte keinen anderen Punkt enthalten darf. Im Dreidimensionalen darf die Kugel um einen Tetraeder aus vier Punkten keine weiteren Punkte enthalten. Mit Hilfe dieses Kriteriums kann eine gegebene Punktmenge trianguliert werden. Die Punkte werden so zu Dreiecken verbunden, dass das *Delaunay*-Kriterium für alle Punkte erfüllt ist. Eine solche Triangulierung nennt man *Delaunay*-Triangulierung. Im ebenen Fall wird durch dieses Verfahren die Gleichwinkligkeit aller Dreiecke maximiert; für den dreidimensionalen Fall ist diese Aussage nicht gültig. Abbildung 3.3 zeigt das *Delaunay*-Kriterium an einfachen Beispielen. Es gibt eine sehr große Zahl von Veröffentlichungen mit speziellen Anwendungen der *Delaunay*-Triangulierung. Für den CFD-Bereich sind besonders [118] und [119] interessant, oder auch [19], in der die Vernetzung gekrümmter Flächen beschrieben wird. In [4] ist ein Überblick über die verschiedenen speziellen Verfahren und eine allgemeine Beschreibung der *Delaunay*-Vernetzungsmethode zu finden; in [99] und [73] wird das Vernetzungsverfahren detailliert beschrieben. *Delaunay*-Methoden bereiten Probleme, wenn vorgegebene Randunterteilungen berücksichtigt werden sollen, die nicht zwangsläufig das *Delaunay*-Kriterium erfüllen.

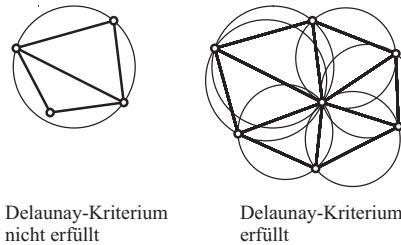


Abbildung 3.3: Delaunay-Triangulierung

Für die Erstellung einer Delaunay-Triangulierung muss eine Ausgangsmenge von Punkten so lange modifiziert werden, bis das Delaunay-Kriterium erfüllt ist. Andere Methoden gehen von wenigen Punkten aus und erzeugen jeden neuen Punkt so, dass das Kriterium erfüllt ist. Diese Methoden können je nach Funktionsweise auch zu einer weiteren Gruppe der unstrukturierten Vernetzungsmethoden gezählt werden, den *Advancing Front*-Verfahren.

Unter den *Advancing Front*-Methoden gibt es viele verschiedene Varianten, die jedoch alle auf dem gleichen Schema basieren. Voraussetzungen sind eine vorgegebene Randunterteilung sowie Informationen über die Elementgröße und -ausrichtung an jeder Stelle des zu vernetzenden Gebietes. Beginnend am Rand wird ein Element nach dem anderen erzeugt und das Rechengebiet so vom Rand her mit Elementen gefüllt. Die Auswahl des nächsten zu bearbeitenden Randelementes hat großen Einfluss auf die Qualität des erzeugten Netzes. In Abbildung 3.4 ist ein Zwischenzustand eines solchen Vernetzungsalgorithmus dargestellt. Mit Hilfe von Advancing Front-Methoden können Gebiete mit komplizierten Berandungen durch Elemente hoher Qualität vernetzt werden. Die Schwierigkeit bei diesen Verfahren liegt in der Bestimmung der Punkte für neue Elemente. Hierfür können unterschiedliche Kriterien verwendet werden, z.B. das zuvor beschriebene Delaunay-Kriterium im Falle dreieckiger Elemente. Eine weitere Herausforderung ist das Schließen des Netzes bzw. die Behandlung aufeinander treffender Fronten. Unter den vielen Veröffentlichungen zu den Advancing Front-Verfahren sind einige für die Anwendung auf Vernetzungen von Schiffsrümpfen besonders interessant. Löhner [62, 63, 66] beschäftigte sich mit Algorithmen zur Erzeugung unstrukturierter Dreiecksnetze. Blacker [11, 12] entwickelte eine *Paving* genannte Variante, die viereckige Elemente erzeugt. Ein indirekter Ansatz, der ein Ausgangsnetz mittels advancing front-Techniken in ein Netz aus Viereckelementen wandelt, wurde von Owen vorgestellt [83, 87]. Ein allgemeiner Überblick über Advancing Front-Methoden wird in [88] gegeben.

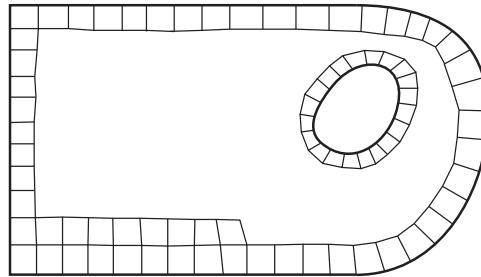


Abbildung 3.4: Beispiel eines Advancing Front-Algorithmus

Die vorgestellte Unterteilung der verschiedenen Vernetzungsalgorithmen ist nicht die einzige mögliche, berücksichtigt aber den größten Teil der existierenden Methoden. Es existieren darüber hinaus spezielle Verfahren, die sich nicht in dieses Schema einordnen lassen. Ein Beispiel ist die als *Mapping* bezeichnete Methode. Blacker [13] entwickelte eine solche Methode zur automatischen Vernetzung von zweidimensionalen Flächen mit komplexer geometrischer Form. Diese Methode basiert auf einer Zerlegung der Fläche in einfach zu vernetzende Teilflächen und anschließender Projektion eines vordefinierten Netzes auf diese Teilflächen. Das Resultat kann strukturiert oder unstrukturiert sein.

Nach Liseikin [61] gibt es zwei Hauptforschungsgebiete im Bereich der Netzgenerierung. Das erste ist die Vereinfachung und Automatisierung der Schritte, die Nutzerinteraktion erfordern; wie

z. B. die Erstellung von Teilregionen (blockstrukturierte Netze), die Aufteilung der Regionenränder oder die Verbesserung der Netzqualität. Zu den blockstrukturierten Netzen schreibt er, dass diese Netze den größten Aufwand bei der Erzeugung der Blockstruktur erfordern; dies sei zeitintensiv, schwierig und erfordere Erfahrung. Deshalb sei besonders hier eine Automatisierung nützlich. Das zweite große Forschungsgebiet umfasst die Entwicklung neuer oder verbesserter Methoden zur Vernetzung beliebiger Geometrien. In Bezug auf diese Gliederung ist die vorliegende Arbeit dem ersten Hauptgebiet zuzuordnen.

3.2 Software

In diesem Abschnitt werden einige Softwarelösungen zur Netzgenerierung betrachtet. Zu Beginn wird allgemeine Software betrachtet, die nicht speziell für die Anwendung im Schiffbau entwickelt worden ist. Die Auswahl ist beschränkt auf wichtige, weit verbreitete Programme sowie auf Lösungen, die beispielhaft für eine größere Zahl ähnlich funktionierender Programme und Methoden stehen. Anschließend werden drei Softwarelösungen untersucht, die aus dem Bereich des Schiffbaus kommen und speziell für die Erzeugung von Panelnetzen entwickelt worden sind. Bei der Beschreibung der unterschiedlichen Lösungen steht die Methodik der Netzgenerierung im Vordergrund. Es werden neben den erstellbaren Netzen vor allem die unterschiedlichen Arbeitsschritte betrachtet, da diese hauptverantwortlich für die Effektivität der Anwendung einer manuellen Netzgenerierungssoftware sind.

3.2.1 Hypermesh

Hypermesh ist ein solverunabhängiger Preprozessor als Teil des CAE-Paketes *Altair HyperWorks* [47]. Das Programm bietet eine interaktive, grafische Bedienoberfläche zur Geometrieaufbereitung und zur Netzerstellung. Es können neben Flächennetzen auch Volumennetze erstellt werden. Für verbreitete FE-Programme existieren Schnittstellen, für alle anderen Zwecke können Schnittstellen selbst definiert werden. Der Geometrieimport kann über eine große Zahl unterschiedlicher Dateiformate erfolgen; für die Verwendung im Schiffbau wurde der Import über die IGES-Schnittstelle [51] (siehe Abschnitt 4.4) untersucht. Ein besonderes Merkmal von Hypermesh ist die effiziente Geometrieaufbereitung; aus diesem Grund soll dieser Aspekt detaillierter beschrieben werden.

Während des Imports der IGES-Datei wird die Lagebeziehung (Topologie) der einzelnen Teilflächen zueinander ermittelt. Die importierte Schiffsform wird als Kurvennetz der einzelnen Randkanten der Teilflächen auf dem Bildschirm dargestellt. Die Flächenkanten, die die äußere Berandung der Schiffsform bilden, werden als Randkanten identifiziert und entsprechend farblich dargestellt. Für die Erzeugung von Panelnetzen hoher Qualität muss das Netz über die Grenzen der Teilflächen hinweg erstellt werden. Zur Verdeutlichung sei auf Abbildung 2.4 auf Seite 13 verwiesen. Eine Schiffsformbeschreibung besteht meistens aus mehreren 100 Einzelflächen, die zudem unterschiedliche Formen und Größen besitzen. Für die Erstellung eines guten Panelnetzes muss die Schiffsform als Ganzes verwendet werden, da ansonsten die Form der Teilflächen die Form der Panels beeinflusst. Hypermesh bietet zu diesem Zweck die Möglichkeit, gemeinsam verwendete Kanten benachbarter Teilflächen automatisch zu unterdrücken. Das Ergebnis wird auf dem Bildschirm dargestellt, indem erfolgreich unterdrückte Flächenränder farblich gekennzeichnet werden.

Die Unterdrückung gemeinsam verwendeter Kurven funktioniert nicht, wenn die IGES-Beschreibung fehlerhaft ist. Die bei den untersuchten Beispielschiffen häufigsten Fehler sind Klaffungen zwischen oder Überlappungen von benachbarten Flächen. Diese Fehlerstellen sind für den Nutzer sofort zu erkennen, da die betroffenen Kanten als Randkanten identifiziert werden und entsprechend anders farblich gekennzeichnet sind. Eine einzige Nutzerinteraktion mit dem Mauszeiger auf diese Kanten schaltet den Status um (Randkante, unterdrückte Kante, normale Kante) oder vereinigt zwei dicht nebeneinander liegende Kanten.

Innere Flächenränder werden nicht unterdrückt, wenn sie einen Knick bilden, wenn also der Übergang zwischen den diese Kante verwendenden Flächen nicht „glatt“ (krümmungsstetig) ist. Besonders starke Knicke in einer Schiffsform wie z.B. der Knick zwischen einem Spiegelheck und dem Rest des Schiffskörpers werden automatisch erkannt. Kanten, die aufgrund einer zu ungenauen IGES-Beschreibung fälschlicherweise als Knick erkannt werden, können unterdrückt werden.

Aus der großen Zahl der Vernetzungsfunktionen in Hypermesh wurden zwei Verfahrensweisen näher untersucht, die mit wenig Aufwand zu Panelnetzen hoher Qualität führen. Hypermesh ist in der Lage, beliebige Flächenformen zu vernetzen, also auch eine die vollständige Schiffsform beschreibende Einzelfläche. Wenn ein ausschließlich aus vierseitigen Elementen bestehendes Netz erzeugt werden soll, ist eine weitere Unterteilung der Rumpfform sinnvoll. Durch einfache Nutzerinteraktionen können unterdrückte Flächenkanten in normale Kanten umgewandelt werden. Auch das Einfügen zusätzlicher Schnittkurven ist schnell möglich, wodurch die gesamte Schiffsform in Teilregionen aufgeteilt wird. Für die Netzerstellung muss lediglich die Art (Viereckelemente) und Größe (Kantenlänge) der Elemente angegeben werden, anschließend werden alle Teilflächen vernetzt. Neben dem erstellten Netz werden die Anzahl der Unterteilungen und die Verteilung der Punkte auf den einzelnen Rändern der Teilregionen angezeigt. Wiederum können durch wenige Maus-Interaktionen die Unterteilungsparameter einzelner Kanten eingestellt werden. Diese Netzgenerierungsmethode erfordert zwar etwas Erfahrung bei der Aufteilung der Schiffsform in günstige Teilregionen, ist aber durch die interaktive einfache Bedienbarkeit sehr schnell in der Anwendung. Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel eines mit dieser Methode erzeugten Panelnetzes.

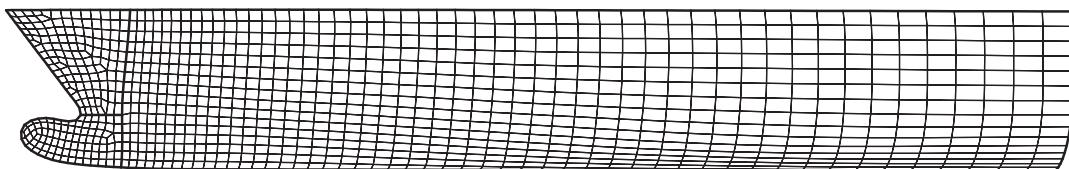


Abbildung 3.5: Beispiel eines mit Hypermesh erstellten Panelnetzes aus Viereckelementen

Die zweite untersuchte Vernetzungsmethode nutzt die Möglichkeit der automatischen Bestimmung der Elementgröße in Abhängigkeit der Oberflächenkrümmung der Schiffsform. Es ist keine weitere Unterteilung der gesamten Schiffsrumppfläche nötig; nur der zulässige Bereich der Elementgröße und die zulässige Abweichung der Elemente von der realen Schiffsform sind anzugeben. Diese Methode erzeugt qualitativ bessere Netze, wenn statt Viereckelementen ausschließlich Dreieckelemente verwendet werden. Abbildung 3.6 zeigt ein Beispielnetz.

Testrechnungen mit ν -Shallo ergeben keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit der Ergebnisse zwischen beiden Netztopologien.

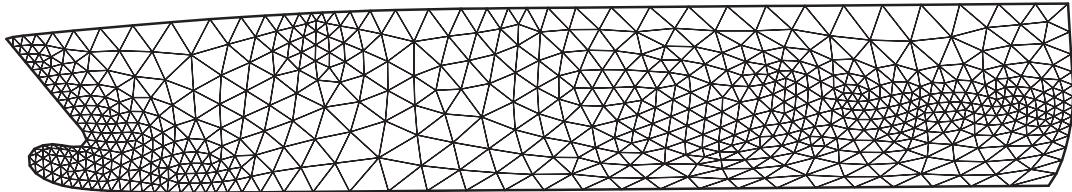


Abbildung 3.6: Beispiel eines mit Hypermesh erstellten Panelnetzes aus Dreieckelementen, die Panelgröße ist abhängig von der Oberflächenkrümmung

Die Funktionsweise von Hypermesh besteht darin, durch eine Vielzahl von Vernetzungsalgorithmen und Einstellungsmöglichkeiten beliebig geformte Flächen vernetzen zu können. Die Änderung von Form und Ausrichtung einzelner Elemente erfordert etwas Aufwand, genau wie die Übertragung eines einmal erstellten Panelnetzes auf eine andere Schiffsform. Dem gegenüber steht die besondere Art der Anwenderinteraktion, welche den Zeitaufwand für eine Netzgenerierung stark reduziert.

3.2.2 Gid

Ein weiteres universelles, nicht an ein Berechnungsprogramm gebundenes Vernetzungstool ist das Programm *Gid*, das vom International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) entwickelt wurde [33]. *Gid* kann Geometriebeschreibungen in verschiedenen Formaten importieren, unter anderem auch im IGES-Format. Die Stärke von *Gid* liegt in der Erstellung von unstrukturierten Dreiecksnetzen. Zum Erstellen eines solchen Netzes sind nur wenige Schritte notwendig. Die Elementgröße kann lokal an einzelnen Punkten, Kurven oder Flächen eingestellt werden oder in Abhängigkeit der Genauigkeit der Flächenapproximation automatisch gewählt werden.

Gid kann nur einzelne parametrische Flächen vernetzen. Für einen üblicherweise mittels vieler einzelner Teilflächen beschriebenen Schiffsrumpf bedeutet dies, dass auf jeder Teilfläche ein Netz generiert wird. An den Flächenrändern ist die Konsistenz der Netzpunkte gewährleistet. Das Problem mit dieser Methode ist die Abhängigkeit des erzeugten Netzes von der Form der Teilfläche. Besonders kleine oder schmale Flächen stören dadurch die Qualität des Gesamtnetzes und können dazu führen, dass das Netz für Berechnungen des Wellenwiderstandes nicht brauchbar ist. Netze aus Viereckelementen können nur auf vierseitigen parametrischen Flächen erzeugt werden. Die gewünschte Unterteilung jeder Seite der Fläche kann definiert werden.

Ähnlich wie *Gid* existieren viele weitere Vernetzungstools, die jede parametrisch beschriebene Fläche einzeln vernetzen. Derartige Methoden sind für die Generierung von Panelnetzen auf Schiffen nur eingeschränkt geeignet.

3.2.3 Napa

Das Programm *Napa* ist ein speziell für den Schiffbau entwickeltes CAE-System [76]. *Napa* ist sehr weit verbreitet und deckt nahezu alle Aspekte des schiffbaulichen Entwurfsprozesses ab. Ein spezielles Teilmittel von *Napa*, das NPN-Modul, ermöglicht die Erstellung von Panelnetzen sowohl für die Nutzung durch die *Napa*-interne CFD-Methode als auch für externe Programme.

Die zu vernetzende Schiffsform muss als Flächenmodell zur Verfügung stehen. In den meisten Fällen wird hierfür eine Schiffsform verwendet, die zuvor mit Hilfe von Napa erzeugt worden ist. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, externe Schiffsformbeschreibungen z.B. im IGES-Format zu importieren und anschließend für die Netzgenerierung zu verwenden. Dies setzt voraus, dass die IGES-Datei neben den Flächen auch wichtige Kurven enthält, die für die Netzgenerierung benötigt werden (z.B. die Stevenkontur). Ohne diese Hilfskurven wird die Netzgenerierung erheblich erschwert. Das Panelnetz wird, wie in Napa üblich, durch einzelne Befehle definiert, die in einer Textdatei zusammengefasst werden können. Ein grafisches Interface ist nicht vorhanden.

In Napa definierte Panelnetze besitzen eine Blockstruktur. Im Normalfall bildet ein einzelner Block eine vierseitig berandete Fläche, die durch eine Anzahl viereckiger Panels unterteilt ist. Es besteht die Möglichkeit, dreiseitige Blöcke mit einer zu einem Punkt degenerierten Randkurve zu definieren, die mehrere dreieckige Panels enthalten. Bei der folgenden Beschreibung der Netzerstellung werden nur vierseitige Blöcke berücksichtigt.

Für die Erstellung eines einzelnen Blocks müssen vier Randkurven definiert werden, die entsprechend ihrer Position bezüglich des gesamten Schifffs mit *left*, *right*, *bottom* und *top* bezeichnet werden. Durch eine geeignete Aufteilung der Randkurven kann die Ausrichtung der einzelnen Elemente gesteuert werden. Als Randkurven können in der Schiffsbeschreibung existierende Kurven, Schnitte der Schiffsform mit Ebenen parallel zu den drei Koordinatenrichtungen oder bereits definierte Blockgrenzen verwendet werden. Die Verwendung von bereits existierenden Kurven ist besonders wichtig, da nur mit Hilfe dieser Kurven kompliziert geformte Bereiche wie z.B. der Heckwulst vernetzt werden können. Oft müssen weitere Kurven speziell für den Zweck der Netzgenerierung erzeugt werden. Hierin begründen sich die Schwierigkeiten bei der Vernetzung importierter Flächenbeschreibungen. Wenn die extern definierten Flächen keine Kurven enthalten, stehen für die Definition der Blockgrenzen nur Schnittkurven oder die Randkurven der Einzelflächen zur Verfügung.

Für die Paare gegenüberliegender Randkurven eines Blockes muss die Unterteilung definiert werden. Zusätzlich zur Anzahl der Punkte auf der Randkurve kann auch deren Verteilung entlang der Randkurve festgelegt werden. Wenn als Randkurve der Blockrand eines anderen Blockes verwendet wird, sind damit Anzahl und Verteilung der Punkte vorgegeben. Punkte innerhalb des Blocks werden erzeugt, indem Schnittkurven durch die Schiffsfläche berechnet werden, auf denen im Bereich der Blockgrenzen Punkte mit einer Verteilung entsprechend den Randkurven berechnet werden. Die Richtung der Schnittkurven kann durch den Anwender festgelegt werden (*left/right* oder *bottom/top*). Die Ausrichtung der Flächen, deren Schnitte mit dem Schiffsrumph die Schnittkurven ergeben, kann definiert werden.

Ein Beispiel einer Blockdefinition sieht wie folgt aus:

```
block b2f,
div=pyu,
left x=90, right 1-b1f,
bottom stem 22/2, top deckf
```

In der ersten Zeile wird die Blockdefinition eingeleitet und der Block benannt. Die zweite Zeile bestimmt die Ausrichtung von Schnittebenen, deren Schnitte mit der Schiffsform die Position der im Inneren eines Blockes liegenden Panelpunkte bestimmen. Die folgenden beiden Zeilen definieren die Blockränder. Der linke Rand besteht aus einer Schnittkurve des Schiffsrumphs mit einer Ebene $x = 90$ m, für den rechten Rand wird ein Rand eines schon vorhandenen Blockes

verwendet. Somit ist für die left/right-Seite keine Angabe der Unterteilung mehr erforderlich. Die bottom- und top-Seite bestehen aus in Napa vorhandenen und benannten Kurven, zu einer dieser Kurven ist die Randunterteilung definiert. Abbildung 3.7 zeigt ein Beispiel für ein mit Napa erzeugtes Panelnetz. Hier sind sowohl konsistent als auch nicht konsistent aneinander grenzende Blöcke zu sehen.

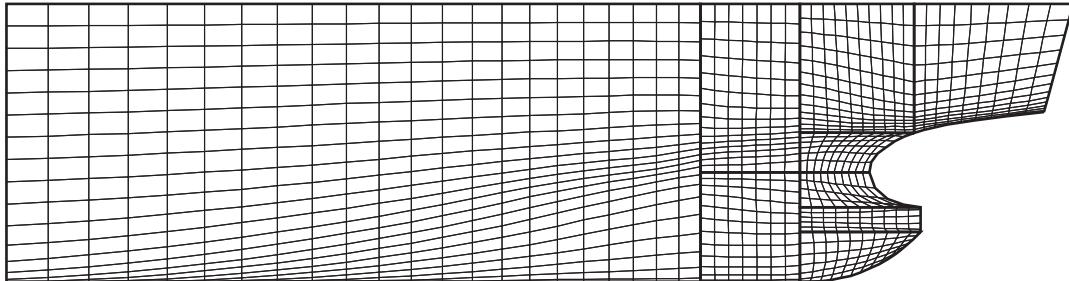


Abbildung 3.7: Beispiel eines mit Napa erstellten Panelnetzes

Die Erstellung von einfachen Blöcken ohne Bezug auf benachbarte Bereiche erfordert nur geringen Aufwand. Für die Erstellung eines vollständig konsistenten Netzes, bei dem alle Blockränder gemeinsam genutzt werden, ist jedoch erheblich mehr Aufwand und Erfahrung nötig.

Ein Vorteil der Netzgenerierung mit Napa ist der Zugriff auf spezielle schiffstypische Kurven, sofern die verwendete Schiffsform auch in Napa definiert worden ist. Diese Kurven können die Netzerzeugung stark vereinfachen, es können sehr genau spezifische Details (z.B. Knicke) einer Schiffsform berücksichtigt werden. Bei geschickter Aufteilung der Blöcke und einheitlicher Definition und Benennung der Details des Schiffsrumpfes kann eine existierende Definition eines Panelnetzes auf ein ähnliches Schiff angewendet werden.

Als Nachteil ist die umständliche, wenig interaktive Methode der Blockdefinition anzusehen. Die Erstellung eines Panelnetzes mit Hilfe von Napa ist ein rein manueller Arbeitsprozess.

3.2.4 Kelvin

Kelvin ist ein Programm der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam zur Berechnung des Wellenwiderstandes von Schiffen mit einer integrierten Methode zur Erstellung des Rechennetzes [112]. Obwohl der Aufbau und die Art der Erzeugung der Kelvin-Netze den von Napa generierten ähnelt, ist die Arbeitsweise grundsätzlich verschieden. In Kelvin werden die Netze durch grafische Eingabe mit der Maus vollständig interaktiv erzeugt. Auch in Kelvin wird das Netz in einzelne Blöcke strukturiert. Konsistenz der Unterteilungen an den Blockgrenzen ist nicht erforderlich.

Die Schiffsform muss für die Verwendung mit Kelvin im IGES-Format definiert sein. Es können alle im IGES-Standard beschriebenen Flächentypen verwendet werden. In der IGES-Schiffssformbeschreibung enthaltene Kurven werden nicht berücksichtigt, es werden ausschließlich Flächen genutzt. Die in der Praxis häufig auftretenden Fehler in Schiffssformdefinitionen müssen mit externen Programmen repariert werden. Eine detailliertere Betrachtung von Fehlern und Reparaturmöglichkeiten erfolgt in Abschnitt 5.3.

Ein Block wird in Kelvin durch vier Randkurven definiert. Es gibt keine Möglichkeit, dreiseitige Blöcke und damit dreieckige Elemente zu erzeugen. Zuerst werden die vier Eckpunkte eines

Blockes bestimmt. Als Eckpunkte können die Eckpunkte der IGES-Flächen, Punkte auf Randkurven der IGES-Flächen oder Punkte innerhalb einer der IGES-Flächen gewählt werden.

Als Randkurve zwischen zwei Eckpunkten können eine oder mehrere Randkurven von IGES-Flächen verwendet werden. Wenn die Eckpunkte die Eckpunkte von IGES-Flächen sind und eine tangentenstetige Kombination aus IGES-Randkurven zwischen diesen beiden Eckpunkten existiert, kann Kelvin diese Kurven automatisch ermitteln. Wenn die Verwendung von Randkurven der IGES-Flächen nicht möglich ist, kann eine Schnittkurve zwischen beiden Block-Eckpunkten berechnet werden. Es wird eine Schnittebene definiert, die beide Eckpunkte enthält. Die Normale der Schnittebene kann um die Gerade durch beide Eckpunkte interaktiv gedreht werden, wodurch die Form der Schnittkurve beeinflusst werden kann.

Für die Vernetzung der einzelnen Blöcke muss die Unterteilung in beiden Richtungen (bottom/top und front/back) definiert werden. Es ist möglich, eine nicht gleichmäßige Verteilung der Randpunkte einzustellen. Die Berechnung innerer Punkte erfolgt ähnlich wie in Napa: es werden Schnittkurven berechnet, auf denen die inneren Punkte verteilt werden.

3.2.5 Shipflow

Das Programm *Shipflow* [107, 108] ist eine Sammlung verschiedener CFD-Tools aus dem Bereich der Schiffshydrodynamik. Es enthält neben Methoden zur Berechnung von Potentialströmungen auch eine Grenzschichtmethode und RANS-Methoden. Für die Netzgenerierung gibt es verschiedene, an die Bedürfnisse der Rechnungsmodule angepasste Unterprogramme. Das Teilmodul für die Erstellung der Panelnetze für die Wellenwiderstandsberechnungen ist XMESH.

Die Definition eines Panelnetzes erfolgt ähnlich wie in Napa durch die manuelle Erstellung einer Netzdefinitionsdatei. Shipflow kombiniert die Netzdefinition mit der Geometriebeschreibung. In einem sogenannten offset-file wird die Schiffsgeometrie als eine Liste von Punktkoordinaten definiert. Der gesamte Schiffsrumpf kann dabei in separate Gruppen unterteilt werden. Jede Gruppe besteht aus einer Anzahl von Spantdefinitionen, die Schnitte des Schiffsrumpfes mit Ebenen $x = \text{konst.}$ darstellen. Jeder Spant besteht aus einer sortierten Liste von Punkten (y,z). Alle Maßangaben sind dimensionslos auf L_{pp} bezogen. Die gemeinsamen Ränder zweier Gruppen werden durch doppelte Definition von Spanen modelliert.

Das Panelnetz ist den Gruppen zugeordnet und wird ebenfalls im offset-file definiert. Für jede Seite einer Gruppe kann eine dimensionslose Panelgröße und die Verteilung der Elemente angegeben werden. Es besteht die Möglichkeit, die Punkte für die Definition der Schiffsform als Panelpunkte zu verwenden. Für die einzelnen Netzgruppen muss angegeben werden, ob sie von der Wasseroberfläche geschnitten werden.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand von Methoden zur Panelnetzgenerierung liegt hinter dem der Rechenverfahren zurück. Durch stetige Weiterentwicklung der potentialtheoretischen Rechenmethoden sowie die sich ständig vergrößernde Rechengeschwindigkeit von Computern ist es heute möglich, unterschiedlichste Probleme in kurzer Zeit zu berechnen. In der Literatur ist ein Trend zur Automatisierung der Rechnungen zu erkennen mit dem Ziel, mehr unterschiedliche Schiffe bzw. Formvarianten in kürzerer Zeit zu untersuchen. Keine der schiffbaulichen Softwarelösungen zur Panelnetzgenerierung wird diesen gestiegenen Anforderungen gerecht. Auch

mit allgemeiner einsetzbaren Programmen ist es nicht möglich, die Panelnetzgenerierung so zu vereinfachen, wie es für die Automatisierung der Berechnungsprozesse erforderlich wäre. Somit ist die Notwendigkeit der Entwicklung einer vollautomatischen Panelnetzgenerierung gegeben.

4 Erzeugung und Austausch von Schiffsformbeschreibungen

Die Voraussetzung für eine automatische Panelnetzgenerierung ist die Verfügbarkeit einer Schiffsform, auf der das Netz erzeugt werden soll. Die Art und Weise, wie die Schiffsform beschrieben wird, hat Einfluss auf die Netzerzeugung. Deshalb werden in diesem Abschnitt verschiedene Aspekte von Schiffsformbeschreibungen näher betrachtet.

Die Hauptaufgabe einer Schiffsformbeschreibung für Netzgenerierungszwecke ist der Datenaustausch. Die im Schiffsentwurfssystem erstellte Schiffsform muss einem Netzgenerierungsprogramm übergeben werden. Der klassische Linienriss ist eine einfache und effektive Methode zur Beschreibung einer Schiffsform. Ein Linienriss beschreibt jedoch nur indirekt eine dreidimensionale Schiffsform über die zweidimensionale Darstellung von Schnittkurven und ist somit nicht geeignet für eine automatische Netzgenerierung. Die Verwendung eines Linienrisses erfordert den manuellen Aufbau eines dreidimensionalen Modells des Schiffsrumpfes durch den Anwender.

Eine andere häufig verwendete Beschreibungsmöglichkeit für Schiffsformen ist eine Liste von Spantkurven, oft auch als *offset table* bezeichnet. Sie besteht aus einer Reihe von Punkten, die jeweils einen Spantschnitt beschreiben. Mehrere solcher Spantschnitte definieren die Schiffsform. Bei größerer Anzahl von Punkten bzw. Spanten ist die Approximationsgenauigkeit ausreichend für viele Rechenverfahren, wie z.B. die Streifenmethode zur Berechnung von Seegangseigenschaften. Auch einfache Panelnetze geringer Qualität können aus derartigen Formbeschreibungen erzeugt werden.

Für die Erzeugung von Panelnetzen guter Qualität und viele weitere Anwendungsfälle sind genauere dreidimensionale Beschreibungen von Schiffsformen nötig. In den meisten Fällen werden hierfür parametrisch definierte Flächen verwendet. Parametrische Flächenmodelle ermöglichen die genaueste Beschreibung einer Schiffsform und werden am häufigsten für den Datenaustausch verwendet. Da die automatische Panelnetzgenerierung auf dieser Art der Flächenbeschreibung basiert, wird sie im Folgenden im Detail erläutert.

4.1 Grundlagen parametrischer Flächen

Zunächst muss die parametrische Darstellung einer Fläche bzw. einer Kurve betrachtet werden. Eine Kurve in der Ebene ist eine Menge von Punkten $\mathbf{P}_i = \{x, y\}$. Bei der parametrischen Darstellung dieser Kurve ist jede Punktkoordinate separat beschrieben als Funktion eines unabhängigen Parameters t in einem Bereich $a \leq t \leq b$: $\mathbf{P} = \{x(t), y(t)\}$. Im Gegensatz dazu wird bei der nicht-parametrischen Darstellung einer Kurve ein Zusammenhang zwischen beiden Koordinaten gebildet: $y = f(x)$ (explizite Darstellung) oder $f(x) + f(y) = 0$ (implizite Darstellung). Die parametrische Darstellung ist im Definitionsbereich des Parameters t eindeutig. Jedem Parameterwert

ist genau ein Punkt auf der Kurve zugeordnet, was bei der expliziten oder impliziten Darstellung nicht der Fall sein muss. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Eine parametrische Kurven-

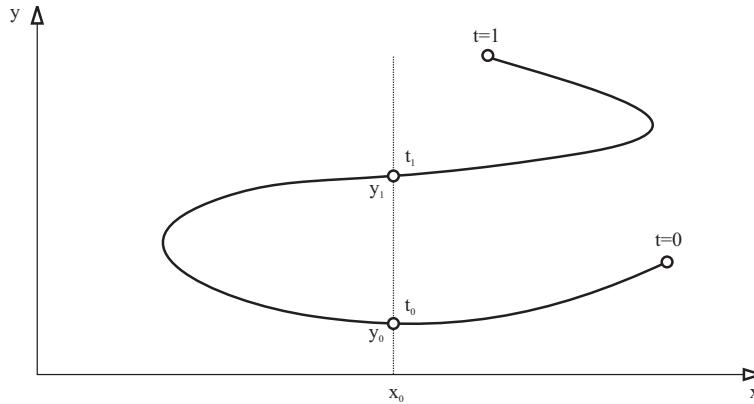


Abbildung 4.1: Beispiel einer parametrischen Kurvendarstellung mit eindeutiger Parameter-Punkt-Zuordnung

oder Flächendarstellung bietet eine größere Flexibilität. Insbesondere räumlich begrenzte Kurven oder Flächen lassen sich leichter parametrisch beschreiben. Da parametrische Kurven eine Definitionsrichtung haben ($t_0 \leq t \leq t_1$), ist es einfacher, eine geordnete Anzahl von Punkten auf der Kurve zu erzeugen.

Besonders wichtig ist die Parameterdarstellung im Zusammenhang mit Splinekurven und -flächen. Splinekurven sind spezielle Arten von Interpolationskurven, die entwickelt wurden, weil klassische Interpolationsverfahren ungeeignet für technische Anwendungen sein können. Oft müssen z. B. Bauteilkonturen dargestellt werden, die durch einzelne Punkte definiert sind. Bei der Interpolation durch Polynome ist die Form der Kurve von der Anzahl der Interpolationspunkte abhängig. Bei höheren Punktzahlen neigt die Kurve zum Überschwingen und ist zur Darstellung glatter Konturen nicht geeignet. Aus diesem Grund wurden Interpolationsverfahren entwickelt, die eine Kurve zwischen einzelnen Punkten interpolieren, dabei nur eine begrenzte Anzahl benachbarter Punkte berücksichtigen und definierte Übergangseigenschaften zwischen einzelnen Kurvenstücken bieten. Solche stückweisen Interpolationskurven werden Splinekurven genannt. Dieser Name steht in direktem Zusammenhang mit dem Schiffbau. Die früher verwendeten Straklatten (englisch: spline) werden durch Gewichte in einzelnen Punkten fixiert und interpolieren eine Kurve zwischen den einzelnen Fixpunkten. Die Form der Kurve ist dabei abhängig von den mechanischen Eigenschaften der Straklatte.

In Analogie hierzu ist die Form der Splinekurve abhängig von der verwendeten Interpolationsfunktion. Wenn z. B. eine einfache lineare Funktion verwendet wird, besteht die Splinekurve aus miteinander verbundenen Geradenstücken. Für technische Anwendungen ist ein glatter Kurvenverlauf gefordert, die zweite Ableitung (Krümmung) soll stetig über die Kurve sein. Diese Eigenschaft, auch C^2 -Stetigkeit genannt, bieten nur Interpolationsfunktionen dritten oder höheren Grades. Unter den verschiedenen Interpolationsfunktionen sind besonders die B-Spline-Funktionen von Bedeutung. B-Spline-Funktionen bilden die Grundlage der B-Spline-Kurven und -Flächen, die aufgrund ihrer universellen Anwendbarkeit besonders große Verbreitung gefunden haben.

Den B-Spline-Funktionen liegen geordnete Parameterwerte zugrunde, die als Knoten bezeichnet

werden

$$t_i < t_{i+1} \quad \text{mit } i = 0 \dots n$$

und als Knotenvektor geschrieben werden können

$$\mathbf{T} = \{t_0, t_1, \dots, t_{n-1}, t_n, t_{n+1}, \dots, t_{n+p}\}$$

Die B-Spline-Funktionen von Grad p sind in rekursiver Schreibweise definiert als:

$$N_{i,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{für } p = 0$$

$$N_{i,p}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+p} - t_i} N_{i,p-1}(t) + \frac{t_{i+p+1} - t}{t_{i+p+1} - t_{i+1}} N_{i+1,p-1}(t) \quad \text{für } p > 0$$

mit $i = 0 \dots n$.

Diese Schreibweise definiert eine Reihe von Funktionen, die überlagert werden und zusammen ein segmentweise definiertes Polynom bilden. Die Funktion $N_{i,0}(t)$ ist eine Treppenfunktion, die außer im Parameterbereich von t_i bis t_{i+1} Null ist. Für höhere Grade $p > 0$ sind die Funktionen $N_{i,p}(t)$ Linearkombinationen der beiden Funktionen mit niedrigerem Grad, $N_{i,p-1}(t)$ und $N_{i+1,p-1}(t)$. An den Übergängen zwischen den einzelnen Segmenten wird C^{p-1} -Stetigkeit erreicht. Für den Sonderfall äquidistanter Parameterwerte

$$t_i - t_{i-1} = t_{i+1} - t_i$$

werden die B-Spline-Funktionen als *uniform* bezeichnet. Eine weitere Besonderheit stellen r -fache Knotenwerte dar: wenn im Knotenvektor r Parameterwerte identisch sind, reduziert sich die Differentiationsordnung von C^{p-1} auf C^{p-r} .

Da B-Spline-Funktionen nur auf einen lokal begrenzten Parameterbereich wirken ($p - 1$ Knoten), können sie zu einer B-Spline-Kurve gekoppelt werden. Eine solche Kurve ist definiert als

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) \mathbf{P}_i \quad a \leq t \leq b \quad (4.2)$$

mit dem Knotenvektor

$$\mathbf{T} = \underbrace{\{a, \dots, a, t_{p+1}, \dots, t_{m-p-1},}_p \underbrace{b, \dots, b\}}_{p+1} \quad (4.3)$$

Der Knotenvektor \mathbf{T} enthält $m + 1$ Parameterwerte. Oft wird ein Parameterbereich von $a = 0$ bis $b = 1$ gewählt. Die Punkte \mathbf{P}_i sind die Kontrollpunkte (auch als de Boor-Punkte bezeichnet) der B-Spline-Kurve. Durch die $(p + 1)$ -fache Verwendung der ersten und letzten Parameterwerte reduziert sich die Stetigkeit am Anfang und am Ende der Kurve auf C^{-1} , wodurch die Kurve exakt durch den ersten und letzten Kontrollpunkt verläuft, d.h. $\mathbf{X}(a) = \mathbf{P}_0$ und $\mathbf{X}(b) = \mathbf{P}_n$. Die Beziehung zwischen dem Grad p der Kurve, der Anzahl der Kontrollpunkte $n + 1$ und der Anzahl der Knotenwerte $m + 1$ lautet

$$m = n + p + 1$$

Eine der wichtigsten Eigenschaften einer solchen B-Spline-Kurve ist der nur lokale Einfluss

von Änderungen. Wenn ein Kontrollpunkt \mathbf{P}_i verschoben wird, ändert sich die Kurve nur im Parameterbereich $[t_i, t_{i+p+1}]$. Durch Beeinflussung der Stetigkeit können Knicke in der Kurve erzeugt werden.

Um die B-Spline-Kurve zu einer Fläche zu erweitern, wird ein Netz von Kontrollpunkten in zwei Richtungen benötigt, zusammen mit zwei Knotenvektoren. Eine B-Spline-Fläche ist definiert als das Produkt der beiden B-Spline-Funktionen für beide Richtungen

$$\mathbf{X}(s, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(s) N_{j,q}(t) \mathbf{P}_{i,j} \quad (4.4)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, s_{p+1}, \dots, s_{k-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \} \\ \mathbf{T} &= \{ \underbrace{a, \dots, a}_{q+1}, t_{q+1}, \dots, t_{l-q-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{q+1} \} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Eine B-Spline-Fläche hat prinzipiell die gleichen Eigenschaften wie die B-Spline-Kurve. Besonders wichtig ist dabei, dass die vier Eckpunkte exakt interpoliert werden und Änderungen eines Kontrollpunktes nur in einem begrenzten Bereich auf die Form der Fläche wirken.

Eine Erweiterung kann sowohl auf die Kurve als auch auf die Fläche angewendet werden: die Schreibweise als rationale Funktion. Eine rationale B-Spline-Kurve ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{X}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) w_i \mathbf{P}_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) w_i} \quad \text{mit } w_i > 0 \quad (4.6)$$

Die w_i werden als Gewichte bezeichnet und bieten eine weitere Einflussmöglichkeit auf die Form der Kurve oder der Fläche. Bei Vergrößerung des einem Kontrollpunkt zugeordneten Gewichtes wird die Kurve bzw. Fläche dichter an diesen Punkt „herangezogen“. Wenn die Parameterwerte des Knotenvektors nicht äquidistant sind, bezeichnet man diese Kurven und Flächen als **nicht uniforme rationale B-Splines (NURBS)**.

4.2 Erstellung von Schiffsformbeschreibungen

Der Aufbau und die Eigenschaften eines Flächenmodells zur Schiffsformbeschreibung sind stark abhängig von der Vorgehensweise bei der Erstellung einer Schiffsform. Aus diesem Grund sollen im Folgenden zwei der am häufigsten anzutreffenden, grundsätzlich verschiedenen Methoden zur Erzeugung bzw. Beschreibung eines Schiffsrumpfes vorgestellt werden.

Ein verbreitetes Programm für den Entwurf von Handelsschiffen und anderen Schiffstypen ähnlicher Größe ist das Programmsystem Napa. Der Schiffsrumpf wird in Napa durch ein Netz aus

Kurven definiert, auf deren Basis das Programm eine Fläche interpoliert. Der Anwender definiert dabei jede Kurve durch eine Reihe von Punkten. An jedem Punkt kann zusätzlich der Tangentenwinkel der Kurve definiert werden. Die Software interpoliert aus den Definitionspunkten eine krümmungsstetige, „glatte“ Kurve. Es stehen verschiedene Hilfsmittel für die Kurvendefinition zur Verfügung, z. B. automatische Strakfunktionen oder Darstellungsmöglichkeiten der Krümmung der Kurven. Trotz dieser Hilfsfunktionen liegt es weitgehend in der Hand des Anwenders und damit seiner Erfahrung, die Definitionspunkte so zu wählen, dass die Kurve ausreichend stetig und „schön“ ist. Aus allen Kurven interpoliert die Software eine möglichst krümmungsstetige Fläche. Das Ergebnis dieser Flächeninterpolation wird wieder maßgeblich vom Anwender bestimmt. Durch die Wahl der Anzahl und Lage der einzelnen Kurven kann die Qualität der resultierenden Fläche stark beeinflusst werden. Abbildung 4.2 zeigt ein Beispiel eines solchen Kurvennetzwerkes.

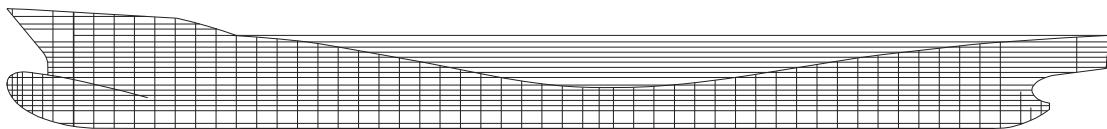


Abbildung 4.2: Definitionskurven für die Beschreibung des Rumpfes eines Containerschiffes in Napa

Der gesamte Schiffsrumprumpf wird durch eine große Anzahl von Einzelflächen definiert. Mittels transfiniter Interpolation wird in jedem mindestens drei- und höchstens vierseitigen Teil des Kurvennetzwerkes eine parametrische Fläche interpoliert. Eine solche Fläche wird auch als patch bezeichnet. Die Herausforderung für den Flächeninterpolationsalgorithmus liegt in der Erzeugung krümmungsstetiger Übergänge zwischen den einzelnen patches. Üblicherweise bestehen Schiffsbeschreibungen in Napa aus 500 bis 2500 Einzelflächen. Das in Abbildung 4.2 dargestellte Modell definiert 2267 einzelne patches.

Eine andere Methodik der Schiffsformerzeugung wird von Programmen wie z. B. Fastship [28], Maxsurf [69] oder Delftship [22] angewendet. Hier werden nur wenige NURBS-Flächen zur Formdefinition verwendet. Die Gestaltung des Schiffsrumprumpfes beginnt mit wenigen ebenen oder schon schiffsähnlich verformten einzelnen Flächen. Die Abmessungen und die Dichte des Kontrollpunktengitters wird definiert. Für die Formmodellierung können vom Anwender die Kontrollpunkte der parametrischen Fläche geändert werden, wodurch sich die Form der Fläche ändert. Eigenschaften wie Tangenten- oder Krümmungsstetigkeit werden automatisch eingehalten. Die Einflussmöglichkeiten auf die Fläche können durch Hinzufügen weiterer Kontrollpunkte erhöht werden. Dieser Modellierungsvorgang ist in hohem Maße intuitiv, allerdings bereitet es Schwierigkeiten, bestimmte spezielle Maße der Schiffsrumprumpffläche einzuhalten. Im Vergleich zu der von Napa verwendeten Methode ist es für den Anwender einfacher, qualitativ hochwertige parametrische Flächen zu erzeugen. Bei dieser Methode der Formerstellung besteht häufig der gesamte Schiffsrumprumpf aus nur wenigen einzelnen patches.

4.3 Datenaustauschformate für Schiffsformdefinitionen

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, muss für die automatische Erzeugung eines Panelnetzes die Schiffsform zur Verfügung stehen. Das Entwurfssystem muss also in der Lage

sein, die Formbeschreibung in ein lesbares Format zu exportieren. Hierfür stehen verschiedene Dateiformate zur Verfügung, die nicht von allen Programmen in gleicher Weise unterstützt werden. Tabelle 4.1 zeigt eine Auswahl von Programmen zur Erzeugung von Schiffsrumpfflächen mit ihren Exportmöglichkeiten. Die Angaben sind den jeweiligen Programmtdokumentationen entnommen. In Einzelfällen musste auf Informationen von der Homepage des Herstellers zurückgegriffen werden. In der Aufstellung der verfügbaren Dateiformate wurden reine Visualisierungsformate oder direkte Verbindungen zu anderer Software nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Unterstützte Datenaustauschformate verbreiteter Schiffsentwurfsssoftware

Software	Dateiformate						
	ACIS SAT	DXF	IDF	IGES	STEP	VDAFS	XML
Autoship [3]		✓		✓			
Delftship		✓		✓			
DFform [24]		✓		✓			
Fairway [26]		✓		✓			
Fastship		✓	✓	✓			
Foran [30]		✓		✓	✓		
Hullform [49]		✓					
Maxsurf		✓		✓			
Multisurf [75]		✓		✓			
Napa		✓	✓	✓	✓	✓	
Naval Designer [77]		✓		✓			
Rhinoceros [94]	✓	✓		✓	✓		
Sea Solution [102]		✓		✓		✓	
Tribon [115]	✓	✓		✓			✓

Das ACIS SAT-Format (Standard ACIS Text) ist ein Dateiformat zur Speicherung und zum Austausch dreidimensionaler geometrischer Modelle, die mit der Programmierbibliothek ACIS erzeugt wurden. SAT-Dateien sind ASCII-formatiert. Üblicherweise wird dieser Dateityp von Programmsystemen unterstützt, die auf ACIS basieren, zusätzlich gibt es eine Reihe unabhängiger Software, die ebenfalls ACIS-SAT-Dateien verarbeiten können.

Auch DXF-Dateien (Drawing Interchange Format) sind ASCII-formatiert und somit lesbar, die Dokumentation dieses Dateiformates ist frei zugänglich [2, 98]. Das DXF-Format hat sich zu einem Standard für den Austausch von einfachen CAD-Modellen entwickelt. Da nur einfache Volumenkörper und parametrische Flächen beschrieben werden können, wird es fast ausschließlich für den Austausch von aus Linien und Kurven bestehenden Modellen verwendet. Auf Schiffsformen bezogen bedeutet das den Austausch der Definitionslinien für den Schiffskörper oder von Spantschnitten, echte Flächenmodelle können durch das DXF-Format nicht beschrieben werden.

Das IDF-Format (IMSA Definition File) wurde von der IMSA (International Maritime Software Associates) als offener Standard für den Austausch von Schiffsrumpfbeschreibungen entwickelt. Das Format ist frei verfügbar und ASCII-formatiert. Der Schiffsrumpf kann mit Hilfe von Spantschnitten, Oberflächennetzen oder NURBS-Flächen beschrieben werden [41, 50, 92].

STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) ist ein internationaler Standard zur Beschreibung aller Arten von Produktdaten [1]. Für verschiedene Anwendungsbereiche gibt es unterschiedliche Applikationsprotokolle, für den Austausch von Schiffsformbeschreibungen ist das Protokoll AP 216 (ship moulded forms) [52] vorgesehen. Aufgrund der Komplexität stehen heute keine Werkzeuge zur Verfügung, die Schnittstellen für dieses Format für kommerziell eingesetzte Systeme bereitstellen.

Das VDAFS-Format (Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle) wurde in der Automobilindustrie für den Austausch von Karosseriedaten entwickelt. Es ist beschränkt auf den Austausch von Flächen (auch parametrischen Flächen) und den zugrunde liegenden einfacheren Elementen wie Kurven oder Punkten. Es eignet sich auch zur Beschreibung von Schiffsrumppflächen [117].

XML steht für Extensible Markup Language und ist eine Beschreibungssprache, die dazu dient, anwendungsspezifische Beschreibungen zu definieren. Daten in XML sind hierarchisch strukturiert. Das XML-Format ist lesbar und wird vor allem im IT-Bereich zum Datenaustausch verwendet [25, 34].

Das IGES-Format [51] wird im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben. Wie in Tabelle 4.1 ersichtlich, sind das IGES- und das DXF-Format die Datenaustauschformate, die von allen untersuchten Softwaresystemen unterstützt werden. Das DXF-Format ist nicht in der Lage, komplex geformte parametrische Flächen zu beschreiben. Diese Aufgabe erfüllt jedoch der IGES-Standard, weshalb die entwickelte automatische Netzgenerierung auf diesem Format zur Beschreibung der Schiffsflächen basiert.

4.4 Der IGES-Standard

IGES ist die Abkürzung von Initial Graphics Exchange Specification und wurde Ende der 1970-er Jahre von einer Vereinigung amerikanischer Hersteller von CAD-Systemen entwickelt. Der IGES-Standard definiert ein neutrales Datenformat für den Austausch von Produktbeschreibungen aller Art [51]. Die beschreibbaren Informationen können geometrischer, beschreibender oder organisatorischer Art sein. Es können zweidimensionale Bauteilezeichnungen, komplexe dreidimensionale geometrische Modelle, aber auch Text oder logische Strukturen beschrieben werden. Dem IGES-Format entsprechende Dateien sind ASCII-formatiert, der Dateiaufbau ist genau dokumentiert. Nahezu alle im Schiffbau verwendeten Softwaresysteme sowie die meisten anderen Programme zur Flächenmodellierung unterstützen dieses Format. In jüngerer Zeit wird das IGES-Format allmählich von STEP abgelöst, die letzte Version der IGES-Dokumentation wurde 1996 veröffentlicht.

Eine IGES-Datei ist in feste Abschnitte unterteilt, wovon drei besonders wichtig sind. Der erste Bereich ist die *global section*, in der übergeordnete Daten wie Dateistruktur, Skalierung, Maßeinheiten oder Toleranzen festgelegt sind. Die *directory entry section* ist das Inhaltsverzeichnis. Hier ist jeder in der Datei enthaltene Datensatz zusammen mit Zusatzinformationen wie z.B. Farbe oder Darstellungsart aufgeführt und mit dem Dateibereich, in dem er definiert ist, verbunden. Die kleinste Dateneinheit des IGES-Standards wird als *entity* bezeichnet. Ein IGES-entity kann geometrischer (Punkte, Kurven, Flächen, Volumenkörper) oder nicht-geometrischer Art sein (Strukturen, Attribute, Verbindungen, Bemerkungen). In der *parameter data section* sind alle im Inhaltsver-

zeichnis aufgeführten Datensätze definiert, hier folgen z. B. zu einem vorher angekündigten Punkt die Koordinaten.

Für die Beschreibung von Schiffsformen im IGES-Format sind besonders die parametrischen Flächentypen von Interesse, es stehen zwei Grundtypen parametrischer Flächenbeschreibungen zur Verfügung:

- Parametric Spline Surface und
- Rational B-Spline Surface.

Die Parametric Spline Surface ist eine Anordnung parametrischer Polynomflächen, siehe auch Abbildung 4.3.

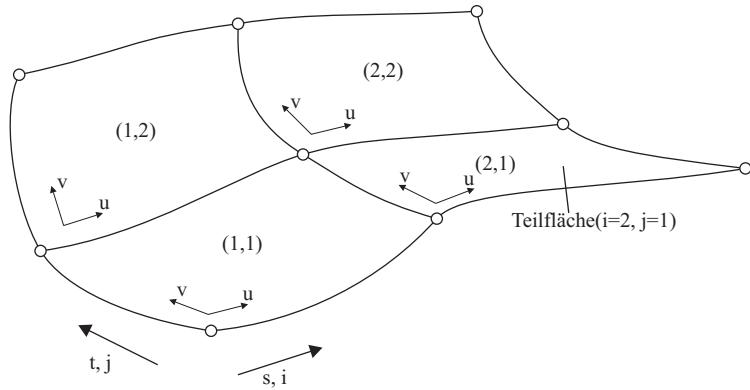


Abbildung 4.3: Parametric Spline Surface

Jede Einzelfläche ist eine bikubische Tensor-Produkt-Fläche. Ein Punkt auf der Fläche an der Parameterstelle (s, t) ist definiert als

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(s, t) = & a_{i,j} + b_{i,j} \cdot u + c_{i,j} \cdot u^2 + d_{i,j} \cdot u^3 \\ & + e_{i,j} \cdot v + f_{i,j} \cdot v u + g_{i,j} \cdot v u^2 + h_{i,j} \cdot v u^3 \\ & + k_{i,j} \cdot v^2 + l_{i,j} \cdot v^2 u + m_{i,j} \cdot v^2 u^2 + n_{i,j} \cdot v^2 u^3 \\ & + p_{i,j} \cdot v^3 + q_{i,j} \cdot v^3 u + r_{i,j} \cdot v^3 u^2 + s_{i,j} \cdot v^3 u^3 \end{aligned}$$

wobei die Indizes i und j die Teilfläche (i, j) in der gesamten Flächenmatrix bezeichnen. Die $a_{i,j} \dots s_{i,j}$ sind die Koeffizienten der kubischen Spline-Kurven in den beiden Richtungen und (u, v) die Parameter im Parametergebiet der Teilfläche (i, j) .

Die Rational B-Spline Surface entspricht exakt der in Abschnitt 4.1 beschriebenen NURBS-Fläche (siehe Gleichung 4.4, 4.5 und 4.6). Aufbauend auf diesen Grundflächen kennt das IGES-Format zwei weitere Flächentypen:

- Trimmed Parametric Surface und
- Bounded Surface.

Mit diesen Flächentypen ist es möglich, beliebig geformte Flächen zu beschreiben, die einen Teilbereich einer ungetrimmten Fläche darstellen. Für die Trimmed Parametric Surface muss

die zugrunde liegende Fläche ebenfalls eine parametrische Fläche sein, also einer der beiden oben erwähnten Flächentypen. Zur Fläche gehören eine oder mehrere Trimmkurven, die im zweidimensionalen Parametergebiet der Fläche definiert sind. Die Trimmkurven werden unterteilt in innere und äußere Trimmkurven. Die resultierende Fläche ist definiert als das Innere der äußeren Trimmkurven ohne das Innere der inneren Trimmkurven.

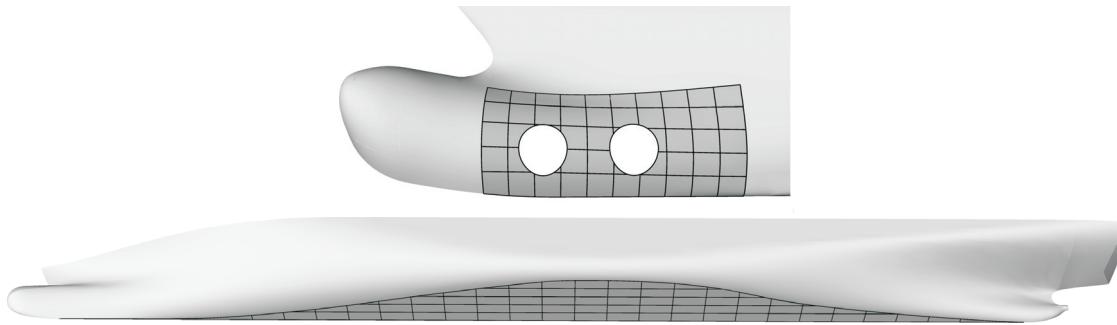


Abbildung 4.4: Getrimmte parametrische Flächen

Der Vorteil derartiger Trimmflächen ist die einfache Definition komplex geformter Flächen, wie sie z. B. in Abbildung 4.4 dargestellt sind. Mit Hilfe von Trimmkurven ist es leicht möglich, Ausschnitte oder Löcher wie z.B. die Öffnungen für Bugstrahlruder zu definieren. Ein anderes Beispiel ist die ebene Bodenfläche eines Schiffes, die am einfachsten als getrimmte Fläche beschrieben werden kann. Wenn solche Flächen als ungetrimmte parametrische Flächen definiert werden, entstehen oft degenerierte Kanten, die Probleme bei der weiteren Arbeit mit diesen Flächen bereiten. Der Nachteil getrimmter Flächen ist die größere Komplexität ihrer Verarbeitung, weshalb sie von vielen Programmen nicht unterstützt werden. Besondere Schwierigkeiten bereiten vollständig geteilte Flächen oder Flächen, die in mehrere unabhängige Teilflächen getrimmt wurden.

Die Bounded Surface der IGES-Spezifikation ist der Trimmed Parametric Surface ähnlich, ist aber allgemeiner definiert. Sie erlaubt auch Basisflächen, die nicht parametrisch definiert sind und im Dreidimensionalen definierte Trimmkurven.

Geometrische Toleranzen sind bei der Arbeit mit geometrischen Objekten zwingend zu beachten. Dies kann am Beispiel zweier Punkte verdeutlicht werden: zwei dreidimensionale Punkte werden als identisch bezeichnet, wenn ihre Koordinatenwerte identisch sind. Wenn jedoch Gleitkommazahlen zur Definition dieser Koordinatenwerte verwendet werden, ist eine Identität nicht zu realisieren. Aus diesem Grund wird in der IGES-Datei die Genauigkeit der Gleitkommazahlen des Datei erzeugenden Systems gespeichert.

Wesentlich wichtiger ist ein Wert, der in der IGES-Spezifikation als *resolution* (= Auflösung) bezeichnet wird. Diese Toleranzangabe definiert den Mindestabstand, den zwei Punkte zueinander haben müssen, um *nicht* als identisch betrachtet zu werden. Diese Toleranz ist direkt mit den geometrischen Objekten verbunden, die im Schiffsentwurfssystem erzeugt wurden. Ohne diese Toleranzangabe wird die Verarbeitung der IGES-Beschreibung erheblich erschwert. Der Anwender oder die Entwurfssoftware müssen dafür Sorge tragen, dass diese Toleranz eine realistische Größe bezogen auf die erzeugten Geometrieobjekte hat, was leider oft nicht der Fall ist (siehe Abschnitt 5.3, S. 43 ff.).

Bei der Erstellung einer Schiffsform entstehen je nach verwendetem Entwurfssystem sehr viele Einzelflächen. In der Praxis werden bei Nutzung des IGES-Formates ausschließlich die mathematischen Geometriebeschreibungen ohne topologische Informationen ausgetauscht. Die Einzelflächen einer Schiffsformbeschreibung werden also ohne Bezug zueinander in die IGES-Datei geschrieben. Dies kann zu Problemen bei der Verarbeitung einer solchen Schiffsformbeschreibung führen.

Der logische Bezug zwischen den einzelnen Flächen muss mit Hilfe der Toleranzangabe des IGES-Standards wieder hergestellt werden, was sehr häufig nicht vollständig möglich ist und zu einer fehlerhaften Interpretation der geometrischen Daten führt [17, 89, 95]. Zur Vermeidung dieser Probleme müsste ein Topologiemodell zusammen mit den geometrischen Daten ausgetauscht werden. Der IGES-Standard bietet hierfür die Möglichkeit der Definition eines B-Rep-Modells (siehe Abschnitt 5.2, S. 41 f.), jedoch nutzt keines der bekannten Schiffsentwurfssysteme diese Funktionalität.

5 Verarbeitung einer IGES-Schiffsformbeschreibung

Für die Verwendung zur automatischen Panelnetzgenerierung müssen Schiffsrumprumpfdefinitionen im IGES-Format zunächst weiter aufbereitet werden. Wie bereits erläutert, enthalten IGES-Schiffsformbeschreibungen eine unterschiedlich große Anzahl von Einzelflächen ohne Bezug zueinander. Für die weitere Arbeit mit der Schiffsform sind Informationen über die Beziehungen zwischen den einzelnen Flächen erforderlich. Ohne Kenntnis der Topologie der Einzelflächen sind Aufgaben wie z.B. die Suche nach der Stevenkontur des Schiffes oder dem Rand der gesamten Rumpffläche nur schwer lösbar. Für die Suche nach Knicken in der Schiffsform ist die Nachbarschaftsbeziehung einzelner Teilflächen ebenfalls von Bedeutung. In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Aspekte der Schiffsformverarbeitung von der Topologieerkennung über automatische Reparaturen fehlerhafter Rumpfbeschreibungen bis hin zu den geometrischen Rechnungen mit einem Schiffsrumprumpf näher betrachtet.

5.1 Implementierung

Zur Lösung der verschiedenen Teilprobleme einer automatischen Netzgenerierung sind umfangreiche Softwareimplementierungen notwendig, die vorwiegend aus Methoden zur Manipulation geometrischer Daten bestehen. Insbesondere geometrische Berechnungen wie z.B. Interpolations- oder Schnittalgorithmen erfordern einen hohen Aufwand für eine stabile Implementierung. Dieser Aufwand kann erheblich reduziert werden durch die Verwendung einer bestehenden Softwarebibliothek. Es gibt eine Vielzahl von Softwarebibliotheken für geometrische Berechnungen. Für die Implementierungen im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wurde die freie Geometriebibliothek *Open Cascade* verwendet [81], da sie einen besonders hohen Funktionsumfang bietet. Open Cascade ist eine open source C++-Bibliothek. Sie enthält Klassen und Methoden für die dreidimensionale Modellierung von Flächen und Volumenkörpern, zur Visualisierung, zum Datenaustausch und zur Anwendungsentwicklung. Viele grundlegende Datentypen und Algorithmen stehen bereits fertig zur Verfügung.

Allerdings konnten auch mit Hilfe dieser Bibliothek nicht alle Teilprobleme bearbeitet werden, so dass vielfach eigene Lösungen gefunden werden mussten. Auch die unzureichende Dokumentation von Open Cascade verhindert einen effizienten Einsatz. Auf die Probleme mit der Verwendung dieser Geometriebibliothek wird u.a. im Abschnitt 5.4 näher eingegangen.

5.2 Topologieanalyse

Die Topologie der eine Schiffsform beschreibenden Einzelflächen muss nach ihrer Ermittlung gespeichert werden. Ein Modell zur Abbildung derartiger topologischer Daten ist das *B-Rep*-Modell [45]. B-Rep steht für boundary representation. Mit Hilfe einer B-Rep-Beschreibung ist es möglich, geometrische Daten durch ihre Begrenzungen zu beschreiben. Ein B-Rep-Modell besteht aus der Verknüpfung topologischer Informationen mit geometrischen Daten. In Abbildung 5.1 ist die Struktur eines B-Rep-Modells dargestellt.

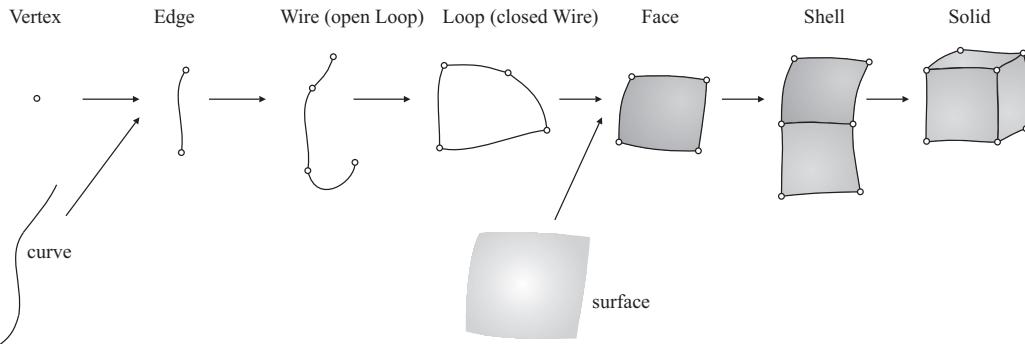


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung eines B-Rep-Modells

Das Grundobjekt eines B-Rep-Modells ist der *Vertex*. Ein Vertex ist mit einem Punkt im Raum verknüpft. Zwei Vertices können einen Abschnitt auf einer beliebigen Kurve begrenzen und so eine *Edge* bilden. Eine beliebige Anzahl von Edges kann über gemeinsame Vertices verbunden werden. Je nachdem, ob diese Edges eine geschlossene Kontur bilden, werden sie als *Wire* oder *Loop* bezeichnet. Über die verbindenden Vertices kann die topologische Beziehung zwischen den einzelnen Edges abgebildet werden. Ein Loop kann einen Bereich einer beliebigen Fläche begrenzen und damit eine *Face* bilden. Verschiedene Faces können über gemeinsame Edges zu einer *Shell* verbunden werden. Wenn eine Shell ein geschlossenes Volumen beschreibt, wird dieses als *Solid* bezeichnet. Zwischen den einzelnen B-Rep-Elementen werden Querverweise gespeichert. Diese Verweise ermöglichen es, die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den geometrischen Datenelementen zu untersuchen. So können z. B. zu jedem Punkt alle angrenzenden Edges und Faces ermittelt werden. In Abbildung 5.2 ist das Speichermodell eines vereinfachten B-Rep-Modells auszugsweise dargestellt.

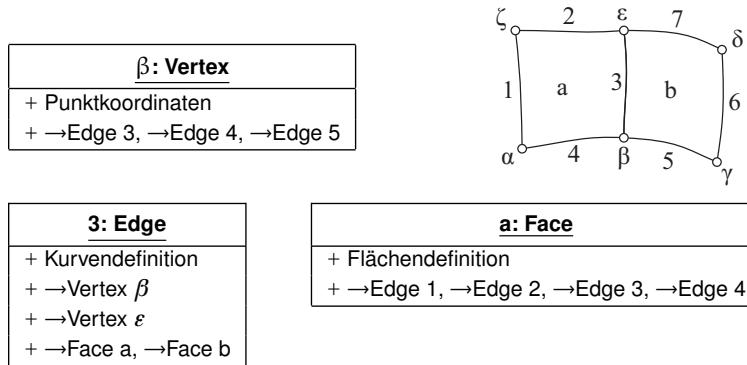


Abbildung 5.2: Beispiel der Speicherung eines B-Rep-Modells

Die Ermittlung der Struktur der einzelnen Flächen einer IGES-Schiffsformbeschreibung erfolgt durch eine schrittweise Erstellung eines B-Rep-Modells, die im Folgenden vereinfacht beschrieben wird. Der erste Schritt besteht in der Darstellung aller Teilflächen als B-Rep-Faces, vorerst noch ohne Bezug zueinander. Die ungetrimmten parametrischen Flächen werden als Faces mit vier Edges dargestellt, die vier Flächenränder werden zu Edges. Bei den getrimmten Flächentypen können die Trimmkurven direkt als Edges verwendet werden. Nun wird die Länge aller Edges gegen einen Toleranzwert geprüft. Wenn eine Edge kürzer als der in der IGES-Datei gespeicherte Wert für die Auflösung ist, wird sie als degeneriert gekennzeichnet, d.h. ihre Länge wird als Null angenommen. Falls eine Face ausschließlich degenerierte Edges besitzt, ist sie ebenfalls degeneriert und wird für die Topologieermittlung nicht berücksichtigt. Wenn die Face mehrere degenerierte Edges besitzt, muss der Flächeninhalt mit einer Toleranz verglichen werden, die als das Quadrat der Auflösung der IGES-Datei angenommen werden kann. Ist die Fläche kleiner, wird sie als degeneriert behandelt. Ein häufig auftretender Fall ist eine Face mit genau einer degenerierten Edge. Eine solche Face kann entstehen, wenn in der zugrunde liegenden parametrischen Fläche die Kontrollpunkte einer Flächenseite identisch sind und somit eine dreieckige Fläche beschrieben wird. Durch die Kennzeichnung der degenerierten Edge wird bei der Topologieermittlung sichergestellt, dass für diese Edge keine benachbarten Edges gesucht werden.

Die Zuverlässigkeit der weiteren Berechnungen kann verbessert werden, wenn eine geringfügig größere Toleranz als die in der IGES-Datei gespeicherte Auflösung verwendet wird. Diese Toleranz wird im Folgenden als Topologietoleranz bezeichnet. Ein guter Wert für diese Toleranz ist die Länge der kürzesten Edge, die nicht degeneriert ist.

In einem nächsten Schritt werden alle Paare von Edges gesucht, die als gleich im Bereich der Topologietoleranz angenommen werden können. Für das Auffinden gleicher Edge-Paare werden alle Endpunkte aller nicht degenerierten Edges miteinander verglichen. Die Annahme, dass das Schiff ohne Löcher definiert worden ist, vereinfacht die Suche nach gleichen Edges. Edges mit gleichen Endpunkten (im Rahmen der Topologietoleranz) können als gleich angenommen werden. Diese Annahme birgt die Gefahr, das Klaffungen zwischen benachbarten Edges durch ungenau modellierte Kurven spätere geometrische Rechnungen stören. Eine genauere Methode ist die Untersuchung des Abstandes der Kurven zweier Edges, deren Endpunkte gleich sind. Für die Ermittlung des Abstandes der Kurven werden beide diskretisiert und der größte Abstand der Punkte einer Kurve von der jeweils anderen wird ermittelt. Ist dieser Abstand kleiner als die Topologietoleranz, werden beide Kurven als identisch angenommen. Im Normalfall kann mit diesen Methoden der größte Teil aller Paare gleicher Edges gefunden werden. Damit ist bereits ein Teil der Nachbarschaftsbeziehungen der Einzel-Faces geklärt: die zu gleichen Edges gehörenden Faces grenzen direkt aneinander.

Wenn wie im linken Teil von Abbildung 5.3 auf S. 44 dargestellt zwei kleinere Flächen an eine größere grenzen, entsteht eine „T-Verbindung“. Die drei beteiligten Edges können mit der zuvor beschriebenen Methode nicht in Bezug zueinander gebracht werden, da nur jeweils ein Vertex mit dem einer anderen Edge übereinstimmt. Zur Bearbeitung dieser häufig auftretenden Flächenkonstellation wird die längere Edge sowie der Punkt, der nicht in der Nähe eines der Endpunkte dieser Edge liegt (hier als T-Punkt bezeichnet), ermittelt. Hierzu können entweder die Abstände der Endpunkte der Edges oder die Tangentenwinkel der Kurven an ihren Verbindungspunkten verglichen werden. Ist der Abstand des T-Punktes zu der längeren Edge kleiner als die Topologietoleranz, wird die Edge an der Position des T-Punktes geteilt. Durch das verwendete B-Rep-Modell ist dies möglich, ohne die Form der Fläche zu ändern. Im Loop der Face wird durch die Teilung eine Edge

durch zwei neue Teiledges ersetzt. Die nun entstandenen vier Edges können in zwei Paare gleicher Edges gruppiert werden, womit die Topologie der drei Flächen eindeutig ermittelt ist.

Nach Abschluss der Topologieerkennung wird das vollständige B-Rep-Modell der Einzelflächen erstellt. Dabei werden mehrere als gleich identifizierte B-Rep-Objekte auf eines reduziert und die jeweils zugehörigen Elemente entsprechend geändert. Als Ergebnis enthält jedes B-Rep-Element einen Verweis auf seine angrenzenden Elemente.

5.3 Automatische Reparatur fehlerhafter Flächen

In der Praxis enthalten viele IGES-Dateien Fehler, die eine erfolgreiche Aufbereitung in der zuvor beschriebenen Weise verhindern. Häufig müssen die Geometriedefinitionen vor einer weiteren Verwendung manuell bearbeitet werden. Die Fehler können in zwei Kategorien unterteilt werden: geometrische Fehler und topologische Fehler. Zusätzlich können Flächenformen auftreten, die nicht falsch, aber wenig geeignet für eine Netzgenerierung sind. In der folgenden Übersicht sind einige Beispiele aufgelistet, für eine detailliertere Beschreibung möglicher Fehler sei auf [72] oder [17] verwiesen:

- geometrische Fehler
 - mathematisch falsche Geometriedefinitionen
 - sich selbst schneidende Kurven oder Flächen
 - inkonsistente Normalenvektoren zwischen einzelnen Flächenpatches
 - geometrische Klaffungen oder Überschneidungen
- topologische Fehler
 - nicht gemeinsam verwendete Vertices/Edges zwischen benachbarten Edges/Faces
 - nicht zur Kurve einer Edge passende Vertices
 - nicht geschlossene Loops
 - nicht auf der Fläche liegende Edges eines Loops einer Face
 - topologische Klaffungen oder Überlappungen
- für Netzgenerierung ungeeignet
 - sehr kleine Faces
 - dreieckige oder singuläre Faces
 - lange und dünne Faces
 - verzerrte Faces

Eine automatische Reparatur von Fehlern in IGES-Dateien wird durch die sehr große Anzahl unterschiedlicher Erscheinungsformen der einzelnen Fehler erschwert. Die Reparaturmethoden sind abhängig von der weiteren Verwendung der IGES-Daten. In der Literatur sind verschiedene Lösungsansätze für die Aufbereitung von IGES-Formbeschreibungen zur Netzgenerierung zu finden. Einen Überblick über die grundsätzlich nötigen Arbeitsschritte geben Beall, Walsh und Shephard [6]. Von Petersson und Kyle [89] werden Methoden zum Auffinden verschiedener

geometrischer und topologischer Fehler beschrieben. Für die Reparatur wird aufgrund der großen Komplexität dieser Aufgabe eine interaktive Vorgehensweise empfohlen. Ribó, Bugeda und Oñate [95] und Mezentsev und Woehler [72] beschreiben eine Reihe von Algorithmen, um unterschiedlichste Fehler sowie schlechte Flächenkonstellationen (z.B. dreieckige Flächen) zu reparieren. Sie weisen darauf hin, dass der Erfolg dieser Vorgehensweise von der Menge der implementierten Reparaturalgorithmen abhängig ist und niemals alle erdenklichen Fehler behoben werden können. Einen anderen Ansatz beschreiben Sheffer, Blacker, Clements und Bercovier [103]: sie schlagen eine virtuelle Reparatur vor, welche die CAD-Daten nicht verändert. Ähnlich einem B-Rep-Modell wird ein virtuelles Topologiemodell der CAD-Daten erstellt, mit dessen Hilfe geometrische oder topologische Fehler für die Vernetzungsmethode „ausgeblendet“ werden.

In den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten IGES-Schiffsformbeschreibungen wurden nur sehr wenige geometrische Fehler gefunden, was in der wenig komplexen Form der einzelnen Flächenpatches begründet sein kann. Dagegen traten sehr viele topologische Fehler auf, die überwiegend auf nicht zur tatsächlichen Geometrie passende Toleranzwerte zurückzuführen sind. Besonders häufige Erscheinungsformen topologischer Fehler waren Klaffungen, Überlappungen oder Risse in der Schiffsrumphbeschreibung, die in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt sind. In Abbildung 5.4 ist eine fehlerhafte Stelle einer realen Schiffsformbeschreibung zu sehen. Bei diesem Schiff handelt es sich um eines der drei Beispielschiffe, die im Rahmen eines CFD-Workshops [70] zu Vergleichszwecken zur Verfügung gestellt wurden. Das Schiff ist ein im Modellmaßstab modellierter Tanker. Zu sehen ist die Verbindungsstelle zwischen vier einzelnen Teilflächen. Die IGES-Auflösung ist mit 0,01 mm ($\cong 0,00017 \% L_{pp}$) sehr klein in Bezug auf die Gesamtabmessungen des Schiffes. Ebenso ist die Modellierung der Teilflächen zu ungenau bezüglich der sehr kleinen IGES-Toleranz: der kleinere der dargestellten Klaffungsabstände beträgt etwa das 100-fache der Toleranz, die kleinste Kantenlänge einer Fläche ist nur 1,5-mal größer als die Toleranz.

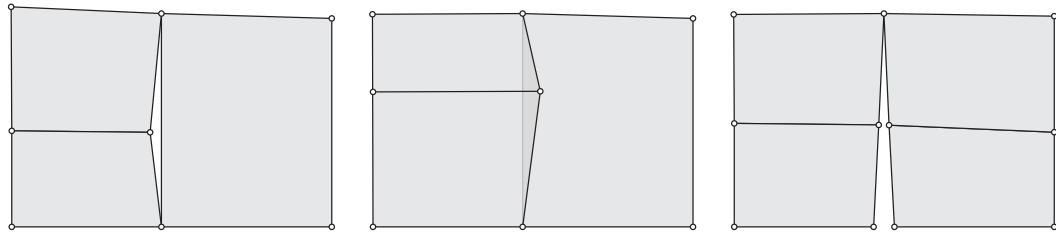


Abbildung 5.3: Typische Erscheinungsformen von Toleranzfehlern in IGES-Schiffsformbeschreibungen: Klaffung, Überlappung, Riss

Aufgrund der Komplexität der automatischen Reparatur von CAD-Daten wurde auf eine umfassende Bearbeitung dieses Themas verzichtet. Statt dessen wurden verschiedene einfach zu realisierende Reparaturmethoden für die am häufigsten auftretenden Fehler (siehe Abbildung 5.3) untersucht, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Zum Auffinden dieser Fehlerstellen wird davon ausgegangen, dass die Schiffsform keine Löcher, z.B. für Bugstrahlruder oder sonstige Öffnungen enthält und eine einzige Fläche bildet. Nach Erstellung des B-Rep-Modells sind alle Edges bekannt, die zu nur einer Face gehören. Diese Edges sollten zu genau einer geschlossenen Kurve gruppiert werden können, die den äußeren Rand der Schiffsform darstellt. Wenn weitere geschlossene Kurven gebildet werden können, sind diese zusätzlichen Kurven die Ränder von Klaffungen oder Überlappungen. Zwischen den zugehörigen Faces konnte keine Beziehung ermittelt werden; die Edges dieser Faces gehören also nur zu jeweils

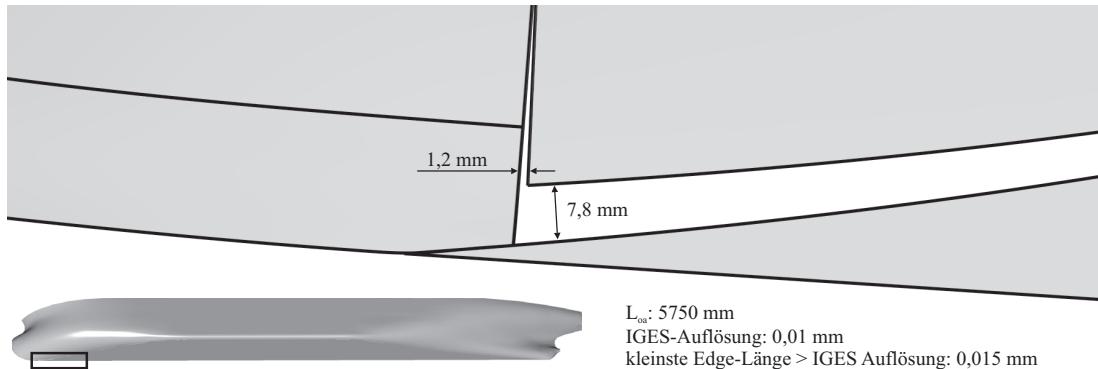


Abbildung 5.4: Detailvergrößerung des Schiffsrumpfes des KVLCC2-Tankers [70], vorderes Ende des ebenen Bodens

einer Face. Die Unterscheidung zwischen der Berandung einer Fehlerstelle und dem gesamten Schiffsflächenrand kann über die Länge der Randkurve geschehen: es wird davon ausgegangen, dass sich Fehler nur über einen kleinen Bereich des Schiffsrumppfes ausdehnen und somit die größte der geschlossenen Randkurven den globalen Rand der Schiffsrumppflefläche darstellt.

Für die Suche nach Rissen muss die Randkurve des Schiffsrumppfes untersucht werden. Durch Berechnung der Tangentenwinkel je zweier benachbarter Edges an ihrem gemeinsamen Vertex können die Rissstellen eindeutig identifiziert werden: bei einer Tangentenunstetigkeit im Verbindungspunkt zweier Randedges mit einem spitzen Winkel $< 10^\circ$ muss es sich um einen Fehler handeln.

Für die automatische Reparatur der gefundenen Fehlerstellen gibt es zwei Möglichkeiten. Die einfache beruht auf einer Anpassung des B-Rep-Modells, ähnlich wie in [103] beschrieben. Bei besonders einfacher Struktur der Fehler kann das B-Rep-Modell so angepasst werden, dass die zusätzlichen Nachbarschaftsbeziehungen abgebildet werden. Am Beispiel des Risses wird dazu in den beteiligten Faces ein Verweis auf eine der in Frage kommenden Edges gespeichert und die dann nicht mehr benötigte Edge aus dem B-Rep-Modell entfernt. Bei komplexeren Fehlern kann das B-Rep-Modell in Teilschritten mit jeweils unterschiedlichen Toleranzwerten vollständig neu erstellt werden. Hierbei werden zuerst die an den Fehlerstellen beteiligten Faces mit einer angepassten (vergrößerten) Toleranz bearbeitet. Die dabei entstehenden topologischen Teilmodelle werden in einem weiteren Schritt mit allen verbliebenen fehlerfreien Faces unter Verwendung der ursprünglichen Toleranz verknüpft. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Einfachheit und der nicht veränderten Geometrie der Einzelflächen. Solange die Fehlerstellen klein sind, werden weitere Arbeiten mit der Schiffsfläche nicht beeinflusst.

Bei größeren Abmessungen der Fehler kann eine automatische Reparatur auch durch Berechnung neuer, besser zueinander passender Teilflächen erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Berechnung eines Netzwerkes von Schnittpunkten oder -kurven über jede der beteiligten Faces, die Anpassung der fehlerhaft zugeordneten Edges und die Neuinterpolation der parametrischen Flächen aus den angepassten Schnittpunkten/-kurven. Je nach Topologie und Form der an der Fehlerstelle beteiligten Faces ist es möglich, mehrere Faces durch eine einzige, neu berechnete Fläche zu ersetzen (siehe Skizze in Abbildung 5.5).

Dieser Ansatz erfordert mehr Rechenzeit, nicht nur für die Interpolation neuer Flächen, sondern auch für die genauere Untersuchung der Struktur der Fehlerstellen. Hierbei wird die geometrische

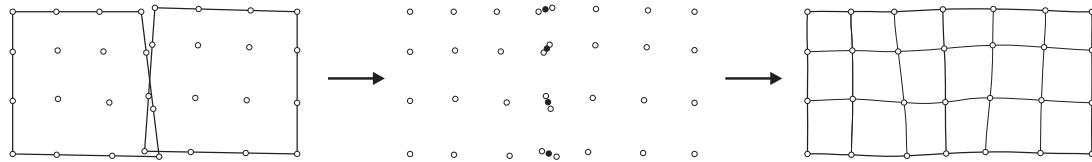


Abbildung 5.5: Flächenreparatur durch Neuinterpolation

Beschreibung des Schiffsrumpfes verändert, Eigenschaften wie die Krümmungsstetigkeit der Fläche können verloren gehen. Im Rahmen einer Panelnetzgenerierung für Berechnungen des Wellenwiderstandes stellt die Genauigkeit der Neuinterpolation einzelner Flächen jedoch kein Problem dar.

5.4 Geometrische Berechnungen

Neben der Aufbereitung der IGES-Daten sind die Berechnungen mit der Schiffsform ein wichtiger Aspekt bei der Verarbeitung der Schiffsformbeschreibung. Die Berechnung von Schnitten zwischen der Schiffsform und weiteren Kurven oder Flächen ist eine im Rahmen einer automatischen Netzgenerierung sehr häufig auftretende Aufgabe. Die Schnittkurven oder -punkte werden sowohl zur Identifizierung bestimmter Merkmale des Schiffsrumpfes als auch zur direkten Berechnung von Panelnetzgrenzen oder einzelnen Elementen benötigt. Der Vorteil in der Verwendung einer Geometriebibliothek wie Open Cascade liegt in der Verfügbarkeit verschiedenster Algorithmen zur Geometriemanipulation, u. a. auch zur Berechnung von Schnitten zwischen Flächen und Kurven.

Im Verlauf der Entwicklung der Methoden zur automatischen Vernetzung zeigten sich jedoch verschiedene Nachteile durch die Verwendung dieser Bibliothek, die zur zusätzlichen Implementierung eigener Berechnungsmethoden sowie einer speziellen Geometriebeschreibung auf Basis eines Dreiecksnetzes führten. Ein Grundproblem externer Geometriebibliotheken ist die unzureichende Funktionalität. Trotz des großen Funktionsumfangs von Open Cascade konnten nicht alle für die Panelnetzgenerierung benötigten Daten im zur Verfügung stehenden Geometriemodell gespeichert werden. Durch die hohe Komplexität von Open Cascade ist die Erweiterung der bestehenden Geometriebeschreibungsklassen um zusätzliche Attribute sehr aufwändig.

Ein weiterer Nachteil entsteht durch die direkte Verwendung der geometrischen Daten der IGES-Schiffsformbeschreibung. Wenn mit Hilfe der Open Cascade-Funktionen z. B. die Schnittkurve zwischen einer Spantebene und dem Schiffsrumpf berechnet wird, ist das Ergebnis zwar sehr genau, benötigt aber viel Rechenzeit, da die beteiligten Flächen lokal diskretisiert werden müssen. Es wurde keine Möglichkeit gefunden, die Ergebnisgenauigkeit speziell dieser Schnittberechnungen zu reduzieren unter gleichzeitiger Beibehaltung der allgemeinen Genauigkeit. Die sehr häufige Verwendung derartiger Schnittberechnungen führte zu einer inakzeptabel hohen Laufzeit der Gesamtrechnung. Durch die anfängliche Berechnung einer ausreichend genauen Diskretisierung der parametrischen Flächen und die ausschließliche Verwendung dieser Diskretisierung für Schnittberechnungen konnte die Rechenzeit deutlich verringert werden.

Ein besonders wichtiger Grund für die Entwicklung einer speziellen Geometriebeschreibung waren die mit Open Cascade auftretenden Berechnungsfehler. In seltenen Fällen konnten bei Schnittberechnungen in der Nähe der Ecken oder Ränder parametrischer Flächen keine Ergeb-

nisse ermittelt werden. Die Ermittlung der Fehlerursache war durch die Komplexität von Open Cascade nicht möglich. Die Implementierung zusätzlicher Methoden zur Absicherung gegen diese Rechenfehler führt zu einer starken Verringerung der Rechengeschwindigkeit. Durch die Verwendung einer einfacheren Geometriebeschreibung konnte die Zuverlässigkeit vieler Rechnungen verbessert werden.

Aufgrund der beschriebenen Nachteile und Probleme bei der Verwendung von Open Cascade wurde eine spezielle Beschreibung der Schiffsgeometrie mit Hilfe eines Netzes aus Dreiecken entwickelt und für einen Teil der Berechnungen zur Panelnetzgenerierung eingesetzt. Die bei der Implementierung der Vernetzungsmethoden gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass dieser Ansatz für nahezu alle Berechnungen im Rahmen der automatischen Netzgenerierung unter dem Aspekt von Rechengeschwindigkeit und Zuverlässigkeit sinnvoll ist. Bei dieser Vorgehensweise wird eine einfache Schiffsformbeschreibung, bestehend aus Punkten, Kanten und Dreiecken mit den Rechenalgorithmen der Geometriebibliothek kombiniert. Der entscheidende Vorteil dieser Lösung ist die leichtere Erweiterung der geometrischen Daten und die Unabhängigkeit vom spezifischen Geometriemodell der Geometriebibliothek.

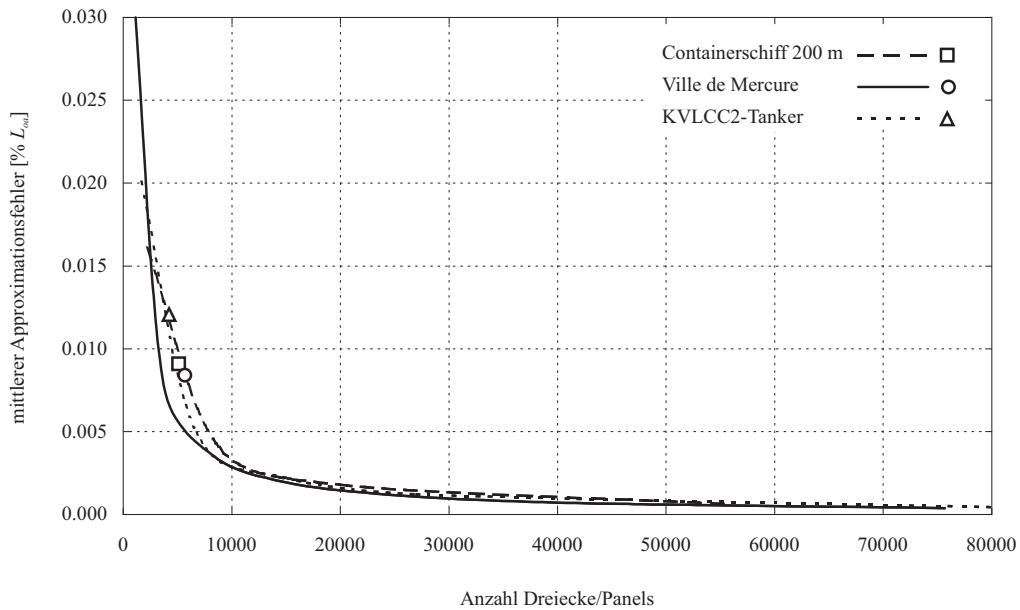


Abbildung 5.6: Vergleich der Approximationsgenauigkeiten einfacher Dreiecks- und Panelnetze

Eine Beschreibung der Schiffsform durch ein Dreiecksnetz ist mit einem Genauigkeitsverlust verbunden. Für die Panelnetzerzeugung ist dies vernachlässigbar, solange der Genauigkeitsverlust klein ist gegenüber der Approximationsgenauigkeit des Panelnetzes. In Abbildung 5.6 ist die mittlere Approximationsgenauigkeit eines Dreiecksnetzes in Abhängigkeit von der Anzahl der Dreiecke für drei verschiedene Schiffe dargestellt. Als Maß für die Approximationsgenauigkeit wurde der Abstand der Flächenschwerpunkte der Dreiecke von der durch NURBS-Flächen beschriebenen Schiffsform verwendet und über alle Dreiecke gemittelt. Dieses Maß ist als obere Grenze der Abweichungen anzusehen, da für die Berechnung nur eine einfache strukturierte Unterteilung der einzelnen parametrischen Flächen erzeugt wurde. Mit einer selektiven Verfeinerung des Dreiecksnetzes können die Abweichung reduziert werden. Zusätzlich sind die Abweichungen von Panelnetzen mit 2000 bis 3000 viereckigen Elementen als Einzelpunkte dargestellt.

Eine anfängliche Triangulierung der Schiffsform erfordert zusätzliche Rechenzeit, die jedoch wieder eingespart wird, weil spätere Rechnungen mit dem Dreiecksnetz deutlich schneller als Rechnungen mit parametrischen Flächen sind. Insgesamt kann die automatische Netzerstellung durch die Verwendung eines Dreiecksnetzes mit endlicher Approximationsgenauigkeit beschleunigt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Erhöhung der Zuverlässigkeit von Schnittberechnungen, mit Hilfe des Dreiecksnetzes können beliebige Schnitte fehlerfrei berechnet werden. Für die Netzerstellung werden die Schiffsformen durch ca. 50000 einzelne Dreiecke approximiert. Details zum Aufbau und zur Funktion dieser Art der Schiffsformbeschreibung werden im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

5.5 Triangulierung

Zur Beschreibung einer Schiffsform durch ein Dreiecksnetz wurde ein objektorientiertes Datenmodell entwickelt. Implementiert wurde dieses Datenmodell in einer Klasse *TriangleMesh*, die sowohl die geometrischen Daten als auch die Methoden zur Manipulation dieser enthält. *TriangleMesh* enthält Listen von Speicherreferenzen auf die Geometrieobjekte *TrianglePoint*, *TriangleEdge* und *Triangle*. Die Verwendung von Verweisen/Zeigern reduziert den Speicherbedarf und erhöht die Geschwindigkeit von Berechnungen. In Abbildung 5.7 ist ein vereinfachtes UML-Klassendiagramm dieses Datenmodells dargestellt.

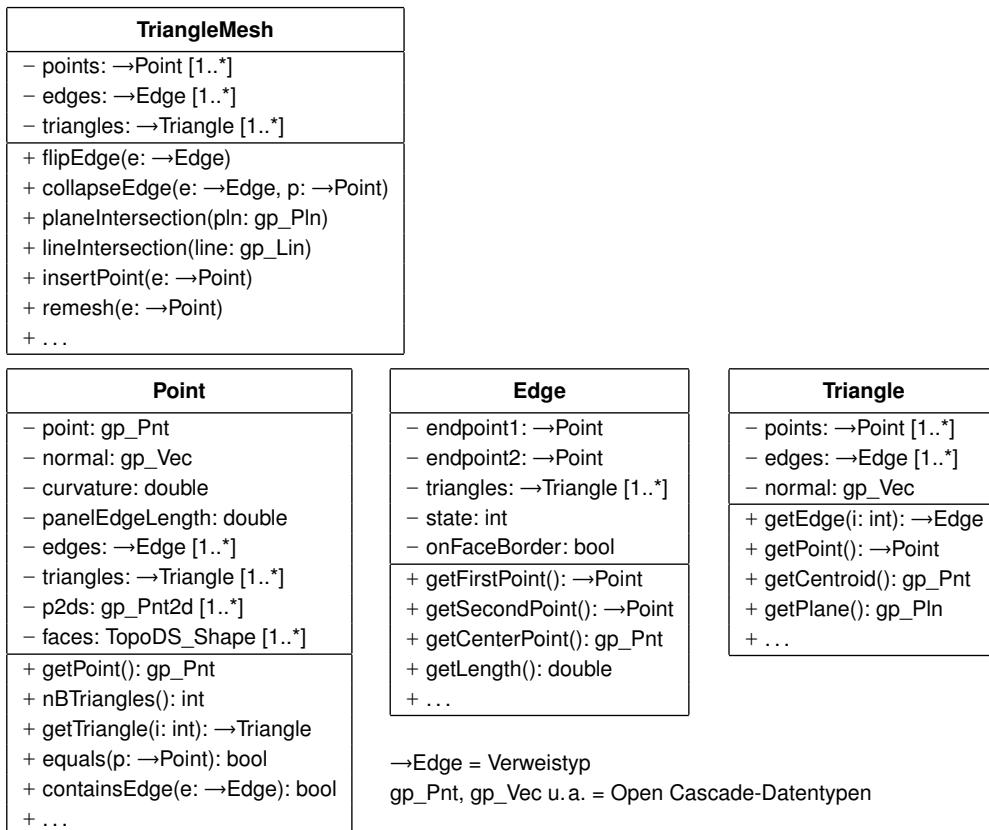


Abbildung 5.7: Datenmodell zur Speicherung und Manipulation eines Dreiecksnetzes

Die Klasse `TrianglePoint` enthält die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes. Zusätzlich können beliebige weitere Informationen, die für die weitere Arbeit nützlich sind, in der Klasse gespeichert werden, wie z.B. die Flächennormale des Schiffsrumpfes an der Stelle des Punktes oder die Oberflächenkrümmung. Außerdem enthält der Punkt eine Liste von Speicherreferenzen auf `TriangleEdge`- und `Triangle`-Objekte. Durch diese Querverweise werden Suchprobleme stark vereinfacht. Als Beispiel muss die Liste aller Kanten, die einen bestimmten Punkt verwenden, nicht durch Suche in allen `TriangleEdges` erstellt werden, sondern ist direkt im Punkt verfügbar. Ähnlich sind die Klassen `TriangleEdge` und `Triangle` aufgebaut: `TriangleEdge` enthält zwei Verweise auf die Endpunkte und eine Liste von `Triangles`, `Triangle` enthält drei `TrianglePoint`- und drei `TriangleEdge`-Objekte. Neben den reinen Datentypen enthalten alle Klassen verschiedenste Methoden zur Arbeit mit dem `TriangleMesh`. Wo immer möglich, wurde dabei auf Funktionen der Geometriebibliothek zurückgegriffen. Dies beinhaltet zum Beispiel Interpolationsfunktionen, Schnittalgorithmen, die Verwaltung der Zeiger-Listen u.a. Wenn die verfügbaren Funktionen nicht ausreichen, kann die fehlende Funktionalität leicht in das Datenmodell integriert werden.

Da das Dreiecksnetz eine Approximation der Schiffsfläche darstellt, ist es zusätzlich mit den originalen Daten des B-Rep-Modells verknüpft. Diese Verknüpfung wird hauptsächlich durch die Klasse `TrianglePoint` realisiert. Jeder Punkt enthält eine Liste von B-Rep-Faces und zweidimensionalen parametrischen Koordinaten (`faces` und `p2ds` in Abbildung 5.7). So ist es möglich, zu jedem Punkt einen Verweis auf die B-Rep-Face mit den zugehörigen Parameterkoordinaten zu speichern, auf der der Punkt liegt. Wenn ein Punkt identisch mit einem B-Rep-Vertex ist, können die Verweise auf mehrere Faces und 2D-Koordinaten gespeichert werden. Dadurch ist es möglich, bei späteren Manipulationen des Dreiecksnetzes die ursprüngliche Approximationsgenauigkeit zu erhalten. Werden Punkte verschoben oder neue Punkte in das Netz eingefügt, kann die Position exakt auf der ursprünglichen Schiffsfläche berechnet werden. Auch die Edges werden mit dem B-Rep-Modell verknüpft: wenn eine Edge auf einer B-Rep-Edge liegt, wird diese Information in der Edge gespeichert (Abb. 5.7: `onFaceBorder`).

Für die automatische Netzgenerierung ist es von Vorteil, wenn das als Rechennetz verwendete Dreiecksnetz über die gesamte Schiffsfläche konsistent ist, wenn also auch über die einzelnen Teilflächengrenzen die Dreiecke mit einander verbunden sind. Zum einen sind dadurch geometrische Rechnungen stabiler (Toleranzproblematik), zum anderen ist für im Weiteren näher beschriebene Netzgenerierungsmethoden die Kenntnis der Topologie einzelner Dreiecke auch über die Grenzen von Flächenpatches hinaus Voraussetzung. Des Weiteren werden Dreiecke annähernd gleicher Größe bzw. mit einer Mindestgröße benötigt. Dies erfordert eine weitere Verkleinerung von in Bezug auf die Approximationsgenauigkeit ausreichend kleinen Dreiecken in ebenen Schiffsbereichen wie z.B. dem Boden oder den Seitenflächen.

Es existiert eine große Zahl von Programmen zur Erzeugung von Dreiecksnetzen aus unterschiedlichsten Ausgangsdaten. Die besonderen Eigenschaften dieser Programme liegen überwiegend in der Erzeugung spezieller Dreiecksformen oder Größenverteilungen. In [84] und [86] ist eine Übersicht aufgelistet. Für die benötigte Schiffsformapproximation ist eine spezielle Dreiecksform jedoch weniger wichtig als eine Konsistenz des Dreiecksnetzes über alle Teilflächen. Diese Anforderung kann von vielen externen Algorithmen nicht erfüllt werden. Ein weiteres Problem bei der Verwendung externer Programme ist die Integration mit dem verwendeten Datenmodell. Insbesondere die den Punkten neben den Koordinaten zugeordneten Daten sind wichtig für weitere Berechnungen und dürfen bei der Erstellung einer Triangulierung nicht verloren gehen.

Zwei Programme wurden hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten näher untersucht: *Tri-*

angle [105, 106] und *Cocone* [23]. Beide Programme berechnen eine Delaunay-Triangulierung einer ungeordneten Punktmenge. *Triangle* verwendet zweidimensionale Punkte, *Cocone* benötigt dreidimensionale Punkte. Die Gleichmäßigkeit der Delaunay-Triangulierung wird nicht benötigt, der hierzu erforderliche Rechenzeitaufwand ist demnach unnötig. Der Vorteil beider Programme liegt in der Erstellung eines über alle Punkte konsistenten Dreiecksnetzes und der einfachen Verknüpfung zuvor erzeugter Punkte mit dem Ergebnis, dem Dreiecksnetz. Bei der Erstellung der Punkte kann die topologische Beziehung der Einzelflächen der Schiffsform berücksichtigt werden. Es kann z. B. sichergestellt werden, dass auf gemeinsamen Flächenrändern keine doppelten Punkte erzeugt werden. Zu dieser Punktmenge liefern *Triangle* und *Cocone* die nötigen Informationen, um sie zu einem Dreiecksnetz zu verbinden, das konsistent über den gesamten Schiffsrumph ist. Leider haben beide Programme Probleme mit der exakten Darstellung des Randes der Schiffsfläche, der besonders am Bug und am Heck eine komplexe Form aufweist. Vielfach wurden Dreiecke zwischen gegenüberliegenden Randpunkten erzeugt oder ganze Randbereiche nicht trianguliert. Aus diesem Grund wurde eine eigene Methode entwickelt, um das benötigte konsistente Dreiecksnetz zu erzeugen.

Zuerst wird eine strukturierte Triangulierung jeder Face in ihrem Parametergebiet berechnet. Die Anzahl der Kantenunterteilung wird dabei durch eine gewünschte Dreieckskantenlänge bestimmt. Anschließend werden diese einzelnen Dreiecksnetze weiter bearbeitet: zu lange Kanten werden weiter geteilt, zu kurze Kanten werden kollabiert. Zu kleine Dreiecke, die besonders in den Ecken dreiseitiger Faces entstehen, werden entfernt. Nachdem sichergestellt ist, dass alle Vertices des B-Rep-Modells durch einen Dreieckspunkt dargestellt sind, werden alle Einzelnetze in ein übergeordnetes Dreiecksnetz kopiert. Dieses Netz ist nicht konsistent, die B-Rep-Edges werden durch je zwei Dreiecksantenpolygone beschrieben. Um Konsistenz zu erreichen, werden alle Einzelnetze entlang ihrer gemeinsam verwendeten TriangleEdges „zusammengenäht“. Dafür werden entlang der doppelten Teildreiecksnetzränder Punkte gesucht, die so dicht beieinander liegen, dass sie zu einem Punkt vereint werden können. Wenn zu einem Punkt kein geeigneter gegenüberliegender Punkt existiert, wird die Dreiecksante, an der der Punkt liegt, geteilt. Dadurch wird ein zusätzlicher Punkt in das Netz eingefügt, der jetzt mit dem Ausgangspunkt vereint werden kann. Nachdem alle Punktpaare derart auf jeweils einen Punkt reduziert worden sind, existiert eine Reihe von TriangleEdges, die die gleichen Endpunkte besitzen, die also auch auf jeweils eine Kante reduziert werden können. In Abbildung 5.8 ist ein fertiges Dreiecksnetz dargestellt. Dieses Netz besteht aus ca. 14000 Dreiecken; die Erzeugung dauerte auf einem aktuellen PC 2,3 s. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt eine Stelle, an der die zuerst inkonsistenten Netze zweier benachbarter Faces verbunden wurden. Die durch die Verbindungsmethode entstehenden kleinen Dreiecke stellen kein Problem dar, da mit Hilfe des Dreiecksnetzes lediglich die Schiffsform approximiert werden soll.

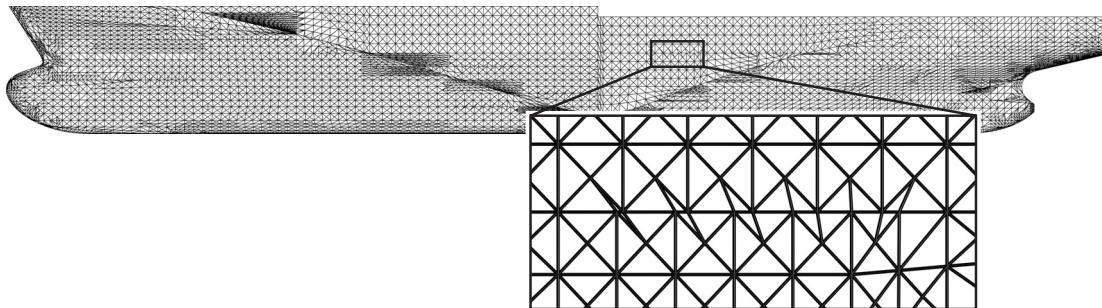


Abbildung 5.8: Dreiecksnetz zur Approximation der Schiffsform (14247 Dreiecke)

6 Automatische Knickerkennung

Knicke in der Schiffsform spielen eine wichtige Rolle in der automatischen Netzgenerierung. Panelnetze hoher Qualität müssen diese Knicklinien exakt darstellen (siehe auch Abschnitt 2.2). Die genaue Berücksichtigung von Knicken erhöht die Genauigkeit der Approximation der Schiffsform durch das Panelnetz. Aus diesem Grund werden Knicke bei der manuellen Erstellung blockstrukturierter Panelnetze häufig als Blockgrenzen genutzt. Bei einer automatischen Netzgenerierung haben die Knicklinien besondere Bedeutung für die automatische Identifikation des Schiffstyps: innerhalb der Schiffsform stellen Knicke Besonderheiten dar, die es ermöglichen, bestimmte spezielle Merkmale verschiedener Schiffstypen zu identifizieren, wie z.B. ein Skeg oder die Fläche des Spiegelhecks. Im Schiffsentwurfssystem sind die Informationen über Knicke bekannt, durch den Export der Schiffsform in das IGES-Format gehen sie jedoch verloren. Selbst mit einem korrekt erzeugten B-Rep-Modell der Einzelflächen sind diese zusätzlichen Informationen nicht zu übertragen. Aus diesem Grund müssen Methoden entwickelt werden, die Knicklinien in der Schiffsform sicher erkennen können.

Bei einer Beschreibung der Schiffsform durch parametrische Flächen können Knicklinien auf zwei verschiedene Arten modelliert sein:

- innerhalb der parametrischen Fläche:

Bei mehrfacher Verwendung des gleichen Knotenwertes oder durch mehrfache Verwendung des gleichen Kontrollpunktes wird die Differentiationsordnung der Fläche an der Stelle des Knotenwertes bzw. Kontrollpunktes reduziert, bei nicht mehr gegebener C^1 -Stetigkeit entsteht ein Knick. In parametrischen Flächen können Knicke nur entlang einer isoparametrischen Linie definiert werden.

- entlang der Randkurve benachbarter Teilflächen:

Die beiden Teilflächen werden so erzeugt, dass an ihrem gemeinsamen Rand nur C^0 -Stetigkeit vorliegt.

Bei der Untersuchung von mit sieben verschiedenen CAD-Systemen¹ erstellten Schiffsformen im IGES-Format stellte sich heraus, dass bei keiner die Knicke direkt in den parametrischen Flächen definiert wurden; alle Schiffsformbeschreibungen nutzten die zweite Möglichkeit. Deshalb wurde die Entscheidung getroffen, bei der Implementierung der Knickerkennungsmethoden vorerst nur Knicke zu berücksichtigen, die als gemeinsame Randkurven benachbarter Teilflächen beschrieben sind. Bei einer Berücksichtigung von Knicken innerhalb parametrischer Flächen können diese so aufbereitet werden, dass sie ebenfalls als Randkurven zweier Teilflächen bearbeitet werden können. Dazu wird die Teilfläche, die einen Knick enthält, entlang der entsprechenden isoparametrischen Kurve geteilt. Die dadurch entstehenden neuen Flächen werden in das B-Rep-Modell eingearbeitet, wodurch der Knick als Grenze zwischen Einzelflächen zur Verfügung steht.

Für die automatische Erkennung der Knicklinien der Schiffsform gibt es zwei grundsätzlich

¹Autoship, Fastship, Ideas, Microstation, Napa, Rhinoceros, Unigraphics

verschiedene Varianten: die Verwendung der parametrischen Flächen, also des B-Rep-Modells, oder die Verwendung des zuvor beschriebenen Dreiecksnetzes. Beide Methoden wurden implementiert und sollen kurz vorgestellt werden.

Eine sehr schnelle Knicksuche vergleicht die Flächennormalen zweier benachbarter Flächen an ihrem gemeinsamen Rand. Eine Skizze dieser Methode ist in Abbildung 6.1 zu sehen.

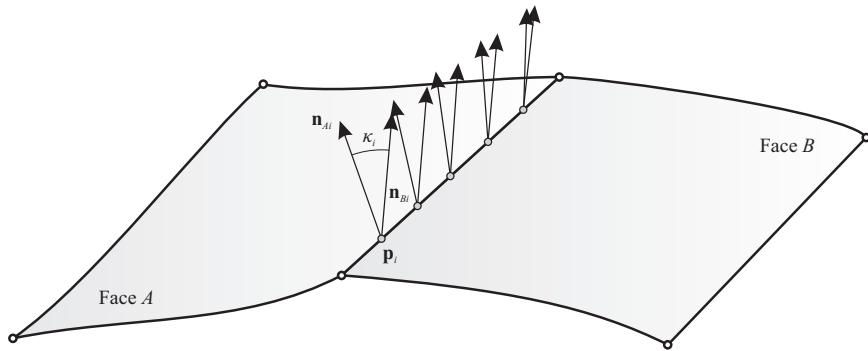


Abbildung 6.1: Knickidentifikation durch Vergleich von Flächennormalen

Zuerst wird auf allen gemeinsam verwendeten Edges eine Reihe von gleichmäßig verteilten Punkten berechnet. Mit einem Punktabstand von ca. 0,3 % der Schiffslänge wurde bei den verwendeten Testschiffen ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit der Knickidentifikation und Rechengeschwindigkeit erzielt. Es muss darauf geachtet werden, dass keiner der Punkte direkt am Anfang oder am Ende der Edge liegt, da bei dreieckigen Flächen die Flächennormalen in den Ecken häufig fehlerhaft berechnet werden². Die Punkte werden iterativ auf jede der an die Edge angrenzenden Faces „projiziert“. Das Ergebnis sind zweidimensionale Koordinaten im jeweiligen Parametergebiet der Flächen, die es ermöglichen, die Flächennormalen \mathbf{n}_{Ai} und \mathbf{n}_{Bi} an der Stelle des Punktes \mathbf{p}_i zu berechnen. Anschließend werden die Winkel κ_i zwischen den zusammengehörenden Normalen berechnet und über die Edge gemittelt:

$$\kappa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{n}_{Ai} \cdot \mathbf{n}_{Bi}}{|\mathbf{n}_{Ai}| \cdot |\mathbf{n}_{Bi}|}$$

Diese Art der Knickidentifikation ist sehr schnell, aber zu ungenau, da die durch die beiden Flächennormalen aufgespannte Ebene nicht immer senkrecht zur Tangente an die gemeinsam verwendete Randkurve im Punkt \mathbf{p}_i liegt. In diesem Fall werden Knickwinkel berechnet, obwohl beide Flächen glatt aneinander grenzen. Aufgrund dieses Problems wurde eine zweite Methode auf Basis der parametrischen Flächen entwickelt, die in Abbildung 6.2 skizziert ist.

Ähnlich wie bei der vorherigen Methode werden auf den zu untersuchenden Edges gleichmäßig verteilte Punkte berechnet. Bei dieser Methode kann die Anzahl der Punkte reduziert werden: ein Abstand von ca. 0,45 % der Schiffslänge führte bei den untersuchten Beispielschiffen zu guten

²Die Flächennormale wird in Open Cascade als das Vektorprodukt der beiden Tangenten an die Fläche im betreffenden Punkt berechnet. Für die Tangentenberechnung werden die beiden durch den betreffenden Punkt definierten Kurven in die beiden Parameterrichtungen verwendet. Dreiseitige Flächen werden in IGES durch parametrische Flächen mit einer zu einem Punkt degenerierten Randkurve modelliert. Wenn der interessierende Punkt auf einer solchen degenerierten Kurve liegt, kann die Tangente an diese Kurve nicht berechnet werden.

Ergebnissen. Für jeden der Vergleichspunkte wird eine Schnittebene $E_i : \mathbf{e}_i(\mathbf{x} - \mathbf{p}_i) = 0$ ermittelt, die durch den Punkt \mathbf{p}_i verläuft und die Tangente \mathbf{e}_i an die Edge in diesem Punkt als Ebenennormale besitzt. Beide an die untersuchte Edge angrenzenden Faces werden mit jeder dieser Schnittebenen geschnitten. Die resultierenden Schnittkurven werden genutzt, um den Knickwinkel zwischen beiden Flächen zu berechnen. Dafür wird der Winkel zwischen den Tangenten \mathbf{a}_i und \mathbf{b}_i an die Schnittkurven in den an der zu untersuchenden Edge liegenden Endpunkten der Schnittkurven berechnet. Der resultierende Knickwinkel ist wie zuvor der Mittelwert aller Einzelwinkel:

$$\kappa = \pi \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_i}{|\mathbf{a}_i| \cdot |\mathbf{b}_i|}$$

Diese Methode ist wesentlich genauer als die zuvor beschriebene, erfordert jedoch die etwa 20-fache Rechenzeit, so dass eine alleinige Verwendung dieser Methode nicht sinnvoll ist. Der beste Weg ist die Kombination beider Rechenmethoden. Zuerst wird die schnelle Normalenmethode angewendet mit einer erhöhten Winkeltoleranz für die Entscheidung, ob eine Edge einen Knick bildet. Wenn diese Methode eine Edge als Knick identifiziert, wird dies durch erneute Berechnung mit der genaueren Schnittmethode validiert.

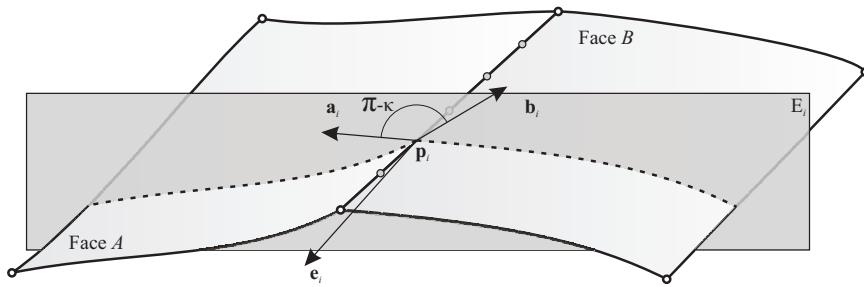


Abbildung 6.2: Knickidentifikation durch Vergleich der Tangenten von Schnittkurven

Bei einem „perfekt“ modellierten Schiff sollte der Winkel zwischen den Flächennormalen benachbarter Teilflächen null sein, wenn mindestens C^1 -Stetigkeit und somit kein Knick vorliegt. Dies wird in der Praxis nicht erreicht. Die Untersuchung aller verfügbaren Beispielschiffe ergab, dass bei besonders sorgfältig³ modellierten Schiffsformen der Schwellenwert für die Knickerkennung auf 5° gesetzt werden kann. Da jedoch üblicherweise der arbeitsaufwändige Feinstrak einer Schiffsform erst zum Ende des Entwurfsprozesses durchgeführt wird, werden viele der für CFD-Rechnungen verwendeten Schiffsformbeschreibungen Ungenauigkeiten enthalten, die einen größeren Grenzwinkel erfordern. Ein Winkel von 15° ergab mit allen untersuchten Beispielschiffen zufrieden stellende Ergebnisse. Die Information, ob eine Edge einen Knick darstellt, wird für die spätere Verwendung den B-Rep-Edges zugeordnet gespeichert.

Die automatische Knickerkennung auf Basis des Dreiecksnetzes ist vergleichsweise einfach. Wenn eine Kante des Dreiecksnetzes auf einer B-Rep-Edge liegt, ist diese Information in der Dreieckskanne gespeichert (siehe Abb. 5.7). Hierdurch kann die Anzahl der zu prüfenden Dreiecksseiten auf diejenigen beschränkt werden, die auf B-Rep-Edges liegen. Für diese Dreiecksseiten werden die Winkel zwischen den Normalen der angrenzenden Dreiecke berechnet. Durch die Diskretisierung der Schiffsform durch das Dreiecksnetz geht eine eventuell vorhandene C^1 -Stetigkeit verloren,

³wenig dreieckige Flächen, regelmäßige Teilflächen, Feinstrak

zwischen benachbarten Dreiecken kann nur noch C^0 -Stetigkeit (also ein Knick) bestehen. Aus diesem Grund muss der Schwellenwert für einen Knick größer sein als bei der zuvor beschriebenen Methode. Mit einem Winkel von 30° wurden alle für die Netzgenerierung relevanten Knicke zuverlässig erkannt. Die dabei irrtümlich als Knick identifizierten Dreieckskanten beschränken sich auf einzelne, nicht zusammenhängende Dreieckskanten, die später von der weiteren Verwendung ausgeschlossen werden.

Aus allen Dreieckskanten mit einem Knickwinkel $> 30^\circ$ werden zusammenhängende Polygone gebildet. Anschließend wird versucht, diese Polygone zu verbinden, weil innerhalb einer Knickkurve einzelne Dreieckskanten mit dem Schwellenwert von 30° nicht als Knick erkannt werden könnten. Hierfür werden weitere Dreieckskanten gesucht, die einen Knickwinkel zwischen 20° und 30° besitzen. Mit Hilfe dieser verbindenden Kanten ist es möglich, die vollständige Knicklinie als Polygon aus Dreieckskanten zu erstellen.

Sowohl die auf den parametrischen Flächen basierende Knickidentifikationsmethode als auch die Verwendung der Triangulierung der Schiffsfläche funktionieren zufriedenstellend; alle für die Panelnetzgenerierung wichtigen Knicke in den zur Verfügung stehenden Beispielschiffen werden erkannt. Abbildung 6.3 zeigt Beispiele von Schiffen mit Knicke in ihrer Rumpfform, die erfolgreich erkannt wurden. Die Methoden, die direkt mit der Form der Schiffsfläche arbeiten, also die Schnittmethode und die auf dem Dreiecksnetz basierende, erkennen mit größerer Sicherheit relevante Knicke. Die Rechenzeit ist bei der Knickerkennung mit Hilfe des Dreiecksnetzes am kürzesten. Bedingt durch die feinere Aufteilung der Knickkanten in einzelne Dreiecke ermöglicht diese Methode auch eine genauere Identifikation von Knicke, die in der glatten Schiffsfläche auslaufen. Bei den direkt mit den Flächen arbeitenden Methoden ist es aufwändiger, nur einen Teil einer B-Rep-Edge als Knick zu erkennen.

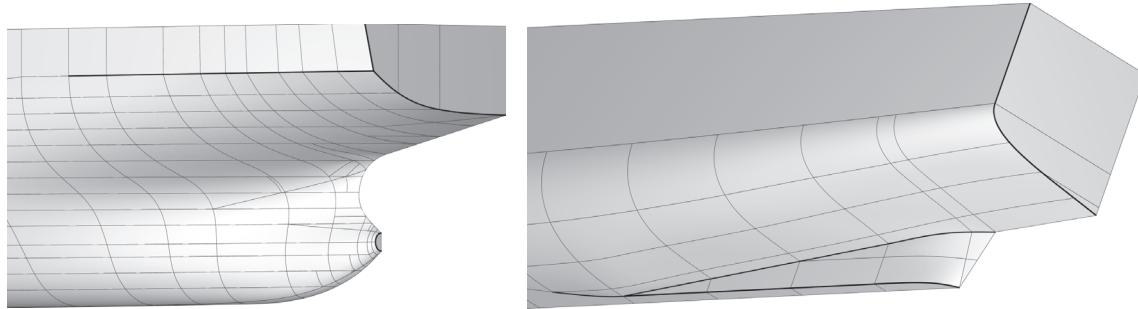


Abbildung 6.3: Verschiedene typische Knicke im Hinterschiffsbereich

Wenn mehrere Teilknicke aneinander grenzen wird versucht, diese Knicke miteinander zu verbinden. Hierfür ist ein weiterer Grenzwinkel notwendig. Bei den verfügbaren Beispielschiffen konnte ein maximaler Unterschied in den Tangenten an die Knickkurven in deren aneinander passenden Endpunkten von 40° zugelassen werden. Dadurch ist es möglich, bei dem links dargestellten Schiff in Abbildung 6.3 den richtigen Verlauf des Knicks zwischen Spiegelheck und „Restrumpf“ zu ermitteln und diesen von dem in Längsrichtung verlaufenden Knick zu trennen. Aufgrund der geringen Anzahl von Testschiffen muss der gewählte Grenzwinkel von 40° genauer validiert werden.

Bei vielen Schiffen führt sowohl eine ungenaue, aber auch eine für Netzgenerierungszwecke zu detaillierte Geometriebeschreibung zum Auffinden unerwünschter oder nicht relevanter Knicke,

wie z.B. dem Knick parallel zum Steven in Abbildung 6.4.

Derartige Knicke müssen bei der späteren Weiterbearbeitung gesondert behandelt werden. In den meisten Fällen haben diese fehlerhaften Knicke allerdings eine sehr kurze Länge und können somit sicher erkannt und ausgeschlossen werden.

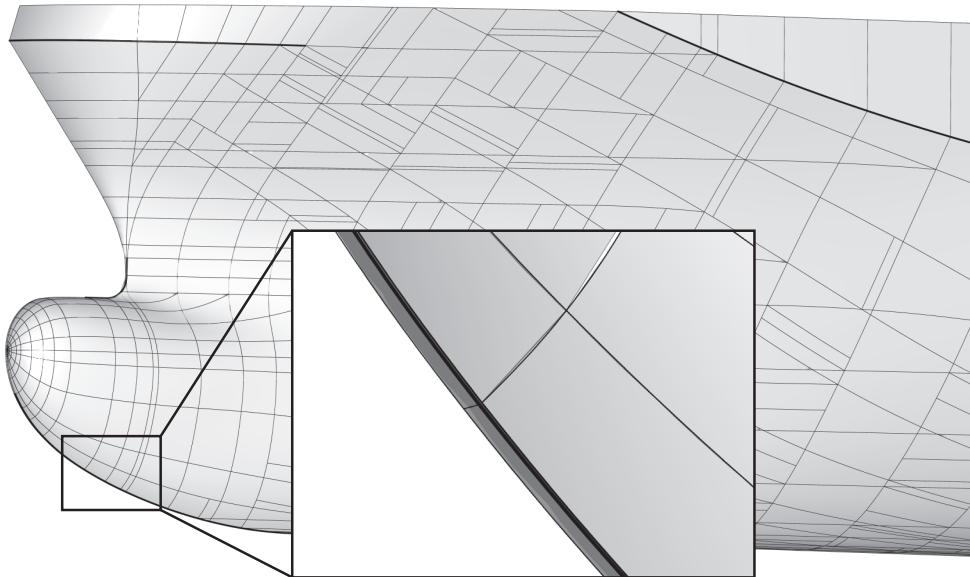


Abbildung 6.4: Für Netzgenerierung nicht relevanter Knick parallel zum Steven

7 Identifikation charakteristischer Schiffsformbereiche

In Kapitel 3 wurde die Arbeitsweise verschiedener Programme zur Netzerstellung vorgestellt. Die Programme aus dem Bereich des Schiffbaus haben eine Gemeinsamkeit: sie erfordern eine Aufteilung der gesamten Schiffsform in Teilbereiche, die jeweils gesondert bearbeitet werden. Hierfür gibt es verschiedene Gründe. Entscheidend ist die Art des erstellten Netzes. Um strukturierte Netze in hoher Qualität erstellen zu können, muss die komplex geformte Schiffsform in einfachere Bereiche gegliedert werden, die zu einer geringen Verzerrung der einzelnen Elementen führen. Auch die Veränderung der Panelgröße über die Schiffsform erfordert bei dieser Art von Panelnetzen zwangsläufig voneinander getrennte Netzbereiche. Ein weiterer Grund gilt auch für alle anderen Panelnetzformen: bestimmte Bereiche wie z.B. die Spiegelfläche oder der Bereich oberhalb der Wasseroberfläche werden nicht vernetzt, demzufolge sind diese Bereiche zu identifizieren und entsprechend zu behandeln. Auch durch die besondere Berücksichtigung spezieller Details eines Schiffsrumms kann die Qualität des erzeugten Panelnetzes verbessert werden. Beispiele hierfür sind die unterschiedlichen Bugwulstformen oder ein Skeg im Hinterschiff.

Eine wichtige Aufgabe des Anwenders von Panelnetzgenerierungsprogrammen liegt in der Beurteilung der Schiffsform und der Erfassung ihrer speziellen Besonderheiten. Die Bestimmung der für das zu erstellende Panelnetz am besten geeigneten Aufteilung des Schiffsrumms in Einzelregionen erfordert das Wissen und die Erfahrung des Nutzers. In Abbildung 7.1 ist ein Beispiel für die Aufteilung einer Schiffsform in Teilbereiche dargestellt.

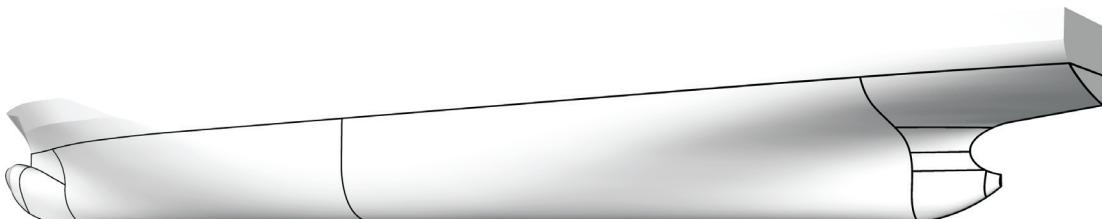


Abbildung 7.1: Beispiel der Aufteilung einer Schiffsform in Teilbereiche für die Panelnetzerzeugung

Für die weitere Beschreibung der automatischen Netzgenerierung werden die Teilbereiche als (Teil)Regionen bezeichnet, demzufolge wird das die Aufteilung der Schiffsform beschreibende Datenmodell als Regionenmodell bezeichnet. Bei der Entwicklung einer automatischen Netzgenerierungsmethode müssen entweder die Arbeitsschritte und damit die Erfahrung des Ingenieurs zur Regionenaufteilung in einem Computerprogramm abgebildet werden oder es ist eine Methode zu entwickeln, die auf die Erstellung eines solchen Regionenmodells nicht angewiesen ist. Beide Lösungswege wurden untersucht und werden im Folgenden vorgestellt.

Da diese unterschiedlichen Wege der Netzgenerierung die Erstellung des Regionenmodells beeinflussen, werden sie in den folgenden Beschreibungen des Regionenmodells häufig erwähnt und müssen hier als Vorgriff kurz umrissen und voneinander abgegrenzt werden.

1. (Block)strukturierte Vernetzung

- detailliertes Regionenmodell
- wissensbasiert
- auf parametrischen Flächen basierende Implementierung

2. Unstrukturierte Vernetzung

- einfaches Regionenmodell
- keine spezielle Berücksichtigung von Schiffsformdetails
- auf Dreiecksapproximation der Schiffsform basierende Implementierung

Die erste Netzgenerierungsmethode bildet die Arbeitsschritte des Anwenders einer manuellen Vernetzung in einem Computerprogramm ab. Derartige Methoden werden oft als wissensbasierte Methoden bezeichnet. Bei dieser Vorgehensweise wird versucht, möglichst viele Details und Besonderheiten der Schiffsform zu erkennen und für alle erdenklichen Konstellationen Vorgehensweisen zu implementieren. Hierfür wurden eine Reihe von Standardregionen definiert, die letztlich das Regionenmodell beeinflussen. Jede einzelne Region soll dabei so beschaffen sein, dass mit einem einheitlichen Vernetzungsalgorithmus strukturierte Viereckelemente erzeugt werden können.

Bei der zweiten Methode wird auf ein detailliertes Regionenmodell verzichtet. Dies stellt höhere Anforderungen an den Algorithmus zur Erstellung der Elemente. Dieser muss in der Lage sein, in Form und Größe sehr unterschiedliche Teilbereiche zu vernetzen.

Für beide Vorgehensweisen stellt das Regionenmodell das zentrale Datenmodell dar, das Einfluss auf die Generierung der Elemente hat. Obwohl dieses Modell unterschiedlich für die verschiedenen Vernetzungsmethoden ist, hat es einige Gemeinsamkeiten, die hier im Detail beschrieben werden sollen.

Für die Implementierung wurde ein Datenmodell verwendet, das dem B-Rep-Modell ähnelt (siehe Abbildung 7.2). Es wurden die Klassen *RegionVertex*, *RegionEdge* und *RegionWire* definiert, die miteinander verknüpft sind. Ein *RegionVertex* stellt einen Verbindungsknoten zwischen *RegionEdges* dar und entspricht geometrisch einem Punkt im kartesischen Koordinatensystem. Die *RegionEdges* verbinden zwei *RegionVertices*. Sie enthalten als geometrisches Element eine Kurve.

Für die erste Vernetzungsmethode wurden alle geometrischen Berechnungen auf den parametrischen Flächen der IGES-Datei durchgeführt. Somit enthält die *RegionEdge* Kurven der verschiedenen durch die Geometriebibliothek bereitgestellten Typen. Bei der zweiten Vernetzungsmethode wurde ausschließlich das bereits beschriebene Dreiecksnetz genutzt. Die *RegionEdges* sind dabei geometrisch durch Polygone definiert (siehe Abbildung 7.3). Die Polygonpunkte sind Punkte des Dreiecksnetzes.

Wie beim B-Rep-Modell werden mehrere *RegionEdges* zu einem *RegionLoop* verbunden. Die *RegionEdges* müssen dabei einen geschlossenen Umlauf bilden. Auf eine explizite Beschreibung der von einem *RegionLoop* berandeten Fläche kann verzichtet werden. Für die auf den para-

RegionVertex	RegionEdge	RegionLoop
<ul style="list-style-type: none"> - point: gp_Pnt - edges: →RegionEdge [1..*] + getPoint(): gp_Pnt + nBEdges(): int + getEdge(i: int): →RegionEdge + removeEdge(e: →RegionEdge) + ... 	<ul style="list-style-type: none"> - ep1: →RegionVertex - ep2: →RegionVertex - curves: →Geom_Curve [1..*] - polygons: →TriaPoly [1..*] - direction: str - subdivision: int + getVertex1(): →RegionVertex + getVertex2(): →RegionVertex + getNearestPoint(): gp_Pnt + getSubdivision(): int + ... 	<ul style="list-style-type: none"> - edges: →RegionEdge [1..*] - name: str - mesh: →TriangleMesh - panelMesh: →PanelMesh - leftEdges: →RegionEdge [1..*] - ... - topEdges: →RegionEdge [1..*] - left: →Geom_Curve - ... - top: →Geom_Curve - surface: →Geom_Surface + getEdge(i: int): →RegionEdge + interpolateSurface() + ...

Abbildung 7.2: Auszug des Datenmodells zur Speicherung der Regionen

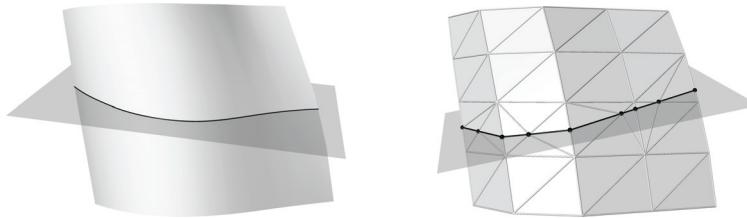


Abbildung 7.3: Geometrische Beschreibung einer RegionEdge: Kurven oder Polygone

metrischen Flächen basierende Vernetzungsmethode wird die Fläche nicht benötigt; für die auf dem Dreiecksnetz basierende Methode kann die Fläche sehr schnell ermittelt werden, da die RegionEdges durch im Dreiecksnetz enthaltene Punkte definiert sind. Einigen Teilregionen wird eine Bezeichnung zugeordnet, um sie später in spezieller Weise zu berücksichtigen.

Viele der RegionEdges entstehen durch Schnitte der Schiffsform mit Ebenen. Für die weitere Arbeit ist es hilfreich, wenn die Ausrichtung solcher RegionEdges im Koordinatensystem des Schiffs bekannt ist. Oft ist die Ausrichtung der Schnittebene und damit die der RegionEdge bekannt und wird in der RegionEdge gespeichert als eine von zwei Richtungen: *horizontal* für eine überwiegend in x-Richtung verlaufende Kurve und *vertical* für in y- oder z-Richtung bzw. in Spanrichtung verlaufende Kurven. Die Wasserlinie ist z.B. eine horizontale RegionEdge, die Hauptspantkontur eine vertikale RegionEdge.

Die Erstellung des Regionenmodells lässt sich in verschiedene Unteraufgaben gliedern, die im Folgenden vorgestellt werden. Einige Arbeitsschritte sind spezifisch für eine der Vernetzungsmethoden, sollen aber für eine bessere Übersichtlichkeit hier im Zusammenhang dargestellt werden. Dabei ist vereinzelt ein Vorgriff auf die Beschreibung der Vernetzungsmethoden notwendig.

7.1 Ausgangsmodell und Wasseroberfläche

Im Ausgangszustand beschreibt das Regionenmodell die gesamte zu vernetzende Schiffsfläche als eine zusammenhängende Region. Die obere Begrenzung wird dabei durch die Wasserlinie

gebildet, die sich über die Iterationen der Wellenwiderstandsberechnung verändert. Für eine gute Qualität des Panelnetzes soll die sich ändernde Wasseroberfläche berücksichtigt werden. Einige derzeit verwendete Rechenprogramme wie z.B. ν -Shallo ändern die oberste Reihe der Panels, um die veränderte Form der Wasseroberfläche zu berücksichtigen. Dadurch entstehen teilweise stark verzerrte Elemente, die nicht mehr den Anforderungen des Rechenverfahrens genügen. Andere Programme (z.B. Kelvin) erzeugen das Netz in an die Wasseroberfläche grenzenden Teilbereichen vollständig neu. Hierdurch wird eine ungünstige Form der Elemente verhindert.

Die entwickelten Vernetzungsmethoden sollen die sich ändernde Wasseroberfläche berücksichtigen und unabhängig von der aktuellen Wasserlinie ein Panelnetz gleichbleibender Qualität erzeugen. Hierzu muss dem Vernetzungsalgorithmus die Form der Wasseroberfläche zur Verfügung stehen. Dies wird durch eine Datei realisiert, welche die auf die Mittschiffsebene projizierte Wasserlinie enthält, diskretisiert durch eine hohe Zahl von Punkten. Die Punkte werden für die Approximation einer B-Spline-Kurve verwendet, aus der durch lineare Interpolation (*ruled surface*) in Querrichtung des Schiffes eine Wasseroberfläche berechnet wird.

Für die Integration der Wasserfläche in das Regionenmodell muss die auf dem Schiffsrumpf liegende Wasserlinie berechnet werden. Bei Verwendung der parametrischen Flächen wird der die Wasserfläche umhüllende Quader berechnet (im Folgenden als *bounding box* bezeichnet). Bei der anschließenden Berechnung der Schnittkurven zwischen der Wasserfläche und den Teilflächen der Schiffsformbeschreibung wird die bounding box zur Vorauswahl der Einzelflächen verwendet (Reduzierung der Rechenzeit).

Für die Berechnung der Wasserlinienkurve mit Hilfe der Dreiecksapproximation des Schiffsrumpfes ist mehr Aufwand nötig, dafür ist die Rechenzeit kürzer. Zuerst wird die Lage aller Punkte des Dreiecksnetzes bezüglich der bounding box der Wasserfläche ermittelt. Anschließend werden die Punkte gesucht und in einer Liste gespeichert, die im Inneren dieser bounding box und innerhalb einer kleinen Toleranz auf der Wasseroberfläche liegen. Dann werden alle Dreiecksseiten der übrigen in der bounding box liegenden Punkte untersucht. Für jede Kante wird der Schnittpunkt einer durch die Kante definierten Geraden mit der Wasserfläche berechnet. Gültige Schnittpunkte sind die, die auf der Dreiecksseite liegen. Diese Punkte werden in das die Schiffsform darstellende Dreiecksnetz durch Teilung der entsprechenden Dreiecksseite eingefügt, gleichzeitig werden sie in der Liste der auf der Wasseroberfläche liegenden Punkte gespeichert. Als Resultat liegt die Wasserlinie am Schiff als Polygon aus Punkten des Approximationsnetzes vor.

Das Ausgangsregionenmodell wird nun erzeugt aus zwei RegionVertices, die die Schnittpunkte der Stevenkontur mit der Wasseroberfläche darstellen. Diese Punkte werden durch die Stevenkontur zwischen den beiden Punkten und die Wasserlinienkurve verbunden. Das letztlich gebildete RegionLoop besteht also aus zwei RegionVertices und zwei RegionEdges und beschreibt die Kontur der gesamten zu vernetzenden Unterwasserschiffsfläche, siehe auch Abbildung 7.4¹.

¹Panelnetze für ν -Shallo werden bis weit über die Wasserlinie erzeugt, während der Rechnung werden über der Wasseroberfläche liegende Panels nicht berücksichtigt. Um mit den erzeugten Panelnetzen Testrechnungen durchführen zu können und in Ermangelung der genauen Tiefgangsdaten für den größten Teil der verwendeten Beispielschiffe wird hier eine fiktive Form der Wasseroberfläche verwendet, die auf dem größtmöglichen Tiefgang angenommen wird.

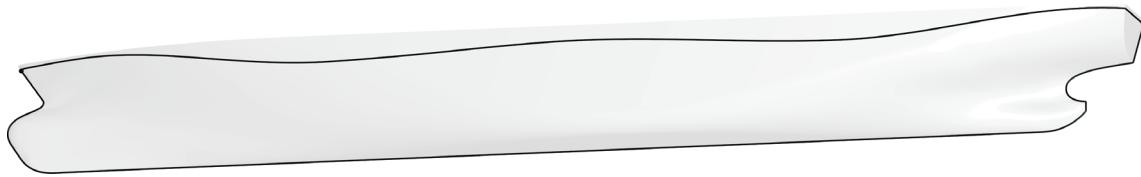


Abbildung 7.4: Ausgangsregionenmodell: Stevenkontur und Wasserlinie

7.2 Erstellung von Teilregionen

Je nach Schiffstyp muss das anfängliche Regionenmodell für die Vernetzung in weitere Bereiche untergliedert werden. Das Regionenmodell muss alle für die Netzgenerierung bedeutsamen Details der Schiffsform in einer Form wiedergeben, die eine automatische Netzgenerierung möglich macht. Dieser Aufgabe kommt eine zentrale Bedeutung im Rahmen der automatischen Netzgenerierung zu. Sie ersetzt direkt den Anwender eines manuellen Vernetzungsprogramms mit seiner Fähigkeit, in Abhängigkeit vom Schiffstyp eine Strategie zur Erstellung eines bestmöglichen Panelnetzes zu entwickeln. Die Aufgabe lässt sich zusammenfassend als die Identifikation spezieller Besonderheiten des Schiffes und die Erstellung leicht zu vernetzender Teilbereiche beschreiben.

In diesem Abschnitt werden alle dafür nötigen Berechnungen dargestellt. Es wird beschrieben, wie wichtige Merkmale eines Schiffsrumpfes automatisch gefunden und im Regionenmodell beschrieben werden. Die Auswahl wichtiger Merkmale orientiert sich an den zur Verfügung stehenden Beispielschiffen. Sie ist nicht vollständig, kann aber den größten Teil gebauter Schiffe abdecken. Als Ergänzung zu den im IGES-Format vorhandenen Testschiffen wurden ca. 250 Modellschiffe im Modelllager der HSVA begutachtet. Hierbei konnte ein breites Spektrum von Schiffsformen genutzt werden, um besondere Teilbereiche und deren Größenverhältnisse zu erkennen. Die in den folgenden Beschreibungen zu findenden Angaben zu Abmessungen einzelner Merkmale einer Schiffsform beruhen auf den Vergleichsschiffen, die zur Verfügung standen.

Folgende Details eines Schiffsrumpfes werden in das Regionenmodell eingefügt, da sie entweder für die Netzgenerierung zwingend notwendig sind oder diese vereinfachen:

- Hauptspant
- Spiegelheck
- Bugwulst
- Einschrauber-Heckwulst
- Stevenrohrendfläche
- Zweischrauber-Center-Skeg

Das Regionenmodell wird in erster Linie für die wissensbasierte Vernetzungsmethode benötigt. Bei dieser Vorgehensweise werden strukturierte Panelnetze mit viereckigen Elementen in den einzelnen Regionen erzeugt. Voraussetzung hierfür ist, dass alle Einzelregionen vierseitig berandet sind. Um dies sicherzustellen, wird die im folgenden vorgestellte Reihenfolge der Einarbeitung der Teilregionen genutzt. Alle Teilregionen werden so in das bestehende Regionenmodell eingefügt, dass alle bearbeiteten Regionen vierseitig berandet sind bzw. bleiben.

7.2.1 Hauptspant

Der Hauptspant ist zwar nicht unbedingt notwendig für die Netzgenerierung, soll aber trotzdem in das Regionenmodell integriert werden. Er ermöglicht eine einfache Steuerung der Elementgröße und wird auch bei der manuellen Netzerstellung häufig als Begrenzung eines Blockes verwendet. So ist es z.B. möglich, die Elementgröße in Schiffslängsrichtung so zu verteilen, dass die Elemente am Hauptspant am größten sind und zum Bug und Heck hin kleiner werden. Durch die kleineren Elemente kann eine bessere Auflösung der Strömungsverhältnisse in den besonders interessierenden Bereichen an Bug und Heck erreicht werden. Eine weitere Größenanpassung kann entlang der Kurve des Hauptspantes vorgenommen werden. Es ist möglich, im Bereich der Kimm die Elemente zu verkleinern, um die dort stärker gekrümmte Schiffsform besser abzubilden. In Abbildung 7.5 ist ein Beispiel eines Regionenmodells mit eingefügtem Hauptspant dargestellt.

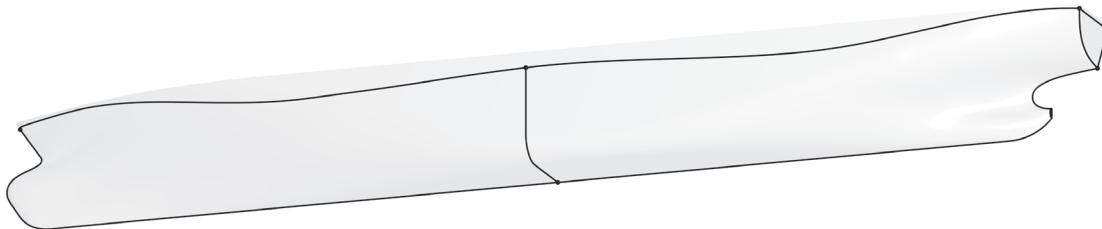


Abbildung 7.5: Ausgangsregionenmodell mit Hauptspant und Spiegelheck

7.2.2 Spiegelheck

Ein Merkmal, das nahezu alle Handelsschiffe besitzen, ist das Spiegelheck. Ein Spiegelheck ist durch einen Knick vom Rest des Schiffsrumpfes abgeteilt. In der Realität kommt es zu einer Ablösung der Strömung an diesem Knick. Weil solche Ablösungsvorgänge durch Potentialverfahren nicht abgebildet werden können, erfordern die meisten Rechenprogramme, dass die Fläche des Spiegelhecks nicht vernetzt wird. Dafür ist es nötig, die Spiegelfläche vom Rest der Schiffsform abzuteilen, der Knick muss also in das Regionenmodell eingefügt werden. Damit das dabei entstehende RegionLoop des Hecks später bei der Vernetzung *nicht* berücksichtigt wird, ist es mit einer Bezeichnung zu versehen.

Für die Identifikation des Spiegelhecks werden die zuvor gefundenen Knicke untersucht.

- Zuerst können diejenigen Knicke aufgrund ihrer Lage ausgeschlossen werden, die nicht im hinteren Drittel des Schifffes liegen.
- Als zweite Bedingung muss die Ausdehnung in y-z-Richtung größer sein als die in x-Richtung, was über die bounding box der Knickkurve geprüft wird.
- Die dritte Bedingung erfordert, dass einer der Endpunkte innerhalb einer Toleranz auf der Deckskontur des Schifffes liegt.

Durch diese drei Kriterien ist es bei allen Schiffen möglich, die Kurve des Spiegelknicks zu finden. Nach dem Beschneiden dieser Kurve mit der Wasseroberfläche kann sie in das Regionenmodell eingefügt werden. In Abbildung 7.5 ist ein Beispiel dargestellt.

7.2.3 Bugwulst

Die meisten modernen Schiffe besitzen einen Bugwulst. Hier treten starke Änderungen der Umströmungsgeschwindigkeit auf, weshalb dieser Bereich des Schiffes bei der Berechnung besonders zu berücksichtigen ist. Die Form des Bugwulstes hat einen signifikanten Einfluss auf den Wellenwiderstand. Das bedeutet, dass eine schlechte Approximation durch das Panelnetz einen besonders großen Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses hat. Außerdem wird beim Vergleich verschiedener Schiffsformvarianten zur Minimierung des Wellenwiderstandes hauptsächlich der Bugbereich verändert, da Formänderungen im Hinterschiffsbereich durch dort auftretende Ablösungserscheinungen mit Potentialverfahren nicht ausreichend genau beurteilt werden können. Der Einfluss des Bugwulstes erfordert eine besonders sorgfältige Vernetzung dieses Bereiches.

Die Untersuchung von Modellschiffen der HSVA zeigte, dass unter der großen Vielfalt von Bugwulstformen zwei Grundformen im Hinblick auf die Panelnetzgenerierung existieren:

- sehr kurze und völlige Bugwulstformen, überwiegend an Tankern, hier als Tankerbugwulst bezeichnet
- längere, schlanke Wulstformen, bei schnelleren Schiffen, im Folgenden als Normalbugwulst bezeichnet

Somit können die verschiedenen Bugwülste nach zwei Vorgehensweisen vernetzt werden. Für die automatische Netzerzeugung müssen die zwei Bugwulstgrundformen sicher voneinander unterschieden werden.

Der erste Schritt besteht in der Klärung der Frage, ob das Schiff überhaupt einen Bugwulst besitzt. Die hierfür durchzuführenden Tests sind in Abbildung 7.6 schematisch dargestellt.

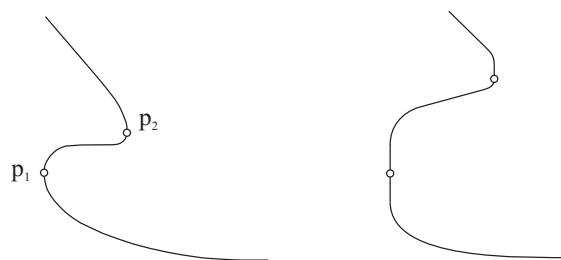


Abbildung 7.6: Charakteristische Punkte zur Identifikation eines Bugwulstes

Untersucht wird der vor dem Hauptspant liegende Teil der Stevenkontur. Er wird durch ein Polygon diskretisiert; der maximal zulässige Abstand von der Kurve ist die in der IGES-Datei definierte Auflösung. Unter den Polygonpunkten wird iterativ durch Verfeinerung der Diskretisierung das erste lokale Maximum der x-Koordinate gesucht. Unter allen diesem Punkt benachbarten Punkten, deren x-Koordinaten in einem kleinen Toleranzbereich gleich dem ersten x-Maximum sind, wird der mittlere gewählt und als p_1 gespeichert. Der Punkt p_1 stellt die Spitze eines möglicherweise vorhandenen Bugwulstes dar. Wenn dieser Punkt in der Nähe des oberen Endpunktes der Vorderstevenkontur liegt, hat das untersuchte Schiff keinen Bugwulst. Die Berücksichtigung einer größeren Zahl von Punkten in der Umgebung des ersten x-Maximums ist notwendig, um auch Bugwulstformen mit längerem vertikalem Verlauf des Vorstevens (siehe rechte Seite von Abbildung 7.6) bearbeiten zu können. Durch eine weitere iterative Suche nach einem auf p_1

folgenden x-Minimum wird der Punkt p_2 ermittelt. Dieser Punkt wird zur Kennzeichnung des hinteren Endes des Bugwulstes verwendet.

Für die Beurteilung der Form des Bugwulstes werden verschiedene Abmessungen und deren Verhältnisse verwendet, siehe Abbildung 7.7. Für die Bestimmung der Breite des Bugwulstes wird ein Spantschnitt in der Mitte zwischen den Punkten p_1 und p_2 berechnet.

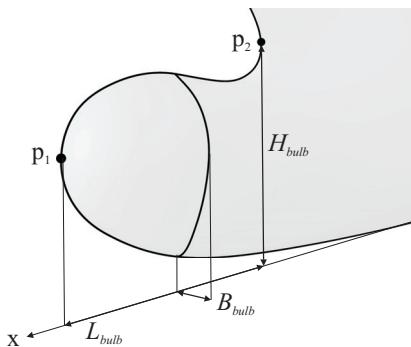


Abbildung 7.7: Bugwulstabmessungen

Vor weiteren Tests zur Unterscheidung zwischen Normal- und Tankerbugwulst muss eine Sonderform eines Bugwulstes berücksichtigt werden: der Sonardom von Marineschiffen. Durch seine Größenabmessungen würde er als Tankerbugwulst bearbeitet werden, was zu schlechten Panelnetzen führt. Bei einem Verhältnis von Schiffslänge zu Bugwulstlänge

$$\frac{L_{oa}}{L_{bulb}} > 50$$

muss vor der weiteren Unterscheidung geprüft werden, ob es sich bei dem Bugwulst um einen Sonardom handelt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird die Erkennung und Bearbeitung eines Sonardoms gesondert im Abschnitt 7.2.4 (S. 67 ff.) beschrieben.

Wenn der Bugwulst kein Sonardom ist, wird anhand des Verhältnisses von Bugwulstlänge und -höhe nach Abbildung 7.7 der Typ des Bugwulstes festgelegt. Bei

$$\frac{L_{bulb}}{H_{bulb}} < 0.45$$

wird der Bugwulst als Tankerbugwulst identifiziert, anderenfalls wird er wie ein Normalbugwulst bearbeitet. Abbildung 7.8 stellt einen typischen Tankerbugwulst (oben links) dem eines Containerschiffes (oben rechts) gegenüber. Der unten links abgebildete kurze Bugwulst eines Containerschiffes wird aufgrund seiner Größenverhältnisse wie der Bugwulst eines Tankers behandelt. Unten rechts ist ein Bugwulst eines Fährschiffes zu sehen, der durch sein Verhältnis von Länge zu Höhe als Normalbugwulst bearbeitet wird.

Einige Bugwülste sind nicht mit glattem Übergang zum Rest des Rumpfes in die Schiffsform eingestrakt, sondern mit einem in Strömungsrichtung ausgerichteten Knick. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.8 oben rechts zu sehen. Wie bereits erläutert, sollen derartige Knicke durch das Panelnetz berücksichtigt werden. Eine einfache Möglichkeit hierfür ist die Verwendung des Knicks als Regionengrenze. Für die Suche nach diesem Knick wird geprüft, ob eine der zuvor gefundenen Knickkurven die folgenden Kriterien erfüllt:

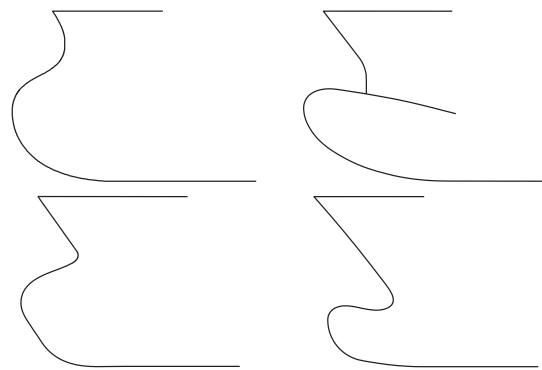


Abbildung 7.8: Beispiele verschiedener Bugwulstformen

- Abstand eines Endpunktes der Knickkurve zum Punkt p_2 kleiner als $10 \cdot \text{IGES-Auflösung}$
- Ausrichtung der Knickkurve in x-Richtung (Abmessungen der bounding box des Knickes)
- Mindestlänge der Knickkurve von $0,015 \cdot L_{oa}$

Nachdem die charakteristischen Merkmale des Bugwulstes bestimmt sind, kann er in das Regionenmodell eingefügt werden. Hierbei werden beide Typen unterschiedlich behandelt. Die resultierenden Regionenmodelle eines Tanker- und eines Normalbugwulstes sowie eines Normalbugwulstes mit Knick sind in Abbildung 7.9 dargestellt.

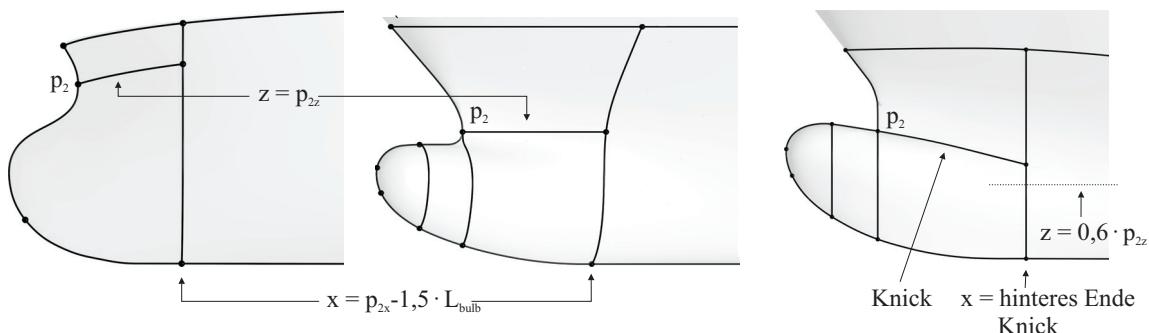


Abbildung 7.9: Regionenmodelle für verschiedene Bugwülste

Bei Bugwülsten ohne Knick wird der gesamte Bugbereich durch einen Spantschnitt im Abstand der 1,5-fachen Bugwulstlänge hinter dem Punkt p_2 abgetrennt. Falls es sich um einen Bugwulst mit Knick handelt, bestimmt das hintere Ende der Knickkurve die Position dieses Spantschnittes. Damit die hintere vertikale Begrenzung einer Bugwulstregion mit Knick nicht zu klein wird, wird die Knickkurve gekürzt, wenn ihr hinteres Ende unter $0,6 \cdot p_{2z}$ liegt.

Anschließend wird der Bugwulst in vertikaler Richtung vom Rest des Bugs abgegrenzt. Bei einem Bugwulst ohne Knick wird eine Schnittkurve durch Schnitt des Schiffsrumpfes mit einer Ebene durch p_2 (parallel zur x-y-Ebene) als obere Begrenzung der Bugwulstregion verwendet.

Bei einem Bugwulst mit Knick wird die Knickkurve als vertikale Begrenzung verwendet. Unter Umständen reicht diese Knickkurve nicht exakt bis zum Punkt p_2 (siehe Abbildung 7.10). In einem solchen Fall muss sie entsprechend verlängert werden. Da dieses Problem bei allen weiteren in das Regionenmodell einzufügenden Knicken ebenfalls auftreten kann, soll die Verlängerung

an dieser Stelle ausführlicher erläutert werden. Für die Verlängerung werden zuerst die in der näheren Umgebung liegenden Edges des B-Rep-Modells darauf untersucht, ob sie ohne starke Tangentenunstetigkeit in die Knickkurve integriert werden können. In vielen Fällen reicht eine weitere Edge, um den Anschluss der Knicklinie an p_2 herzustellen. Wenn dies nicht möglich ist, wird eine Schnittebene erstellt, die sowohl durch das vordere Ende der Knickkurve als auch durch p_2 verläuft und deren Normale in der x-z-Ebene liegt. Die aus dem Schnitt dieser Ebene mit dem Schiffsrumpf resultierende Kurve kann verwendet werden, um den Knick bis zum Punkt p_2 zu verlängern.

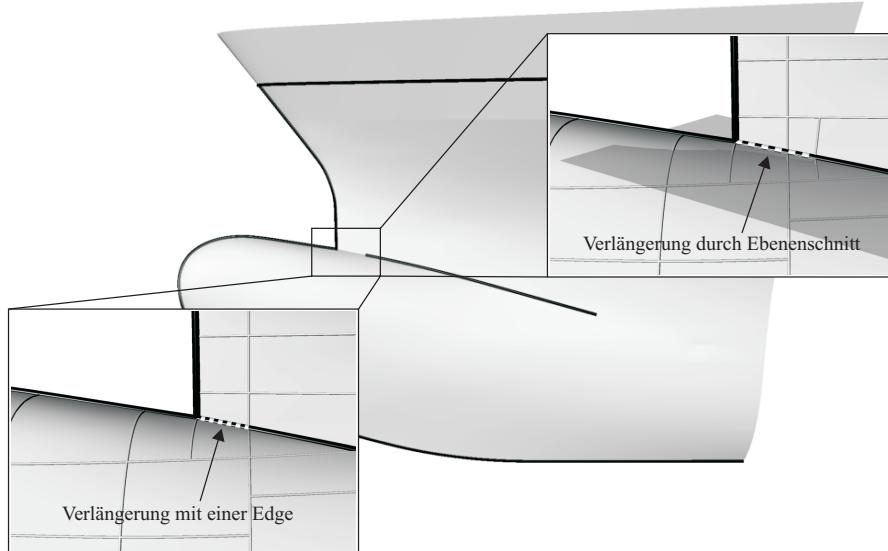


Abbildung 7.10: Verlängerung von Knicklinien

Der verbleibende Arbeitsschritt bei einem Tankerbugwulst ist die Teilung einer RegionEdge, um eine vierseitige Regionenfläche zu erzeugen. Hierzu wird die die Stevenkontur darstellende RegionEdge so geteilt, dass das hintere untere Ende genau so lang ist wie die obere horizontale Abtrennung. Aus der betreffenden RegionEdge entstehen zwei RegionEdges mit einem zusätzlichen RegionVertex (siehe linker Teil von Abbildung 7.9). Durch die Einstellung ähnlicher Längen gegenüberliegender RegionEdges wird eine geringe Verzerrung der Panelnetzelemente erreicht.

Die Region eines Normalbugwulstes erfordert weitere Unterteilungen, die in den beiden rechten Teilbildern von Abbildung 7.9 zu erkennen sind. Die abgebildete Konfiguration der Bugwulstregion hat sich beim manuellen Erstellen von Panelnetzen bewährt und führt mit dem implementierten strukturierten Vernetzungsalgorithmus zu den geringsten Verzerrungen der Elemente an der Bugwulstspitze. Es werden zwei Spantschnittkurven eingebunden; die Lage der hinteren wird durch den Punkt p_2 bestimmt, die vordere liegt in der Mitte zwischen p_1 und p_2 . Die dadurch entstehende Region an der Spitze des Bugwulstes besteht aus nur zwei RegionEdges. Durch zweifache Teilung der die Stevenkontur bildenden RegionEdge und Einfügen zweier neuer RegionVertices wird auch hier eine vierseitige Teilregion erzeugt. Die Teilung wird so ausgeführt, dass die Länge der vorderen Kurve 25 % der Länge der hinteren vertikalen Begrenzung beträgt und die obere Randkurve genau so lang ist wie die untere.

7.2.4 Sonardom

Der Sonardom eines Marineschiffes stellt eine Sonderform eines Bugwulstes dar und muss anders bearbeitet werden als die zuvor beschriebenen Bugwulsttypen. Wenn das Verhältnis von Schiffslänge zu Bugwulstlänge > 50 ist, muss geprüft werden, ob der Bugwulst ein Sonardom ist. Dazu wird ein Spantschnitt an einer Stelle

$$x = p_{2x} - 2,0 \cdot L_{bulb}$$

berechnet. Bei einem Sonardom unterscheidet sich diese Spantkontur grundsätzlich von der eines „normalen“ Bugwulstes, siehe Abbildung 7.11. Zur Erkennung dieser Unterschiede durch den Algorithmus werden auf dem Spantschnitt lokale Extremwerte in y-Richtung gesucht. Der Punkt p_u bezeichnet das untere Ende der Spantschnittrkurve. Die Punkte p_s und p_o sind das erste Maximum in y-Richtung und das darauf folgende y-Minimum. Anhand des Höhen- und Breitenverhältnisses der drei Punkte wird entschieden, ob es sich um einen Sonardom handelt: bei

$$\frac{|p_o - p_{u_z}|}{p_{s_y}} < 3,0$$

wird der Bugwulst als Sonardom behandelt.

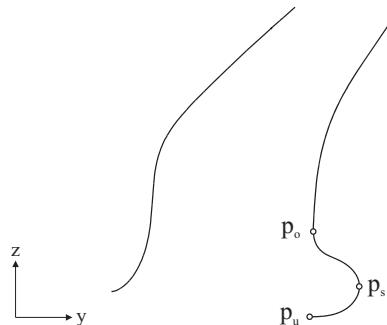


Abbildung 7.11: Spantschnitt durch einen Normalbugwulst (links) und einen Sonardom (rechts)

Die Erstellung des Regionenmodells für einen Sonardom ist komplexer als für normale Bugwülste. Zuerst wird nach der Stelle der größten Dicke des Sonardoms gesucht. Dazu werden zwei Schnittkurven mit dem Schiffsrumpf berechnet, siehe Abbildung 7.12. Die horizontale Schnittkurve wird durch den Punkt p_1 definiert, der Spantschnitt wird an der größten Breite der horizontalen Schnittkurve berechnet.

Die genaue Länge des Sonardoms wird mit Hilfe einer großen Zahl von Spantschnitten bestimmt, siehe Abbildung 7.13. Zu jeder dieser Spantkurven werden zwei charakteristische Punkte ermittelt:

- das erste lokale y-Maximum, vom unteren Ende des Spantschnittes ausgehend. Dieser Punkt definiert die Breite des Sonardoms.
- ein Punkt, der dem doppelten Abstand des y-Maximums vom Kurvenanfang in z-Richtung entspricht. Dieser Punkt hat sich bei verschiedenen Sonardom-Formen als geeignet für die Definition der oberen Regionengrenze erwiesen.

Die Berechnung der Spantschnitte wird abgebrochen, sobald kein lokales y-Maximum ermittelt

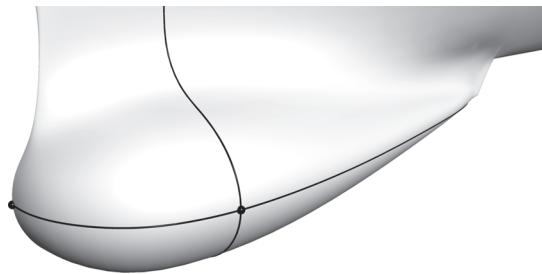


Abbildung 7.12: Schnittkurven zur Bestimmung der größten Breite eines Sonardoms

werden kann. In der Nähe dieser Stelle muss sich das hintere Ende des Sonardoms befinden. Für die genaue Ermittlung des hinteren Endpunktes des Sonardoms wird eine Schnittebene erzeugt, deren Normale \mathbf{n} sich aus dem Kreuzprodukt eines Vektors \mathbf{v} vom Punkt maximaler Breite des vordersten Spantschnittes zum gleichen Punkt auf dem letzten Spantschnitt mit der y -Achse ergibt. Der hintere Schnittpunkt der Stevenkontur mit dieser Ebene ist das hintere Ende des Sonardoms.

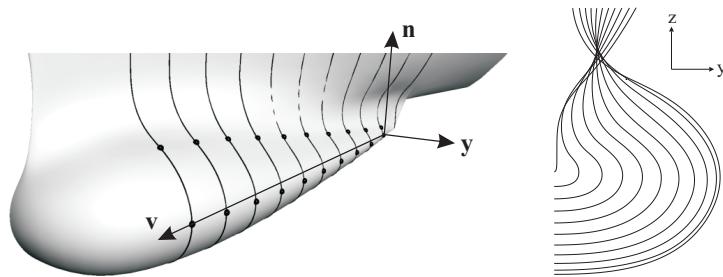


Abbildung 7.13: Spantschnitte eines Sonardoms zur Ermittlung des hinteren Endes

Die obere Begrenzung des Sonardoms wird durch eine Kurve beschrieben, die durch den Sonardom-Endpunkt und die oberen Spantschnittpunkte interpoliert wird. In Abbildung 7.14 ist diese Kurve dargestellt.

Viele Sonardome sind vom Schiffsrumpf nach unten abgesetzt, ihr hinterer Endpunkt liegt unterhalb des Schiffsbodens. In einem solchen Fall kann die Qualität des Panelnetzes durch eine weitere Region über dem Sonardom verbessert werden. Die obere Begrenzung dieser Region wird durch eine Schnittkurve gebildet, deren Berechnung in Abbildung 7.14 dargestellt ist. Die Ebenen-normale \mathbf{n} ist wieder das Kreuzprodukt der y -Richtung mit einem Vektor \mathbf{v} durch den Endpunkt des Sonardoms und den oberen Punkt auf dem vordersten Spantschnitt. Für eine Verschiebung dieser Schnittebene wird der Punkt gesucht, der auf der Stevenkontur von vorne kommend hinter dem Sonardom-Endpunkt liegt und die gleiche z -Koordinate wie der Schiffsboden besitzt. Die Schnittebene wird entlang ihrer Normale soweit verschoben, dass der zuvor beschriebene Punkt in der Ebene liegt.

Das resultierende Regionenmodell ist in Abbildung 7.15 zu sehen. Die kleine dreieckige Region stellt eine Besonderheit dar. Die Größe dieser Region ist so gewählt, dass sie mit genau einem dreieckigen Panel vernetzt werden kann. Dadurch ist es möglich, die direkt davor liegende Region mit den automatischen Vernetzungsmethoden zu bearbeiten, die vierseitige Regionen erfordern.

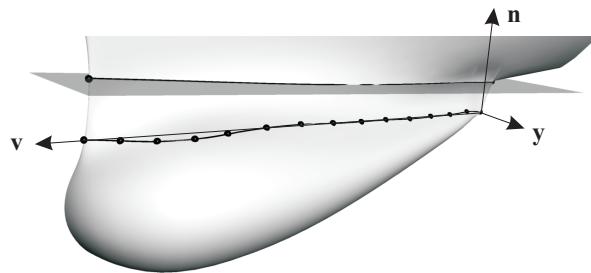


Abbildung 7.14: Obere Begrenzungen der Region des Sonardoms

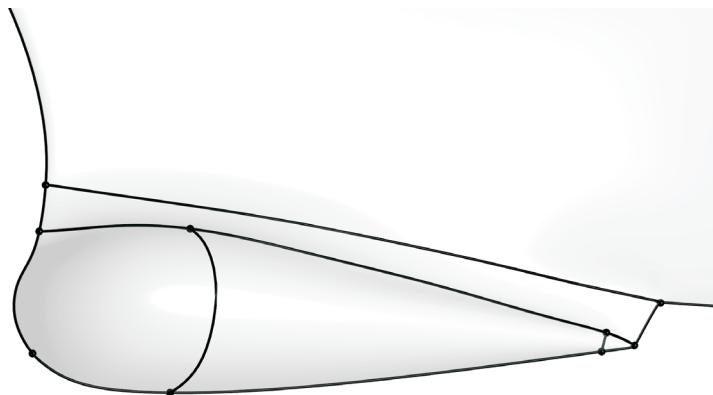


Abbildung 7.15: Regionenmodell eines Sonardoms

7.2.5 Heckwulst

Die Identifizierung eines Heckwulstes geschieht mit Hilfe der Stevenkontur, die auf ihr hinteres Drittel und ihre untere Hälfte reduziert wird. Auf der verbleibenden Kurve wird durch iterative Verfeinerung ihrer Diskretisierung der Punkt gesucht, der vom vorderen Kurvenende ausgehend das erste lokale Minimum der x-Koordinate darstellt. Wenn der gefundene Punkt am hinteren Ende der bei ihrer halben Höhe abgeschnittenen Stevenkontur liegt, besitzt das untersuchte Schiff keinen Heckwulst. Ein gültiger Punkt liegt in der Nähe des Stevenrohrendes. Ein solcher Punkt ist im linken Teil der Abbildung 7.16 mit p_1 bezeichnet. Anschließend wird der Teil der Stevenkurve unterhalb dieses Punktes entfernt. Auf der verbleibenden Kurve wird iterativ der nächste Punkt mit maximaler x-Koordinate gesucht (p_2 in Abb. 7.16).

Für die Erstellung des Regionenmodells werden von p_2 ausgehend in beide Richtungen auf der Stevenkurve die Punkte p_3 und p_4 ermittelt. Die Position dieser Punkte ist durch ihre Abstände in x- und z-Richtung von p_2 bestimmt. Es wird jeweils der erste Punkt verwendet, für den gilt:

$$|p_{2x} - p_{3,4x}| \geq 0,4 \cdot |p_{2z} - p_{3,4z}|$$

Dieses Abstandsverhältnis ist ein Erfahrungswert, der sich bei der manuellen Erstellung von Panelnetzen bewährt hat. Die Punkte p_3 und p_4 bestimmen die Position zweier zur y-z-Ebene parallelen Schnittebenen. Mit diesen Ebenen werden zwei Schnittkurven berechnet, die jeweils auf ihnen über- bzw. unterhalb der Punkte p_3 und p_4 liegenden Teil reduziert und als RegionEdges

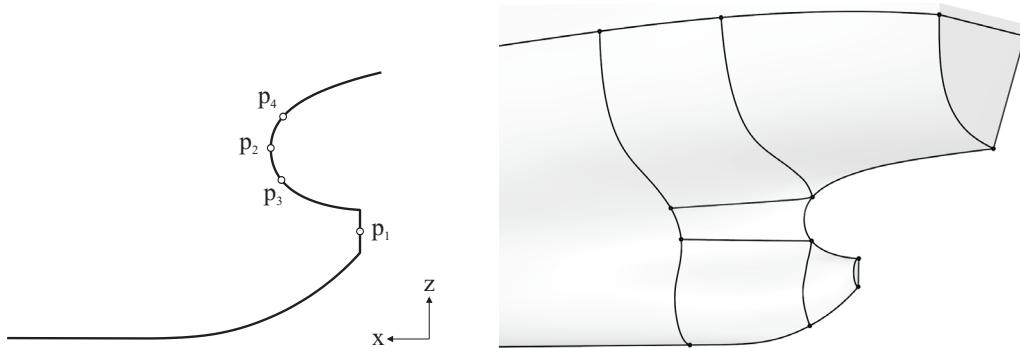


Abbildung 7.16: Regionenmodell eines Einschrauber-Heckwulstes

in das Regionenmodell eingefügt werden. Ein weiterer Spantschnitt wird an der Stelle

$$x = p_{2x} + 0,35 \cdot L_{oa}$$

berechnet und als vordere Begrenzung der Regionen des Heckwulstes in das Regionenmodell eingefügt. Zum Schluss werden zwei horizontale Schnittkurven durch die Punkte p_3 und p_4 berechnet. Diese Kurven teilen die durch die drei vorherigen Spantschnitte abgetrennte Region in drei weitere, später leichter zu bearbeitende Teile. Das gesamte Regionenmodell eines Heckwulstes ist im rechten Teil von Abbildung 7.16 dargestellt.

7.2.6 Stevenrohrendfläche

Eine kleines, aber dennoch wichtiges Detail ist die meistens kreisförmige Fläche an der Stelle eines Heckwulstes, an der die Propellerwelle aus dem Schiffsrumphf austritt (siehe erstes Teilbild von links in Abbildung 7.17). Dieser Bereich umfasst oft nur zwei bis drei Panels. Bei einem Modellversuch würde die Strömung an der Kante abreissen. Da dies mit Hilfe der Potentialtheorie nicht abgebildet werden kann, behilft man sich, indem durch das Panelnetz eine „Kappe“ über dieser Fläche modelliert wird.

Für das Regionenmodell muss der Knick gefunden werden. Dazu wird nach einer Knicklinie gesucht, die folgende Kriterien erfüllt:

- der Knick liegt im hinteren Drittel des Schiffes
- die bounding box des Knicks hat über die geometrische Toleranz hinaus keine Ausdehnung in x-Richtung
- die Endpunkte der Knicklinie liegen auf der Stevenkontur

Die ermittelte Knickkurve wird direkt in das Regionenmodell eingebunden.

Es kommt vor, dass Schiffsformen für CFD-Rechnungen bereits mit einer Kappe über der Stevenrohrendfläche modelliert worden sind (siehe zweites Teilbild von links in Abbildung 7.17). Von einer solchen Konfiguration wird ausgegangen, wenn das Schiff einen Heckwulst besitzt, aber die zuvor beschriebene Knickkurve nicht ermittelt werden konnte. In diesem Fall wird eine Schnittkurve berechnet, die anschließend wie die Knickkurve weiter verwendet werden kann. Dazu werden von der Spitze der Kappe (p_1 in Abb. 7.16) ausgehend auf der Stevenkontur zwei

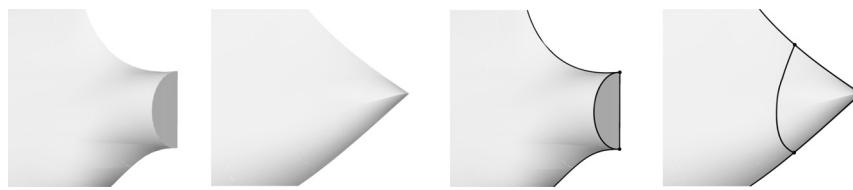


Abbildung 7.17: Regionenmodell für Propellerwelle

Punkte ermittelt, deren Abstand zueinander etwa $0,00635 \cdot L_{oa}$ ist. Dieser Abstand wurde als Mittelwert der Stevenrohrdurchmesser aller zur Verfügung stehenden Vergleichsschiffe gefunden. An der x-Position dieser Punkte wird ein Spantschnitt ermittelt. Die Schnittkurve wird als Ersatz für die dort eigentlich existierende Knickkurve in das Regionenmodell eingefügt und im Weiteren genauso behandelt wie eine „echte“ Knickkurve.

7.2.7 Skeg

Ein letztes näher zu beschreibendes Detail ist das Center-Skeg eines Zweischaubenschiffes. Die Entscheidung, ob das untersuchte Schiff ein Skeg besitzt, wird anhand eines Spantschnittes an der Stelle

$$x = x_{min} + \frac{L_{oa}}{6}$$

getroffen. L_{oa} und x_{min} beziehen sich hierbei auf die bounding box des gesamten Schiffsrumptes. Dieser und weitere Vergleichswerte wurden wieder anhand der Skeg-Abmessungen und -positionen der zur Verfügung stehenden Vergleichsschiffe bestimmt. Mögliche Grundformen dieses Spantschnittes sind in Abbildung 7.18 dargestellt.

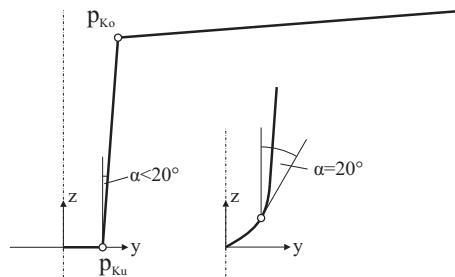


Abbildung 7.18: Spantschnitt zur Identifizierung eines Center-Skegs

Der Spantschnitt wird diskretisiert und es wird der erste Punkt p_i gesucht, an dem die Tangente an die Kurve einen Winkel $\alpha < 20^\circ$ zur z-Achse besitzt:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{(p_{i+1z} - p_{iz}) \cdot 1,0}{\sqrt{(p_{i+1x} - p_{ix})^2 + (p_{i+1y} - p_{iy})^2 + (p_{i+1z} - p_{iz})^2}} \right)$$

Der Abstand dieses Punktes zur Mittschiffsebene entscheidet über die Existenz eines Skegs. Bei einem Schiff ohne Skeg wird dieser Punkt etwa in der Größenordnung der halben Schiffsbreite

von der Mittschiffsebene entfernt liegen. Wenn der Punkt weniger als 10 % der Schiffsbreite von der Mittschiffsebene entfernt liegt, wird angenommen, dass das Schiff ein Center-Skeg besitzt.

Für die Erstellung eines Regionenmodells sind weitere Informationen über das Skeg erforderlich. Aus der Seitenansicht des Skegs müssen zwei charakteristische Punkte des hinteren Endes ermittelt werden. Zwei Beispiele für verschiedene Konturen eines Skegs sind in Abbildung 7.19 dargestellt.

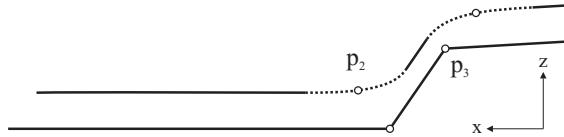


Abbildung 7.19: Schematische Kontur eines Skegs, Seitenansicht

Die häufigste Form ist die untere, das Skeg hat zwei deutlich zu erkennende hintere „Ecken“. Diese Eckpunkte sind bei der Erstellung des Regionenmodells zu berücksichtigen. Für die Suche nach diesen Punkten wird die Stevenkontur des Schiffes auf ihr hinteres Sechstel begrenzt und diskretisiert. Zu jedem Punkt p_i wird die Richtungsänderung β der angrenzenden Polygonsegmente ($\mathbf{r}_1 = p_i - p_{i-1}$; $\mathbf{r}_2 = p_{i+1} - p_i$) und die Krümmung κ der diskretisierten Kurve berechnet:

$$\beta(p_i) = \arcsin \left(\frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1| \cdot |\mathbf{r}_2|} \right)$$

$$\kappa(p_i) = \frac{2(\pi - \beta(p_i))}{|\mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2|}$$

Vom vorderen Ende der Stevenkurve beginnend wird zuerst versucht, die gesuchten Eckpunkte als Knicke in der Kurve zu finden. Hierbei wird ein Punkt als Knickpunkt angenommen, wenn der Winkel der zugehörigen Kurventangente zur vorherigen Tangente $> 35^\circ$ ist². Zur Vereinfachung der Beschreibung soll der vordere, untere Punkt als p_2 und der hintere, obere Punkt als p_3 bezeichnet werden. Wenn einer oder beide dieser Punkte nicht gefunden werden konnten, wurde das Skeg mit Rundungen an den betreffenden Stellen modelliert. Um dennoch vergleichbare Punkte für die Erstellung des Regionenmodells zu erhalten, wird die Krümmung der Stevenkurve verwendet. Es werden die beiden Kurvenbereiche mit der größten Krümmung gesucht; die entsprechend der Kurvenlänge mittleren Punkte dieser Bereiche werden als die gesuchten Punkte p_2 und p_3 verwendet.

Ein weiteres Merkmal zur Unterscheidung verschiedener Skegs sind zwei typische Knicke. Einer dieser Knicke trennt die ebene Unterseite eines Skegs vom oberen Teil des Skegs ab, der andere liegt an der Verbindungsstelle des Skegs mit dem Schiffsrumpf. Beispiele für diese Knicke sind in der Darstellung des resultierenden Regionenmodells in Abbildung 7.20 auf S. 73 zu sehen. Beide Knicke sind nicht bei jedem Skeg vorhanden.

Um zu entscheiden, nach welchen Knicke gesucht werden muss, wird erneut der Spantschnitt untersucht, der zur Identifikation des Skegs verwendet wurde (Abb. 7.18). An diesem Spantschnitt werden von unten beginnend die ersten beiden Knickpunkte gesucht, die in diesem Fall nur ein Viertel der Schiffsbreite von der Mittschiffsebene entfernt sein dürfen. Die Punkte werden entsprechend ihrer Position als p_{Ku} und p_{Ko} bezeichnet. Bei dem rechts in Abbildung 7.18 dargestellten

²mittlerer Knickwinkel der Stevenkontur aller untersuchten Skegformen

Skeg würde der Punkt p_{Ku} nicht existieren. Falls einer oder beide Punkte vorhanden sind, wird nach den zugehörigen Knicklinien gesucht. Folgende Kriterien werden zur Auswahl der passenden Knicklinie verwendet:

- die Knicklinie muss vollständig in der hinteren Schiffshälfte liegen
- die Knicklinie muss vollständig in der unteren Schiffshälfte liegen
- der Knick muss überwiegend in Längsrichtung verlaufen (bounding box: $\Delta x \geq 2 \cdot \Delta y$, $\Delta x \geq 2 \cdot \Delta z$)
- p_{Ku} bzw. p_{Ko} muss auf der Knicklinie liegen

Zuletzt wird eine vordere Begrenzung des Skegs ermittelt. Bei Existenz eines der zuvor beschriebenen Knicke kann dessen vorderes Ende als Begrenzung des Skegs verwendet werden. Wenn kein Knick vorhanden ist, wird das vordere Ende des Skegs durch eine Reihe von Spantschnitten ermittelt. Diese Spantschnitte liegen vor p_2 , die x-Position wird iterativ ermittelt. Das vordere Skeg-Ende wird dort angenommen, wo anhand der Spantschnittkurve kein Skeg mehr erkennbar ist. Dazu wird die Entfernung des ersten vertikalen Abschnittes der Spantschnittkurve in y-Richtung von der Mittschiffsebene bestimmt. Wenn dieser vertikale Abschnitt weiter als $B/8$ von der Mittschiffsebene entfernt liegt, handelt es sich um die Seite des Schiffsrumptes, ein Skeg ist nicht vorhanden.

Bei der Erstellung des Regionenmodells werden die einzelnen Details der verschiedenen Ausführungen eines Skegs berücksichtigt. Bei allen Varianten wird als hintere Begrenzung ein Spantschnitt an der Position des Punktes p_3 berechnet und in das Regionenmodell eingefügt. Die vordere Abgrenzung der Skeg-Region wird ebenfalls durch einen Spantschnitt realisiert. Falls die obere Knicklinie nicht vorhanden ist, wird der Spantschnitt am zuvor ermittelten vorderen Ende des Skegs berechnet. Andernfalls könnte das vordere Ende der oberen Knicklinie als Position des vorderen Spantschnittes genutzt werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass am vorderen Ende der Skeg-Region keine spitzwinklige Ecke zwischen den RegionEdges entsteht. Zu diesem Zweck wird der Spantschnitt vom vorderen Ende des oberen Knicks so weit nach hinten verschoben, bis der mit der oberen Knicklinie entstehende Schnittpunkt eine Höhe über dem Schiffsdeck besitzt, die ungefähr der Länge einer späteren Panelkante entspricht. In Abbildung 7.20 ist die dadurch erzeugte *nicht* spitzwinklige Regionenecke zu sehen. Nach Anpassung der oberen Knicklinie an die vordere und hintere Begrenzung kann auch diese Kurve in das Regionenmodell eingefügt werden.

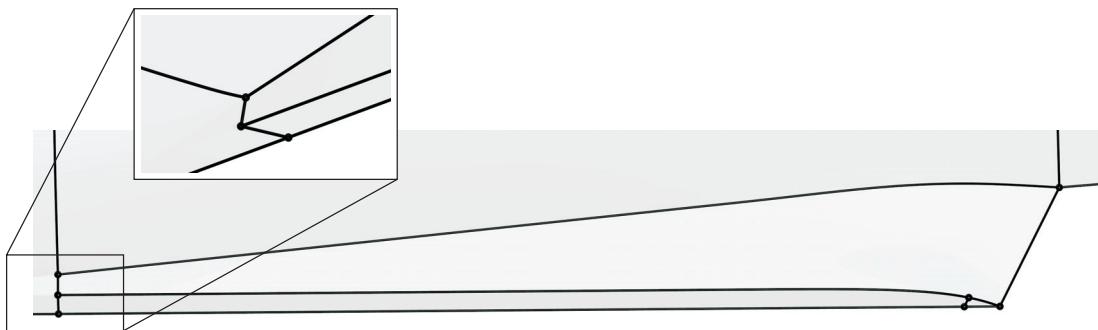


Abbildung 7.20: Regionenmodell eines Skegs mit Knicken

Wenn die möglicherweise vorhandene untere Knicklinie in das Regionenmodell eingefügt wird, entsteht dadurch eine die ebene Bodenfläche des Skegs beschreibende Region, die durch mindestens eine Reihe von Panels zu vernetzen ist. Oft ist die Unterseite eines Skegs jedoch so schmal, dass nur sehr kleine Panels verwendet werden können. Dadurch ist es erschwert, die Forderung gleichmäßiger Größenverhältnisse benachbarter Elemente an der Seite des Skegs und an dessen vorderen Ende einzuhalten. Bei der manuellen Netzerstellung hat es sich als zweckmäßig erwiesen, auf die Panellierung des Skegbodens zu verzichten, wenn dieser schmäler als drei Viertel der Panelkantenlänge ist. Die untere Knicklinie wird nur in das Regionenmodell eingefügt, wenn ein Punkt in der Mitte dieses Knicks einen größeren Abstand als 75 % der Panelkantenlänge zur Mittschiffsebene besitzt.

Falls ein unterer Knick eingefügt wurde, wird ähnlich wie zuvor beim Sonardom eine kleine dreieckige Region am hinteren Ende erstellt. Diese Region wird durch genau ein Panel vernetzt und sichert eine vierseitige Restfläche zu.

Auch wenn der Bodenknick nicht eingefügt wird, sollte die RegionEdge, die die Stevenkontur im Bereich des Skegs darstellt, trotzdem geteilt werden. Dazu wird an der Stelle des Punktes p_2 ein RegionVertex eingefügt. Zum einen wird dadurch sichergestellt, dass die Ecke p_2 des Skegs exakt durch die Paneelemente dargestellt wird, zum anderen wird bei alleiniger Verwendung eines oberen Knicks die Vierseitigkeit der gesamten Region zugesichert.

Ohne oberen und unteren Knick bestünde die Skeg-Region aus genau vier Seiten (siehe Abb. 7.21). Trotzdem muss der Eckpunkt p_2 eingefügt werden, um die Ausrichtung der dabei entstehenden kleinen Teilkurve der Steven-Edge zu berücksichtigen. Bei horizontaler Ausrichtung (Winkel $< 45^\circ$ zur x-Achse) bildet diese RegionEdge zusammen mit der anderen Edge des Stevens eine der vier Seiten für die Netzgenerierung. Bei vertikaler Ausrichtung wird diese Edge dem hinteren Spantschnitt zugeordnet.

Das resultierende Regionenmodell eines Skegs mit oberem und unterem Knick sowie echten hinteren „Ecken“ wurde in Abbildung 7.20 dargestellt. Abbildung 7.21 zeigt eine Skeg-Region ohne einen der beiden Knicke.

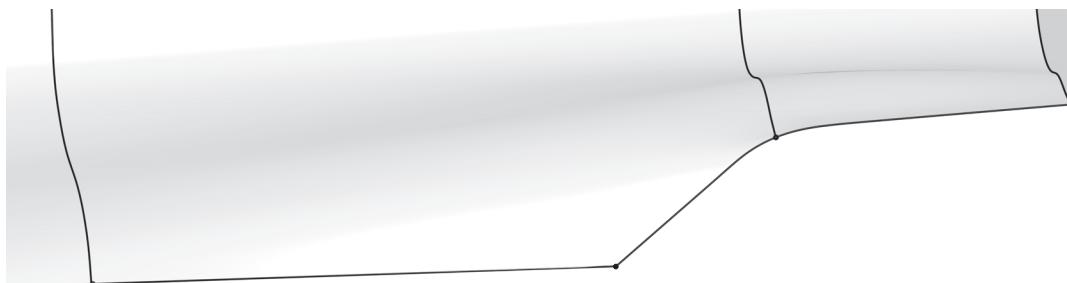


Abbildung 7.21: Regionenmodell eines Skegs ohne Knicke

7.2.8 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurde die Erstellung von Teilregionen des Regionenmodells eines Schiffes beschrieben. Dieses Regionenmodell ist hauptsächlich für den wissensbasierten

Vernetzungsansatz (beschrieben in Abschnitt 8.2 auf S. 84 ff.) von Bedeutung. Einzelne Bearbeitungsschritte zur Identifizierung wichtiger Details einer Schiffsform werden jedoch auch für die allgemeinere Vernetzungsmethode (Abschnitt 8.3, S. 95 ff.) benötigt. Die beschriebenen und implementierten Methoden wurden ausgewählt, weil sie eine Bearbeitung der am häufigsten an Schiffen auftretenden Details ermöglichen. Nach Analyse der Modellschiffe der HSVA kann geschätzt werden, dass ca. 90 % aller Schiffsformen mit den beschriebenen Methoden bearbeitet werden können. Unter den verbleibenden Schiffen sind besonders Zweischaubenschiffe, deren Bearbeitung noch nicht implementiert werden konnte. Hierfür ist es erforderlich, auch z. B. Doppel-Skegs oder zwei Propellergondeln zu berücksichtigen, was mit den vorgestellten Arbeitsschritten keine Schwierigkeiten bereiten sollte. Mit dem beschriebenen Ansatz zur Identifikation spezieller Merkmale und der Erstellung eines Regionenmodells werden nicht alle Schiffsformen bearbeitet werden können. Es wird immer Schiffsformen geben, die sich einer systematischen Einordnung entziehen. Ebenso wird es neue, bisher nicht berücksichtigte Schiffsformen geben, die eine Anpassung der vorgestellten Methoden erforderlich machen. Ein Beispiel hierfür ist die Form des Bugwulstes. Abbildung 7.22 zeigt einen auf der Oshima-Werft in Japan gebauten bulk carrier mit einer neuartigen Bugform.



Abbildung 7.22: Neue Bugform eines bulk carriers (links), Bild entnommen aus [97]

Der links zu sehende Bug würde mit der momentanen Konfiguration der beschriebenen Methoden als Bugwulst eines Tankers identifiziert und entsprechend weiter bearbeitet. Ein besseres Netz könnte in diesem Fall erzeugt werden, wenn der Bug als ein Bug ohne Wulstbug behandelt würde. Wenn diese Bugform häufiger gebaut wird, könnte der automatische Vernetzungsansatz ohne großen Aufwand dahingehend angepasst bzw. erweitert werden, dass auch diese spezielle Form richtig erkannt und weiter bearbeitet werden kann. Der im Bild rechts zu sehende Bugwulst sollte problemlos als Tankerbugwulst identifiziert und bearbeitet werden. Der gewählte Ansatz zur automatischen Vernetzung lässt sich leicht an zukünftige geänderte Schiffsformen oder häufig auftretende Spezialschiffsformen anpassen. Dazu wäre es erforderlich, unter Verwendung der zuvor erläuterten Techniken weitere Methoden zur Identifizierung und Verarbeitung der speziellen Schiffsformdetails zu implementieren.

7.3 Automatische Integration von Knicke

Ein wichtiger Aspekt bei der Erstellung des Regionenmodells ist die Berücksichtigung von Knicke. Die am häufigsten zu findenden Knicke in einer Schiffsform befinden sich bei nahezu jedem Schiff an den gleichen Stellen, z. B. die Knicke am Heckwulst am Austritt der Propellerwelle, zwischen Spiegelheck und Rumpf, am Bugwulst oder am Skeg. Nach diesen Knicke wird bei der Erstellung des Regionenmodells gezielt gesucht und sie werden in die einzelnen Regionen integriert. Zusätzlich kann es Knicke geben, die nicht typisch für eine bestimmte Schiffsform sind und ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Diese Knicke müssen zusätzlich automatisch in das Regionenmodell eingefügt werden.

Noch wichtiger ist das automatische Einarbeiten von Knicke für den unstrukturierten Vernetzungsansatz (Abschnitt 8.3), der weitgehend ohne Teilregionen auskommt. Knicke, die für die strukturierte Vernetzung zusammen mit der Erstellung einer Teilregion berücksichtigt wurden, müssen in das Regionenmodell eingefügt werden, ohne Teilregionen zu erzeugen. Beispiele solcher Knicke sind Knicke am Bugwulst oder am Skeg. Implementiert wurde die automatische Knickeintegration für den unstrukturierten Vernetzungsansatz, der ein Dreiecksnetz zur Darstellung der Schiffsform verwendet. Es werden Details am Beispiel des Dreiecksnetzes erklärt, das Funktionsprinzip ist jedoch identisch bei Verwendung der parametrischen Schiffsformbeschreibung.

Der erste Schritt der automatischen Knickeintegration besteht in der Untersuchung der verfügbaren Knicke. Einige Knickekurven sind durch ungenau modellierte Schiffsformen fehlerhaft als Knicke erkannt worden, andere sind für die Panelnetzgenerierung nicht relevant. Regionen wie z. B. das Spiegelheck oder die kleine Stevenrohrendfläche müssen immer im Regionenmodell vorhanden sein, da sie nicht oder auf besondere Art vernetzt werden. Zu diesen Regionen gehörende Knicke müssen nicht automatisch in das Regionenmodell eingefügt werden. Unter den verbleibenden Knicke können alle Knicke ausgeschlossen werden, die über der Wasseroberfläche liegen, wie z. B. in Längsrichtung verlaufende Knicke auf Höhe des Hauptdecks an Bug oder Heck. Auch zu kurze Knicke werden vernachlässigt, da sie fast immer fehlerhaft erkannt wurden. Die Mindestlänge eines gültigen Knicke wird entsprechend der Knicke der Vergleichsschiffe mit $0,03 \cdot L_{oa}$ angenommen. Darüber hinaus werden Knicke ausgeschlossen, die zu dicht an schon vorhandenen Regionengrenzen liegen. Das betrifft z. B. Knicke wie den in Abbildung 6.4 auf Seite 56 dicht neben der Stevenkontur zu sehenden Knicke.

Bei Verwendung des Dreiecksnetzes als Schiffsformbeschreibung ist die Knicke als Polygon definiert, es wird also der Mittelwert der Abstände aller Polygonpunkte zur nächsten RegionEdge berechnet. Bei Verwendung der parametrischen Flächen kann die Knicke hierfür durch Punkte diskretisiert werden. Wenn der mittlere Abstand der Knicke zu einer RegionEdge kleiner ist als die halbe mittlere Panelkantenlänge, wird der Knicke nicht berücksichtigt. Alle verbleibenden Knicke werden in das Regionenmodell integriert.

Falls sich einer der Knicke über mehrere Teilregionen erstreckt, wird er an den jeweiligen Regionengrenzen geteilt, die Einzelkurven werden gemeinsam mit den anderen Knicke bearbeitet.

Die Bearbeitung eines einzelnen Knicke geschieht in mehreren Stufen, die sich durch steigenden Aufwand unterscheiden. Jede Knickekurve muss in das bestehende Regionenmodell eingefügt werden. Dies setzt voraus, dass die Enden der Knickekurve auf einer der existierenden RegionEdges liegen. Die wenigen Knicke, bei denen das der Fall ist, können sofort als weitere RegionEdges in das Regionenmodell eingefügt werden. Die meisten Knicke verlaufen jedoch im Inneren

einer Region, ohne die Regionengrenzen zu erreichen. Das kann durch die automatische Knickerkennung verursacht worden sein, die den fehlenden Teil der Knickkurve aufgrund zu geringer Winkelunterschiede nicht mehr als Knick identifiziert hat. Einige Knicke laufen in der „glatten“ Schiffsfläche aus, sie gehen in eine C^1 -stetige Fläche über. Derartige Knicke müssen verlängert werden oder durch zusätzliche RegionEdges an das bestehende Regionenmodell angeschlossen werden.

Die erste Stufe der Verlängerung eines Knicke ist die Suche nach passenden Kanten im die Schiffsform approximierenden Dreiecksnetz. Passende Kanten werden über ihren Knickwinkel, das heißt den Winkelunterschied in den Normalen beider angrenzender Dreiecke oder über ihre Ausrichtung in Bezug auf die Tangente an die Knickkurve gesucht. Ein freies Ende einer Knickkurve wird durch Anfügen passender Dreieckskanten so weit verlängert, bis eine RegionEdge erreicht oder ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Verlängerung soll dazu dienen, eigentlich bis zum Rand der Schiffsform verlaufende Knicke wieder bis zu diesem zu verlängern. Durch die Begrenzung der Verlängerung soll verhindert werden, dass auslaufende Knicke zu weit verlängert werden. Als Abbruchkriterium wurde eine Begrenzung der maximalen Verlängerung auf fünf weitere Dreieckskanten oder eine Verlängerung um höchstens 50 % der ursprünglichen Länge der Knickkurve gewählt, womit alle durch die automatische Knickerkennung zu kurz erkannten Knicke wieder bis zu ihrer ursprünglichen Länge ausgedehnt wurden.

Falls es mit diesem ersten Schritt nicht möglich ist, eine Verbindung eines Knickendes mit einer RegionEdge herzustellen, wird in einem zweiten Schritt versucht, die Knickkurve durch eine Schnittberechnung zu verlängern (siehe Detailvergrößerung (rechts) in Abbildung 7.10 auf Seite 66). Hierzu werden im Knickendpunkt die Tangente an die Knickkurve und die Normale der Schiffsfläche ermittelt. Das Kreuzprodukt beider Vektoren ist die Normale einer Schnittebene. Es werden alle Schnittpunkte dieser Ebene mit existierenden RegionEdges oder noch nicht bearbeiteten Knicklinien berechnet. Wenn einer dieser Schnittpunkte dichter als ein Drittel der Knicklänge am jeweiligen Endpunkt des Knicke liegt, wird mit Hilfe der Schnittebene eine Kurve auf dem Schiffsrumph berechnet (durch die Begrenzung der Verlängerung wird eine zu große Verlängerung auslaufender Knicke verhindert). Diese Kurve wird verwendet, um den bearbeiteten Knick zu verlängern.

Bei Versagen beider Methoden zur Verlängerung einer Knickkurve, was bei in der glatten Schiffsfläche endenden Knicken der Fall sein kann, muss eine dritte Methode angewendet werden. Hier wird statt der Verlängerung des Knicke eine zusätzliche RegionEdge senkrecht zum Ende des Knicke berechnet und in das Regionenmodell eingefügt. Dazu wird eine Schnittebene definiert, die den Endpunkt des Knicke enthält und deren Flächennormale die Tangente an die Knickkurve im Endpunkt ist. Mit dieser Ebene wird der Schiffsrumph geschnitten, die entstehende Schnittkurve wird, falls nötig, soweit begrenzt, dass sie keine weiteren RegionEdges schneidet und in das Regionenmodell eingefügt. Dadurch endet die Knickkurve direkt an einer RegionEdge und kann in das Regionenmodell eingesetzt werden.

Die folgende Abbildung 7.23 zeigt zwei mittels der zuvor beschriebenen Methoden automatisch in das Regionenmodell eingefügte Knicke. Links ist der Knick am Bugwulst zuerst nach hinten verlängert worden und, weil diese Verlängerung nicht ausreichte, per zusätzlicher Schnittkurve eingebunden worden. Das nach vorn zeigende Ende des Knicke im oberen Bugbereich des rechten Bildes wurde durch Verlängerung mit drei weiteren Dreieckskanten an die obere horizontale Regionengrenze angeschlossen. Das nach hinten zeigende Ende wurde zunächst nach hinten

verlängert und anschließend wie der Bugwulstknick durch eine zusätzliche Schnittkurve in das Regionenmodell integriert.

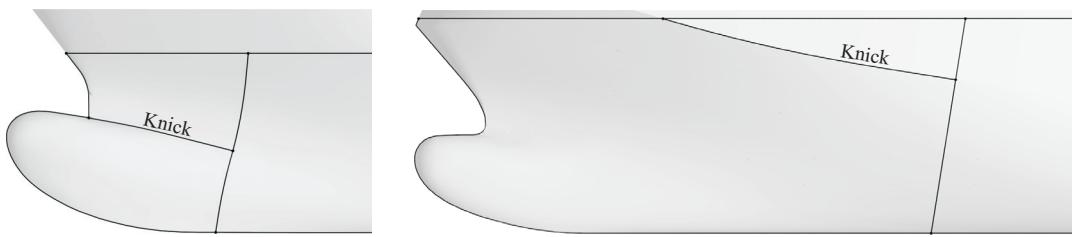


Abbildung 7.23: Automatisch in das Regionenmodell eingefügte Knicke

8 Netzerstellung

In diesem Abschnitt wird der noch verbleibende Arbeitsschritt der automatischen Netzgenerierung beschrieben: die Erzeugung eines Netzes in den vorbereiteten Regionen. Im Abschnitt 2.2 wurden die Anforderungen der potentialtheoretischen Methoden zur Berechnung des Wellenwiderstandes dargestellt. Im Ergebnis wurde gezeigt, dass neben den bisher verwendeten strukturierten Netzen aus Dreieck- oder Viereckelementen auch unstrukturierte Netze genutzt werden können. Aufgrund der im Umfeld des Schiffbaus zur Verfügung stehenden Netzgenerierungsmethoden werden solche unstrukturierten Netze kaum genutzt. Deshalb wurde als Ziel für diesen Teil der Arbeit die Erzeugung zweier unterschiedlicher Netze definiert: ein strukturiertes Netz, wie es bisher verwendet wird sowie ein unstrukturiertes Netz, um die Möglichkeiten dieser Variante aufzuzeigen.

Wie im Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde, existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren zur Erzeugung der Rechengitter. Neben Veröffentlichungen gibt es auch eine große Zahl implementierter Programme; einige davon sind frei verfügbar oder liegen als Quellcode vor (siehe auch [86]). Trotz intensiver Suche wurde jedoch kein Programm gefunden, welches im Zusammenhang dieser Arbeit uneingeschränkt nutzbar ist, vgl. auch Abschnitt 5.5. Dagegen bietet eine eigene Implementierung den Vorteil, sehr flexibel alle Möglichkeiten der Geometrievorbereitung zu nutzen und den Algorithmus an die teilweise besonderen Anforderungen potentialtheoretischer Panelnetze anzupassen.

Im Folgenden werden die beiden unterschiedlichen Ansätze im Detail erklärt. Zu beachten ist die zeitliche Reihenfolge der Entwicklung bzw. Implementierung entsprechend der hier dargestellten Reihenfolge. Vor der Implementierung der unstrukturierten Vernetzung wurden einige grundlegende Änderungen der Arbeitsschritte zur Geometrievorbereitung vorgenommen, die nicht mehr rückwirkend auf die Implementierung der strukturierten Vernetzung angewendet werden konnten. Im Besonderen betrifft dies die Beschreibung der Schiffsform, zum einen mit Hilfe parametrischer Flächen und zum anderen mittels eines Dreiecksnetzes.

8.1 Verteilung der Panelgröße

Viele Rechennetze für Wellenwiderstandsberechnungen werden mit über die Schiffsfläche variabler Panelgröße erstellt. Einer der Vorteile ist die Einsparung von Rechenzeit durch die Erstellung von weniger, dafür größeren Panels in Regionen, in denen sich die Strömungsverhältnisse nur gering ändern, z. B. in der Mitte des Schiffs. Andererseits können dort, wo eine größere Genauigkeit erforderlich ist, kleinere Panels erzeugt werden um die Strömungsverhältnisse feiner aufzulösen.

Die einzige Angabe für die automatische Panelnetzgenerierung ist die Gesamtzahl der zu erzeugenden Elemente. Zusammen mit dem Flächeninhalt des Unterwasserrumpfes ergibt sich eine mittlere

Panelfläche. Aus dieser mittleren Panelfläche werden je nach Art der zu erstellenden Elemente unter Annahme einer quadratischen oder gleichseitigen dreieckigen Form mittlere Panelkantenlängen berechnet. Diese Panelkantenlängen werden als Maß für die Panelgröße verwendet und in den Punkten des Dreiecksnetzes zur Schiffsformapproximation gespeichert (siehe Abbildung 5.7). Dabei wird nicht die absolute Kantenlänge gespeichert, sondern ein Faktor f_p , der den Unterschied zur mittleren Kantenlänge angibt. Um eine bestimmte Verteilung der Elementgröße zu erreichen, kann dieser anfänglich für alle Punkte gleiche Faktor ($f_p = 1,0$) nach verschiedenen Kriterien modifiziert werden.

8.1.1 Schiffslänge

Die einfachste und bei fast allen Panelnetzen vorzufindende Verteilung erzeugt kleinere Elemente an Bug und Heck des Schiffes, um die dort auftretenden größeren Änderungen der Umströmungsgeschwindigkeit besser aufzulösen. Zur Einhaltung einer Gesamtpanelzahl müssen entsprechend größere Elemente in der Schiffsmitte erzeugt werden. Da noch weitere Verteilungskriterien angewendet werden sollen, wurde die Einstellung der Gesamtpanelzahl zum Schluss durch Skalierung aller Elementgrößen vorgenommen. Die Verteilung über die Schiffslänge wird deshalb nur auf die Enden des Schiffes im Bereich $0,2 \cdot L_{oa}$ angewendet, die Größe der Elemente in der Schiffsmitte wird vorerst nicht geändert. Die verwendete Verteilungsfunktion und die sich daraus ergebende Panelgrößenverteilung auf dem Schiffsrumph ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die größten Elemente sind weiß dargestellt, die kleinsten schwarz. Aus der Verteilungsfunktion über die Schiffslänge wird für jeden Punkt ein Faktor gebildet, mit dem der vorhandene Größenfaktor jedes Dreieckspunktes multipliziert wird.

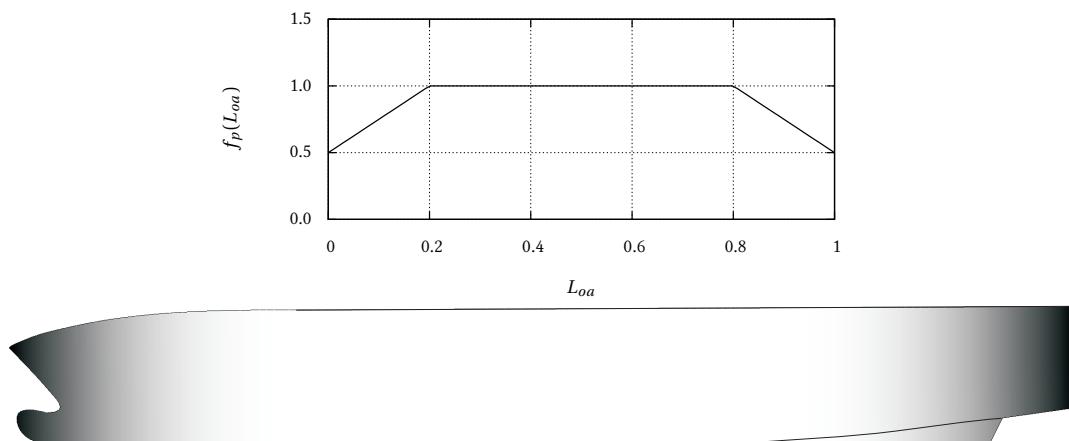


Abbildung 8.1: Verteilung der Panelgröße über die Schiffslänge

8.1.2 Oberflächenkrümmung

Als ein weiteres Kriterium für die Panelgrößenverteilung wird die Gauß'sche Krümmung

$$K = \frac{\frac{\partial^2 X}{\partial u^2} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial v^2} + \left(\frac{\partial^2 X}{\partial u \partial v} \right)^2}{\left(1 + \left(\frac{\partial X}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial v} \right)^2 \right)^2}$$

der Schiffsfläche verwendet. Bei der Erstellung des Dreiecksnetzes zur Schiffsformapproximation wird in jedem Dreieckspunkt der Absolutwert der Krümmung der zugrunde liegenden parametrischen Fläche $X(u, v)$ an dieser Stelle gespeichert (siehe Datenmodell in Abbildung 5.7). Für die Verteilung der Panelgröße reicht es aus, den Absolutbetrag der Krümmung zu verwenden; die Krümmungsrichtung ist hierfür nicht interessant. Bei der Bestimmung der Panelgröße wird nicht zwischen konkav oder konvex gekrümmten Flächenbereichen unterschieden. Die Panelgröße wird vorerst nur verkleinert bei größerer Krümmung, die für eine vorgegebene Panelanzahl nötige Vergrößerung der Panelgröße in schwach gekrümmten Bereichen wird später für alle Einzelkriterien im Zusammenhang ermittelt. Ähnlich der Verteilungsfunktion über die Schiffslänge sollen die Panelkantenlängen bei der größten Krümmung um 50 % reduziert werden:

$$f_{p_i} = 1 - \tilde{K}_i \cdot 0,5 \quad i = 0 \dots n$$

Die \tilde{K}_i sind die auf den Bereich $[0 \dots 1]$ normierten Krümmungswerte der n Punkte des Dreiecksnetzes.

Ein Problem entsteht durch die ungleichmäßige Verteilung der Krümmungsbeträge. Bei dem Schiff, das für die Darstellung der Panelgrößenverteilungen verwendet wurde (siehe Abb. 8.1), haben die 20 % der größten Krümmungswerte einen Anteil von 0,027 % an der gesamten Rumpffläche.¹ Entsprechend sieht die Verteilung des Panelgrößenfaktors f_{p_A} aus, siehe Abbildung 8.2. In dieser Abbildung sind die nach verschiedenen Methoden berechneten f_{p_i} über den $n = 7350$ Punkten des Dreiecksnetzes des Beispielschiffes dargestellt. Die Punkte sind aufsteigend nach ihrem Krümmungswert $|K|$ sortiert. Für die Bestimmung von $f_{p_{A_i}}$ wurden die Absolutbeträge der Krümmung verwendet:

$$K_{A_i} = |K_i|$$

Als Abhilfe für das Problem der ungleichen Krümmungsverteilung wird ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Panelgröße und den sich über mehrere Größenordnungen erstreckenden Krümmungswerten angewendet (siehe $f_{p_{B_i}}$ in Abb. 8.2):

$$K_{B_i} = \log_e (\max(K_{A_{\min}}, K_{A_i})) \quad K_{A_{\min}} = \text{kleinstes } K_{A_i} \neq 0$$

Bei dieser Verteilung der Panelgröße gibt es fast keine Punkte, an denen die Panelgröße unverändert bleibt. Die Ursache hierfür sind Rechenun genauigkeiten, die zu einer Berechnung sehr kleiner Krümmungswerte in ebenen Bereichen des Schiffes führen. Durch die logarithmische Skalierung werden diese kleinsten Krümmungswerte zu stark berücksichtigt. Abhilfe schafft eine Anpassung der Krümmungswerte. Eine Untersuchung der verfügbaren Beispielschiffe ergab, dass die ebenen

¹Annahme: die Punkte des Dreiecksnetzes sind gleichmäßig über die Schiffsrumppfläche verteilt.

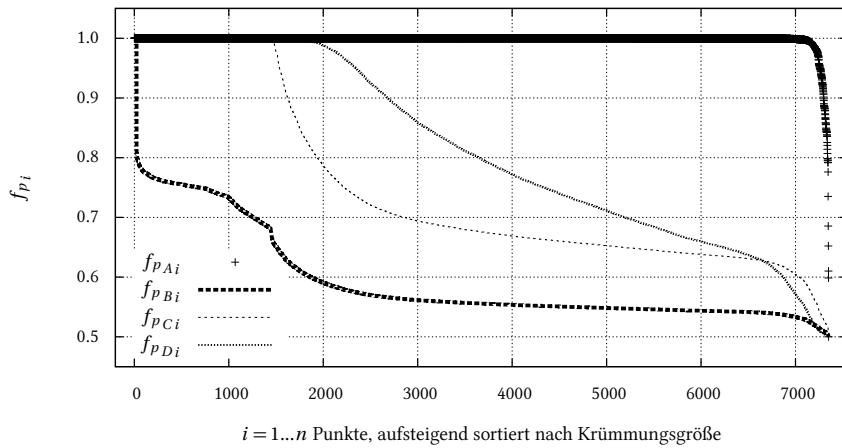


Abbildung 8.2: Verteilung des Panelgrößenfaktors der Krümmung

Boden- und Seitenbereiche und die oft ebenfalls ebene Spiegelfläche einen Anteil von 30 bis 35 % an der gesamten Rumpffläche besitzen. Davon ausgehend wurde die Annahme getroffen, dass die ersten 20 % der sortierten Krümmungswerte eines Schiffes eine Krümmung von Null darstellen. Für die Berechnung der Panelgröße wurden also die kleinsten 20 % der Krümmungswerte nicht berücksichtigt, hier bleibt die Elementgröße unverändert, siehe $f_{p_{Ci}}$ mit

$$K_{C_i} = \max(K_{B_{(0,2n)}}, K_{B_i})$$

Zuletzt soll der Unterschied zwischen den kleinsten und den größten Krümmungen verstärkt werden, um die Änderungen auf einen kleineren Bereich des Schiffsrumpfes zu beschränken ($f_{p_{Di}}$). Dazu wird eine S-förmige Funktion (Abbildung 8.3) verwendet, die logistische Funktion aus der Gruppe der Sigmoidfunktionen. Durch diese Funktion werden alle Krümmungswerte oberhalb einer Grenze vergrößert, die anderen verkleinert:

$$K_{D_i} = \frac{1}{1 + e^{-15(\tilde{K}_{C_i} - \tilde{K}_{C_{Hmax}})}} \quad \tilde{K}_{C_{Hmax}} = \tilde{K}_{C_i} \text{ mit größter Häufigkeit}$$

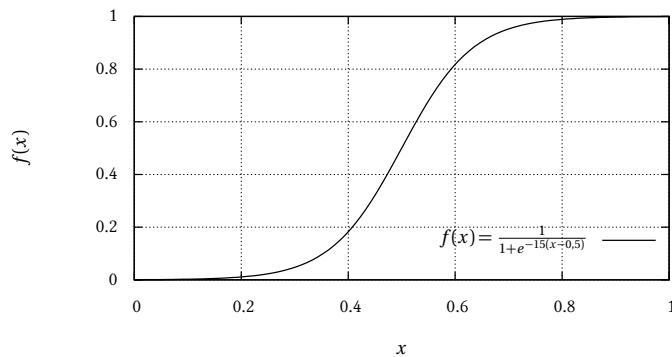


Abbildung 8.3: Logistische Funktion (Sigmoidfunktion)

In Bezug auf die Darstellung der resultierenden Panelgrößenverteilung in Abbildung 8.4 kann die Anwendung der S-Funktion als „Kontrasterhöhung“ verstanden werden.



Abbildung 8.4: Verteilung der Panelgröße in Abhängigkeit der Oberflächenkrümmung

8.1.3 Länge von Regionenrändern

An einigen Stellen des Regionenmodells existieren sehr kurze RegionEdges, wie z.B. am vorderen Ende des Skegs des hier für die Beschreibung der Panelgrößenverteilung verwendeten Beispielschiffes. Diese Edges sollen durch ein einzelnes Panel diskretisiert werden. Bei der Erzeugung dieser Edges wurde von der kleinst möglichen Panelgröße ausgegangen, die mit Hilfe der Panelgrößenverteilung realisiert werden muss. Auch an anderen Stellen können durch das automatische Einfügen von Knicken kleine RegionEdges oder sehr kleine Winkel in den Ecken der einzelnen Regionen entstehen. An diesen Stellen sollte die Panelgröße ebenfalls reduziert werden, um Verzerrungen der Elemente zu vermeiden.

Zur Reduktion der Panelgröße an diesen ausgewählten Stellen werden die gemeinsamen Punkte spitzwinklig aneinander grenzender RegionEdges und die Mittelpunkte kurzer RegionEdges verwendet. Direkt an diesen Punkten soll der Panelgrößenfaktor f_p auf 0,5 reduziert werden. Alle umliegenden Punkte müssen bis zu einem bestimmten Abstand berücksichtigt werden. Bis zu diesem Maximalabstand nimmt die Panelgröße linear bis zum Faktor $f_p = 1$ zu. Um zu große Änderungen der Panelgröße benachbarter Elemente zu vermeiden, wird als maximaler Abstand umliegender Punkte ein Zehntel der Gesamtlänge L_{oa} verwendet. Falls ein weiterer Ausgangspunkt zur Panelgrößenreduktion dichter als $0,2 \cdot L_{oa}$ am aktuell bearbeiteten Punkt liegt, wird die Hälfte dieses Abstandes als Radius des Gebietes der zu ändernden Punkte verwendet. Abbildung 8.5 zeigt das Ergebnis einer Reduktion des Panelgrößenfaktors im Bereich um die kurze RegionEdge am vorderen Ende des Skegs.



Abbildung 8.5: Reduktion der Panelgröße an ausgewählten Stellen

8.1.4 Gesamtverteilung

Die Faktoren der einzelnen Kriterien werden nacheinander durch Multiplikation kombiniert:

$$f_p = f_{p_1} + f_{p_2} + f_{p_3} + \dots$$

Abschließend ist eine Skalierung aller Faktoren nötig. Durch eine Skalierung auf den Bereich von 0,5 bis 1,5 soll der Unterschied zwischen kleinsten und größten Panelkantenlängen eingeschränkt werden. Die Panelgröße kann also um die Hälfte der mittleren Panelgröße verkleinert oder vergrößert werden. Anschließend werden alle Panelgrößenfaktoren gleichmäßig vergrößert bzw. verkleinert, um eine der geforderten Gesamtpanelzahl entsprechende mittlere Panelkantenlänge sicherzustellen.

Bei Anwendung der beschriebenen Einzelkriterien ist für jeden der gleichmäßig verteilten Punkte des Dreiecksnetzes die örtliche Panelgröße als ein Faktor gespeichert, mit dem die anfangs berechnete mittlere Panelgröße zu multiplizieren ist. Eine für die Netzerstellung verwendete Panelgrößenverteilung aus den drei Einzelkriterien ist in Abbildung 8.6 zu sehen. Mit der abgebildeten Panelgrößenverteilung würden die kleinsten Elemente am Bug des Schiffes erzeugt, da hier die Kriterien *Schiffslänge* und *Krümmung* gemeinsam wirken. Im Bereich der ebenen Boden- und Seitenflächen in der Mitte des Schiffes würden die größten Elemente entstehen. Neben den dargestellten Kriterien zur Größenverteilung sind weitere denkbar, wie z. B. eine Verkleinerung der Elemente in der Nähe der freien Wasseroberfläche für eine genauere Auflösung der Form der entstehenden Wellen.

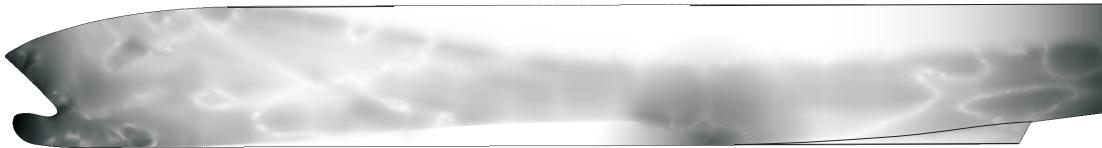


Abbildung 8.6: Gesamte Panelgrößenverteilung

8.2 Strukturierte Vernetzung

Das Ergebnis der strukturierten Vernetzung soll ein blockstrukturiertes Panelnetz sein, wie es in Abbildung 3.7 auf Seite 27 dargestellt ist. Die Blockstruktur wurde mit Hilfe des Regionenmodells anhand der speziellen Form des Schiffsrumpfes definiert. Die meisten der einzelnen Regionen werden mit einem einheitlichen Algorithmus vernetzt, der hier im Detail vorgestellt wird. Einige wenige Regionen wie z. B. die Stevenrohrendfläche oder die dreieckigen Regionen am Ende eines Sonardoms oder Skegs werden gesondert behandelt. Aufgrund der Verwendung des Regionenmodells kann die implementierte Vernetzungsmethode den *mapping*-Methoden zugeordnet werden, der eigentliche Algorithmus kann nach der zuvor beschriebenen Gliederung als *algebraische* Methode bezeichnet werden (siehe Abschnitt 3.1.1, S. 20 ff.).

Der Ablauf ist wie folgt gegliedert:

- Aufteilung der Regionenrandkurven und Bestimmung der Unterteilung
- Interpolation einer parametrischen Darstellung der Regionenfläche
- Reparametrisierung der Interpolationsfläche
- Netzgenerierung und Projektion des Netzes auf die Schiffsoberfläche

8.2.1 Unterteilung von Randkurven

Der erste Schritt besteht in der Bestimmung der Anzahl der Panelpunkte, die auf jeder Region-Edge anzuordnen sind. Bei einigen speziellen, besonders kurzen RegionEdges wird bei ihrer Erstellung eine feste Unterteilung definiert; diese werden nicht weiter bearbeitet. Bei allen anderen RegionEdges wird aus der Panelgrößenverteilung unter Annahme quadratischer Elemente die Panelkantenlänge am Anfangs- und Endpunkt der RegionEdge bestimmt. Der Mittelwert dieser Längen definiert die Unterteilung der RegionEdge und wird in dieser gespeichert (siehe Darstellung des Datenmodells, Abb. 7.2, S. 59).

Bei allen RegionLoops mit mehr als drei RegionEdges müssen die Randkurven sortiert werden. Bei genau vier RegionEdges ist dies sehr einfach: anhand der Ausrichtung der Edges bezüglich der Koordinatenachsen oder anhand der in den Edges gespeicherten Ausrichtung werden sie vier Kurvengruppen zugeordnet: *top*, *bottom*, *left* und *right*. Diese Zuordnung wird im RegionLoop gespeichert (Abb. 7.2, S. 59). Bei mehr als vier RegionEdges werden die einzelnen RegionEdges anhand ihrer Tangenten in den gemeinsamen RegionVertices sortiert: Winkel nahe 180° führen zu einer Zuordnung der RegionEdges zur gleichen Kurvengruppe, besonders kleine Winkel bewirken das Gegenteil. Mit dieser Methode können alle RegionEdges eindeutig zugeordnet werden. Zur Einsparung von Rechenzeit werden zusätzlich die Informationen über benannte RegionLoops genutzt. Bei diesen ist die Aufteilung oft schon durch die Lage bestimmter RegionVertices bezüglich des Schiffes zu ermitteln, z. B. wenn ein RegionVertex in der Mittschiffsebene liegt.

In einem nächsten Schritt wird die in den einzelnen RegionEdges gespeicherte Unterteilung zur Gesamtunterteilung der jeweiligen Randkurven zusammengezählt. Je nach zu erzeugendem Netz (konsistent oder inkonsistent) kann oder muss diese Gesamtunterteilung an benachbarte Regionen angepasst werden. Insbesondere bei vollständig konsistenten Panelnetzen aus Viereckelementen ist die Unterteilung einer RegionEdge von mehreren angrenzenden Regionen abhängig. Hierzu gibt es die Möglichkeit, eine „Wunschunterteilung“ in jeder RegionEdge zu speichern. Diese „Wunschunterteilung“ ergibt sich aus den Unterteilungen der jeweils gegenüberliegenden Seite der Region (*bottom/top*, *left/right*) und aus der Unterteilung von benachbarten Regionen. Sie gibt bei der iterativen Unterteilungsanpassung einen Zielwert vor und ermöglicht die gleichberechtigte Berücksichtigung aller Regionen.

Eine Änderung der Unterteilung einer der vier Seiten eines RegionLoops wird gleichmäßig auf die an der betreffenden Seite beteiligten RegionEdges verteilt, RegionEdges mit fester Unterteilung werden davon ausgenommen.

Den geringsten Aufwand zur Unterteilungsanpassung erfordert ein blockstrukturiertes Netz mit strukturierten Einzelnetzen und ohne Konsistenz an den Blockgrenzen. Hier muss nur die Unterteilung der jeweils gegenüber liegenden Seiten eines RegionLoops angepasst werden, es wird der Mittelwert verwendet (siehe Netz (b) in Abbildung 8.7).

Eine weitere Möglichkeit ist die Erstellung eines an den Blockgrenzen vollständig konsistenten Netzes, das einzelne Dreiecke in den ansonsten strukturierten Einzelnetzen aus Viereckelementen zulässt (Abb. 8.7, Netz (c)). So ist es möglich, unterschiedliche Elementgrößen über das Schiff mit weitgehend strukturiertem Netz und konsistenten Blockgrenzen zu erzeugen. Für eine solche Konfiguration werden alle einzelnen RegionLoops untersucht und die Anzahl der Randunterteilungen ermittelt, die nötig wäre, um die gegenüberliegenden Seiten bis auf wenige (z. B. zwei) Unterteilungen anzugeleichen. Die entsprechenden Unterteilungen der einzelnen RegionEdges werden als

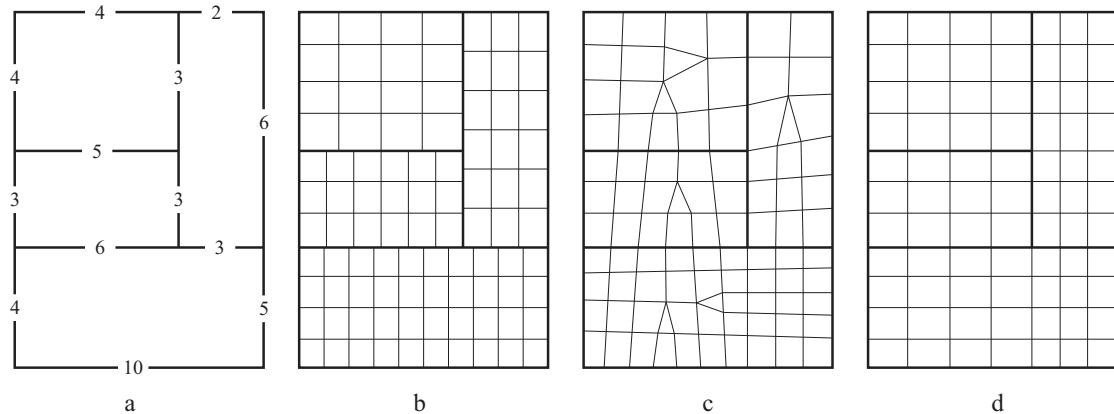


Abbildung 8.7: Unterteilung der gemeinsamen Ränder verschiedener Blöcke, (a): Unterteilung aus Panelgrößenverteilung, (b): inkonsistent und strukturiert, (c): konsistent und (teil)unstrukturiert, (d): konsistent und strukturiert

gewünschte Unterteilungen in diesen gespeichert und mit jedem bearbeiteten RegionLoop angepasst. Nach Abarbeitung aller RegionLoops kann in einem zweiten Schritt die Unterteilung aller RegionEdges so geändert werden, dass alle Unterteilungsanforderungen berücksichtigt werden.

Die Netzvariante (d) in Abb. 8.7 ähnelt der vorherigen, nur werden zusätzlich zur Konsistenz der Blockgrenzen ausschließlich strukturierte Einzelnetze erzeugt. Die Berücksichtigung einer Panelgrößenverteilung ist mit einem solchen Netz nur eingeschränkt möglich, da die Einhaltung gleicher Unterteilungen gegenüberliegender Randkurven und benachbarter Regionen Voraussetzung für vollständig strukturierte Einzelnetze ist. Für die Erstellung werden keine Unterschiede der Unterteilung gegenüberliegender Seiten zugelassen. Die Unterteilung des ersten bearbeiteten RegionLoops beeinflusst durch die Forderung konsistenter Blockgrenzen die Unterteilungen aller weiteren, aneinander angrenzenden RegionLoops. Im zuerst bearbeiteten RegionLoop kann die vorgegebene Unterteilung weitgehend eingehalten werden, die Unterteilung der zuletzt bearbeiteten Region wird hauptsächlich durch die Einhaltung der Konsistenz bestimmt.

8.2.2 Flächeninterpolation

Für die Darstellung der Fläche innerhalb des RegionLoop soll eine neue parametrische Fläche interpoliert werden, deren zweidimensionales Parametergebiet anschließend für die Erzeugung des Panelnetzes genutzt wird. Dazu werden zuerst die vier Randkurven aufbereitet, indem sie durch eine B-Spline-Kurve approximiert und einheitlich ausgerichtet werden (die Kurve, die die untere Begrenzung *bottom* der Region beschreibt, soll am gemeinsamen Punkt mit der Randkurve *left* beginnen und bei der Kurve *right* enden, andere Randkurven ebenso). Für die Approximation muss eine ausreichende Anzahl von Punkten auf den Randkurven ermittelt werden; falls die Randkurven durch Polygone beschrieben sind, werden die Polygonpunkte verwendet. Für die Implementierung wurden in Open Cascade verfügbare Approximationsmethoden verwendet, deren genaue Funktionsweise nicht bekannt ist. Prinzipiell kann die Approximation wie folgt beschrieben werden:

Den $n + 1$ zu interpolierenden Punkten \mathbf{p}_i ($i = 0 \dots n$) werden Parameterwerte t_i zugeordnet, im

einfachsten Fall $t_i = i$. Die entstehende B-Spline-Kurve soll den Grad $p = 3$ besitzen und den ersten und letzten Punkt \mathbf{p}_i exakt darstellen. Somit lautet der zu verwendende Knotenvektor

$$T = \{t_0, t_0, t_0, t_0, t_1, \dots, t_{n-1}, t_n, t_n, t_n, t_n\} \quad (8.1)$$

Die Kurve zur Approximation der Punkte ist

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{i=0}^m N_{i,p}(t) \mathbf{p}_i \quad (8.2)$$

mit $t \in [0, 1]$, $m \leq n$ und den Randbedingungen $\mathbf{X}(0) = \mathbf{p}_0$, $\mathbf{X}(1) = \mathbf{p}_n$. Die verbleibenden Punkte \mathbf{p}_k ($k = 1 \dots n - 1$) können nach der Gauss'schen Fehlerquadratmethode mit der Bedingung der Minimierung des Gesamtfehlers approximiert werden:

$$\sum_{k=1}^{n-1} |\mathbf{p}_k - \mathbf{X}(t_k)|^2 \rightarrow \min \quad (8.3)$$

Es entsteht ein lineares Gleichungssystem mit den Unbekannten $\mathbf{P}_1 \dots \mathbf{P}_{m-1}$, das zur Berechnung der Approximationskurve zu lösen ist.

Die aus den approximierten Randkurven zu berechnende neue Fläche soll möglichst gleichmäßig verteilte Parameterwerte besitzen, da diese für die Netzgenerierung verwendet werden. Um dies sicherzustellen, müssen die Randkurven reparametrisiert werden. Bei einer B-Spline-Kurve (und auch bei B-Spline-Flächen) existiert kein geometrischer Bezug zwischen den Knotenwerten t_i und den Punkten $\mathbf{X}(t_i)$ auf der Kurve. Bei einer zweidimensionalen Kurve, wie z.B. der in Abbildung 8.8, sind deshalb die Punkte auf der Kurve trotz gleich verteilter Parameterwerte nicht notwendigerweise äquidistant. Das bedeutet, dass z.B. der zum ursprünglichen Parameterwert $t = 0,5$ gehörende Punkt auf der Kurve nicht zwingend in der Mitte der Kurve liegt.

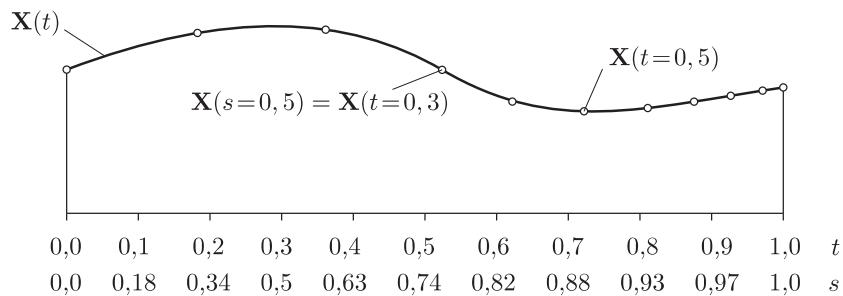


Abbildung 8.8: Parameterwerte und zugehörige Punkte auf einer parametrischen Kurve

Zur Herstellung eines geometrischen Zusammenhangs kann die Kurve reparametrisiert werden, indem den Originalparametern neue, zu den geometrischen Punkten auf der Kurve passende Parameter zugeordnet werden oder indem die Knotenwerte der B-Spline-Kurve angepasst werden. Zur Ermittlung neuer Parameter werden $n + 1$ Punkte $\mathbf{X}(t_i)$ auf der Kurve berechnet unter Verwendung äquidistanter Parameter t_i ($i = 0 \dots 1$). Aus den tatsächlichen Abständen der Punkte

auf der Kurve können die neuen Parameter s_i berechnet werden:

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= 0,0 \\ \tilde{s}_i &= |\mathbf{X}(t_i) - \mathbf{X}(t_{i-1})| + \tilde{s}_{i-1} \\ s_i &= \frac{\tilde{s}_i}{\tilde{s}_n}\end{aligned}\tag{8.4}$$

Durch lineare Interpolation kann jedem Parameter $s \in (0, 1)$ ein Parameterwert t zugeordnet werden, womit die Punkte $\mathbf{X}(t(s))$ einen geometrischen Bezug zum Parameter s erhalten. Für die Beispielkurve in Abbildung 8.8 bedeutet das, dass der Punkt $\mathbf{X}(s=0,5)$ identisch ist mit dem Punkt $\mathbf{X}(t=0,3)$ und in der Mitte der Kurve liegt. Die Genauigkeit einer derartigen Reparametrisierung erhöht sich mit der Anzahl n der verwendeten Punkte bzw. einer mehrfachen Reparametrisierung.

Unter Verwendung der aufbereiteten Randkurven des RegionLoops wird eine neue parametrische Fläche berechnet, die die Fläche des RegionLoops darstellt. Eine direkte Interpolation oder Approximation einer B-Spline-Fläche ist mit den verfügbaren Daten nur eingeschränkt möglich. Bei Verwendung der Interpolations- und Approximationsmethoden von Open Cascade wird das Ergebnis sehr von einer günstigen Wahl der zu interpolierenden/approximierenden Punkte beeinflusst. Bei ungleichmäßig verteilten Punkten werden stark überschwingende Flächen berechnet bzw. es kann kein Ergebnis gefunden werden. Die Ermittlung einer ausreichend gleichmäßigen Punkteverteilung ist nicht direkt möglich, da in den RegionLoops kein Bezug auf den zugehörigen Anteil der Schiffsrumppfläche enthalten ist.

Statt dessen wird zunächst eine *Coons-Fläche* berechnet, welche die vier Randkurven des RegionLoops exakt interpoliert. Diese Coons-Fläche kann als „erste Näherung“ für die gesuchte Fläche betrachtet werden. Ein bilineares Coons-Patch aus je zwei Randkurven in die beiden Parameterrichtungen

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_k(s) &= \sum_{i=0}^n N_{i,p}(s) \mathbf{P}_{k,i} \quad k = 0, 1 \quad u \in [0, 1] \\ \mathbf{X}_l(t) &= \sum_{j=0}^m N_{j,p}(t) \mathbf{P}_{l,j} \quad l = 0, 1 \quad v \in [0, 1]\end{aligned}$$

ist definiert als

$$\mathbf{X}(s, t) = \mathbf{R}_1(s, t) + \mathbf{R}_2(s, t) - \mathbf{T}(s, t)$$

\mathbf{R}_1 und \mathbf{R}_2 sind linear zwischen je zwei der Randkurven interpolierte Flächen und \mathbf{T} ist eine linear zwischen den Eckpunkten interpolierte Tensorproduktfläche. Für weitere Details sei auf [91] verwiesen. Eine Coons-Fläche interpoliert die Randkurven des RegionLoops exakt, das Innere der Fläche kann jedoch deutlich von der wirklichen Schiffsfläche abweichen.

Um die neue parametrische Fläche möglichst genau an den realen Schiffsrumppf anzupassen, wird ein sehr dichtes Gitter von Punkten auf der Coons-Fläche berechnet. Da die Randkurven zuvor reparametrisiert worden sind, sind die Punkte auf der Fläche gleichmäßig verteilt. Zu jedem Punkt wird die Flächennormale (der Coons-Fläche) berechnet. Anschließend werden die Punkte auf die Schiffsfläche projiziert, indem die Schnittpunkte aus Punktnormalen und Schiffsfläche berechnet

werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Reihenfolge der Punkte erhalten bleibt. Abbildung 8.9 verdeutlicht das Problem. Dargestellt ist ein Querschnitt durch Schiffsfläche und Coons-Fläche. Bei ungünstiger Form der Coons-Fläche können Punkte durch die Projektion „vertauscht“ werden, was berücksichtigt werden muss.

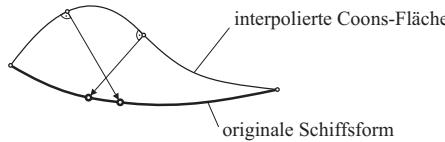


Abbildung 8.9: Überlappung bei Punktprojektion

Aus den sortierten und auf die Schiffsfläche projizierten Punkten wird eine neue B-Spline-Fläche approximiert. Hierzu muss für jede Reihe von Punkten in beide Parameterrichtungen ein Gleichungssystem gelöst werden, um die noch unbekannten Kontrollpunkte zu berechnen (siehe Gl. 8.1 bis 8.3). Auch hier sei für Details auf [91] verwiesen. Für die Berechnung dieser Flächenapproximation können in der Geometriebibliothek vorhandene Funktionen benutzt werden. Das Ergebnis ist eine B-Spline-Fläche, die eine für die Belange der Panelnetzgenerierung ausreichend genaue Approximation der Schiffsfläche innerhalb eines RegionLoops darstellt.

Bevor diese B-Spline-Fläche zur Erzeugung des Panelnetzes genutzt werden kann, muss sie reparametrisiert werden. Durch die Projektion der Coons-Punkte auf den Schiffsrumpf geht die vorherige gleichmäßige Verteilung über die Fläche verloren und die Parameterkurven der Fläche sind unregelmäßig verteilt. Die Reparametrisierung läuft analog der zuvor beschriebenen Verfahrensweise ab (Gl. 8.4), nur dass nun ein zweidimensionales Punktegitter bearbeitet wird.

8.2.3 Netzgenerierung

Die Erzeugung der einzelnen Punkte für das Panelnetz geschieht im zweidimensionalen Parametergebiet der die RegionLoops interpolierenden B-Spline-Flächen. Durch die Reparametrisierung dieser Fläche kann davon ausgegangen werden, dass die aus einem regelmäßigen zweidimensionalen Netz erzeugten Punkte gleichmäßig über die reale Schiffsfläche verteilt sind. Abbildung 8.10 zeigt ein Panelnetz einer Region im zweidimensionalen Parametergebiet sowie das dreidimensionale Netz mehrerer Regionen eines Beispielschiffes.

Zuerst wird ein gleichmäßiges, strukturiertes Netz erzeugt, dessen Randunterteilung von der größeren Unterteilung der beiden Randkurven für eine Parameterrichtung bestimmt wird. Wenn eine Konsistenz des Netzes an den Regionenrändern nicht erforderlich ist, kann die Netzgenerierung an dieser Stelle beendet werden. Andernfalls müssen in einem nächsten Schritt die Randpunkte der einzelnen Regionen an die Eckpunkte benachbarter Regionen angepasst werden. Dieser Arbeitsschritt wird anhand des bereits in Abbildung 8.10 verwendeten Beispiels erläutert, Details sind in Abbildung 8.11 dargestellt.

Wenn wie im rechten Teil von Abb. 8.11 zwei kleine Regionen (2), (3) an eine große (1) grenzen, muss am Rand der Region (1) ein Panelpunkt genau auf dem von beiden Regionen (2), (3) gemeinsam verwendeten RegionVertex liegen. Dazu wird unter Berücksichtigung der geforderten Unterteilung der RegionEdges der Panelpunkt gesucht, der auf die Koordinaten des RegionVertex geschoben wird. Die Verschiebung wird im zweidimensionalen Parametergebiet ausgeführt (siehe

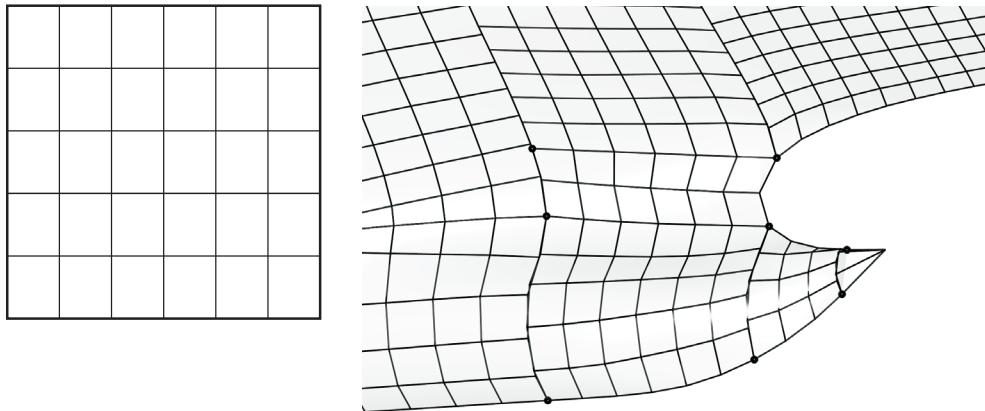


Abbildung 8.10: Strukturiertes Ausgangsnetz

linker Teil von Abb. 8.11). Zur Ermittlung der neuen (zweidimensionalen) Punktkoordinaten wird der RegionVertex auf die B-Spline-Approximationsfläche der Region (1) projiziert. Damit die Elemente der Region (1) gleichmäßig verteilt bleiben, müssen alle Punkte gleichmäßig verschoben werden. Hiervon ausgenommen sind Randpunkte, die nicht auf dem gleichen Rand wie der Ausgangspunkt liegen, sowie Punkte, die im Anschluss an vorherige gleichartige Anpassungen als nicht verschiebbar gekennzeichnet wurden.

Die Methode zur gleichmäßigen Verschiebung ist im linken Teil der Abbildung 8.11 skizziert. Randpunkt A wurde nach A' verschoben. Innere Punkte (z. B. B) wurden verschoben, indem der Schnittpunkt C des Randes mit der Gerade durch AB bestimmt wird. Die neue Position des Punktes B ist der Schnittpunkt des durch Punkt B verlaufenden Vektors AA' mit der Gerade A'C. Der verschobene Punkt A bzw. A' wird als Fixpunkt gekennzeichnet, der bei weiteren Anpassungen des Netzes nicht mehr verändert werden darf.

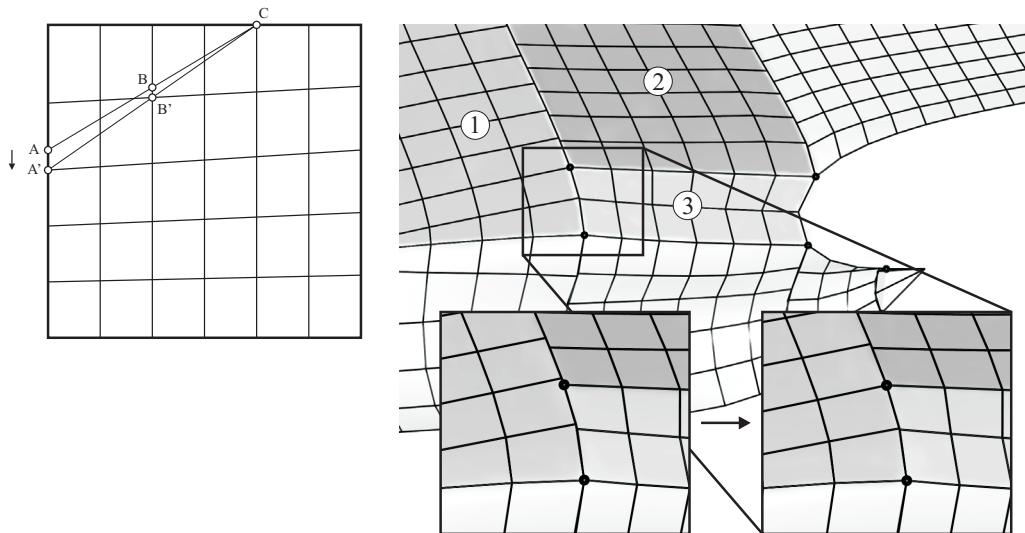


Abbildung 8.11: Anpassung an Regioneneckpunkte, links: Verschiebung der Punkte im zweidimensionalen Parametergebiet, rechts: Ergebnis am dreidimensionalen Panelnetz

Abschließend müssen eventuell unterschiedliche Unterteilungen benachbarter Regionenränder bearbeitet werden, wenn das Gesamtnetz konsistent sein soll. Wenn die Anzahl der Punkte eines Regionenrandes nicht zur Soll-Unterteilung passt, wird sie schrittweise verringert. Bei der Bestimmung der Unterteilungszahl eines Randes wurde durch Aufrunden berechneter Randunterteilungen sichergestellt, dass im Falle einer Nicht-Übereinstimmung in jedem Fall mehr Punkte als gefordert vorhanden sind. Falls auf einem Regionenrand durch vorherige Anpassungen Fixpunkte vorhanden sind, teilen diese Punkte den gesamten Rand in Unterabschnitte, die getrennt bearbeitet werden. Die Anpassungsmethode wird am Beispiel der zuvor verwendeten Panelnetzausschnitte erläutert und ist in Abbildung 8.12 im Detail dargestellt.

Die in dieser Abbildung mit (2) und (3) bezeichneten Regionen besitzen eine unterschiedliche Unterteilung ihres gemeinsamen Randes, was in der Darstellung des Ausgangszustandes in Abbildung 8.10 zu sehen ist. Zur Angleichung wird die Randunterteilung der Region (2) verringert. Dazu wird die in der Mitte liegende Panelkante mit Hilfe der zuvor bei der Anpassung der Regionenecken beschriebenen Methode zur gleichmäßigen Punktverschiebung kollabiert, indem beide Endpunkte der zu kollabierenden Kante auf den Kantenmittelpunkt verschoben werden. Es entsteht ein dreieckiges Panel am Rand des Netzes sowie eine Reihe verzerrter Elemente im Inneren des Teilnetzes. Durch anschließende Kollabierung von Panelkanten, die kleiner als 30 % ihrer Ausgangslänge sind, bleibt die Gleichmäßigkeit des Teilnetzes erhalten. Durch die Gleichmäßigkeit der Punktverschiebung wird dabei zuerst eine der Kanten des zuvor erstellten Dreieckelementes kollabiert, wodurch dieses Element verschwindet und ein weiteres Viereckelement in ein Dreieckelement gewandelt wird. Das nach Bearbeitung aller zu kleinen Panelkanten entstandene Netz im zweidimensionalen Parametergebiet ist im linken Teil der Abbildung 8.12 dargestellt.

In der gleichen Abbildung ist rechts das geänderte dreidimensionale Panelnetz zu sehen. Zusätzlich ist hier das Ergebnis eines letzten Arbeitsschrittes zu erkennen, der nicht im Detail beschrieben werden soll: Panelpunkte auf gemeinsam genutzten Regionenrändern wurden mit den zuvor beschriebenen Verfahren auf gleiche dreidimensionalen Koordinaten verschoben.

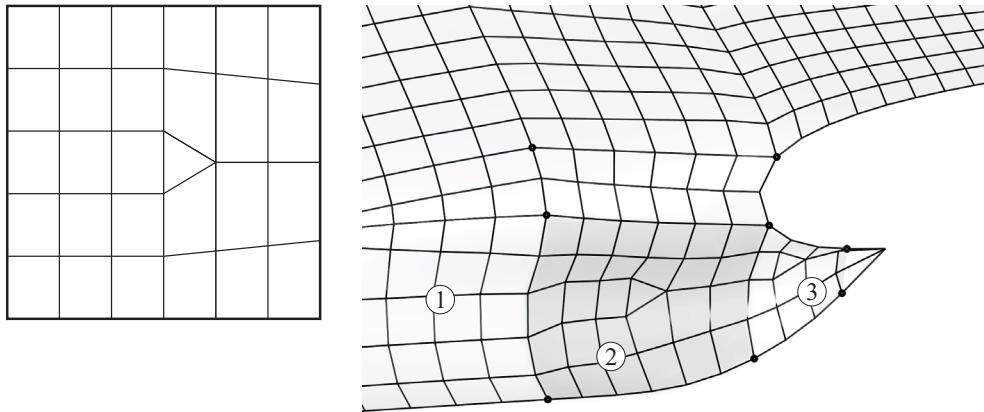


Abbildung 8.12: Einstellung unterschiedlicher Randunterteilungen und Vereinigung von Panelpunkten auf Regionenrändern gleicher Unterteilung

8.2.4 Ergebnisse

Da der vorgestellte Ansatz für eine strukturierte Netzgenerierung eng mit der Erstellung eines detaillierten Regionenmodells verbunden ist, sollen hier Panelnetzbeispiele der wichtigsten in Abschnitt 7.2 beschriebenen Teilregionen gezeigt werden. Abbildung 8.13 zeigt einen Ausschnitt eines Panelnetzes für einen Tanker, mit insgesamt 2000 Elementen. Bei der Anpassung der unterschiedlichen Unterteilungen der oberen und unteren Begrenzung des Bugwulstes ist ein einzelnes dreieckiges Element entstanden.

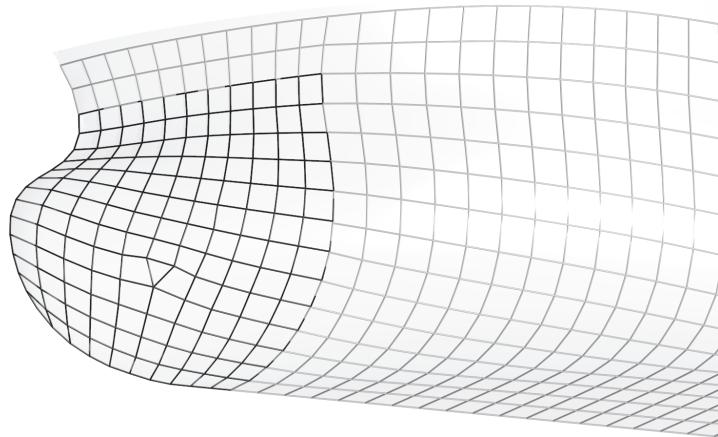


Abbildung 8.13: Panelnetz eines Tankerbugwulstes

In Abbildung 8.14 ist ein Bugwulst mit einem Knick dargestellt. Dieses Schiff wurde mit insgesamt 3000 Elementen diskretisiert und es wurde ein vollständig strukturiertes Netz erzeugt.

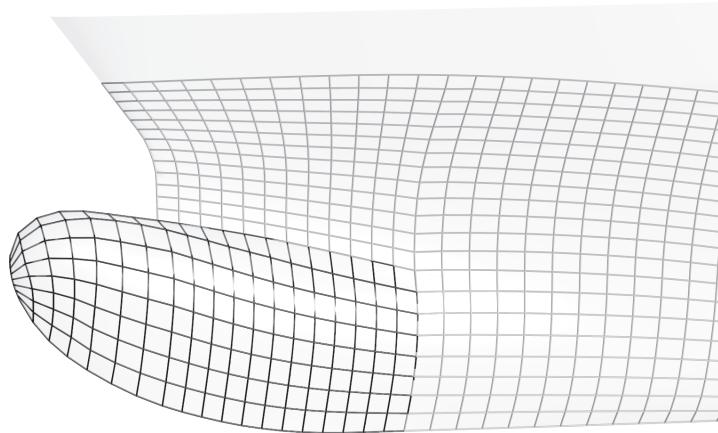


Abbildung 8.14: Panelnetz eines normalen Bugwulstes, mit Knick

Der Sonardom in Abbildung 8.15 erfordert mehrere dreieckige Elemente, wenn die Panelgröße nur wenig variieren soll.

Ein Beispiel für die Vernetzung des Heckwulstes ist in Abbildung 8.12 auf Seite 91 gezeigt. Ein Detail, das noch nicht beschrieben wurde, ist die „Kappe“ über dem Bereich, an dem die

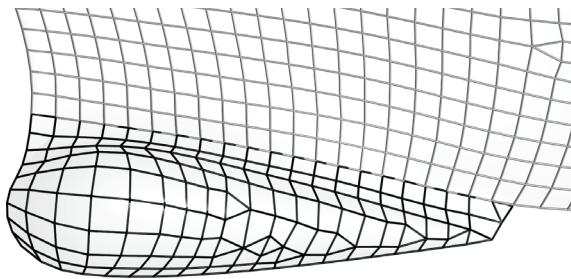


Abbildung 8.15: Panelnetz eines Sonardoms

Propellerwelle aus dem Schiffsrumpf austritt. In Abbildung 8.16 ist dieses Detail vergrößert dargestellt. Für die Erstellung wird der Schnittpunkt der Tangenten an die Stevenkontur ober- und unterhalb der Öffnung für die Welle bestimmt. Dieser Punkt bildet die Spitze der Kappe, die Anzahl der Elemente wird durch die Unterteilung der RegionEdge bestimmt, die den Öffnungshalbkreis darstellt. Eine schon modellierte Kappe wird in gleicher Weise bearbeitet, als Spitze wird die tatsächlich modellierte Spitze der Kappe verwendet.

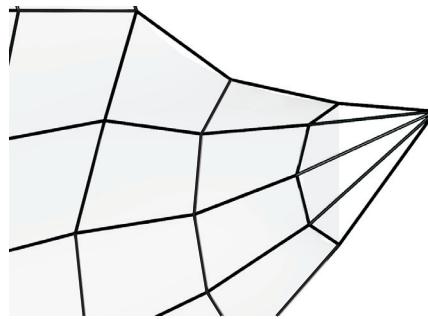


Abbildung 8.16: Panelnetz bei Propellerwelle

Die Abbildungen 8.17 und 8.18 zeigen Beispielnetze für eine Schiffsform mit einem Center Skeg. Im ersten Fall handelt sich um ein Skeg, das ohne Knick glatt in den Schiffsrumpf übergeht und einfach zu vernetzen ist. Das andere Skeg ist mit einem Knick an den Schiffsrumpf angeschlossen und besitzt zusätzlich einen ebenen Boden, der breit genug ist, um durch eine Reihe von Elementen dargestellt zu werden.

Für weitere Ergebnisse, Beispielnetze und Testrechnungen sei auf Kapitel 8.4 ab Seite 103 verwiesen.

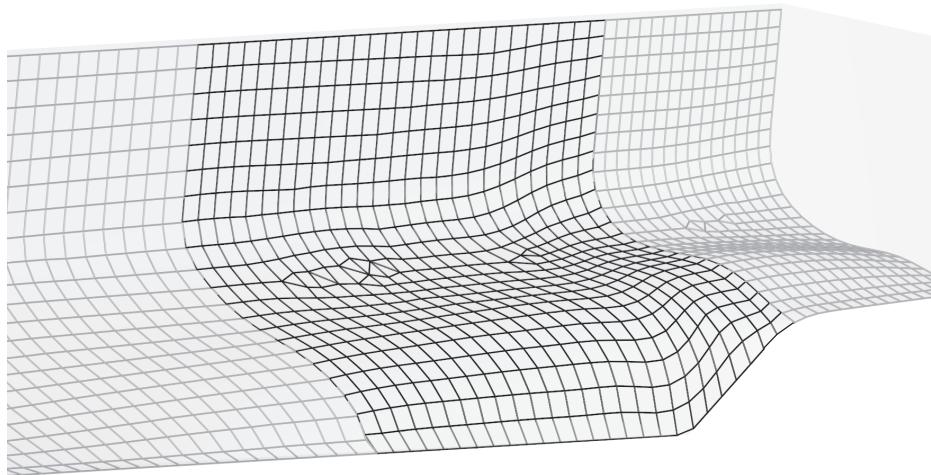


Abbildung 8.17: Panelnetz eines Skegs ohne Knick

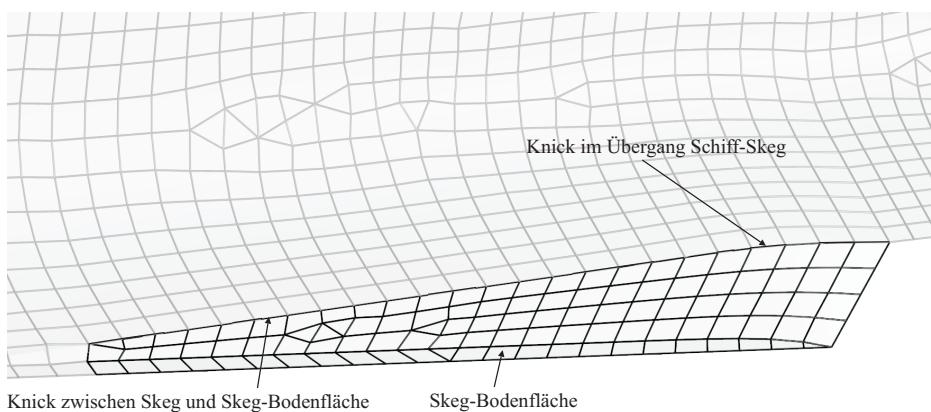


Abbildung 8.18: Panelnetz eines Skegs mit Knick und ebenem Boden

8.3 Unstrukturierte Vernetzung

Der zweite Ansatz zur Vernetzung erzeugt ein unstrukturiertes Panelnetz. In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass mit unstrukturierten Panelnetzen keine ungenauerer Rechenergebnisse erzielt werden als mit den überwiegend verwendeten blockstrukturierten Netzen. Unstrukturierte Netze haben gegenüber den strukturierten Netzen den Vorteil, dass sie sich wesentlich besser an lokale geometrische Gegebenheiten anpassen lassen und damit eine bessere Schiffsformapproximation darstellen. In Abschnitt 3.1.1 wurden verschiedene Verfahren zur Erzeugung unstrukturierter Netze vorgestellt. Ein Quadtree-Verfahren kommt aufgrund der durch diese Methode erzeugten sehr unterschiedlich großen Elemente für die Generierung eines Panelnetzes nicht in Frage. Die Delaunay- und Advancing Front-Methoden sind für die Erzeugung von Panelnetzen gleichermaßen geeignet. Allerdings ist mit Delaunay-Methoden ausschließlich die Erzeugung von Dreieckelementen möglich. Die Advancing Front-Methoden können prinzipiell beliebig geformte Elemente erzeugen, also auch viereckige Panels. Da viereckige Panels aus in Abschnitt 2.2 beschriebenen Gründen heute vorrangig für Wellenwiderstandsberechnungen verwendet werden, wurde für die Erzeugung des unstrukturierten Netzes ein Advancing Front-Verfahren gewählt, das viereckige Elemente erzeugt.

Es existiert eine Reihe von Programmen, die vierseitige Elemente mittels eines Advancing Front-Algorithmus erzeugen können. In [85] ist ein Überblick dargestellt. Der überwiegende Teil dieser Software ist nur kommerziell verfügbar, andere sind nicht dokumentiert, können nur zweidimensionale Elemente erzeugen, erfordern nicht zur Verfügung stehende Eingabeformate oder lassen sich nicht in eine automatische Netzgenerierung integrieren. Eines der kommerziellen Programme ist *Hypermesh*, welches für Testzwecke genutzt werden konnte (siehe Abschnitt 3.2.1). Das Programm *Geompack* [5] ist ein frei verfügbares Programm, das nahezu alle Anforderungen zu erfüllen scheint und als Quellcode vorliegt. Zum Zeitpunkt der Entscheidung über die Nutzung eines externen Programmes war Geompack allerdings kaum dokumentiert. Dies und die hohe Komplexität von Geompack führten zu der Entscheidung, es nicht zu verwenden und statt dessen eine eigene Methode in Anlehnung an verschiedene Veröffentlichungen zu implementieren. Der größte Vorteil einer eigenen Implementierung liegt in der Flexibilität bei der Berücksichtigung schiffspezifischer Anforderungen. Darüber hinaus können fundierte Erfahrungen zur Funktionsweise der Advancing Front-Verfahren gesammelt werden, was für eine mögliche Weiterentwicklung vorteilhaft sein könnte.

Während der Implementierung stellte sich heraus, dass eine Berücksichtigung aller in der Praxis auftretenden Sonderfälle aufwendiger ist als zunächst angenommen. Viele Detailprobleme haben nur wenig mit dem Advancing Front-Verfahren selbst zu tun, sondern sind in der Implementierung und in den vorliegenden Randbedingungen begründet.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Arbeitsschritte und die dabei auftretenden Probleme des implementierten Advancing Front-Algorithmus beschrieben werden. Für die Implementierung lieferten Veröffentlichungen von Blacker [11, 12] und Löhner [62, 63, 66] wertvolle Anregungen. Blacker entwickelte eine als *Paving* bezeichnete Methode zur Erstellung viereckiger Elemente, Löhner konzentriert sich auf dreieckige Elemente. Den größten Einfluss auf die hier vorgestellte Methode hatten zwei Veröffentlichungen von Owen [83, 87], der einen indirekten Ansatz zur Umwandlung eines Netzes aus dreieckigen Elementen in viereckige beschreibt. Viele Veröffentlichungen zu Netzgenerierungsmethoden beschränken sich auf zweidimensionale Netze. Cass [18] gibt wichtige Hinweise zu speziell bei dreidimensionalen Netzen auftretenden Problemen.

Für die Implementierung wurde ein indirekter Ansatz gewählt. So kann Rechenzeit gespart werden, da das zur Flächenapproximation benötigte Dreiecksnetz bereits zuvor erzeugt wurde. Außerdem ist bei dieser Variante zu jeder Zeit die Konsistenz des Netzes gewährleistet, wodurch Probleme mit Klaffungen oder Überlappungen zwischen einzelnen Elementen vermieden werden. Der grundsätzliche Ablauf eines Advancing Front-Vernetzungsverfahrens ist in Abbildung 8.19 schematisch dargestellt. Die einzelnen Schritte werden im Detail beschrieben.

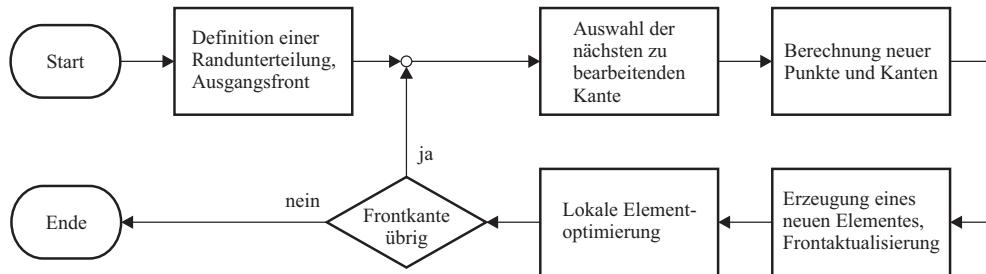


Abbildung 8.19: Ablaufschema eines Advancing Front-Vernetzungsalgorithmus

8.3.1 Randunterteilung

Die Berechnung des unstrukturierten Panelnetzes geschieht vollständig mit Hilfe der Schiffsformapproximation durch das Dreiecksnetz, siehe Abschnitt 5.5. Dabei wird das Dreiecksnetz schrittweise in ein unstrukturiertes Panelnetz umgewandelt. Damit das unveränderte Dreiecksnetz weiterhin zur Verfügung steht, werden alle Berechnungen zur Netzgenerierung mit einer Kopie des Dreiecksnetzes durchgeführt. Das Regionenmodell für die unstrukturierte Vernetzung ist prinzipiell genauso aufgebaut wie für das strukturierte Panelnetz. Der Unterschied besteht im Detaillierungsgrad des Regionenmodells. Für die unstrukturierte Vernetzung kann auf die meisten der Spezialregionen verzichtet werden, der Vernetzungsalgorithmus ist in der Lage, beliebig benannte Teilflächen zu vernetzen. Durch das Regionenmodell müssen nur die Bereiche dargestellt werden, die nicht vernetzt werden sollen, wie z. B. die Fläche des Spiegelhecks. Die Grenzen der Regionen, die RegionEdges, werden bei Verwendung der Triangulierung der Schiffsform durch Polygone gebildet und als solche gespeichert (siehe Abb. 7.2 auf S. 59).

Die einzelnen Kanten des Dreiecksnetzes und damit auch der Polygone der RegionEdges sind ca. um den Faktor 8 kleiner als die Kanten des zu erstellenden Panelnetzes (bei angenommenen 3000 Panels für eine Hälfte des Schiffes). Damit ist eine RegionEdge durch mehr Punkte beschrieben, als für das Panelnetz nötig sind. Zur Berechnung der Unterteilung der RegionEdges wird im Gegensatz zur strukturierten Vernetzung der genaue Verlauf der in den einzelnen Dreiecksnetz- und damit auch Polygonpunkten gespeicherten Panelgröße über die RegionEdge berücksichtigt. In einem ersten Schritt werden zusätzliche Punkte an den durch den Panelgrößenverlauf bestimmten Stellen in das Polygon und damit in das Dreiecksnetz eingefügt. Dies geschieht durch Teilung von Dreieckskanten und den zugehörigen Dreiecken. Anschließend werden die überflüssigen Punkte aus dem Dreiecksnetz und damit aus den Polygone der RegionEdges entfernt.

Mit Hilfe einer als *edge flipping* bezeichneten Technik (siehe Abbildung 8.20) wird die Anzahl der TriangleEdges eines zu entfernden Punktes so weit wie möglich reduziert. Dabei wird versucht, die gemeinsame Kante zweier Triangles, die eine Diagonale des Vierecks aus beiden Dreiecken ist,

durch die andere mögliche Diagonale des Vierecks zu ersetzen. Punkt p in Abb. 8.20 soll entfernt werden, die Kanten e_1 und e_2 liegen auf dem Polygon und dürfen nicht getauscht werden. Wenn der Punkt p nur noch zu vier Dreiecken gehört, können der Punkt, die vier Kanten und die vier Dreiecke problemlos gelöscht und durch eine neue Kante und zwei neue Dreiecke ersetzt werden.

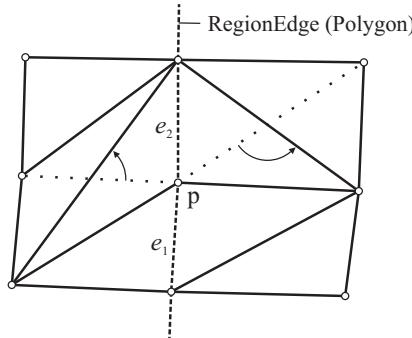


Abbildung 8.20: Edge flipping-Schema

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist eine Vergrößerung des Dreiecksnetzes in unmittelbarer Nähe der die RegionEdges darstellenden Polygone. Die Dreiecksanten der Polygone stellen die Ausgangsfront für den Advancing Front-Algorithmus dar.

Durch den Algorithmus wird das existierende Dreiecksnetz stückweise in ein Panelnetz umgewandelt. Dabei werden keine vierseitigen Elemente erzeugt, sondern je zwei Dreiecke, die zusammen ein viereckiges Panel bilden. Die für das Panelnetz nicht benötigte Diagonale wird gekennzeichnet. Die Beibehaltung eines Dreiecksnetzes hat den Vorteil, dass keine Rechenmethode für die Berücksichtigung vierseitiger Elemente angepasst werden muss. Alle Elemente können in gleicher Weise behandelt werden, unabhängig davon, ob sie ein fertiges Panel bilden oder noch zur ursprünglichen Schiffsformapproximation gehören.

Zu Beginn der Netzerstellung muss die Menge aller Dreiecke auf diejenigen reduziert werden, die die gerade bearbeitete Teilregion darstellen. Dazu wird mit Hilfe der bounding box ein Dreieckspunkt nahe der Mitte der Region gesucht. Von diesem Punkt ausgehend werden alle Dreiecke bis zu den die Region begrenzenden TriangleEdges der Ausgangsfront gesucht. Zur Vermeidung zusätzlicher Listen zur Speicherung dieser Dreiecke werden die einzelnen Elemente (TrianglePoint, TriangleEdge, Triangle) als zur aktuellen Region gehörig gekennzeichnet.

In ähnlicher Weise werden alle Kanten des Teildreiecksnetzes gekennzeichnet. Jede Kante bekommt einen Status zugewiesen, der ihren aktuellen Bearbeitungszustand beschreibt. Zu Beginn haben alle Kanten den Status -1, sie wurden noch nicht bearbeitet. Fertig bearbeitete Kanten haben den Status 4 oder 5; diese Kanten dürfen nicht mehr verändert werden, sie bilden das Panelnetz. Der Status 5 kennzeichnet dabei die Diagonal-Kanten der vierseitigen Panels. Auch die TriangleEdges, die die aktuelle Front bilden, bekommen einen Status zugewiesen, der die Art ihrer Bearbeitung beschreibt. Die verbleibenden Zustände 0 bis 3 werden für die Beschreibung der Front-Edges verwendet.

8.3.2 Auswahl der Randkanten

Der Status der Front-Edges beschreibt ihre Anbindung an die Nachbarelemente und bestimmt die Reihenfolge ihrer Bearbeitung. Abbildung 8.21 stellt die verschiedenen Konfigurationen dar.

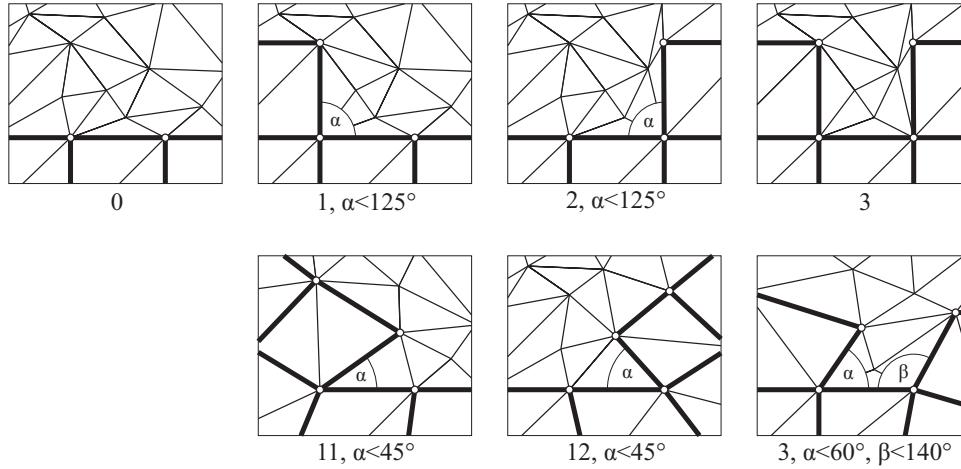


Abbildung 8.21: Status einer Front-Edge

Der Status 0 besagt, dass an keiner Seite der Front-Edge ein Element existiert, von dem eine Kante für das neu zu erzeugende Element genutzt werden kann. Bei Status 1 und 2 ist genau solch ein Element vorhanden und die betreffende Kante braucht nicht neu zu erzeugt werden. Bei Status 3 existieren schon beide neuen Kanten. Die Zustände 11 und 12 beschreiben Sonderfälle von 1 und 2, bei denen der Winkel zwischen Front-Edge und vorhandener Seiten-Edge $< 45^\circ$ ist.

Alle Front-Edges werden je nach Status in einer Liste gespeichert. Zu jedem Status gibt es eine erste und eine zweite Liste. Alle Ausgangskanten werden in der ersten Liste gespeichert, neu erzeugte Front-Edges in der zweiten Liste. Priorität bei der Bearbeitung haben immer die Front-Edges der jeweils ersten Liste. Dadurch wird sichergestellt, dass jede Reihe neuer Elemente beendet wird, bevor eine neue Reihe bearbeitet wird. Der Status einer Front-Edge bestimmt die Priorität der Bearbeitung, die Reihenfolge ist: 3, 11/12, 1/2, 0.

Die Berechnung des Status einer Front-Edge wird nach jeder Änderung des Netzes ausgeführt. Dabei werden zu jedem Endpunkt der Front-Edge die angrenzenden Front-Edges gesucht und deren Winkel zur aktuellen Front-Edge bestimmt. Wenn sich der Status einer Front-Edge ändert, wird sie innerhalb der Listen umsortiert.

8.3.3 Berechnung neuer Punkte und Kanten

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Berechnung neuer Elementkanten ist bei allen Advancing Front-Verfahren ähnlich. Deshalb sollen hier nur die wichtigsten für das Verständnis nötigen Schritte sowie die speziellen Anpassungen erläutert werden. Weitere Details können [87], [83] oder [18] entnommen werden.

Die Berechnung einer neuen Seiten-Edge für ein neues Element besteht im Wesentlichen aus der Suche nach einem passenden Panelpunkt, der zusammen mit einem der Endpunkte der

Front-Edge die neue Seitenkante bildet. Bei einem indirekten Ansatz wird idealerweise ein schon im Dreiecksnetz vorhandener Punkt verwendet und auf diese Weise Rechenzeit gespart. Die Berechnung eines neuen Panelpunktes ist in Abbildung 8.22 schematisch dargestellt.

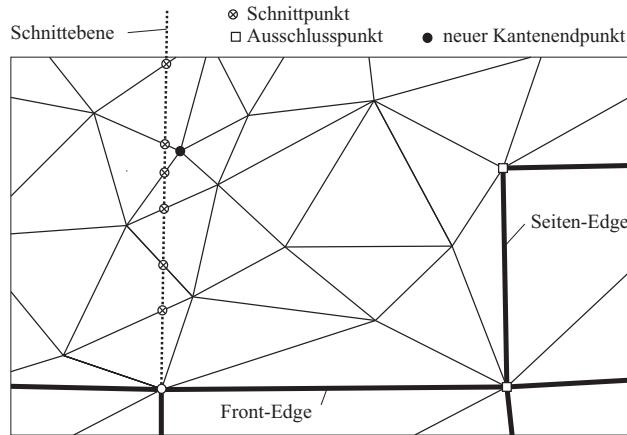


Abbildung 8.22: Berechnung einer neuen Seiten-Edge

Zuerst wird der Ausgangspunkt auf der Front-Edge sowie eine Liste von Ausschlusspunkten definiert. Die Ausschlusspunkte sind Endpunkte benachbarter Panelkanten, die in keinem Fall als neue Punkte für die neue Seiten-Edge verwendet werden dürfen. Insbesondere bei starken Verzerrungen des Netzes erleichtert dieser Ausschluss die Suche nach dem neuen Punkt.

Zur Suche nach einem geeigneten Endpunkt für die neu zu erstellende TriangleEdge wird eine Schnittebene definiert. Der am besten geeignete Punkt würde auf dieser Schnittebene liegen und einen Soll-Abstand zum Ausgangspunkt besitzen, der sich zu gleichen Anteilen aus dem Mittelwert der zum Ausgangspunkt gehörenden Front-Edges, der gespeicherten Panelgröße und einer eventuell vorhandenen Seiten-Edge zusammensetzt.

Ausgehend vom Ausgangspunkt werden die Schnittpunkte der Ebene mit Dreieckskanten berechnet, bis der Abstand des letzten Punktes mehr als 120 % des Soll-Abstandes beträgt, siehe auch Abb. 8.22. Falls eine Dreieckskante mit dem Status 4 (bereits erstelltes Panel) geschnitten wird, wird die Suche nach Schnittpunkten abgebrochen.

Die Auswahl des besten Punktes ist in drei Stufen mit steigendem Bearbeitungsaufwand gegliedert. Der Rechenaufwand wird hauptsächlich durch Rechnungen zur Änderung des zugrunde liegenden Dreiecksnetzes verursacht, demzufolge erfordert die Verwendung eines bereits existierenden Punktes den geringsten Rechenaufwand. Darüber hinaus erhöht sich durch jede weitere Verfeinerung des Dreiecksnetzes der Aufwand für folgende Rechnungen. Ausgehend vom dem am besten passenden Schnittpunkt werden die umliegenden vorhandenen Punkte verglichen. Als Vergleichskriterium wird die normierte Summe aus Abstandsabweichung zum Soll-Abstand und Winkel der potentiellen neuen Kante zur Schnittebene verwendet. Um die Verwendung eines existierenden Punktes zu begünstigen, werden Abweichungen zum idealen Vergleichskriterium von 30 % zugelassen. Im Beispiel in Abb. 8.22 würde der schwarz dargestellte Punkt verwendet werden.

Falls keiner der existierenden Punkte genutzt werden kann, wird untersucht, ob die Verwendung eines der berechneten Schnittpunkte möglich ist. Auch hierbei wird die Verwendung durch

das Zulassen einer Abweichung von bis zu 10 % zum Soll-Abstand begünstigt. Die Größe der gewählten zulässigen Abweichungen resultiert aus praktischen Tests. Ein geeigneter Schnittpunkt wird durch Teilen der entsprechenden Kante und zweier Dreiecke in das Dreiecksnetz eingefügt und als neuer Kantenendpunkt verwendet.

Wenn keiner der Schnittpunkte geeignet ist, wird ein neuer Punkt an der Soll-Position eingefügt, indem das dortige Dreieck in drei neue Dreiecke geteilt wird.

Nachdem der neue Panelpunkt gefunden ist, ist die neue Seiten-Edge zu ermitteln. Hierfür wird eine Technik verwendet, die als *edge recovering* bezeichnet wird. Durch Vertauschen störender Dreiecksanten ähnlich wie in Abbildung 8.20 wird das Dreiecksnetz bis zur Entstehung der gewünschten Kante geändert. In Abbildung 8.23 ist dies schematisch dargestellt.

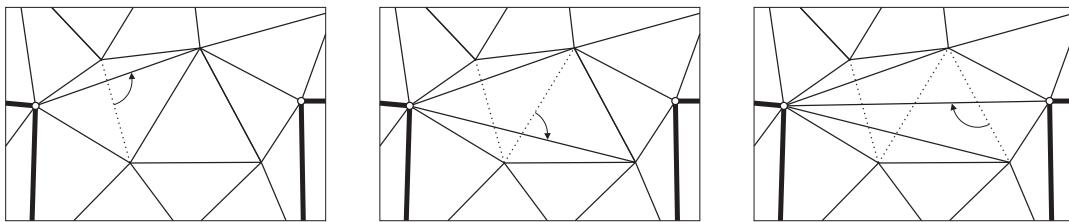


Abbildung 8.23: Edge recovering

Die zu tauschenden Dreiecksanten werden mit Hilfe einer Schnittebene gefunden, die die Endpunkte der neu zu erstellenden Kante enthält. Bei mehr als 15 geschnittenen Dreiecksanten hat es sich bewährt, das Dreiecksnetz lokal zu vergrößern. Dazu werden alle von der Schnittebene geschnittenen Dreiecksanten, deren Endpunkte sowie alle zu diesen Endpunkten gehörenden Kanten und Dreiecke gelöscht. Es entsteht eine Öffnung im Dreiecksnetz, die mittels eines *ear cutting* [32, 71] genannten Algorithmus wieder geschlossen wird, siehe Abbildung 8.24. Auf gleiche Weise werden Kanten bearbeitet, die sich aufgrund stark verzerrter und ungünstig geformter Dreiecke nicht ohne Entstehung von Überlappungen tauschen lassen.

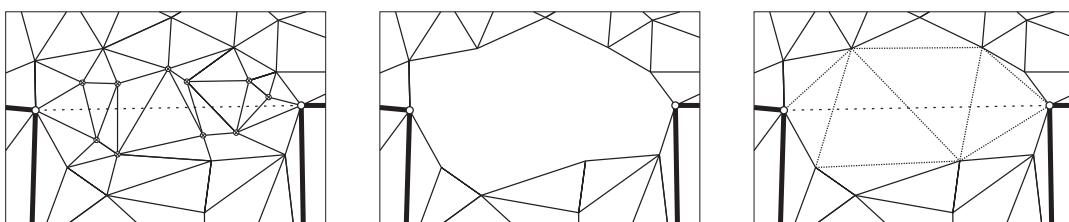


Abbildung 8.24: Ear cutting

Nachdem beide Seiten-Edges erzeugt worden sind, wird mittels edge recovering die letzte Kante erstellt. Nun können alle innerhalb des Panels liegenden Punkte gelöscht und zwei neue Dreiecke erzeugt werden. Diese beiden Dreiecke werden entsprechend markiert und bilden das neue Panel.

Auf die bis hier beschriebene Weise wird der größte Teil aller Front-Edges bearbeitet: alle Kanten mit einem Status von 0, 1, 2 oder 3. Wenn eine der Seiten-Edges schon existiert, aber einen sehr kleinen Winkel zur Front-Edge hat (Status 11 oder 12), wird auf das Erzeugen eines neuen Elementes verzichtet. Statt dessen werden Dreiecke kollabiert und die beiden mit spitzem Winkel

aneinander angrenzenden Front-Edges vereint. Dieser Schritt wird als *seaming* bezeichnet und ist in Abbildung 8.25 skizziert.

Weitere Sonderbehandlung erfahren benachbarte Front-Edges mit stark unterschiedlicher Größe. Bei kleinem Winkel zwischen den Front-Edges wird ein *transition seam* angewendet, bei normal großem Winkel ein *transition split*. Auch diese Techniken sind in Abbildung 8.25 skizziert, weitere Informationen können [83] entnommen werden.

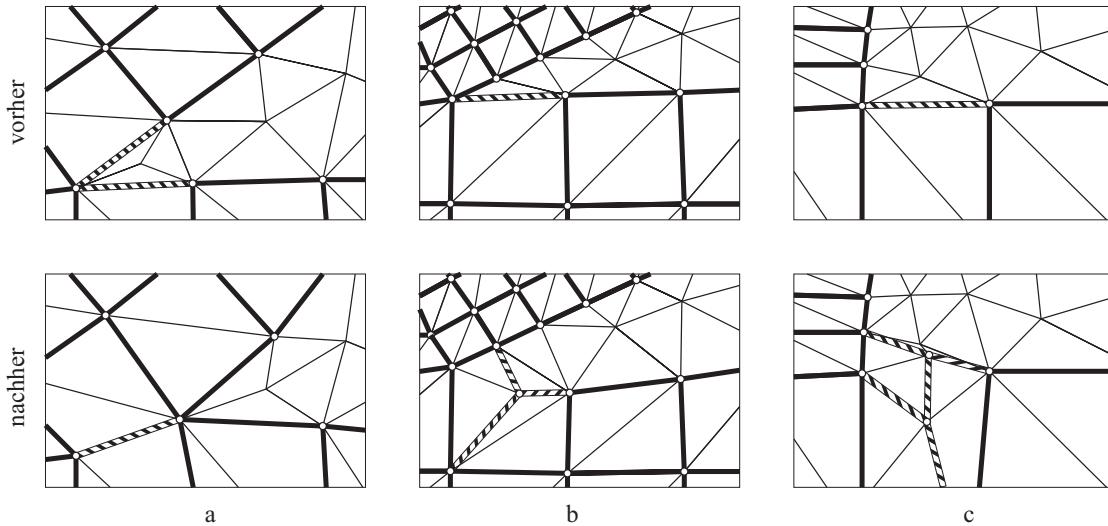


Abbildung 8.25: Spezielle Bearbeitungen von Front-Edges: seaming (a), transition seam (b) und transition split (c), schraffiert dargestellte Kanten werden durch die Bearbeitung direkt verändert

Zu jedem Zeitpunkt ist eine Liste aller aktuellen Front-Edges gespeichert. Wenn sich während des Vernetzungsprozesses zwei gegenüberliegende Fronten begegnen, kommt es zu einer Teilung des vorher geschlossenen Umlaufes der Front-Edges in zwei voneinander getrennte Umläufe, die unabhängig voneinander bearbeitet werden.

Eine weitere Sonderbehandlung ist bei Beendigung der Vernetzung einer Front erforderlich. Wenn nur noch sechs oder weniger Front-Edges übrig sind, werden die restlichen Dreiecke je nach Lage der Front-Edges in einem Schritt erzeugt, Abbildung 8.26 zeigt schematisch die zu berücksichtigenden Konstellationen der Front-Edges.

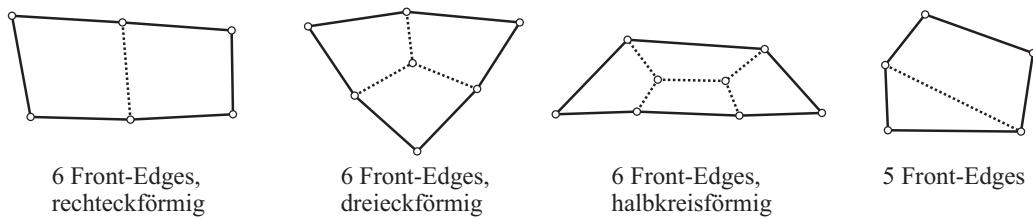


Abbildung 8.26: Varianten zum Schließen des Panelnetzes

8.3.4 Lokale Elementoptimierung

Bei nahezu jeder Methode der automatischen Netzgenerierung ist eine abschließende Verbesserung der Elementqualität erforderlich. Dies gilt besonders für unstrukturierte Netzgenerierungsverfahren. Diese Qualitätsverbesserung wird durch als *smoothing* bezeichnete Methoden erreicht. Fast alle smoothing-Techniken arbeiten iterativ und werden so lange auf alle Elemente angewendet, bis die Gesamtqualität des Netzes konvergiert.

Es gibt verschiedene Grundtechniken: die verbreitetsten werden als Durchschnitts- oder Mittelungsverfahren bezeichnet. Unter diesen ist das Laplace'sche smoothing [29, 43] das am häufigsten verwendete Verfahren. Es ist einfach zu implementieren. Bei dieser Methode wird jeder Elementknoten in den Schwerpunkt der ihn direkt umgebenden Knoten verschoben. Es können zusätzliche Randbedingungen mit der Berechnung der neuen Knotenpositionen verknüpft werden.

Andere smoothing-Ansätze basieren auf Optimierungsrechnungen. Hierbei wird die Elementqualität nach verschiedenen Kriterien bewertet; die Knoten werden dann so verschoben, dass sich die Gesamtqualität verbessert. Diese Verfahren benötigen viel Rechenzeit, so dass sie selten eingesetzt werden. Eine dritte Gruppe von smoothing-Verfahren bildet verschiedenste physikalische Prinzipien auf das Netz ab, um eine bestmögliche Anordnung der Elementpunkte zu erreichen. Ein anschauliches Beispiel ist z. B. der Ansatz, die Elementkanten als Federn abzubilden und die Knoten so zu verschieben, dass die Federkräfte im Gleichgewicht sind.

Die hier implementierte Methode zur Verbesserung der Elementqualität basiert auf dem Ansatz von [12]. Sie besteht hauptsächlich aus einem Laplace'schen smoothing mit Anpassungen für die Sollkantenlängen und die Winkel zwischen den Elementen. Panelpunkte auf der aktuellen Front werden dabei anders bearbeitet als Punkte im Panelnetz. Der smoothing-Algorithmus wird nach jeder Erzeugung eines neuen Elementes sowie jeder anderen Änderung des Panelnetzes ausgeführt. Dabei werden zur Rechenzeiteinsparung nur das aktuell bearbeitete Element und alle direkt benachbarten Elemente berücksichtigt. Aus dem gleichen Grund wird die iterative Verschiebung der Panelpunkte abgebrochen, wenn die größte Punktverschiebung kleiner als ein Grenzwert ist. Für diesen Grenzwert wurde eine maximale Punktverschiebung von $0,001 \cdot \text{Soll-Panelkantenlänge}$ gewählt, er wird im Mittel nach ca. fünf Iterationen erreicht.

8.3.5 Ergebnisse

Das Resultat des vorgestellten Advancing Front-Algorithmus ist ein fast ausschließlich aus Viereckelementen bestehendes Panelnetz. Die Besonderheit dieser Vernetzungsmethode liegt in ihrer Unabhängigkeit von der zu vernetzenden Geometrie, mit einer stabilen Implementierung können beliebig geformte Flächen vernetzt werden. Als Beispiel für ein fertiges Panelnetz wurde der Bugbereich eines Schiffes mit Sonardom gewählt. Der Sonardom stellt eine für eine Schiffsform ungewöhnlich starke lokale Geometrieänderung dar und ist deshalb eine besondere Herausforderung für den Vernetzungsalgorithmus. Abbildung 8.27 zeigt einen Ausschnitt des Panelnetzes und zusätzlich das zugrunde liegende Regionenmodell. Bis auf den Hauptspant und den Knick am Spiegelheck wurden keine weiteren Teilregionen erzeugt. Der Vernetzungsalgorithmus ist in der Lage, die relativ kompliziert geformte Geometrie (lokal große Tangenten- und Krümmungsänderungen) zu bearbeiten. Der implementierte Algorithmus soll jedoch nur den Anspruch erfüllen, die Leistungsfähigkeit unstrukturierter Vernetzungsalgorithmen zu untersuchen. Die Qualität des erzeugten Netzes kann in Bezug auf die Gleichmäßigkeit der Elemente noch nicht mit der

kommerzieller Programme (s. Abschn. 3.2.1, S. 23 ff.) konkurrieren. Zur weiteren Qualitätsverbesserung müssen umfangreiche Tests zur Anpassung der großen Zahl von Winkel- und sonstigen Kriterien durchgeführt werden, die bei der Netzerstellung die Form der Elemente steuern.

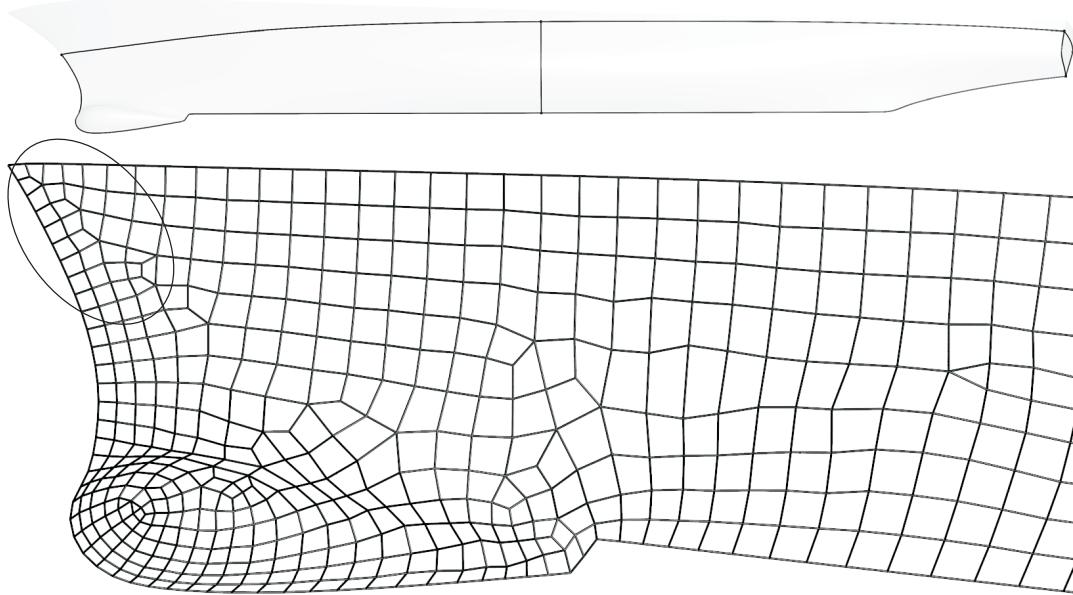


Abbildung 8.27: Unstrukturiertes Panelnetz und zugehöriges Regionenmodell

Ein Vorteil der unstrukturierten Panelnetze ist deutlich zu erkennen: es ist möglich, ein konsistentes Netz ohne Klaffungen und Überlappungen zu erzeugen und trotzdem sehr unterschiedliche Panelgrößen zu realisieren. Am gezeigten Beispiel ist auch ein Nachteil unstrukturierter Vierecksnetze zu erkennen. In der Nähe der Bugspitze trifft eine Front mit kleinen Elementgrößen auf eine mit großen Elementen. Der Übergang zwischen den verschiedenen Panelgrößen ließe sich mit dreieckigen Elementen wesentlich gleichmäßiger realisieren, wie es zum Vergleich in Abbildung 3.6 auf Seite 25 zu sehen ist.

8.4 Panelnetze und Rechenergebnisse ausgewählter Beispielschiffe

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der beschriebenen Verfahren zur automatischen Panelnetzgenerierung zusammenhängend dargestellt, unabhängig von der Art der verwendeten Vernetzungsmethode. Für drei Beispielschiffe werden mit den verschiedenen Netzgenerierungsmethoden erstellte Panelnetze vollständig dargestellt. Zum Nachweis der praktischen Verwendbarkeit der Panelnetze werden die Ergebnisse von Berechnungen des Wellenwiderstandes gezeigt. Die Rechnungen wurden mit dem Programm *v-Shallo* (Version 1.1) [67, 116] der HSVA durchgeführt. Zum Nachweis der Erzielung realistischer Rechenergebnisse werden der Verlauf des Wellenwiderstandsbeiwertes c_w über einen für das jeweilige Schiff relevanten Geschwindigkeitsbereich sowie die Verteilung des Druckbeiwertes c_p im Vorschiffsbereich für die Entwurfsgeschwindigkeit dargestellt. Zusätzlich werden zu jedem Schiff und Panelnetz die wichtigsten Daten und die

Rechenzeiten der einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt. Die Rechenzeiten wurden auf einem herkömmlichen PC² ermittelt. Zum Vergleich werden den Ergebnissen mit den automatisch erzeugten Panelnetzen die Ergebnisse manuell erstellter Panelnetze gegenüber gestellt.

Die folgenden Abbildungen 8.28 bis 8.31 zeigen Beispielnetze und Rechenergebnisse für ein Modell eines Zerstörers der US Navy mit der Bezeichnung *DTMB 5415*. Dieses Schiff wurde um 1980 im David Taylor Model Basin (heute: Naval Surface Warfare Center, Carderock Division [78]) entwickelt, aber nie gebaut. Das Schiff wird für viele CFD-Untersuchungen als Referenzmodell verwendet. Eine Besonderheit des unter anderem auf [70] zur Verfügung gestellten Schiffsmodells ist die besonders schlechte Qualität der IGES-Beschreibung. Das gesamte Schiff besteht aus nur drei einzelnen NURBS-Flächen, von denen die beiden den Rumpf bildenden Flächen im Vorschiffsbereich stark überlappen. Hierin sind auch die im Vergleich zu den anderen Beispielschiffen höheren Rechenzeiten begründet: Bei der Optimierung des Panelnetzes werden u. a. alle Panelpunkte exakt auf den Schiffsrumphilfverschoben, indem die Schnittpunkte von durch die Panelpunkte verlaufenden Geraden mit der parametrischen Flächenbeschreibung berechnet werden. Bei aus vielen Einzelflächen bestehenden Schiffsmodellen kann für die Schnittpunktberechnung die jeweils in Frage kommende (kleine) Einzelfläche verwendet werden, was zu einer Reduktion der Rechenzeit führt. Beim Modell des DTMB 5415 muss für jeden Schnittpunkt nahezu der gesamte Schiffsrumphilf untersucht werden. In Abbildung 8.32 sind die Gesamtwiderstandsbeiwerte c_t der verschiedenen Panelnetze des Zerstörers zusammengefasst dargestellt. Die Abweichungen sind sehr gering, bei der Entwurfsgeschwindigkeit ($F_n = 0,412$) beträgt die maximale Abweichung vom Mittelwert 3,8 %. Das zum Vergleich verwendete manuell erstellte Panelnetz wurde von der HSVA zur Verfügung gestellt.

Die Abbildungen 8.33 und 8.34 zeigen die zwei Varianten eines strukturierten Panelnetzes für das bereits vorgestellte Containerschiff *Ville de Mercure*. Zu beachten sind hier die geringeren Rechenzeiten für die automatische Erstellung der Panelnetze. Dies ist durch die aus einer größeren Zahl einzelner Flächen bestehende Schiffsformbeschreibung begründet. Für dieses und auch das folgende Testschiff können keine Beispiele unstrukturierter Panelnetze gezeigt werden, da die Implementierung nicht stabil genug ist, um alle Teilregionen dieser Schiffe ausreichend zu vernetzen. Durch die größere Anzahl an Einzelflächen entstehen an den Verbindungsstellen des konsistenten Grundnetzes sehr kleine Dreiecke, die zu Problemen beim edge recovering des Advancing Front-Algorithmus führen.

Die beiden Abbildungen 8.35 und 8.36 zeigen Netze und Rechenergebnisse eines Schiffes mit Center-Skeg. Zu diesem Schiff liegen keine weiteren Informationen vor; es ist lediglich bekannt, dass es sich um das Modell eines Fährschiffes handelt. Das Vergleichsnetz wurde manuell mit dem Programm Hypermesh erzeugt.

Zur Demonstration der Flexibilität der automatischen Panelgenerierungsmethode in Bezug auf unterschiedliche Schiffsgeometrien soll die Anpassung des Panelnetzes an eine sich ändernde Wasseroberfläche verwendet werden. Genauso wie das Panelnetz bei gleichbleibender Qualität an verschiedene Wasseroberflächenkonturen angepasst wird, werden auch unterschiedlichste Schiffsformen in gleichbleibender Qualität vernetzt. Die Abbildung 8.37 zeigt die strukturierte und die unstrukturierte Variante des Panelnetzes mit sehr unterschiedlichen Wasseroberflächen. Die jeweils oberen Bilder zeigen Wasserlinien bei einer Geschwindigkeit von 3 kn bzw. 9 kn, das untere Bild einer Gruppe zeigt eine fiktive Wasserlinie in Sinusform.

²Prozessor: AMD Athlon64 X2 3800 (2,0 GHz)

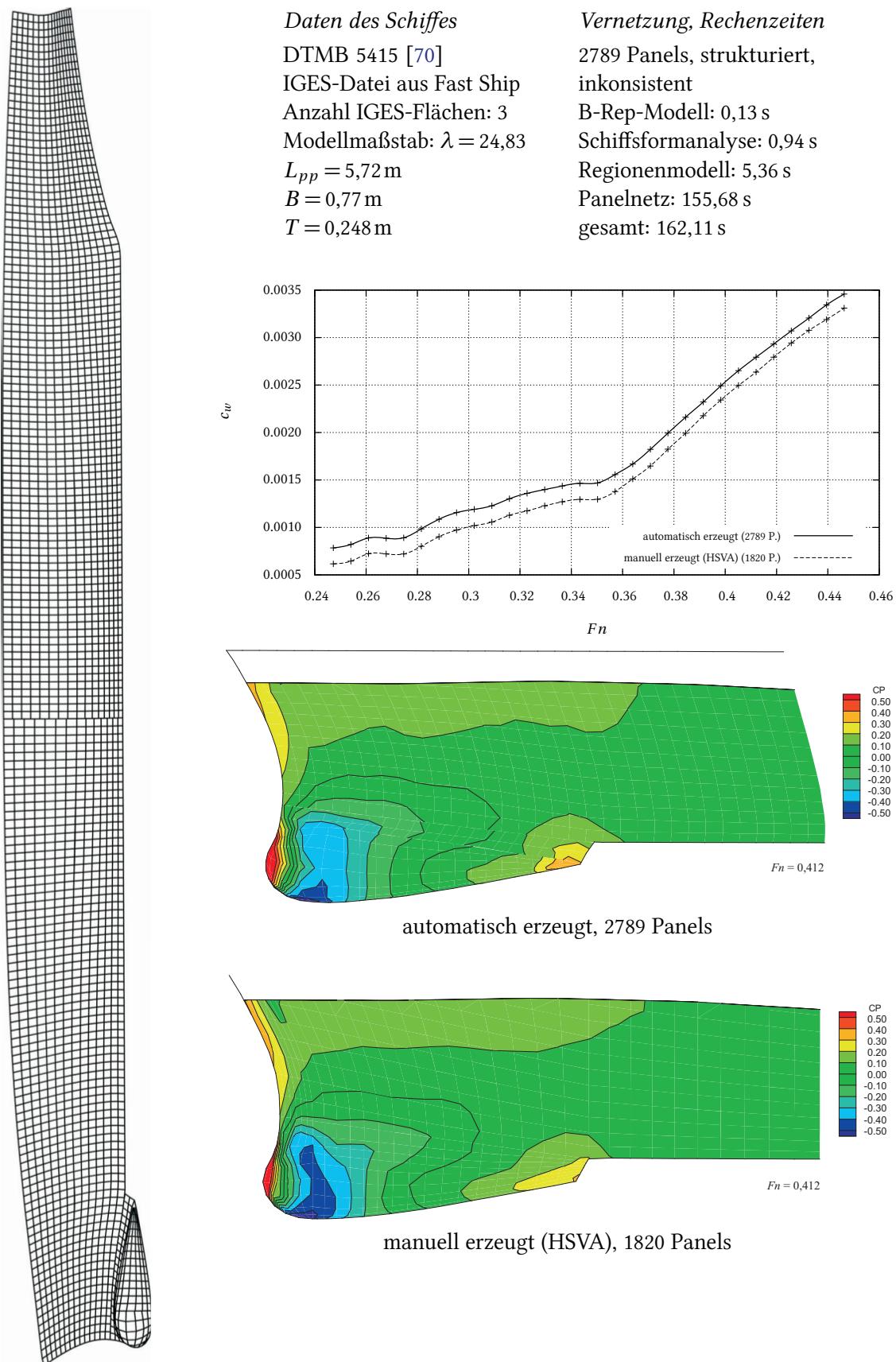


Abbildung 8.28: DTMB 5415: strukturiertes, nicht konsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse

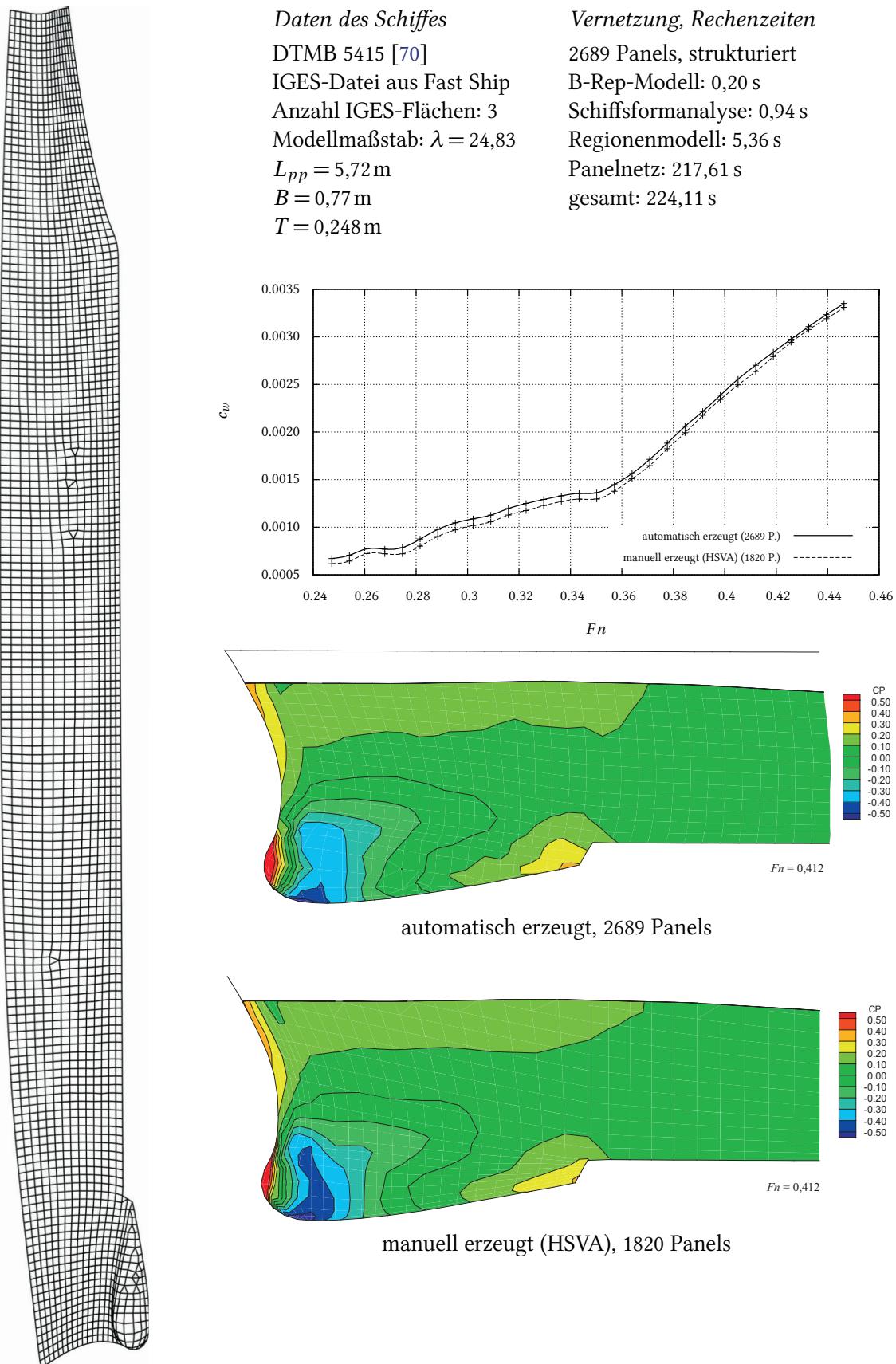


Abbildung 8.29: DTMB 5415: strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse

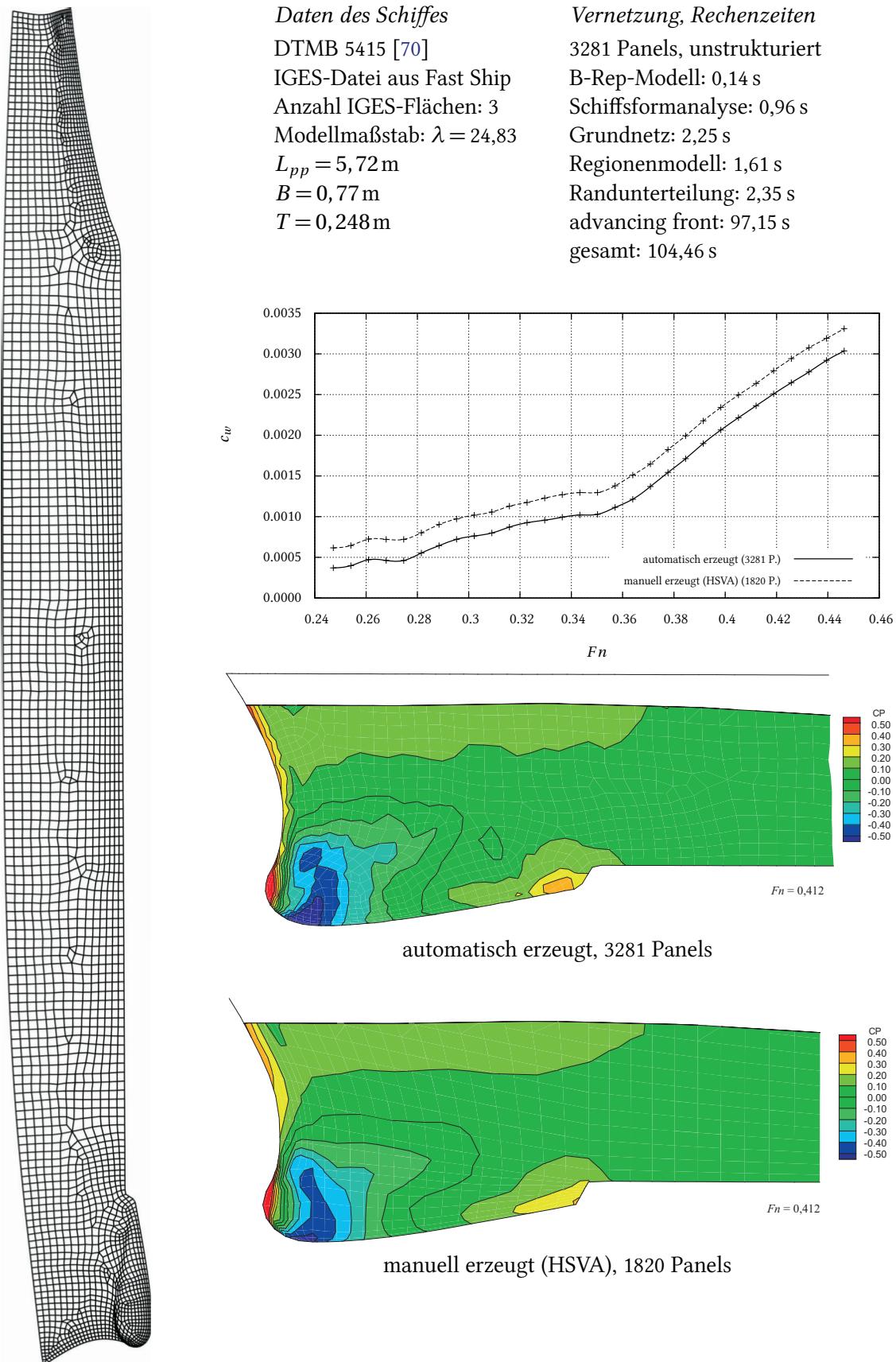


Abbildung 8.30: DTMB 5415: unstrukturiertes Panelnetz (fein) und Rechenergebnisse

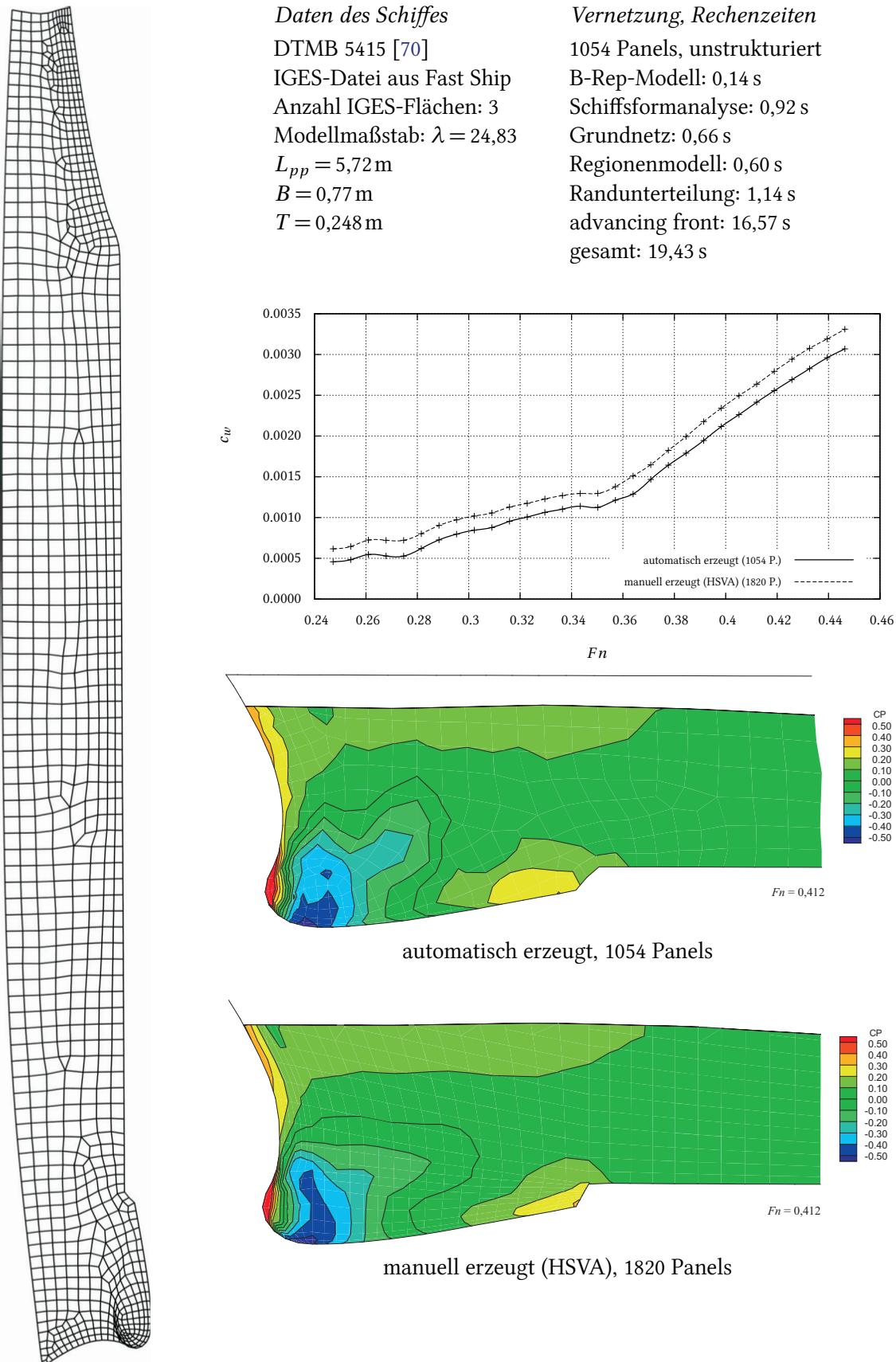


Abbildung 8.31: DTMB 5415: unstrukturiertes Panelnetz (grob) und Rechenergebnisse

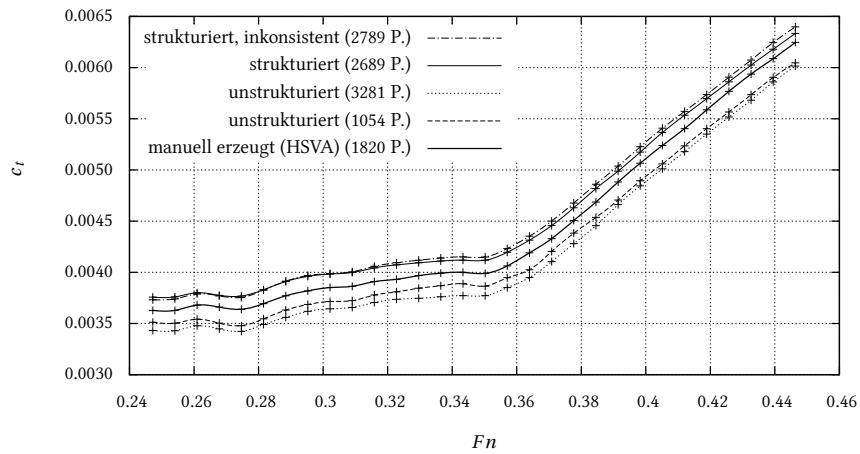


Abbildung 8.32: Gegenüberstellung der mit unterschiedlichen Panelnetzen ermittelten Gesamtwiderrstandsbeiwerte c_t des Zerstörers DTMB 5415

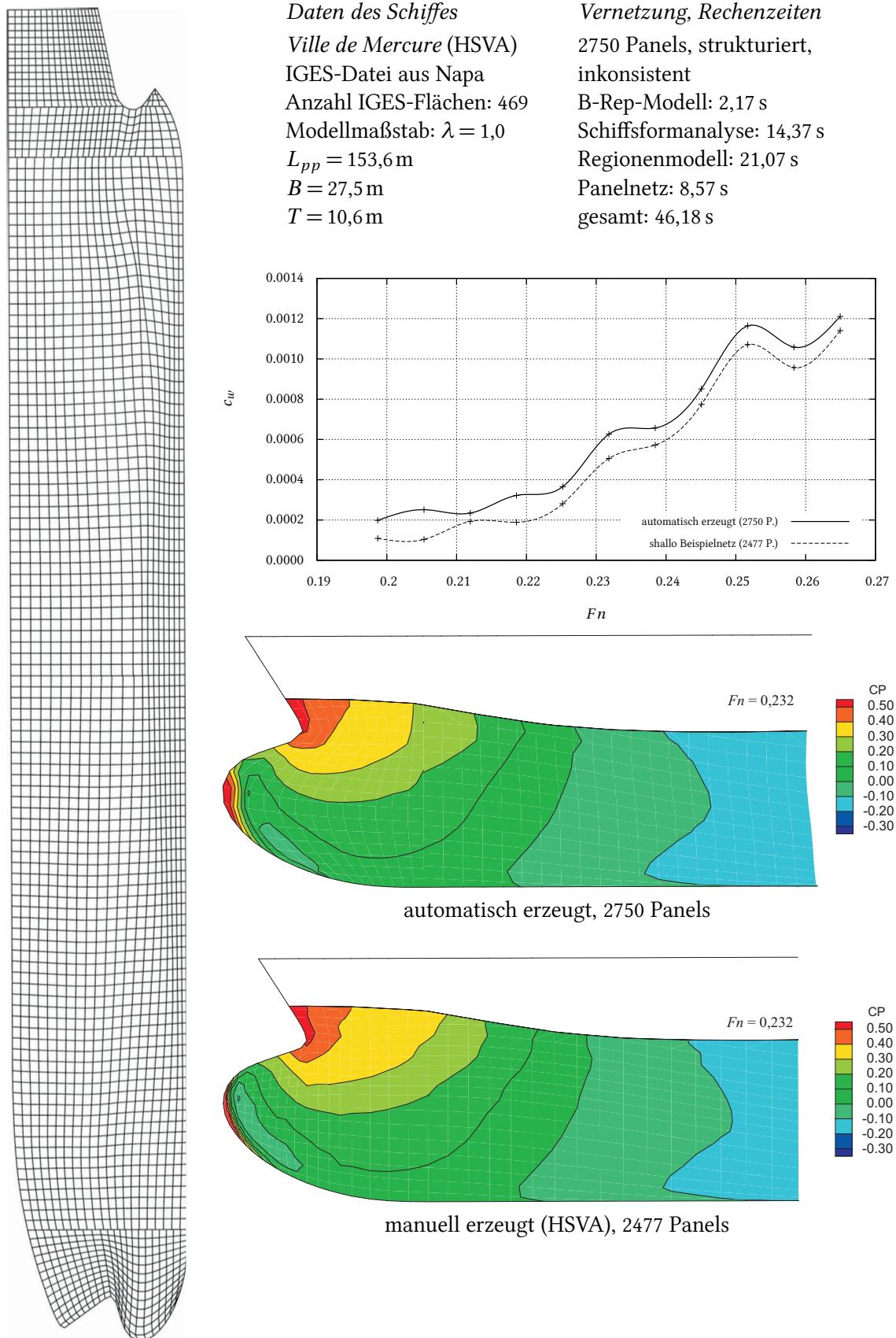
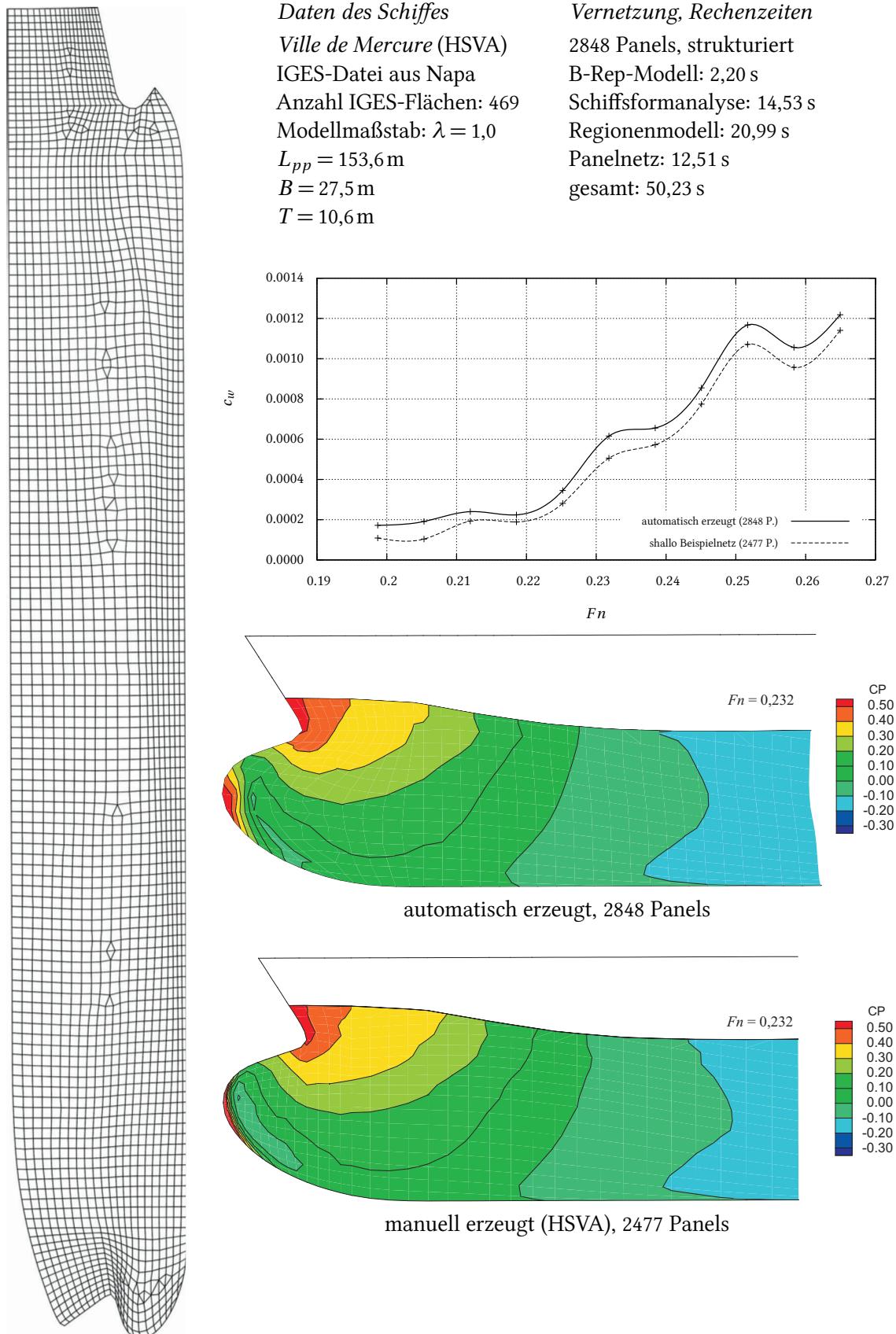


Abbildung 8.33: Ville de Mercure: strukturiertes, inkonsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse

Abbildung 8.34: *Ville de Mercure*: strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse

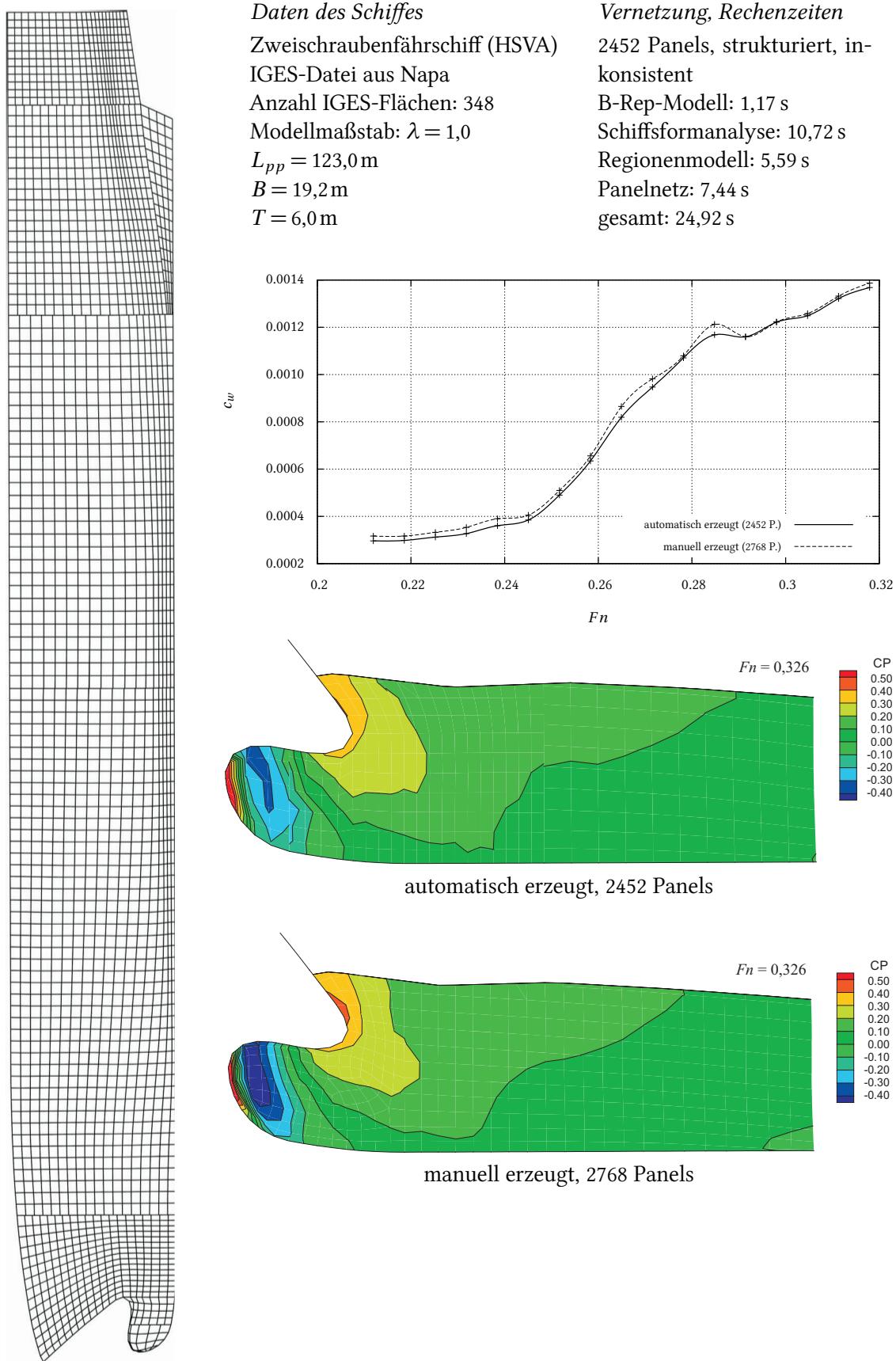


Abbildung 8.35: Zweischraubenfährschiff mit Center-Skeg: strukturiertes, nicht konsistentes Panelnetz und Rechenergebnisse

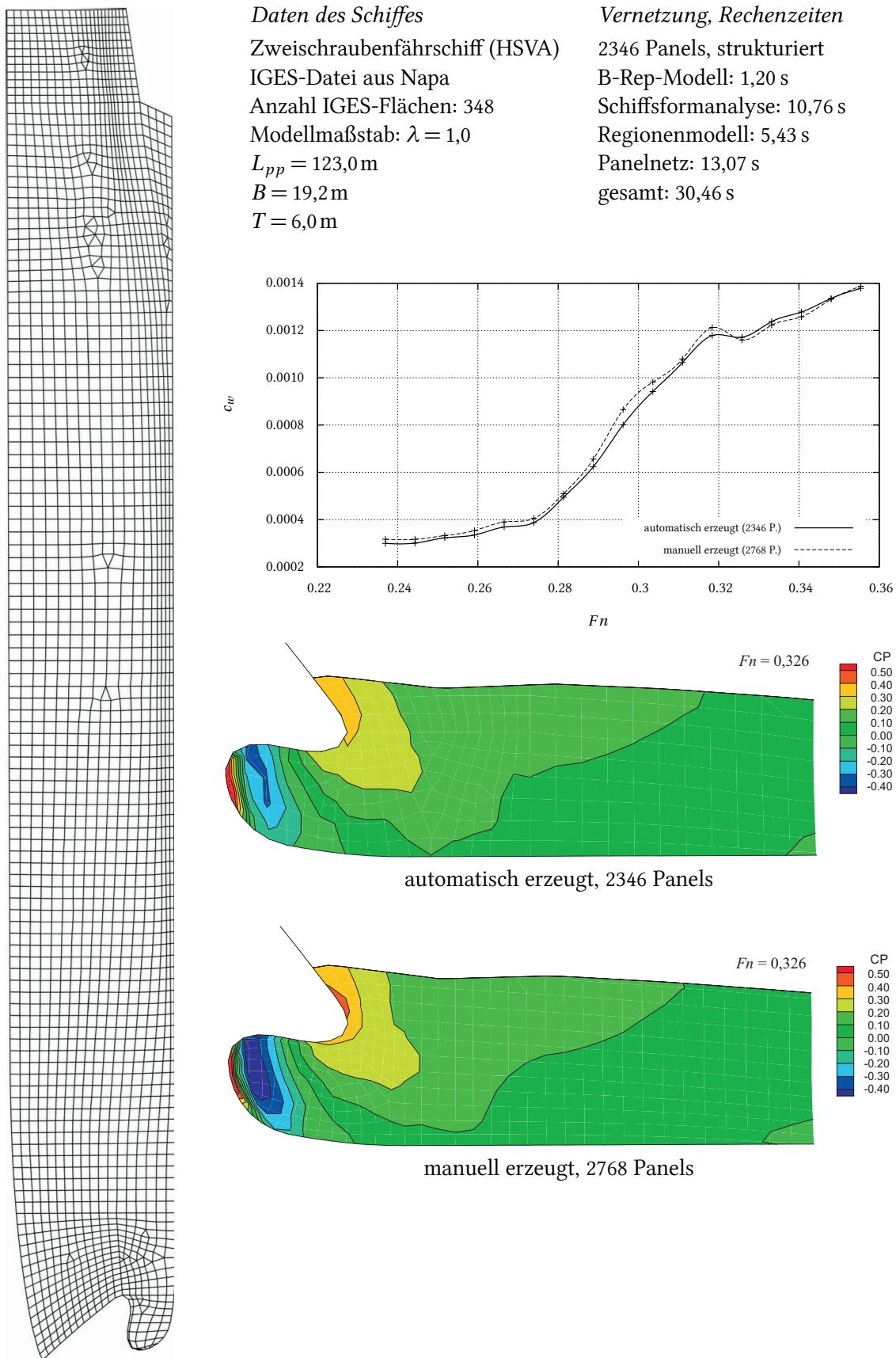


Abbildung 8.36: Zweischraubenfährschiff mit Center-Skeg: strukturiertes Panelnetz und Rechenergebnisse

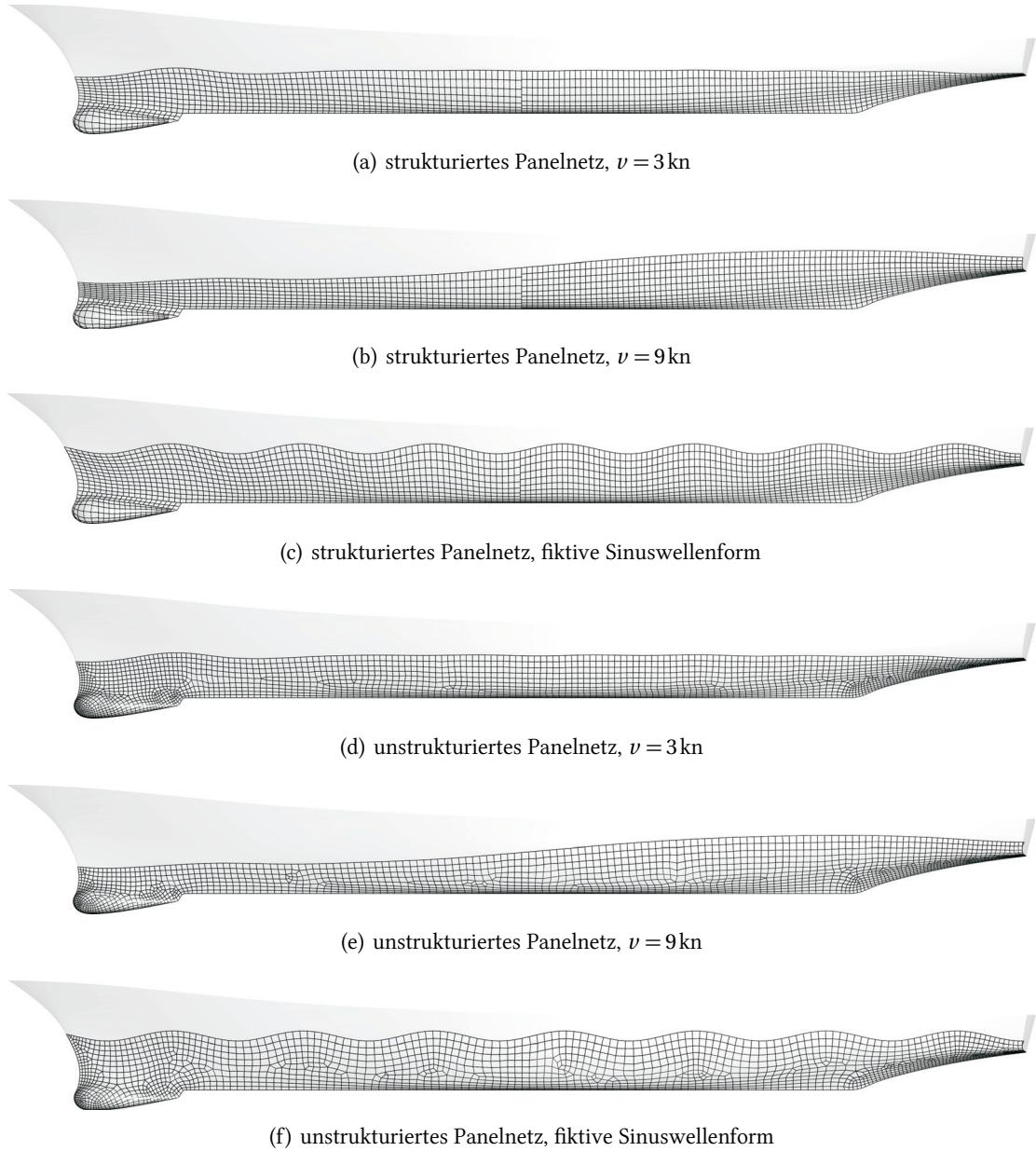


Abbildung 8.37: Anpassung eines strukturierten und unstrukturierten Panelnetzes an unterschiedliche Wasseroberflächen

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Entwicklung von Methoden zur vollautomatischen Erzeugung von Panelnetzen auf Schiffsrümpfen für Berechnungen des Wellenwiderstandes. Die Ermittlung des Wellenwiderstandes mit Hilfe der Potentialtheorie ist ein wichtiges Werkzeug, um beim Entwurf eines Schiffes verschiedene Rumpfvarianten zu vergleichen. Hierbei kommt es darauf an, in möglichst kurzer Zeit eine hinsichtlich des Schleppwiderstandes optimale Schiffsform zu ermitteln. Bisher entfällt auf den Arbeitsschritt der Panelnetzgenerierung der größte Anteil der insgesamt für Wellenwiderstandsanalysen benötigten Zeit. Eine vollständige Übernahme der Netzgenerierung durch ein Computerprogramm bietet ein großes Potential zur Zeitsparnis.

Zu Beginn wurden die Zusammenhänge zwischen den potentialtheoretischen Berechnungsverfahren und den dafür benötigten Panelnetzen näher betrachtet. Es wurden die Auswirkungen unterschiedlichster Panelparameter und Netzkonfigurationen auf die Rechenergebnisse untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass auf den globalen Aufbau des Panelnetzes bezogene Parameter (konsistent/inkonsistent, strukturiert/unstrukturiert, Dreieck-/Viereckelemente) nur sehr geringe Auswirkungen auf die berechneten Ergebnisse besitzen. Ein weiterer Teil der Voruntersuchungen beschäftigte sich mit den derzeit verfügbaren Verfahren zur manuellen Erzeugung der Panelnetze und ihren Vor- und Nachteilen. Der Hauptbestandteil dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden zur Automatisierung des gesamten Netzgenerierungsprozesses. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Aufbereitung der Schiffsformbeschreibung. Es wurden die verschiedenen Möglichkeiten des Datenaustauschs und der weiteren Bearbeitung von Schiffsformbeschreibungen untersucht. Ein Teil der Arbeit beschäftigt sich mit einem besonders wichtigen Aspekt der Schiffsformaufbereitung, der automatischen Identifikation der besonderen Merkmale eines Schiffsrumfes. Den Abschluss der Untersuchungen bilden die Vernetzungsverfahren. Es wurden zwei grundsätzlich verschiedene Methoden vorgestellt und untersucht.

Im Rahmen der Methodenentwicklung wurden umfangreiche Programme implementiert, sowohl in der Programmiersprache Java als auch in C++. Es wurde eine Arbeitsumgebung geschaffen, die die Visualisierung von Zwischenergebnissen und den manuellen Eingriff in den vollautomatischen Vernetzungsprozess gestattet (siehe Abbildung 9.1).

Der gesamte Bereich der Geometriebearbeitung erfordert einen hohen Programmieraufwand. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lösungen können deshalb nur als Labormuster bezeichnet werden; sie funktionieren gut mit den zur Verfügung stehenden Beispieldaten, eine stabile Implementierung würde jedoch bedeutend mehr Aufwand erfordern. Der Quellcode der in C++ implementierten Methoden hat einen Umfang von ca. 45000 Zeilen.

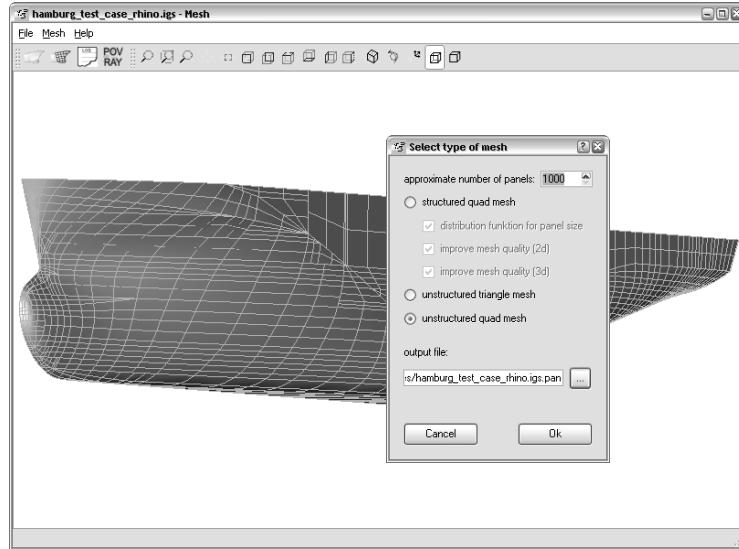


Abbildung 9.1: Labormuster zur Untersuchung der automatischen Vernetzungsmethoden

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

Das Datenformat zur Beschreibung der Schiffsgeometrie hat einen großen Einfluss auf die automatische Panelnetzgenerierung. Es muss die Schiffsform in einer Weise beschreiben, die es ermöglicht, ein topologisches Modell des Schiffsrumpfes zu erstellen. Unter den derzeit gebräuchlichen Datenformaten kommen hierfür besonders das STEP-Format oder das IGES-Format in Frage. Bei einer Schiffsbeschreibung mit Hilfe des IGES-Standards ist insbesondere die Genauigkeit der Geometriedefinition entscheidend für eine erfolgreiche automatische Vernetzung.

Die genaue Analyse der Form des Schiffsrumpfes ist von entscheidender Bedeutung für die automatische Netzgenerierung. Je nach Art des zu erzeugenden Panelnetzes (strukturiert oder unstrukturiert) müssen alle relevanten Formdetails eines Schiffsrumpfes automatisch identifiziert werden, damit sie bei der Netzerstellung berücksichtigt werden können. Für unstrukturierte Netze ist der Aufwand hierfür geringer als für strukturierte Elemente. Besonders eine automatische Erkennung von Knicken im sonst strakenden Schiffsrumpf ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Schiffsformanalyse. Mit Hilfe der über die Schiffsform gewonnenen Informationen muss der Unterwasserrumpf in einfache, einer Vernetzung leichter zugängliche Teilbereiche gegliedert werden.

Für die Netzgenerierung stehen je nach Art des zu erzeugenden Netzes eine Vielzahl von Methoden in der Literatur zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei grundsätzlich verschiedene Strategien implementiert und auf ihre Anwendungsmöglichkeiten untersucht. Die erste Vorgehensweise beruht auf einer sehr detaillierten Analyse der Schiffsform. Alle für eine Vernetzung bedeutsamen Details werden erkannt und bei der Erstellung eines strukturierten Netzes berücksichtigt. Diese Herangehensweise erfordert einen hohen Aufwand bei der Implementierung. Es können nur solche Schiffe erfolgreich bearbeitet werden, deren Charakteristika bei der Implementierung berücksichtigt worden sind. Dies bedeutet, dass eine derartige Methode nicht für alle denkbaren Schiffsformen einsetzbar sein wird. Eine Bearbeitung von nicht vom Algorithmus abgedeckten Schiffsformen kann durch manuellen Eingriff in den ansonsten automatischen Vernetzungsprozess erheblich beschleunigt werden. Ein Vorteil dieser Methode ist die sehr gute Qualität

der erstellten Panelnetze. Durch die detaillierte Berücksichtigung der speziellen Merkmale einer Schiffsform kann das erzeugte Panelnetz sehr genau an die Anforderungen bezüglich der Form und Gleichmäßigkeit der Elemente angepasst werden.

Der unstrukturierte Vernetzungsansatz ist weniger speziell an bestimmte Merkmale einer Schiffsform angepasst. Die Schiffsformanalyse beschränkt sich hierfür weitgehend auf die Erkennung von Knicken und wenigen wichtigen Details (Stevenrohr, Spiegelheck), die genaue Form des Schiffsrumpfes ist nicht von Bedeutung. Dies erfordert jedoch einen höheren Aufwand im Vergleich zur strukturierten Vernetzungsmethode bei der Implementierung des Vernetzungsalgorithmus. Im Unterschied zur strukturierten Methode, bei der die Schiffsrumppflächen in einfache zu vernetzende Teilflächen geteilt wird, müssen die Algorithmen zur unstrukturierten Netzgenerierung in der Lage sein, beliebig geformte Flächen zu vernetzen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die hierfür erforderliche Stabilität der Implementierung nicht vollständig erreicht werden. Die große Zahl kommerziell verfügbarer Algorithmen zeigt jedoch das Potential dieser Vorgehensweise. Mit einer solchen Methode wäre es möglich, Panelnetze ausreichender Qualität auf beliebigen Schiffsformen automatisch zu erzeugen.

Die vorliegende Arbeit stellt eine erste Untersuchung zur vollautomatischen Panelnetzgenerierung für Schiffe dar. Es konnte gezeigt werden, dass eine solche automatische Gittergenerierung möglich ist. Für eine umfassende praktische Anwendung sind jedoch noch weitere Untersuchungen nötig, die über das Ziel dieser Arbeit hinausgehen.

Ein wichtiges Gebiet für weitere Verbesserungen ist die automatische Reparatur von Schiffsformbeschreibungen. Die Qualität der Schiffsformbeschreibung hat einen großen Einfluss auf die automatische Vernetzung. In der Praxis sind viele Schiffsformdefinitionen fehlerhaft und verhindern so von Anfang an eine automatische Bearbeitung. Die automatische Erkennung und Reparatur von Fehlern in einer Schiffsformbeschreibung bietet ein ähnlich großes Potential zur Zeiteinsparung wie die automatische Netzgenerierung. Geometriebeschreibungen von Schiffen werden in sehr vielen Bereichen des Schiffbaus verwendet und häufig wird viel Zeit investiert, um mit immer gleichen Arbeitsschritten immer wieder auftretende Fehler manuell zu reparieren.

Auch die Netzgenerierung selbst erfordert weitere Verbesserungen. So müssen die Methoden zur Erkennung und Bearbeitung der Schiffsformdetails auf bisher nicht berücksichtigte Schiffe wie z.B. Mehrrumpfschiffe oder Schiffe mit besonderen Anhängen erweitert werden. Auch eine abschließende Qualitätsverbesserung der automatisch erzeugten Panelnetze konnte bisher nur am Rande berücksichtigt werden. Hierdurch können große Verbesserungen der Elementkonfiguration erzielt werden.

Für viele der in dieser Arbeit vorgestellten Lösungen ergeben sich weitere Einsatzmöglichkeiten. So könnte z.B. das automatisch erzeugte Panelnetz auf dem Schiffsrumpp für die automatische Generierung eines Netzes aus Volumenelementen verwendet werden. Viele Rechenverfahren erfordern Volumennetze, z.B. muss für RANSE-Rechnungen das das Schiff umgebende Wasser durch Volumenelemente diskretisiert werden. Den Ausgang für die Erzeugung solcher dreidimensionalen Netze bildet dabei eine Vernetzung des Unterwasserschiffsrumppes.

Ein weiterer Aspekt ist die Erweiterung der Netzgenerierung auf die Erzeugung von Elementen für andere Berechnungsverfahren neben den CFD-Analysen. Insbesondere für Festigkeitsberechnungen werden andere Anforderungen an die einzelnen Elemente gestellt. Ein potentielles

Einsatzgebiet könnte die globale Festigkeitsanalyse für einen Schiffsrumphf sein. Hierzu wird ein Rechennetz auf dem Schiffsrumphf benötigt, dessen Elemente an den inneren Strukturen des Schiffes ausgerichtet sind. Ähnlich der in dieser Arbeit vorgestellten Berücksichtigung von Knickecken könnten die zu berücksichtigenden inneren Schiffsstrukturen als Randbedingung für die Vernetzung vorgegeben werden.

In einigen Fällen wurden bereits Versuche mit automatischen Formoptimierungen durchgeführt [20, 42, 68]. Die Methoden zur Änderung der Schiffsform waren dabei abhängig von den zur Verfügung stehenden Netzgenerierungsmethoden. Mit Hilfe einer automatischen Panelnetzerstellung erweitern sich die Möglichkeiten der Schiffsformvariation, da die Erstellung des Rechennetzes nicht berücksichtigt werden muss.

Literatur

- [1] Reiner Anderl und Dietmar Trippner. *STEP, Standard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Stuttgart: Teubner, 2000.
- [2] Autodesk, Inc., Hg. *DXF Reference*. 2007.
- [3] *Autoship Homepage*. Autoship Systems Corporation. URL: www.autoship.com.
- [4] Timothy J. Baker. „Delaunay-Voronoi Methods“. In: *Handbook of Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. CRC Press, 1999. 16–1–16–11.
- [5] *Barry Joe's Geompack and Mesh Generation Research*. Dr. Barry Joe, Zhou Computing Services Inc. URL: <http://members.shaw.ca/bjoe>.
- [6] Mark W. Beall, Joe Walsh und Mark S. Shephard. „Accessing CAD geometry for mesh generation“. In: *12th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 2003. S. 33–42.
- [7] Volker Bertram. *Practical ship hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [8] Volker Bertram und Gerhard Jensen. *Numerische Berechnung des Schiffswellenwiderstandes*. Techn. Ber. 477. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1987.
- [9] Volker Bertram und Gerhard Jensen. *Programme zur numerischen Berechnung des Schiffswellenwiderstands*. Techn. Ber. 2365. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1987.
- [10] Lothar Birk, Günther Clauss und June Young Lee. „Strategien zur hydrodynamischen Formoptimierung meerestechnischer Konstruktionen“. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 96 (2002). S. 335–355.
- [11] Ted D. Blacker und Michael B. Stephenson. „Analysis Automation With Paving: A New Quadrilateral Meshing Technique“. In: *Advances in Engineering Software* 56.13 (1991). S. 332–337.
- [12] Ted D. Blacker und Michael B. Stephenson. „Paving: A new Approach to Automated Quadrilateral Mesh Generation“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 32 (1991). S. 811–847.
- [13] Ted D. Blacker, Michael B. Stephenson u. a. „Automated Quadrilateral Mesh Generation: A Knowledge System Approach“. In: *Computers in Engineering* 3 (1988). S. 153–162.
- [14] R. Bronsart und G. Knieling. „Automatic Subdivision of Ship Hull Surfaces for Block Structured Mesh Generation“. In: *ICCAS 2007*. The Royal Institution of Naval Architects. Portsmouth 2007. S. 111–120.
- [15] R. Bronsart, G. Knieling und M. Zimmermann. „Automatic Generation of a Panel-Based Representation of Ship Hulls for Wave Resistance Calculations“. In: *PRADS 2004*. STG. Lübeck 2004. S. 59–64.

- [16] Robert Bronsart und Gernot Knieling. „Automated Knuckle Detection in Ship Hull Forms“. In: *Ship Technology Research* 54 (2007). S. 3–10.
- [17] Geoffrey Butlin und Clive Stops. „CAD Data Repair“. In: *5th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1996. S. 7–12.
- [18] Roger J. Cass, Steven E. Benzley, Ray J. Meyers und Ted D. Blacker. „Generalized 3-D Paving: An Automated Quadrilateral Surface Mesh Generation Algorithm“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 39 (1996). S. 1475–1489.
- [19] Hao Chen und Jonathan Bishop. „Delaunay Triangulation for Curved Surfaces“. In: *6th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1997. S. 115–127.
- [20] G. F. Clauss und L. Birk. „Hydrodynamic optimization of large offshore structures“. In: *Proceedings of the 5th International Maritime Design Conference*. Delft 1996.
- [21] C. W. Dawson. „A practical computer method for solving ship-wave problems“. In: *International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*. Berkeley 1977.
- [22] *Delftship Homepage*. Delftship B.V. URL: www.delftship.net.
- [23] Tamal K. Dey. *Cocone software for surface reconstruction and medial axis*. URL: [www.cse.ohio-state.edu/%7Etamaldey/cocone.html](http://cse.ohio-state.edu/%7Etamaldey/cocone.html) (besucht am 26.10.2007).
- [24] *DFform Homepage*. Cintranal-Defcar S.L. URL: www.defcar.es.
- [25] *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fourth Edition)*. World Wide Web Consortium (W3C). Sep. 2006. URL: www.w3.org/TR/xml.
- [26] *Fairway Homepage*. SARC BV. URL: www.sarc.nl.
- [27] Gerald Farin. *Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide*. 4. Aufl. San Diego: Acad. Press, 1997.
- [28] *Fastship Homepage*. Proteus Engineering. URL: www.proteusengineering.com.
- [29] David A. Field. „Laplacian Smoothing and Delaunay Triangulations“. In: *Communications in Applied Numerical Methods* 4 (1988). S. 709–712.
- [30] *Foran Homepage*. SENER Ingeniería y Sistemas SA. URL: www.foran.es (besucht am 22.04.2008).
- [31] Pascal J. Frey und Loic Marechal. „Fast Adaptive Quadtree Mesh Generation“. In: *7th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1998. S. 211–224.
- [32] Ian Garton. *Ear Cutting for Simple Polygons*. URL: http://cgm.cs.mcgill.ca/~godfried/teaching/cg-projects/97/Ian/cutting_ears.html (besucht am 13.12.2007).
- [33] *Gid Homepage*. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). URL: <http://gid.cimne.upc.es> (besucht am 28.04.2008).
- [34] Charles Goldfarb und Paul Prescod. *Das XML-Handbuch: Anwendungen, Produkte, Technologien*. 2. Aufl. München: Addison-Wesley, 2000.
- [35] William J. Gordon und Charles A. Hall. „Construction of curvilinear coordinate systems and applications to mesh generation“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 7 (1973). S. 461–477.

- [36] William J. Gordon und Linda C. Thiel. „Transfinite mappings and their application to grid generation“. In: *Numerical Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. 1982. S. 171–192.
- [37] Thomas Guiard. „Berechnung des Wellenwiderstandes mit dem CFD-Programm ν -Shallo“. Projektarbeit. Universität Rostock, Lehrstuhl Schiffbau, 2006.
- [38] Stefan Harries. „Hydrodynamic Optimierung von Schiffsformen auf Basis parametrischer Entwurfsmethoden“. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 94 (2000). 249 ff.
- [39] Stefan Harries. „Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms“. Diss. Technische Universität Berlin, 1998.
- [40] Stefan Harries. „Systematic optimization - a key for improving ship hydrodynamics“. In: *Hansa, International Maritime Journal* 12 (2005).
- [41] B. N. Hays und N. L. Anderson. „The International Marine Software Associates' “IMSA Definition File”: A neutral hull description standard“. In: *Marine Computers 1991. 2nd Symposium on Computer Applications in the Marine Industry*. SNAME. 1991.
- [42] Justus Heimann. „CFD Based Optimization of the Wave-Making Characteristics of Ship Hulls“. Diss. Technische Universität Berlin, 2005.
- [43] Leonard R. Herrmann. „Laplacian-Isoparametric Grid Generation Scheme“. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division* 102 (1976). S. 749–756.
- [44] John L. Hess und A. M. O. Smith. „Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies“. In: *Journal of Ship Research* 8.2 (1964). S. 22–44.
- [45] Christoph Martin Hoffmann. *Geometric and Solid Modeling: An Introduction*. 2. Aufl. San Mateo, Calif.: Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [46] Josef Hoschek und Dieter Lasser. *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Stuttgart: Teubner, 1989.
- [47] *Hperworks Homepage*. Altair Engineering, Inc. URL: www.altairhyperworks.de/Default.aspx.
- [48] Michael Hughes und Volker Bertram. *A Higher-Order Panel Method for 3-D Free Surface Flow*. Techn. Ber. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1995.
- [49] *Hullform Homepage*. Blue Peter Marine Systems Pty Ltd. URL: www.hullform.com.
- [50] HydroComp, Inc., Hg. *IDF Hull Data Transfer Format*. 133. 2003.
- [51] IGES/PDES Organisation, U.S. Product Data Association, Hg. *Initial Graphics Exchange Specification IGES 5.3*. Gaithersburg 1996.
- [52] *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 216: Application protocol: Ship moulded forms*. ISO-Norm 10303-216:2003. Juli 2003.
- [53] Carl-Erik Janson. „Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free-surface Flows with Lift“. Diss. Chalmers University of Technology Göteborg, 1997.
- [54] G. Jensen, H. Söding und Z. X. Mi. „Rankine Methods for the Solution of the Steady Wave Resistance Problem“. In: *Sixteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*. 16. University of Calif. Berkeley 1986. S. 575–582.

- [55] Gerhard Jensen. *Berechnung der stationären Potentialströmung um ein Schiff unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der Wasseroberfläche*. Techn. Ber. 484. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1988.
- [56] Gerhard Jensen, Jochen Marzi und Jochen Laudan. „CFD-Applications in the Development of Innovative Hydrodynamic Solutions“. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 95 (2001). S. 168–172.
- [57] Peter S. Jensen. „Automatic Panel Generation for Seakeeping and Wave Resistance Calculations“. In: *CFD and CAD in Ship Design*. Hg. von G. van Oortmerssen. Wageningen 1990. S. 133–146.
- [58] Gernot Knieling. „Automatisierte Panellierung der Schiffsaußenhaut für die Berechnung des Wellenwiderstandes mit Hilfe von CFD-Programmen“. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 97 (2003). S. 111–116.
- [59] A. Kracht. *Leistungsprognose für kleine, breite Containerschiffe (Einschrauber)*. Techn. Ber. 278. Forschungszentrum des deutschen Schiffbaus e.V., Hamburg, 1997.
- [60] D. T. Lee und A. K. Lin. „Generalized Delaunay Triangulation for Planar Graphs“. In: *Discrete & Computational Geometry*. Bd. 1. New York: Springer, 1986. S. 201–217.
- [61] Vladimir D. Liseikin. *Grid Generation Methods*. Springer, 1999.
- [62] Rainald Löhner. „Extensions and Improvements of the Advancing Front Grid Generation Technique“. In: *Communications in Numerical Methods in Engineering* 12 (1996). S. 683–702.
- [63] Rainald Löhner. „Progress in Grid Generation via the Advancing Front Technique“. In: *Engineering with Computers* 12 (1996). S. 186–210.
- [64] Rainald Löhner. „Regridding Surface Triangulations“. In: *Journal of Computational Physics* 126 (1996). S. 1–10.
- [65] Rainald Löhner und Juan R. Cebral. „Parallel Advancing Front Grid Generation“. In: *8th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1999. S. 67–74.
- [66] Rainald Löhner und Paresh Parikh. „Generation of Three-Dimensional Unstructured Grids by the Advancing-Front Method“. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 8 (1988). S. 1135–1149.
- [67] J. Marzi und D. Hafermann. *The v-Shallow User Guide*. HSVA, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt. 2002.
- [68] Jochen Marzi. „Automatische Formoptimierung für eine schnelle RoPax-Fähre“. In: *Schiff & Hafen* 12 (2003). S. 43–47.
- [69] *Maxsurf Homepage*. Formation Design Systems Pty Ltd. URL: www.formsys.com.
- [70] *CFD-Workshop Gothenburg 2000*. URL: www.iihr.uiowa.edu/gothenburg-2000/index.html (besucht am 30.10.2007).
- [71] G. H. Meisters. „Polygons have ears“. In: *American Mathematical Monthly* 82 (1975). S. 648–651.
- [72] Andrey A. Mezentsev und Thomas Woehler. „Methods and Algorithms of automated CAD repair for incremental surface meshing“. In: *8th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1999. S. 299–309.

- [73] Gary L. Miller, Steven E. Pav und Noel J. Walkington. „When and Why Ruppert’s Algorithm Works“. In: *12th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 2003. S. 91–102.
- [74] Dirk Müller. „Krümmungsbasierte Unterteilung der Hirnoberfläche“. Diplomarbeit. Universität Leipzig, Fakultät für Mathematik und Informatik, 2002.
- [75] *Multisurf Homepage*. AeroHydro, Inc. URL: www.aerohydro.com.
- [76] *Napa Homepage*. Napa Ltd. URL: www.napa.fi.
- [77] *Naval Designer Homepage*. Verre-Mer. URL: www.navaldesigner.com/en/index.html.
- [78] *Naval Surface Warfare Center*. URL: www.dt.navy.mil (besucht am 31.07.2008).
- [79] Friedhelm Neugebauer und Ralf Diekmann. „Improved Mesh Generation: Not Simple but Good“. In: *5th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1996. S. 257–272.
- [80] H. Nowacki, M. I. G. Bloor und B. Oleksiewicz. *Computational Geometry for Ships*. Singapore u. a.: World Scientific, 1995.
- [81] *Open Cascade Technical Documentation 5.2*. Open Cascade S.A. 2004.
- [82] Joseph O’Rourke. *Computational Geometry in C*. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [83] S. J. Owen, M. L. Staten, S. A. Canann und S. Saigal. „Q-Morph: An Indirect Approach to Advancing Front Quad Meshing“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 44 (1999). S. 1317–1340.
- [84] Steven J. Owen. „A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology“. In: *7th International Meshing Roundtable*. Bd. 7. Sandia National Laboratories. 1998. S. 239–267.
- [85] Steven J. Owen. *Quadrilateral Mesh Generation Software*. URL: www.andrew.cmu.edu/user/sowen/software/quadrilateral.html (besucht am 11.12.2007).
- [86] Steven J. Owen. *Triangle Mesh Generation Software*. URL: www.andrew.cmu.edu/user/sowen/software/triangle.html (besucht am 26.10.2007).
- [87] Steven J. Owen, Matthew L. Staten, Scott A. Canann und Sunil Saigal. „Advancing Front Quadrilateral Meshing Using Triangle Transformations“. In: *7th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1998. S. 409–428.
- [88] J. Peraire, J. Peiró und K. Morgan. „Advancing Front Grid Generation“. In: *Handbook of Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. CRC Press, 1999. S. 17–1–12–22.
- [89] Anders N. Petersson und Chand K. Kyle. „Detecting translation errors in CAD surfaces and preparing geometry for mesh generation“. In: *10th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 2001.
- [90] Les A. Piegl und Wayne Tiller. „Geometry-based triangulation of trimmed NURBS surfaces“. In: *Computer-Aided Design* 30.1 (1998). S. 11–18.
- [91] Les Piegl und Wayne Tiller. *The NURBS Book*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997.

- [92] Proteus Engineering. *International Marine Software Associates Interface Definition File (.idf) revision 3.04*. In FastShip 6 Dokumentation.
- [93] Hoyte C. Raven. „A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance“. Diss. Technical University of Delft, 1996.
- [94] *Rhinoceros Homepage*. McNeel Europe. URL: www.rhino3d.de.
- [95] R. Ribó, G. Bugeda und E. Oñate. „Some algorithms to correct a geometry in order to create a finite element mesh“. In: *Computers and Structures* 80.16 (2002). S. 1399–1408.
- [96] Alyn Rockwood, Kurt Heaton und Tom Davis. „Real-Time Rendering of Trimmed Surfaces“. In: *Computer Graphics* 23.3 (1989). S. 107–116.
- [97] Magne A. Røe. „Innovation in bulk carrier design and production“. In: *DNV Bulk Carrier Update 2* (2007). S. 22–27.
- [98] Dietmar Rudolph, Thomas Stürznickel und Leo Weissenberger. *Der DXF-Standard*. Edition Autodesk. München: Rossipaul Verlag, 1993.
- [99] Jim Ruppert. „A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation“. In: *Journal of Algorithms* 18 (1995). S. 548–585.
- [100] G. Ryskin und L.G. Leal. „Orthogonal mapping“. In: *Journal of Computational Physics* 50 (1983). S. 71–100.
- [101] P. D. Sclavounos und D. E. Nakos. „Stability Analysis of Panel Methods for Free-Surface Flows with Forward Speed“. In: *17th Symposium of Naval Hydrodynamics*. Den Haag 1989.
- [102] *Sea Solution Homepage*. Sea Tech Ltd. URL: www.seasolution.com.
- [103] Alla Sheffer, Ted Blacker, Jan Clements und Michel Bercovier. „Virtual Topology Operators for Meshing“. In: *International Journal of Computational Geometry and Applications* 10.3 (2000). S. 309–331.
- [104] X. Sheng und B. E. Hirsch. „Triangulation of trimmed surfaces in parametric space“. In: *Computer Aided Design* 24.8 (1992). S. 437–444.
- [105] Jonathan Richard Shewchuk. *Triangle: A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*. URL: www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html (besucht am 26. 10. 2007).
- [106] Jonathan Richard Shewchuk. „Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator“. In: *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering*. Hg. von Ming C. Lin und Dinesh Manocha. Bd. 1148. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 1996. S. 203–222.
- [107] *Shipflow Homepage*. Flowtech International AB. URL: www.flowtech.se.
- [108] *Shipflow Users Manual*. Version 3.4. Flowtech International AB. Göteborg, Schweden 2007.
- [109] R. E. Smith. „Algebraic grid generation“. In: *Numerical Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. 1982. S. 137–170.
- [110] Heinrich Söding. „A Method for Accurate Force Calculations in Potential Flow“. In: *Ship Technology Research* 40 (1993). S. 176–188.

- [111] Stefan P. Spekreijse. „Elliptic Generation Systems“. In: *Handbook of Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. CRC Press, 1999. S. 4–1–4–49.
- [112] *SVA Homepage*. Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH (SVA). URL: www.sva-potsdam.de.
- [113] J. F. Thompson, Z. U. A. Warsi und C. W. Mastin. *Numerical Grid Generation: Foundations and Applications*. New York: Elsevier, 1985.
- [114] Joe F. Thompson. *Handbook of Grid Generation*. Hg. von Joe F. Thompson. CRC Press, 1999. ISBN: 0-8493-2687-7.
- [115] *Tribon Homepage*. AVEVA Group plc. URL: www.aveva.com.
- [116] *v-Shallo Homepage*. Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA). URL: www.hsva.de.
- [117] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Arbeitskreis “CAD/CAM”, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Hg. *VDA-Flächenschnittstelle (VDAFSS): Version 2.0*. 1987.
- [118] N. P. Weatherill. „Delaunay triangulation in computational fluid dynamics“. In: *Computers and Mathematics with Applications, CAMWA* 24.5/6 (1992). S. 129–150.
- [119] N. P. Weatherill und O. Hassan. „Efficient three-dimensional delaunay triangulation with automatic point creation and imposed boundary constraints“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 37 (1994). S. 2005–2039.
- [120] William C. Webster. „The Flow About Arbitrary, Three-Dimensional Smooth Bodies“. In: *Journal of Ship Research* 19.4 (1975). S. 206–218.
- [121] David R. White und Paul Kinney. „Redesign of the Paving Algorithm: Robustness Enhancements through Element by Element Meshing“. In: *6th International Meshing Roundtable*. Sandia National Laboratories. 1997. S. 323–335.
- [122] Fujio Yamaguchi. *Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1988.
- [123] Mark A. Yerry und Mark S. Shephard. „Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Modified-Octree Technique“. In: *International Journal For Numerical Methods In Engineering* 20 (1984). S. 1965–1990.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbständig nach bestem Wissen und mit den vorliegenden Informationen erarbeitet zu haben. Alle Quellen und Hilfsmittel sind ordnungsgemäß angegeben.

Rostock, September 2008

Gernot Knieling

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl Schiffbau der Universität Rostock. Besonderer Dank gilt Prof. Robert Bronsart für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Themas.

Meinen Kollegen der Lehrstühle Schiffbau und Stahlbau danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen, besonders Michael Zimmermann für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Weiterhin möchte ich der SVA Potsdam und der HSVA in Hamburg für die Bereitstellung von Beispielschiffen und Vergleichsdaten danken.

Schließlich gilt mein besonderer Dank Susanne Gaida für ihre Geduld während der letzten Jahre und dafür, dass sie durch ihre Ermutigung erheblich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Rostock, September 2008

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Gernot Knieling
Geburtstag: 17. Oktober 1976
Geburtsort: Waren (Müritz)

Schulbildung

1983 – 1985: Friedrich-Engels-Schule, Waren
1985 – 1990: Gustav-Sobottka-Schule, Waren
1990 – 1995: Richard-Wossidlo-Gymnasium, Waren, Abitur

Studium

1996 – 1998: Grundstudium Maschinenbau, Universität Rostock, Vordiplom
1998 – 2002: Hauptstudium Maschinenbau, Vertiefungsrichtung Schiffbau, Diplom

Berufserfahrung

10/1999 – 03/2000: Praktikum Flensburger Schiffbau-Gesellschaft
01/2003 – 04/2008: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Schiffbau,
Universität Rostock
seit 05/2008: Abeking & Rasmussen Schiffs- und Yachtwerft, Bremen

Veröffentlichungen

Knieling: Automatisierte Panellierung der Schiffsaußenhaut für die Berechnung des Wellenwiderstandes mit Hilfe von CFD-Programmen, Jahrbuch der STG, 2003

Bronsart, Knieling, Zimmermann: Automatic Generation of a Panel-Based Representation of Ship Hulls for Wave Resistance Calculations, PRADS (Practical Design of Ships and Other Floating Structures), 2004

Bronsart, Knieling: Automated Knuckle Detection in Ship Hull Forms, Compit (International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries), 2006

Bronsart, Knieling: Automated Knuckle Detection in Ship Hull Forms, Ship Technology Research Nr. 54, 2007

Bronsart, Knieling: Automatic Subdivision of Ship Hull Surfaces for Block Structured Mesh Generation, ICCAS (International Conference on Computer Applications in Shipbuilding), 2007