

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Online-Simulation von fluidischen Prozessen
in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung**

Stefan Krottil

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. ir. Fred J.A.M. van Houten,
University of Twente / Niederlande

Die Dissertation wurde am 26.10.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.03.2016 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	4
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	6
2 Begriffsdefinition und Grundlagen.....	9
2.1 Definition elementarer Begriffe.....	9
2.2 Der Produktentwicklungsprozess.....	11
2.2.1 Tätigkeiten in der Produktentwicklung.....	11
2.2.2 Definition der frühen Phase.....	12
2.2.3 Die ökonomische Bedeutung der frühen Phase.....	15
2.2.4 Simulation als Werkzeug im Entwicklungsprozess.....	15
2.3 Grundlagen der computergestützten Modellbildung und Simulation.....	16
2.3.1 Grundlagen der Rechnerarchitektur.....	16
2.3.2 Szenegraph.....	18
2.3.3 Geometrische Modellbeschreibung.....	19
2.3.4 Kollisionserkennung in computergraphischen Anwendungen.....	20
2.3.5 Konvexe Zerlegung von Geometrien.....	22

2.4	Grundlagen der CFD-Simulation	23
2.4.1	Einordnung der fluiddynamischen Prozesse	23
2.4.2	Die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung	24
2.4.3	Modellierung der Simulationsdomäne in CFD-Simulationen.....	25
2.4.4	Verifikation und Validierung von Simulationen	27
2.5	Zusammenfassung	28
3	Stand der Wissenschaft und Technik	31
3.1	Methodische Entwicklung mechatronischer Systeme	31
3.1.1	Vorgehensmodelle elementarer Denk- und Handlungsabläufe.....	32
3.1.2	Vorgehensmodelle auf operativer Ebene	33
3.1.3	Phasenmodelle im Produktentwicklungsprozess.....	35
3.1.4	Die frühe Phase im Produktentwicklungsprozess	38
3.2	Computational Fluid Dynamics	41
3.2.1	Netzbasierte Berechnungsmethoden	42
3.2.2	Netzfremde Berechnungsmethoden.....	45
3.2.3	Prozessuale Durchführung von CFD-Simulationen im Entwicklungsprozess.....	51
3.3	Modellvariation in der Simulation	54
3.4	Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfes	56
4	Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase.....	61
4.1	Methodische Vorgehensweise zur Auswahl einer anwendungsfallspezifischen Simulationsmethode.....	61
4.2	Anforderungen an die Online-Simulation in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses	62

4.2.1	Prozessuale Anforderungen.....	63
4.2.2	Technische Anforderungen	64
4.3	Deduktion der Anforderungen an eine CFD-Simulation	65
4.4	Auswahl einer Simulationsmethodenklasse.....	68
4.5	Anwendungsfallspezifische Auswahl einer Simulationsmethode	71
4.6	Zusammenfassung.....	72
5	Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse in der frühen Phase.....	75
5.1	Übersicht des Gesamtkonzepts	75
5.2	Initialisierung	77
5.3	Simulationsdurchführung.....	78
5.4	Simulationsvorbereitung	80
5.4.1	Fluidspezifische Präparationen.....	81
5.4.2	Modellspezifische Präparationen	83
5.4.3	Modellaktualisierung in der Simulation	97
5.5	Ergebnisanalyse.....	99
5.6	Nutzung der Hardwareressourcen.....	100
5.7	Prozessuale und technische Integration in den Entwicklungsprozess ...	102
5.7.1	Prozessuale Integration in den Entwicklungsprozess.....	102
5.7.2	Technische Integration in die Softwareinfrastruktur.....	106
5.8	Zusammenfassung.....	106
6	Umsetzung und Evaluierung der Methode	109
6.1	Auswahl eines Anwendungsfalls	109
6.2	Softwaretechnische Realisierung	111

Inhaltsverzeichnis

6.2.1	Softwarestruktur und Kommunikationsinfrastruktur	111
6.2.2	Klassenstruktur und Ablaufdiagramm.....	112
6.3	Evaluierung und Quantifizierung des Nutzens einzelner Prozessschritte.....	116
6.3.1	Nutzen der Separation der Geometrievorbereitung.....	117
6.3.2	Nutzen der konvexen Zerlegung der Online-Simulation	118
6.4	Online-Simulation von fluidischen Prozessen im Anwendungsfall	120
6.5	Zusammenfassung.....	123
7	Technische und wirtschaftliche Bewertung	125
7.1	Erfüllungsgrad der prozessualen und technischen Anforderungen	125
7.2	Nutzenpotential, Einschränkungen und Aufwände.....	128
7.3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	130
7.4	Zusammenfassung.....	132
8	Schlussbetrachtung.....	135
8.1	Resümee	135
8.2	Ausblick	136
9	Literaturverzeichnis	139
10	Anhang.....	165
10.1	Ablaufdiagramme der Online-Simulation.....	165
10.1.1	Beobachter	165
10.1.2	Simulationsschritt	166
10.1.3	Geometrieimport.....	167
10.1.4	Simulationsschleife.....	168

10.2 Abgleich der Realität mit der Simulation	169
11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	171

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
a	Jahr
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CPU	Central Processing Unit
ca.	circa
d. h.	das heißt
DES	Detached Eddy Simulation
DIN	Deutsche Industrienorm
DMU	Digital Mock-up
e. V.	eingetragener Verein
et al.	et alii
etc.	et cetera
f.	folgende
FDM	Finite Differenzen Methode
FEM	Finite Element Methode
ff.	fortfolgende
FVM	Finite Volumen Methode

Abkürzungsverzeichnis

Flop	Floating Point Operation per Second (Gleitkommazahlberechnungen pro Sekunde)
GPU	Graphics Processing Unit
MLPG	Meshless Local Petrov-Galerkin Methode
PDM	Produktdatenmanagement
S.	Seite
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
u. ä.	und ähnliches
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WYSIWYG	What You See Is What You Get
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$AF_{A_{SW}}$	$\frac{\text{€}}{a}$	<i>Kalkulatorische Abschreibung</i>
B		<i>Baugruppe</i>
C		<i>Konvexitätsgrad</i>
E_{AN}	€	<i>Entwicklungskosten</i>
F_{SW}	$\frac{\text{€}}{a}$	<i>Jährliche Kosten</i>
G		<i>Geometrisches Objekt</i>
G_{VZ}	$\frac{\text{€}}{a}$	<i>Jährlicher monetärer Vorteil vor Zinsen</i>
I_{AN}	$\frac{1}{a}$	<i>Anzahl der jährlichen Entwicklungsprojekte</i>
I_{SW}	€	<i>Investitionskosten</i>
K		<i>Konstruktor</i>
K_{SW}	€	<i>Kalkulatorische Zinsen</i>
KA		<i>Aktive Kinematik</i>
KP		<i>Passive Kinematik</i>
M		<i>Mach-Zahl</i>
P, P_1, P_2		<i>Beliebige Punkte im Raum</i>
P_G	m	<i>Größe der Fluidpartikel</i>
P_{Konvex}		<i>Projektionspunkt auf konvexer Hülle</i>
R_e		<i>Reynolds-Zahl</i>
S_{An}	€	<i>Jährlicher Nutzen</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

T		<i>Transformationsmatrix</i>
T_A	a	<i>Amortisationszeit</i>
T_{SW}	a	<i>Nutzungsdauer</i>
W		<i>Glättungsfunktion</i>
$W_{K,AN}$	$\frac{\text{€}}{a}$	<i>Kalkulatorische Produktkostensenkung</i>
$W_{A,AN}$	$\frac{\text{€}}{a}$	<i>Kalkulatorische Kostensenkung durch simulative Absicherung</i>
W_{SW}	€	<i>Wartungs- und Schulungskosten</i>
Z_{AN}	%	<i>Kosteneinsparung</i>
Z_{SW}	%	<i>Zinssatz</i>

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
c	$\frac{m}{s}$	<i>Schallgeschwindigkeit</i>
c_{CFL}		<i>Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl</i>
\vec{f}	$\frac{N}{m^3}$	<i>Volumenkraft</i>
f_{Abtast}	Hz	<i>Abtastfrequenz</i>
$f_{Nyquist}$	Hz	<i>Nyquist-Frequenz</i>
\vec{g}	$\frac{m}{s^2}$	<i>Fallbeschleunigung</i>
h	m	<i>Glättungslänge</i>
h_{Wasser}	m	<i>Höhe der Wassersäule</i>
i_{Sim}		<i>Simulationszyklus</i>
κ		<i>Streckungsfaktor</i>

m	g	<i>Masse</i>
$n_{\text{Hüllgeometrie}}$		<i>Gesamtanzahl der Hüllgeometrien</i>
n_{Pl}		<i>Anzahl der Partikel</i>
n_{Sim}		<i>Anzahl der Simulationsschritte</i>
n_{Vertices}		<i>Gesamtanzahl der Vertices</i>
r	m	<i>Abstand</i>
p	$\frac{N}{m^2}$	<i>Druck</i>
p_1, p_2		<i>Koeffizienten der Viskosität</i>
$r_{\text{Ausström}}$	m	<i>Radius der Ausströmungsöffnung</i>
t	s	<i>Zeitpunkt</i>
t_{init}	s	<i>Zeitpunkt der Initialisierung des Fluids</i>
Δt	s	<i>Zeitschritt/Simulationsschritt</i>
$\Delta t_{\text{Berechnung}}$	s	<i>Vergangene Berechnungszeit während eines Simulationsschritts</i>
$t_{\text{Syn-Ana}}$	s	<i>Dauer eines simulationsunterstützten Synthese-Analyse-Zyklus</i>
\vec{u}	$\frac{m}{s}$	<i>Geschwindigkeitsvektor</i>
u_{max}	$\frac{m}{s}$	<i>Maximale Geschwindigkeit</i>
u_{Schall}	$\frac{m}{s}$	<i>Schallgeschwindigkeit</i>
\vec{v}	$\frac{m}{s}$	<i>Geschwindigkeit eines Partikels</i>
$\overrightarrow{v_{\text{max}}}$	$\frac{m}{s}$	<i>Maximale Geschwindigkeit eines Partikels</i>
$\vec{v}_{\text{Ausström}}$	$\frac{m}{s}$	<i>Ausströmungsgeschwindigkeit</i>

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die globalen Megatrends wie die Verkürzung und Dynamisierung der Produktlebenszyklen stellen den Anlagen- und Maschinenbau vor neue Herausforderungen (ABELE & REINHART 2011). Ein besonderer Fokus innerhalb des Lebenszyklus liegt auf dem Produktentwicklungsprozess, welcher ca. 70 % der gesamten Produktkosten definiert. Unter diesem Aspekt und getrieben durch die Verkürzung der Entwicklungszeiten bei steigender Individualisierung der Produkte (ERNST 2014) muss sich der Entwicklungsprozess hin zu einer integrierten Produkt- und Systementwicklung wandeln. Darüber hinaus ist die Beherrschung der komplexen Produkte und Prozesse eine Herausforderung (SPATH ET AL. 2013). Bereits heute werden die Entwicklungsingenieure durch unterschiedliche virtuelle Methoden und Werkzeuge unterstützt. Jedoch besteht weiterer Handlungsbedarf, beispielsweise eine Aufwandsreduktion durch redundanzfreie Modellbildungsprozesse und eine Steigerung der Wiederverwendbarkeit der Modelle (BIERSCHENK ET AL. 2005). Zudem muss der Umgang mit Prozesskomplexitäten durch integrierte Prozess- und Produktmodelle verbessert werden. Ein Anfang wurde im Rahmen der digitalen Fabrik (BRACHT ET AL. 2011) durch die engere Kopplung der unterschiedlichen IT-Werkzeuge gemacht. Jedoch besteht weiterer Verbesserungsbedarf in Sachen Anwenderorientierung sowie der Modularisier- und Skalierbarkeit in der Methoden- und Werkzeuggestaltung, welche auf die Denk- und Handlungsabläufe der Entwicklungsingenieure abgestimmt ist (ABELE & REINHART 2011).

Ein oft genutztes Werkzeug im Produktentwicklungsprozess ist die Simulation, welche unterschiedliche Vorteile bietet. Beispiele hierfür sind die Erhöhung der Entscheidungsqualität und -sicherheit, die Reduzierung der Investitionskosten, die schnelle Parametervariation und somit die Verbesserung des Systemverständnisses bei geringem finanziellen Aufwand (LANGERMANN 2008). Somit werden bereits heute Produkte durch zeit- und kostenreduzierende virtuelle Prototypen und Simulationen validiert und Funktionen abgesichert (GAUSEMEIER ET AL. 2013, S. 40). Deshalb nutzen laut einer Studie 70 % der Unternehmen Simulations- und Visualisierungstechnologien in der Konstruktion bzw. im Design, wobei 52 % der Befragten der Ansicht sind, dass durch Simulation der Produktentwicklungsprozess beschleunigt werden kann und 62 % von einer gesteigerten Produktqualität überzeugt sind (DÖBLER 2008). Auch sind in einer weiteren

Studie 85 % der Unternehmen der Meinung, dass das Werkzeug Simulation die Generierung von Wissen über Problemstellungen steigert. Darüber hinaus erachten 84 % der Studienteilnehmer die Simulationsergebnisse als eine wesentliche Unterstützung im Entscheidungsprozess (OPPELT ET AL. 2015). Somit ist die Simulation ein valides und anerkanntes Werkzeug in der Produktentwicklung.

Innerhalb des Produktentwicklungsprozesses ist die frühe Phase von großer Bedeutung, in welcher die Grundlage für das spätere Produkt durch unterschiedliche Konzepte gelegt wird. Bezogen auf den gesamten Produktlebenszyklus entstehen bis zu dieser Phase kaum Kosten, jedoch hat diese einen großen Einfluss auf die Gesamtproduktkosten (EHRENSPIEL ET AL. 2007, S. 8-22). Auch ist die Phase entscheidend für die Güte der finalen Produkte und somit für den Erfolg des Produkts (ERNST 2005). Die frühe Phase ist daher von hoher Bedeutung, um wichtige Entscheidungen möglichst früh im Entwicklungsprozess zu treffen (SIEDL 2008, S. 59-61).

In dieser Phase sind die Produkte in Form von Konzepten noch meist rein virtuell, da die Entwicklung der unterschiedlichen Prototypen sehr kostenintensiv ist. Somit würden sich virtuelle simulative Überprüfungen der Funktionen zur Bewertung der Konzepte anbieten (BENDER ET AL. 2005, REINHART ET AL. 2011). Heute erfolgt dies jedoch aufgrund des großen Aufwandes bei der Durchführung einer Simulation und der langen Wartezeiten auf die Ergebnisse nur in Ausnahmefällen (WANG ET AL. 2002, LANGERMANN 2008, S. 31).

Dies trifft besonders für die Simulation fluidischer Prozesse zu, welche durch Computational Fluid Dynamics (CFD)-Methoden simuliert werden (JOHNSON ET AL. 2005, BEINERT 2007, SONNENBURG 2009, OPPELT ET AL. 2015). Die geringe Nutzung der simulativen Absicherung hat mehrere Ursachen. So ist die inkompressible Navier-Stokes Gleichung eines der sieben Millenniums-Probleme, d. h. es existiert bis heute kein mathematischer Beweis für die eindeutige Lösbarkeit (FEFFERMAN 2006). Darüber hinaus sind die Berechnungszeiten sehr lange und wegen der noch ungelösten Problemstellungen, bspw. einer exakten Nachbildung von Verwirbelungen, für welche unterschiedliche Modellierungsmethoden und -theorien bestehen, müssen die Ergebnisse von Simulationsexperten interpretiert werden (DAVIDSON 2002, HÖLLING & HERWIG 2004, JOHNSON ET AL. 2005). Jedoch steht in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses nicht die quantitative Aussage im Fokus, stattdessen ist eine schnelle qualitative Aussage über die Funktionsweise von Maschinen und Anlagen von höherer Bedeutung. Somit ist eine höhere Simulationsungenauigkeit für Aussagen über Tendenzen

von Maschinen und Anlagen zugunsten einer schnellen Bereitstellung der Ergebnisse erlaubt (ZIRN & WEIKERT 2006, S. 51-52).

Das schnelle Feedback ist zudem den unbewussten Arbeitsabläufen der Entwicklungsingenieure zuträglich. Das menschliche Verhalten ist in kreativen Prozessen stark von Trial-and-Error geprägt (MILLER ET AL. 1991, HACKER 1998). Daher ist die Latenz einer Rückmeldung der Simulation entscheidend. Je schneller die Rückmeldung ist, desto besser ist das System an den Menschen angepasst. Somit kann die Intuitivität in der Entwicklung gesteigert werden, falls die Simulation eine direkte Rückmeldung über Änderungen an Konzepten ist. Dieser Online-Ansatz folgt dem What You See Is What You Get (WYSIWYG)-Ansatz (ZEIDLER 2004).

1.2 Problemstellung

Die frühe Phase im Produktentwicklungsprozess ist eine für das Produkt entscheidende Phase, welche auf das hilfreiche Werkzeug der Simulation nicht zurückgreift. Darüber hinaus werden Simulationsuntersuchungen zu spät eingesetzt, wobei die Wirksamkeit der Simulation steigt, je früher diese genutzt wird (ZEICHEN & FÜRST 2000, S. 43.). Folglich wird bei der Entwicklung von Produkten nur die „(...) nächstbeste Systemarchitektur (genutzt, die) zur Verfügung steht. (...) Es wird sich damit in einer für die Systementwicklung entscheidenden Phase auf ein Konzept festgelegt, das keinem Optimierungsprozess unterzogen wurde. Stattdessen erfolgt die Auswahl einer Systemarchitektur ausschließlich auf Basis von Erfahrungswerten (...)“ (LANGERMANN 2008, S. 31). Um diese Missstände zu lösen, muss ein Werkzeug geschaffen werden, welches einen auf phasenspezifische Anforderungen angepassten Optimierungsprozess der Produkte erlaubt. Ein solches Werkzeug stellt die Simulation als bereits etablierte Methode dar.

Diese kann bereits in vielen Fällen eingesetzt werden. Betrachtet man jedoch die heutigen Prozessplanungen in der Entwicklung, werden aufgrund der zu hohen Komplexität sonstiger Werkzeuge nach einer Befragung kleiner und mittelständischer Unternehmen zu 38% Microsoft Visio und zu 66% Microsoft Excel eingesetzt (BIERSCHENK ET AL. 2005). Ein Grund für die Nichtnutzung der Simulationen ist der hohe und intensive Modellierungsaufwand, welcher bei CFD-Simulationen bis zu 80 % eines Synthese-Analyse-Zyklus beträgt (VERSTEEG & MALALASEKRA 2007, S. 3, BARBA 2010). In Kombination mit den langen Warte-

zeiten auf die Ergebnisse ist daher der Einsatz in der frühen Phase in vielen Unternehmen nicht akzeptiert. Es ist notwendig, dass sich die Simulationstools an die Anforderungen im Entwicklungsprozess anpassen. In Bezug auf die frühe Phase bedeutet dies, dass der Synthese-Analyse-Zyklus zur Absicherung prinzipieller Tendenzen sehr schnell erfolgen muss. CFD-Simulationen bieten hierfür bis heute keine Methode, da diese einen rein sequentiellen, iterativen und unflexiblen Ablauf von der Modellerstellung bis zur Ergebnisanalyse haben (ENGEL 1994, HEDTSTÜCK, 2013, HEFNER ET AL. 2014, LECHER 2014).

Ein weiterer Handlungsbedarf basiert auf der Forderung nach einer intuitiven und an die menschlichen unbewussten Denk- und Handlungsprozesse angepassten Simulationemethode. Heutige Simulationemethoden weisen eine strikte Sequenzierung der Synthese- und Analyseprozesse auf (HEDTSTÜCK 2013, LECHER 2014) und manifestieren somit eine statische Vorgehensweise im Umgang mit Simulationen. Dies wirkt kontraproduktiv auf die Akzeptanz von wissensgenerierenden Simulationen in den dynamischen frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

„Virtuelle Prototypen ermöglichen die modellbasierte Verifikation und Validierung und tragen damit zur Senkung des zeit- und kostenintensiven Baus und Tests von realen Prototypen bei.“ (GAUSEMEIER ET AL. 2013, S. 40) Um dieser Aussage im Bereich der fluidischen Prozesse auch in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses gerecht zu werden, müssen bestimmte Grundanforderungen erfüllt werden.

Eine wesentliche Anforderung ist eine realitätsnahe Simulation, welche über ein einfaches, intuitiv zu bedienendes Werkzeug durchgeführt werden kann. Darüber hinaus muss zur Reduktion des Aufwandes der Simulation und somit zur Steigerung der Akzeptanz eine durchgängige und einfache Datennutzung sichergestellt werden. Des Weiteren erfordert die frühe Phase aufgrund ihrer inhärenten Dynamik ein hohes Maß an Flexibilität (BIERSCHENK ET AL. 2005). Die bisherigen Methoden erfüllen diese Anforderungen nicht, weshalb nur eine geringe Akzeptanz vorhanden ist und daher nur selten die Produktkonzepte durch Simulationen untersucht werden.

Aus diesem Grund ist das übergeordnete Ziel eine Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase Maschinen- und Anla-

genentwicklung. Diese Methode umfasst eine heute noch nicht vorhandene, sehr schnelle Möglichkeit zur Simulation von fluidischen Vorgängen, wobei das Simulationsmodell während der laufenden Simulationsberechnung variant und jederzeit modifizierbar ist.

Zum Erreichen des Ziels werden in einem ersten Schritt die Anforderungen an die Online-Simulation im Fall von fluidischen Prozessen sowohl auf Basis heutiger mikro- bis makroskopischer Vorgehensweisen im Entwicklungsprozess als auch der technischen Rahmenbedingungen von CFD-Simulationen deduziert. Anschließend wird auf der Grundlage der gesammelten Anforderungen eine Klasse von geeigneten Simulationsmethoden abgeleitet. Dies ist notwendig, da aufgrund der mathematischen und physikalischen Herausforderungen keine anwendungsfallunabhängige Standardmethode zur Simulation von Fluiden existiert. Die Simulationsmethodenklasse bildet abschließend die Grundlage zur Entwicklung einer intuitiven Online-Simulation, welche ein gleichzeitiges Bearbeiten der Konzepte mit direktem simulativen Feedback an den Anwender ermöglicht. Ein besonderer Fokus liegt auf der Reduktion der manuellen Aufwände.

Folglich werden folgende Forschungsfragen betrachtet:

1. Welche Anforderungen ergeben sich für die Online-Simulation in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses?
2. Welche Klasse an Simulationsmethoden eignet sich für die Simulation von Fluiden in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses?
3. Wie kann der heutige hohe Modellierungsaufwand von Simulationsmodellen reduziert werden?
4. Wie kann die Online-Simulation im Synthese-Analyse-Zyklus zwischen Modell und Simulation umgesetzt werden?

Das Leitziel dieser Arbeit ist die Schaffung einer praxistauglichen und wirtschaftlichen Möglichkeit zum Einsatz der Simulation in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses in der industriellen Praxis im Maschinen- und Anlagenbau, welche bis heute nicht vorhanden ist. Ein Schwerpunkt ist die Anpassung heutiger Methoden und Bedienung von Werkzeugen an die unbewussten, intuitiven menschlichen Denk- und Handlungsweisen. Darüber hinaus erfolgt die Anpassung und Erweiterung heutiger Simulationsverfahren an die phasenspezifischen Anforderungen und Restriktionen. Zudem wird die Steigerung der Durchgängigkeit von Modellen verbessert, der Modellierungsprozess beschleunigt und die Skalierbarkeit innerhalb von CFD-Simulationen vergrößert. Des Weiteren

werden durch die Implementierung in ein Softwarewerkzeug die prototypische Durchführung, die Funktionsweise und die Praxistauglichkeit nachgewiesen.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich, inklusive dieses Kapitels und der Schlussbetrachtung, in acht Kapitel, welche in Abbildung 1 veranschaulicht sind. Die vorangegangenen Abschnitte des ersten Kapitels umfassen die Motivation und die Ableitung des Handlungsbedarfs sowie die Zielsetzung dieser Arbeit.

Kapitel 1	Einleitung
Kapitel 2	Begriffsdefinition und Grundlagen
Kapitel 3	Stand der Wissenschaft und Technik
Kapitel 4	Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase
Kapitel 5	Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse in der frühen Phase
Kapitel 6	Umsetzung und Evaluierung der Methode
Kapitel 7	Technische und wirtschaftliche Bewertung
Kapitel 8	Schlussbetrachtung

Abbildung 1: Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

In *Kapitel 2* werden grundlegende Zusammenhänge erläutert, welche für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Neben der Definition zentraler Begriffe werden sowohl Zusammenhänge des Produktentwicklungsprozesses als auch mathematische und computergraphische Grundlagen dargestellt. Darüber hinaus erfolgt eine eingliedernde Vorstellung von CFD-Simulationen.

Kapitel 3 fokussiert die wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse. Betrachtet werden von der Mikro- bis hin zur Makroebene unterschiedliche Entwicklungsprozesse, in welchen die frühe Phase dargestellt wird. Anschließend

liegt der Fokus auf den Berechnungsmethoden und der prozessualen Durchführung der CFD-Simulation. Auf dieser Grundlage erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfs.

Die nächsten beiden Kapitel konzentrieren sich auf die Beantwortung der gestellten Forschungsfragen. In einem ersten Schritt umfasst *Kapitel 4* die Analyse der prozessualen und technischen Anforderungen zum aktuellen Stand der Wissenschaft und der Technik. Diese werden anschließend zur deduktiven Auswahl einer Simulationsmethodenklasse genutzt. Darüber hinaus wird in dem Kapitel die finale, anwendungsfallbezogene Auswahl einer Simulationsmethode beschrieben. Anschließend erfolgt in *Kapitel 5* die Vorstellung der Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase. Betrachtet wird der vollständige Synthese-Analyse-Zyklus.

Die Umsetzung und Evaluierung der Methode wird in *Kapitel 6* beschrieben. Nach einer Vorstellung des Anwendungsfalls erfolgt die Auswahl der genutzten Simulationsmethode. Anschließend werden die softwaretechnische Realisierung und die Systemarchitektur dargestellt. Der realisierte Softwareprototyp wird danach anhand eines Anwendungsfalls evaluiert und der Nutzen wird quantifiziert.

Anhand der gesammelten Erkenntnisse wird die Methode in *Kapitel 7* bewertet. Dies umfasst eine technische und wirtschaftliche Betrachtung der Nutzenpotentiale.

Im Rahmen einer Schlussbetrachtung wird die Arbeit in *Kapitel 8* zusammengefasst. Darüber hinaus werden mögliche Weiterentwicklungen der vorgestellten Methode aufgezeigt und offene Forschungsfragen identifiziert.

2 Begriffsdefinition und Grundlagen

Das Kapitel umfasst zu Beginn die Definition elementarer Begriffe, auf deren Basis eine Eingliederung der Arbeit vorgenommen werden kann. Darüber hinaus werden mathematische und computergraphische Grundlagen vorgestellt. Abschließend werden die inkompressible Navier-Stokes Gleichung sowie Simulationsspezifika weitergehend erläutert.

2.1 Definition elementarer Begriffe

In der Simulationstechnik werden grundsätzliche Fachtermini oftmals unterschiedlich verwendet. Aus diesem Grund werden im Folgenden die wichtigsten Begriffe definiert.

Fluid

HAUKE (2008, S. 7) definiert ein Fluid als eine Substanz, welche einer Scherung keinen Widerstand entgegensetzt. Ein Fluid ist somit ein Überbegriff für Flüssigkeiten oder Gase.

Simulation

VDI 3633 (S. 14) definiert Simulation als die „ (...) Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Modell

Die VDI 3633 (S. 9) definiert ein Modell als eine „ (...) vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“. Darüber hinaus beinhaltet ein Modell ein Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal sowie ein pragmatisches Merkmal (STACHOWIAK 1973, S. 131-133).

Geometrie

In Anlehnung an EIGNER 2014 (S. 47) ist eine Geometrie sowohl die räumliche als auch topologische 3D Ausdehnung und Positionierung von Objekten.

Simulationsdomäne

Der geometrische Raum, welcher in der Simulation betrachtet wird, ist die Simulationsdomäne.

Simulationsmodell

Ein Simulationsmodell ist ein Modell, welches die Grundlage für eine Durchführung einer Simulation ist. In Anlehnung an SCHWARZE (2013, S. 10-11) umfasst diese im Bereich der CFD-Simulationen

- die Simulationsdomäne,
- die mathematischen Grundgleichungen,
- weitere Parameter, bspw. Stoffwerte wie Dichte oder Viskosität,
- Randbedingung der Simulationsdomäne und
- die Definition der numerischen Verfahren, Algorithmen und Lösungsverfahren.

Simulationsschritt / Zeitschritt

Ein Simulationsschritt oder Zeitschritt ist die Zeit Δt , mit welcher ein Berechnungszyklus in der temporären Dimension propagiert wird. Diese beträgt meist nur wenige Millisekunden.

Echtzeitfähigkeit

DIN 60050 (S. 117) definiert die Echtzeitfähigkeit als die „(...) Fähigkeit eines Rechensystems, die Rechenprozesse ständig ablaufbereit hält, derart, dass innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne auf Ereignisse im Ablauf eines technischen Prozesses reagiert werden kann“.

Digital Mock-up

Nach EIGNER 2014 ist ein Digital Mock-up (DMU) eine „(...) auf ein bestimmtes Endprodukt bezogene, abgegrenzte Datenmenge, auf deren Grundlage (...) Funktionalitäten des Produktes ausgeführt und getestet werden können“ (EIGNER 2014, S 185). Insbesondere die Produktgeometrie steht hierbei im Vordergrund.

Online-Simulation

Die Online-Simulation ist eine Simulation, in welcher das zu Grunde liegende Simulationsmodell permanent verändert werden kann. Die Modifikationen am Simulationsmodell haben sofortige und direkte Auswirkungen auf die Simulation selbst. (vgl. PRANGGONO ET AL. 2015). Das Gegenteil einer Online-Simulation ist

eine Offline-Simulation, in welcher das Simulationsmodell vollständig vor der Simulationsdurchführung modelliert wurde und nicht während der Simulationsdurchführung modifiziert werden kann.

WYSIWYG-Simulation

Die WYSIWYG-Simulation ist ein Spezialfall der Online-Simulation, welche die Randbedingungen einer Echtzeitfähigkeit beinhaltet.

2.2 Der Produktentwicklungsprozess

Der Lebenszyklus von Produktionsanlagen umfasst alle Lebensphasen beginnend mit der Konstruktion bis hin zum Recycling. WIENDAHL ET AL. (2002) unterteilen den gesamten Lebenszyklus in eine Planungsphase, welcher die Realisierungsphase folgt. Daran schließt sich die Betriebsphase und abschließend eine Redistributionsphase an. Der in dieser Arbeit betrachtete Produktentwicklungsprozess ist in der ersten Phase eingegliedert.

2.2.1 Tätigkeiten in der Produktentwicklung

Je nach Anwendungsfall und Anforderung ist der Produktentwicklungsprozess ein hoch innovativer Prozess. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist ein generierendes Vorgehen bei der Lösungssuche notwendig, welches durch ein phasenorientiertes und generierendes Vorgehen sowie offenes Konstruieren gekennzeichnet ist (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Dabei werden bspw. im Rahmen einer Neuentwicklung mehrere Tätigkeiten bewusst oder unbewusst durchgeführt. Auch hängt der prinzipielle Lösungsprozess maßgeblich von der Erfahrung und der prinzipiellen Denkweise ab (GÜNTHER 1998, EHRENSPIEL 2002). Abbildung 2 stellt die Resultate einer Untersuchung von DYLLA (1991) bzgl. der Tätigkeitsverteilung im Entwicklungsprozess dar. So zeigt die Studie, dass trotz der individuellen personenspezifischen Einflüsse ein Großteil der Aufgaben im Entwicklungsprozess die Suche und Darstellung der unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten ist. Die Erfassung der Aufgabe spielt eine geringere Rolle. Darüber hinaus war ein Resultat der Studie, dass das natürliche Vorgehen nicht rein sequentiell ist, stattdessen werden die unterschiedlichen Phasen im Lösungsprozess iteriert.

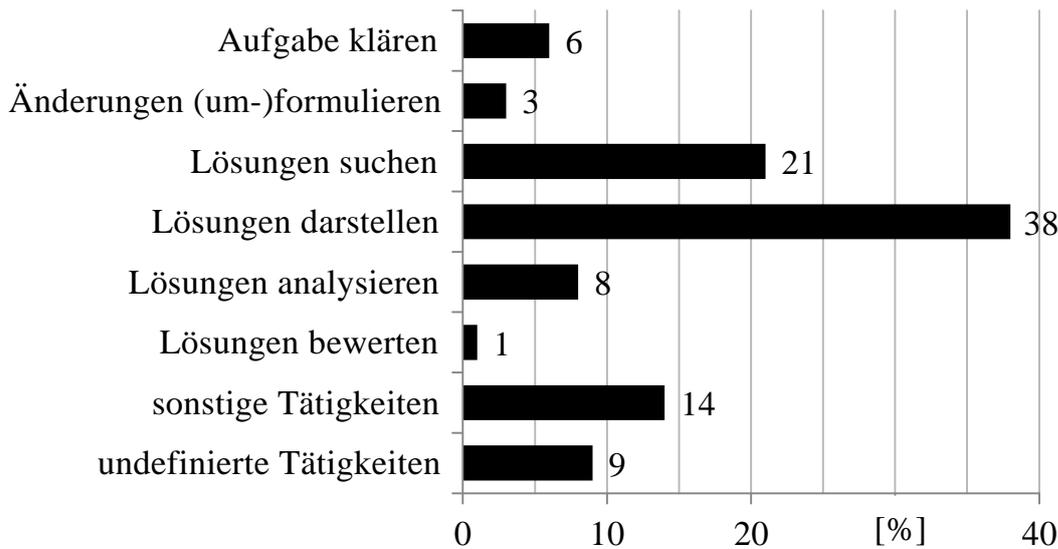


Abbildung 2: Tätigkeitsverteilung im Entwicklungsprozess nach DYLLA (1991)

2.2.2 Definition der frühen Phase

Aufgrund der Individualität der unterschiedlichen Produktentwicklungen wird der Produktentwicklungsprozess in der Literatur vielschichtig betrachtet (vgl. Abschnitt 3.1). Ein Grundprinzip der Entwicklungsmethoden ist jedoch, dass sich der Produktentwicklungsprozess in eine Grobplanung und eine Detailplanung untergliedern lässt (KIEFER 2007). Eine strikte zeitliche und sequentielle Trennung und Abgrenzung der beiden Planungsphasen ist, u. a. im Sinne des Simultaneous Engineering, nicht möglich.

Dem folgend ist auch die Definition einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses in der Literatur unterschiedlich, da eine Trennung der Phasen nicht gänzlich möglich ist (TATARCZYK 2008). Daher definiert TATARCZYK (2008), die frühe Phase „(...) als eine Reihe von Aktivitäten (...), die von der Generierung erster Ideen bis zur Definition eines neuen Produktkonzepts reichen. Sie wird mit der Entscheidung über die (Weiter-)Entwicklung des Konzeptes zu einem serienreifen Produkt abgeschlossen“ (TATARCZYK 2008, S. 23).

In der Definition von VERWORN & HERSTATT (2007) wird vor allem dem Aspekt der Entscheidungsfindung besonderes Gewicht gegeben. So wird die frühe Phase als eine Zusammenfassung aller Aktivitäten „(...) vom ersten Impuls bzw. einer sich ergebenden Gelegenheit für ein neues Produkt bzw. eine neue Dienstleistung bis zur Go-no-go-Entscheidung zur Umsetzung des Konzeptes und somit Auf-

nahme der eigentlichen Entwicklung des Produkts bzw. der Dienstleistung (...)“ (VERWORN & HERSTATT 2007, S. 8) definiert.

Darüber hinaus definiert KIM & WILEMON (2002) die frühe Phase als den Zeitraum zwischen dem ersten Zeitpunkt einer Idee und dem Zeitpunkt, an dem beschlossen wurde, die Idee umzusetzen.

Die dargestellten Definitionen sind aufgrund ihrer festgelegten Enddefinition nur schwer in der Praxis anwendbar, da der Zeitpunkt für eine Go-no-go-Entscheidung bzw. eine Entscheidung zur Entwicklung oft nicht deutlich vom darauf folgenden Prozessablauf akzentuiert ist, da die jeweiligen Prozessschritte nicht strikt sequentiell abgearbeitet werden (KOEN ET AL. 2001).

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die frühe Phase anhand von Tätigkeiten definiert, welche sich aus Teilschritten der Konstruktionsphasen definieren und Teilaspekte sowohl des Konzipierens als auch des Entwerfens umfassen (vgl. EHRENSPIEL 2002). Grundlage hierfür bietet die VDI 2221, welche eine Vorgehensweise zum „Methodischen Entwerfen technischer Produkte“ beschreibt. Darüber hinaus werden einzelne Prozessschritte zum einen in der VDI 2222, zum anderen in der VDI 2223 genauer spezifiziert.

Abbildung 3 stellt den gesamten Lebenszyklus nach WIENDAHL ET AL. (2002) dar. Die VDI 2221 beschreibt hierbei in der Planungs- und Realisierungsphase den ersten Lebensabschnitt der Konstruktion. Die beiden Prozessschritte „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“ sowie „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“ werden im Rahmen dieser Arbeit als Vorphase definiert. Aus diesen resultieren Funktionsstrukturen sowie Anforderungen an das Produkt.

Im Rahmen dieser Arbeit umfasst die frühe Phase die Prozessschritte der „Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“, das „Gliedern in realisierbare Module“ sowie das „Gestalten der maßgebenden Module“.

Im Gegensatz zu den Definitionen von TATARCZYK (2008) und VERWORN & HERSTATT (2007) wird die frühe Phase somit nicht an Entscheidungen, sondern anhand von Arbeitsergebnissen definiert. Diese sind:

- Prinzipielle Lösungen, welche „(...) unscharf bzw. grobe aber funktionsbestimmende Vorstellungen zur Realisierung von Produkten (...)“ (VDI 2222, S. 6) sind.
- Gliederung der Teilaspekte der prinzipiellen Lösungen, welche auf Basis einer Modularisierung die funktionale Bedeutung klassifiziert (VDI 2223).

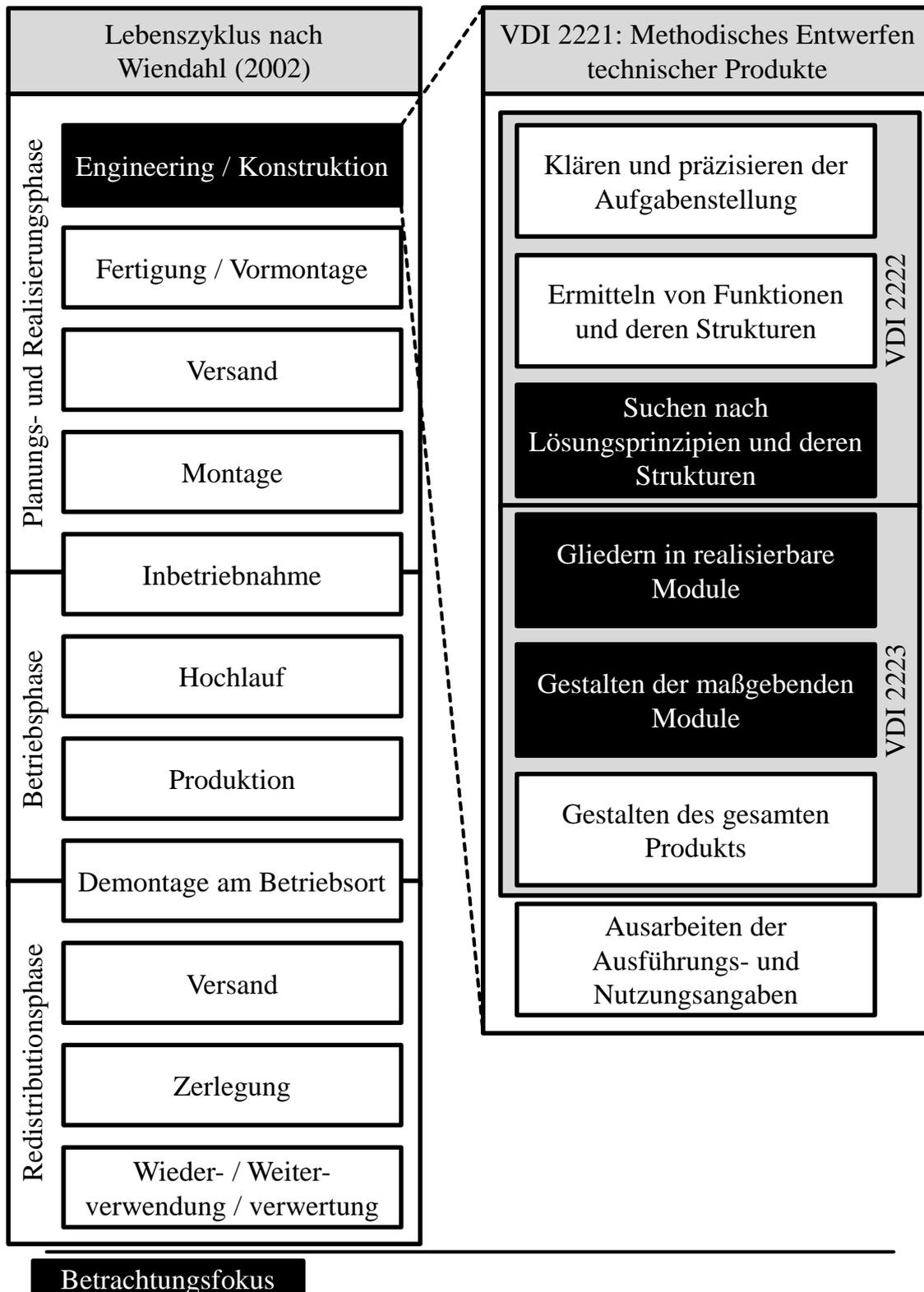


Abbildung 3: Eingliederung der Definition der frühen Phase des Entwicklungsprozess in Anlehnung an WIENDAHL ET AL. (2002) sowie der VDI 2221, VDI 2222 und VDI 2223

- Vorentwürfe der maßgebenden Bereiche der Wirkstruktur, welche grundsätzliche Körperkonturen, die für die Funktionserfüllung von Bedeutung sind, und erste Dimensionsangaben enthalten (VDI 2221).

2.2.3 Die ökonomische Bedeutung der frühen Phase

Die frühe Phase ist zentraler Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses, welcher im gesamten Produktlebenszyklus eine bedeutende Rolle spielt. So werden in dieser Lebensphase ca. 70 % der Produktkosten festgelegt (VDI 2235). Die frühe Phase selbst ist dabei ein zentraler Bestandteil in der Definition der Produktkosten. Zu diesem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess ist jedoch die Beurteilung der möglichen Kosten ein Problem, da noch kaum Informationen über das Produkt vorhanden sind. Meist können erst mit dem Entwurf des Produktes die Kosten festgelegt werden (VDI 2235).

Aus diesem Grund stellt die frühe Phase eine entscheidende Phase im Produktlebenszyklus dar und bedarf der Revisionsbarkeit von Konzepten und Entwürfen (EHRENSPIEL ET AL. 2007).

2.2.4 Simulation als Werkzeug im Entwicklungsprozess

Der Produktentwicklungsprozess kann bereits heute durch unterschiedliche Simulationsmethoden unterstützt werden (vgl. Abbildung 4).

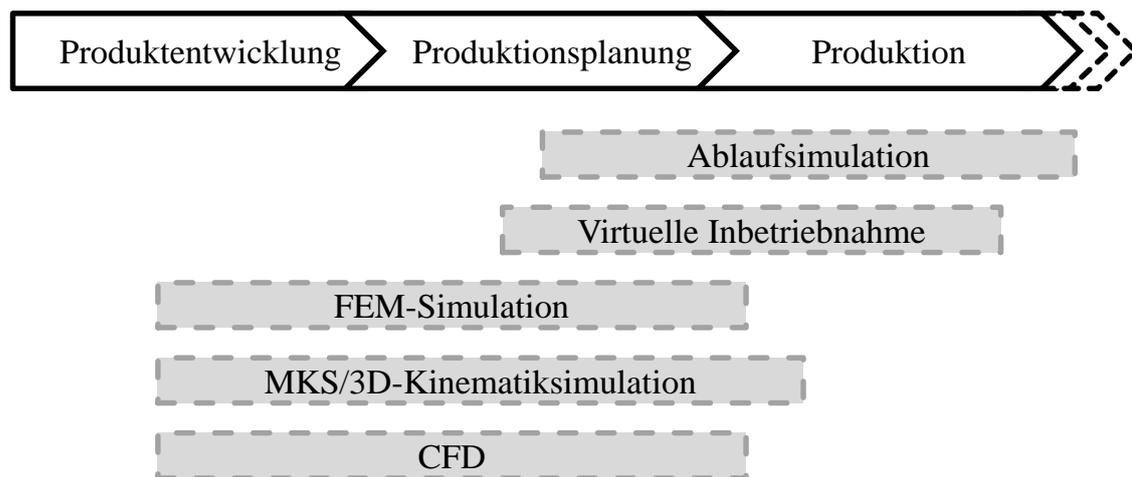


Abbildung 4: Phasenspezifischer Einsatz unterschiedlicher Simulationsmethoden in einem Ausschnitt des Produktlebenszyklus (in Anlehnung an SCHACK (2008) und STARK ET AL. (2011))

So wird die eigentliche Produktentwicklung ab einem bestimmten Reifegrad durch Finite Elemente Methoden (FEM)-Simulationen, Mehrkörpersimulationen, Kinematiksimulationen und CFD-Simulationen unterstützt. Darüber hinaus werden spätere Phasen durch Ablaufsimulationen sowie durch Simulationen zur virtuellen Inbetriebnahme von Anlagen virtuell abgesichert (ZÄH ET AL. 2006, SCHACK 2008, STARK ET AL. 2011, KROTIL 2012, HEFNER ET AL. 2014). Diese Methoden sind Teil der digitalen Fabrik (BRACHT ET AL. 2011).

Der Einsatz der virtuellen Simulationstechniken beginnt heute jedoch in der Regel erst mit der Gestaltung maßgebender Module. Die Evaluierung prinzipieller Lösungsmöglichkeiten erfolgt eher durch Kreativtechniken. Techniken der Digitalen Fabrik kommen nicht zum Einsatz (SCHACK 2008, S. 22-23).

CFD-Simulationen werden aufgrund des hohen Modellierungs- und Berechnungsaufwands heute nur sehr eingeschränkt eingesetzt (JOHNSON ET AL. 2005, BEINERT 2007, SONNENBURG 2009, OPPELT ET AL. 2015). Vornehmlich sind dies Anwendungsfälle, welche stark und in ihrer Funktionsweise bestimmend durch fluidische Effekte geprägt sind. Beispiele hierfür sind in der Automobilindustrie die akustische Auslegung von Bauteilen sowie aerodynamische Optimierungen (LANGERMANN 2008, S. 18), welche auch in anderen Anwendungsfällen wie in der Luftfahrtindustrie sowie der Auslegung von Strömungen in Ventilen Verwendung finden (LECHELER 2014). Weitere Anwendungsbeispiele sind die Simulationen von konvektiven Wärmetransporten und Mehrphasenströmungen (LAURIEN & OERTEL 2011, S 239-260).

2.3 Grundlagen der computergestützten Modellbildung und Simulation

2.3.1 Grundlagen der Rechnerarchitektur

Heutige Simulationen werden aufgrund der hohen Verfügbarkeit meist auf Workstations ausgeführt, in welcher die CPU (Central Processing Unit) der Hauptprozessor ist. Die Aufgabe der CPU ist es, unterschiedlichste Berechnungen in iterativer Abfolge abzuarbeiten (SANTO 2009). Diese Frequenz der Berechnungen wird heute vor allem durch eine Parallelisierung von mehreren CPUs gesteigert, welche unabhängig voneinander Aufgaben bearbeiten können. Die CPU nimmt in heutigen Workstations die Rolle des Generalisten ein und dient somit der Berechnung unterschiedlicher und unterbrechbarer Algorithmen.

Einen anderen Ansatz verfolgt die GPU (Graphics Processing Unit). Diese ist ein niedriger getakteter Hilfsprozessor, der ursprünglich auf die Berechnung graphischer Darstellungen spezialisiert ist. Die GPU ist aus diesem Grund auf die parallele Berechnung gleicher Anweisungen spezialisiert sog. „Single Instruction, Multiple Data“ Berechnungen. Die GPU ist somit ein Spezialist für die parallele Ausführung gleicher Befehle mit unterschiedlichen Daten (HÄBERLEIN 2011, S.171-173). Darüber hinaus ist aufgrund der einfachen Rechnerarchitektur eine Parallelisierung von tausenden gleichzeitig durchgeführten Berechnungen möglich.

Vergleicht man den theoretischen Durchsatz der CPU und GPU in einer heutigen Workstation-Maximalkonfiguration, so kann aufgrund der simplifizierten Parallelisierung die GPU theoretisch ein Vielfaches an Durchsatzleistung mit weiter steigender Tendenz leisten (PEDDIE 2006, SENOCAK ET AL. 2009). Diese Entwicklung der Durchsatzleistung wird in Abbildung 5 dargestellt. So lag bspw. im Jahr 2013 der theoretische Durchsatz einer GPU, gemessen in GFlops¹, ungefähr 7x höher als der theoretische Berechnungsdurchsatz einer CPU. Zur Nutzung der theoretischen Berechnungskapazitäten ist es jedoch essentiell, dass die Algorithmen an die spezifischen Hardwarekomponenten angepasst werden (LEE ET AL. 2010).

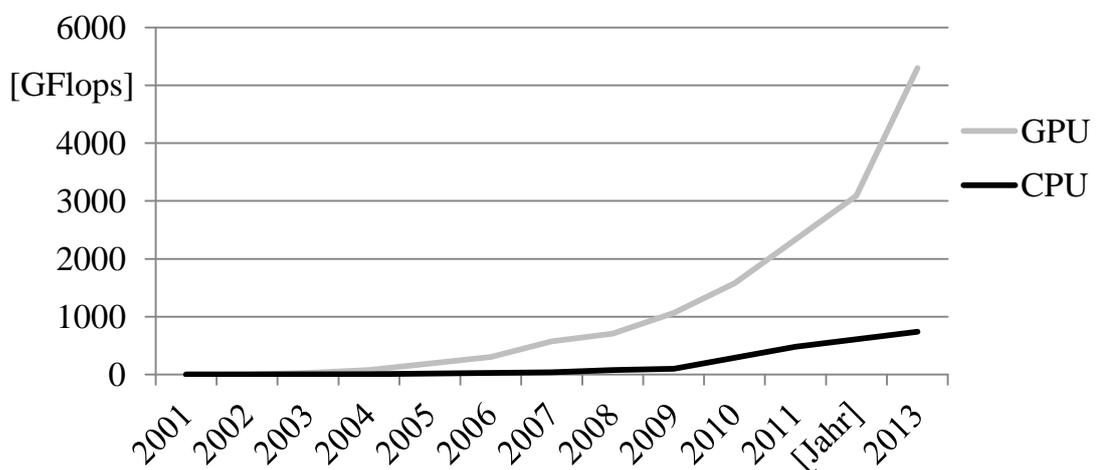


Abbildung 5: Historische Entwicklung der Rechenkapazität
(NVIDIA CORPORATION, 2015)

¹ GFlops = Giga floating point operations per second

2.3.2 Szenegraph

In computergrafischen Anwendungen und Simulationen werden Modelle in Szenegraphen repräsentiert (EGERMEIER 2008). Ein Szenegraph ist eine objektorientierte Datenstruktur, welche aus graphentheoretischer Sicht ein gerichteter Graph in Baumstruktur ist. Die Gesamtszene wird durch einen Wurzelknoten repräsentiert, welchem in logischer Hierarchie durch Transformationsmatrizen Kindknoten unterstellt werden. Die Transformationsmatrizen beinhalten Informationen sowohl über die translatorische Verschiebung und rotatorische Drehung als auch die Skalierungsinformationen. Diese enthalten Verweise auf geometrische Informationen. Die eigentlichen Geometriedaten werden in einem Konstruktorenvektor singular vorgehalten. Dadurch ist eine einfache Wiederverwendung der Geometriedaten durch unterschiedliche Knoten, welche diese Daten instanziierten, ermöglicht (TOBLER 2011). Abbildung 6 stellt beispielhaft einen Szenegraphen dar. Dabei wird durch den Transformationsknoten „Fahrzeug_gesamt“ die Koordinate des Fahrzeuges definiert, auf welche durch den Verweis „Verweis: Fahrzeug“ die Geometriedaten des Fahrzeuges aus dem Konstruktorenvektor instanziiert werden. Darüber hinaus wird die Geometrie der Reifen zweimal an unterschiedlichen Koordinaten, welche durch unterschiedliche Transformationsknoten definiert werden, instanziiert (LACOUR 2011).

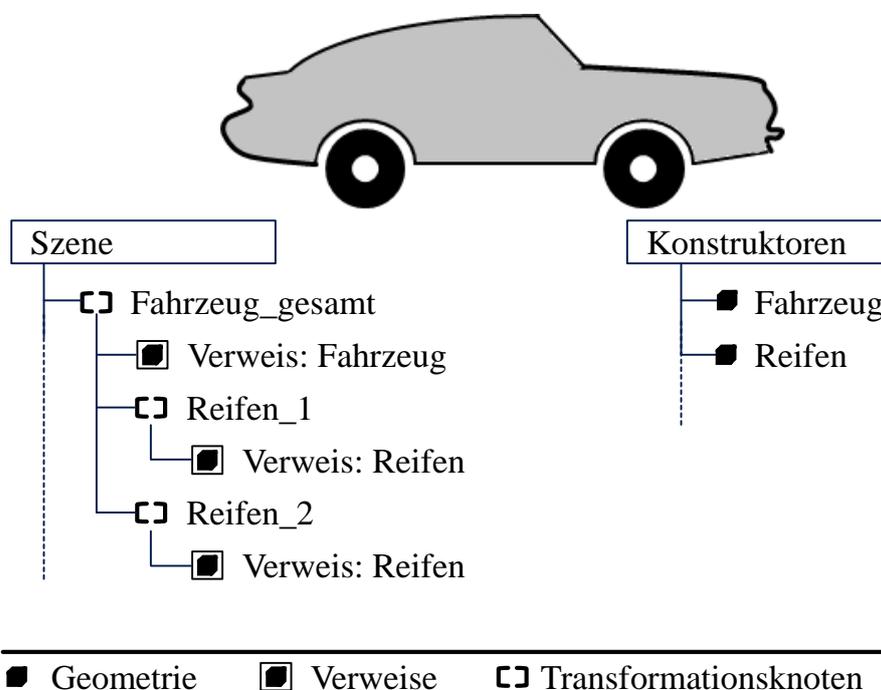


Abbildung 6: Szenegraph eines Fahrzeuges und instanziierten Reifen, welche relativ auf den Konstruktorenvektor verweisen

Durch die Methode des Instanzierens und der Verweise ergibt sich der Vorteil, dass die Geometriedaten nur einmalig im Konstruktorenvektor vorgehalten werden. Darüber hinaus werden Modifikationen an den Konstruktoren auf alle Instanzen projiziert.

2.3.3 Geometrische Modellbeschreibung

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen können virtuelle Geometrien durch unterschiedliche Modelle beschrieben werden. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die prinzipiellen, wichtigsten Formen.

Klassische 3D Computer-Aided-Design (CAD) Systeme nutzen aufgrund der Reproduzierbarkeit einzelner Konstruktionsschritte nichtpolygonale Modelle. Beispielsweise bilden konstruktive Festkörpergeometrien die Gesamtmodelle der logischen Verknüpfung einfacher Geometrien wie Würfel, Kugeln etc. nach (BEIELSTEIN ET AL. 2003). Eine weitere Modellierungsart sind implizite Oberflächen, bei denen die Oberfläche durch implizite Funktionen modelliert wird. Somit sind die Geometrien stets geschlossen.

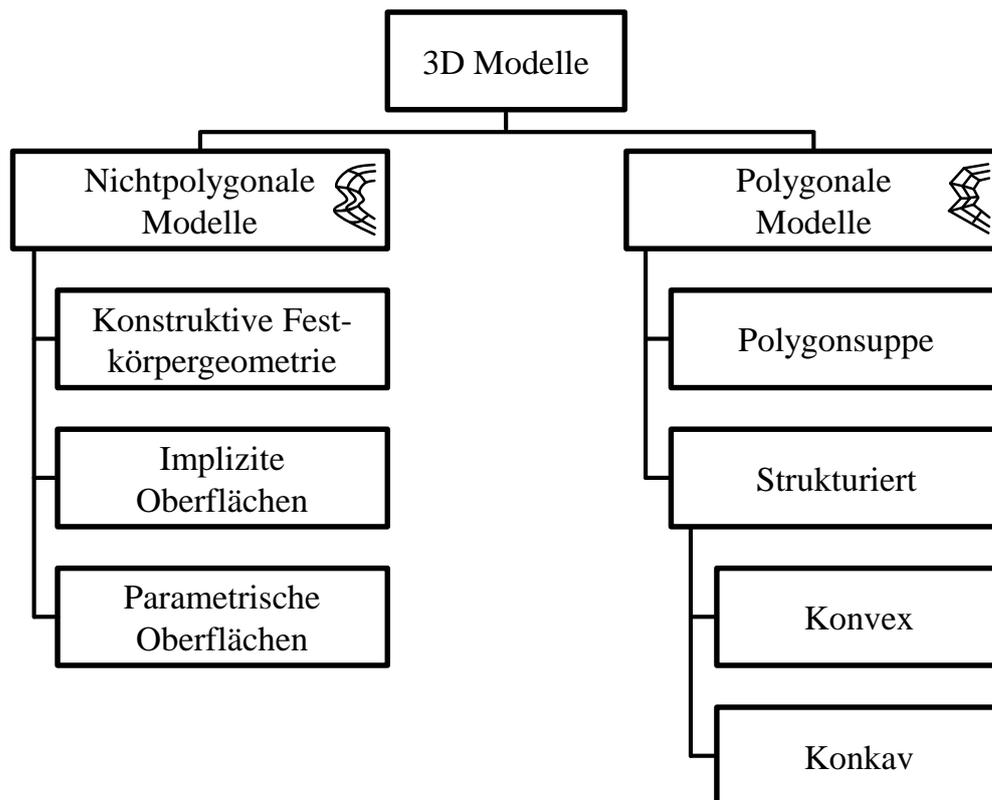


Abbildung 7: Kategorien geometrischer Modelle nach LIN & GOTTSCHALK (1998)

Im Gegensatz dazu sind parametrische Oberflächen nicht immer geschlossen, da diese nur planare Flächen in den 3D Raum projektieren (HABLINGER & KLEMENT 1990). Eine einfache Repräsentation geometrischer Modelle bieten polygonale Modelle. Hierbei kann zwischen unstrukturierten Polygonen, sog. Polygonsuppen, welche eine unsortierte und nicht weiter definierte Menge an Polygonen darstellen, und strukturierten polygonalen Modellen unterschieden werden. Darüber hinaus lassen sich strukturierte polygonale Modelle in konvexe und konkave Modelle unterteilen.

Ein Modell gilt als konvex, wenn für alle Punkte in einer Geometrie gilt:

$$\overline{P_1 P_2} \subseteq G, \quad 2.1$$

wobei

$$P_1, P_2 \in G \quad 2.2$$

Darüber hinaus werden nichtpolygonale Modelle zur graphischen Ausgabe oft in polygonale Modelle diskretisiert. Dieser Schritt ist notwendig, da Grafikkarten polygonale Modelle erwarten. Ein Grund ist unter anderem, dass polygonale Modelle aus vielen, von der Grundstruktur her gleiche Primitiva bestehen, und somit eine schnelle Durchführung der Algorithmen und Berechnungen möglich ist. Den Prozessschritt der Modelltransformation nennt sich Tessellierung. Meist werden Dreiecke als primitiver Polygon-Typ genutzt, da die einfachste, garantiert planare und konvexe 2D Form sind. Darüber hinaus eignet sich die datentechnische Repräsentation durch Vertices (Punkte im 3D euklidischen Raum) und deren verbindenden Kanten sehr gut für das parallele Berechnen durch GPUs. Daher bilden Dreiecksnetze in der virtuellen Visualisierung oftmals die geometrische Repräsentation.

2.3.4 Kollisionserkennung in computergraphischen Anwendungen

In Simulationen ist das Erkennen von Kollisionen zwischen Geometrien oftmals von essentieller Bedeutung. Im einfachsten Fall würde hierfür jedes Element im Szenegraph mit jedem Element auf mögliche Überschneidungen der Geometrien überprüft. In dieser Methode müssten jedoch im Fall von polygonalen Modellen, repräsentiert durch Dreiecksnetze, jedes Dreieck mit jedem auf Schnittmengen

überprüft werden. Dadurch ist die Methode für große Modelle mit vielen Geometrien aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes nicht geeignet, da die Berechnungskomplexität $\mathcal{O}(n_G^2 n_{Vertices}^2)$ ist (MOORE & WILHELMS 1988). Stattdessen erfolgt die Auflösung möglicher Kollisionen in physikalischen Simulationen in zwei Phasen.

Der erste Überprüfungsschritt einer möglichen auftretenden Kollision ist die Broad-Phase (YEH ET AL. 2009). Hierbei wird nicht im Detail überprüft, ob eine Kollision stattfindet, sondern es erfolgt eine Voruntersuchung möglicher Kollisionspartner. Aus diesem Grund sind in diesem Schritt keine exakten Repräsentationen der Geometrien zu beachten, stattdessen kann eine simplifizierte Hüllgeometrie genutzt werden ($\mathcal{O}(n_{Hüllgeometrie} = n_G)$). Die Hüllgeometrien sind immer größer als die eigentlich zu untersuchenden (Teil-)Geometrien. Abbildung 8 stellt übliche Hüllgeometrien zur schnelleren Berechnung dar. Werden z. B. Sphären als Hüllgeometrie gewählt, so ist die Broad-Phase eine einfache Überprüfung der Distanz der beiden Mittelpunkte. Die Berechnung kann somit stark vereinfacht werden (YEH ET AL. 2009). Im Fall von achsausgerichteten Boxen erfolgt die Erstabschätzung durch den Vergleich der Minimal-Maximal Achswerte (WANG ET AL. 2009).

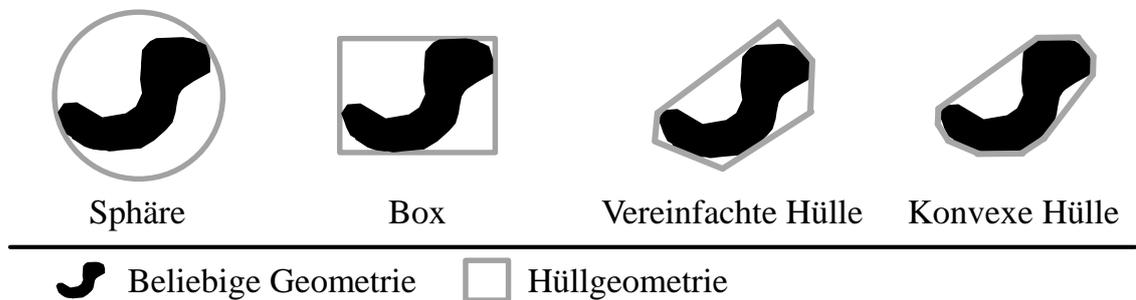


Abbildung 8: Übliche Hüllgeometrien zur Kollisionserkennung in der Broad-Phase

Die Berechnungskomplexität der Broad-Phase beträgt in diesem Fall $\mathcal{O}(2n_{Hüllgeometrie})$ (WANG ET AL. 2009), wobei $n_{Hüllgeometrie}$ die Gesamtanzahl der Hüllgeometrien ist. Eine weitere Reduktion der Berechnungskomplexität erfolgt in Anwendungsfällen mit vielen Geometrien. Diese basieren auf der Sortierung der Domäne, wodurch mögliche Kollisionen zwischen Partnern ausgeschlossen werden und somit nicht überprüft werden. Ein Beispiel hierfür sind Sort and Sweep Algorithmen, welche die Berechnungskomplexität auf $\mathcal{O}(n_{Hüllgeometrie})$ reduzieren (LE GRAND 2007).

Der zweite Berechnungsschritt zur Auflösung von Kollisionen ist die sog. Narrow-Phase. In dieser werden lediglich die durch die Broad-Phase identifizierten Geometrien näher betrachtet. Aufgrund der hohen Reduktion möglicher Kollisionspartner erfolgt hier meist die exakte Auflösung, welche Geometrie an welchem Kontaktpunkt mit welchen Kräften kollidiert (EITZ & LIXU 2007).

2.3.5 Konvexe Zerlegung von Geometrien

Das Prinzip der zweistufigen Kollisionserkennung kann zugunsten einer Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit genutzt werden. Hierfür kann durch die konvexe Zerlegung jede Geometrie in eine Anzahl von konvexen Hüllen (Teilmengen) gegliedert werden. Als Maß für die Konvexität dient der Konvexitätsgrad C einer Geometrie G , welcher definiert ist als

$$C(G) = \arg \max_{P_{Konvex} \in G} \|P_{Konvex} - H(G, P)\| \quad 2.3$$

wobei P ein beliebiger Punkt der Geometrieoberfläche und $H(G, P)$ der zugehörige Projektionspunkt des Punktes P_{Konvex} auf der konvexen Hülle der Geometrie G ist (MAMOU & GHORBEL 2009).

Zur konvexen Zerlegung können unterschiedliche Algorithmen genutzt werden. Eine grundsätzliche Unterscheidung besteht in der Wahl der Bezugsgröße, welche sowohl die Oberfläche der Geometrie als auch das Volumen selbst darstellen kann. Eine optimale Zerlegung, d. h. die Zerlegung der ursprünglichen Geometrie in möglichst wenige konvexe Teilgeometrien, ist jedoch sehr berechnungsaufwändig (CHAZELLE 1984).

Bei der exakten konvexen Zerlegung (BAJAJ 1990, EHMANN & LIN 2001) wird die ursprüngliche Geometrie in eine (meist minimale) Menge konvexer Teilgeometrien separiert. Die Summe der Teilgeometrien repräsentiert exakt die ursprüngliche Geometrie. Darüber hinaus ist jede Teilgeometrie konvex, d. h. es gilt für jede Teilgeometrie $C(G) = 0$ (MAMOU & GHORBEL 2009). Aufgrund der harten Randbedingung kann die exakte konvexe Zerlegung zu einer starken Fragmentierung führen.

Darüber hinaus ist die exakte konvexe Zerlegung sehr rechenaufwändig (EHMANN & LIN 2001). Aus diesem Grund werden oftmals Algorithmen zur approximativen konvexen Zerlegung (LIEN 2006, REN ET AL. 2013) genutzt. In diesen Methoden wird die Bedingung der Konvexität jeder Teilgeometrie modifiziert.

Stattdessen darf der Konkavitätsgrad einen bestimmten Schwellwert nicht überschreiten. Durch diesen Schritt können die Berechnungsalgorithmen simplifiziert werden, wodurch sich die Vorteile ergeben, dass zum einen die Berechnungszeiten stark reduziert, zum anderen die Partitionierung in zu viele Teile vermieden werden kann (MAMOU & GHORBEL 2009).

2.4 Grundlagen der CFD-Simulation

Die CFD-Simulation beschäftigt sich mit der Simulation fluidmechanischer Prozesse. Nach SCHWARZE (2013, S. 12) umfasst die CFD-Simulation die Formulierung eines Modells, die computergestützte Berechnung des Strömungsfeldes sowie die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse. Der Fokus der CFD-Simulationen ist eine möglichst präzise numerische Nachbildung der Realität.

2.4.1 Einordnung der fluiddynamischen Prozesse

CFD-Simulationen bilden die Prozesse der Fluidmechanik ab, welche ein Teilgebiet der Technischen Mechanik ist, und sich mit den Gesetzmäßigkeiten der Bewegungen und des Kräftegleichgewichts von Fluiden beschäftigt. Fluide können grundsätzlich in inkompressible Fluide, bspw. Flüssigkeiten, welche massebeständig und annähernd volumenbeständig sind, und kompressible Fluide, welche massebeständig, jedoch nicht volumenbeständig sind, aufgeteilt werden (vgl. Abbildung 9) (SIEGLOCH 2012, S. 4-6). Im Rahmen dieser Arbeit wird das dynamische Verhalten inkompressibler Fluide betrachtet. Dieses kann numerisch durch CFD-Simulationen gelöst werden.

Darüber hinaus können Fluide in vier Grundarten klassifiziert werden (IRGENS 2014):

- Zum einen Nichtnewtonsche Fluide wie
 - Bingham-Fluide, welche erst ab einer Mindestschubspannung zu fließen beginnen,
 - strukturviskose Fluide, welche bei hohen Scherkräften niedrigere Viskosität aufzeigen,
 - dilatante Fluide, deren Viskosität sich bei hohen Scherkräften steigert, zum anderen
- newtonsche Fluide, deren Viskosität proportional abhängig von der Scherung ist und in dieser Arbeit betrachtet werden.

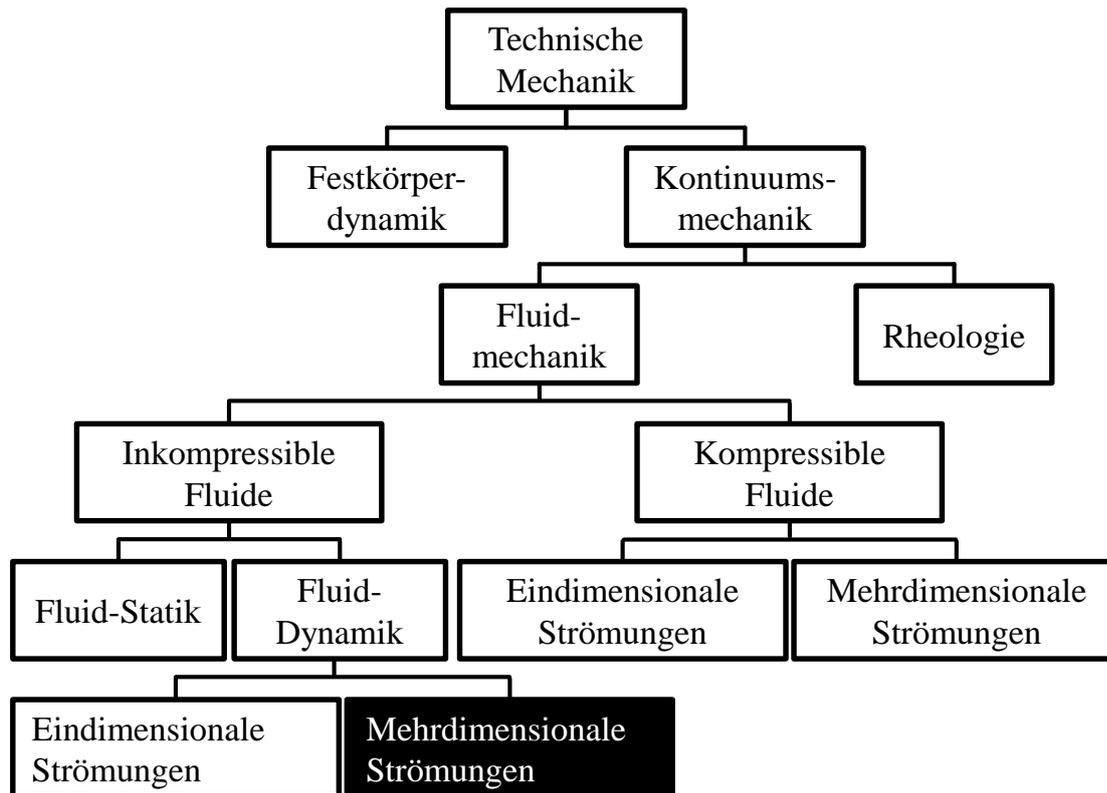


Abbildung 9: Eingliederung des Betrachtungsfokus (SIEGLOCH 2012, S. 5)

2.4.2 Die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung

Die mathematische und physikalische Grundlage der Fluidmechanik ist die Navier-Stokes Gleichung, eine Kombination von komplexen partiellen Differentialgleichungen, welche nur in Ausnahmefällen analytisch zu berechnen sind (ROGERS 1992, S. 23). Eine legitime Vereinfachung der Gleichungen ist die Einschränkung der Formel hin zur Navier-Stokes-Gleichung für inkompressible Fluide, auf welche sich diese Arbeit beschränkt. Bei dieser Formel wurde noch nicht die mathematisch eindeutige Lösbarkeit bewiesen und stellt die Mathematik noch immer vor große Herausforderungen (FEFFERMAN 2006). Jedoch konnten in der Vergangenheit unter der Zuhilfenahme der inkompressiblen Navier-Stokes Gleichung bereits unterschiedliche Anwendungen simuliert werden, wodurch die praktische Anwendbarkeit erwiesen wurde (SELLE ET AL. 2005, SOLENTHALER 2010, VOROBOYEV 2012). Die Annahme einer Inkompressibilität der Fluide ist im ingenieurwissenschaftlichen Bereich legitim, wenn gilt (CHUNG 2002, S. 106):

$$M = \frac{u_{max}}{u_{Schall}} < 0,3$$

2.4

Diese bedeutet, dass bspw. im Fall von Wasser eine Inkompressibilität bis zur maximalen Geschwindigkeit von ca. $400 \frac{m}{s}$ angenommen werden kann.

Im Fall der Inkompressibilität kann für die Berechnung des fluidischen Verhaltens die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} * \nabla) * \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu_{kinematisch} * \nabla * \nabla * \vec{u} + \frac{\vec{f}}{\rho} \quad 2.5$$

genutzt werden, wobei \vec{u} die Geschwindigkeit, ρ die Dichte, p der Druck, $\mu_{kinematisch}$ die kinematische Viskosität und \vec{f} die Volumenkraftdichte ist. Dabei gilt die Randbedingung

$$\nabla * \vec{u} = 0, \quad 2.6$$

welche eine Divergenzfreiheit des Geschwindigkeitsfeldes bedingt. Dies ist gleichzusetzen mit einer konstanten Dichte innerhalb eines Fluids.

2.4.3 Modellierung der Simulationsdomäne in CFD-Simulationen

Da fluidische Prozesse nur selten analytisch berechnet werden können (ROGERS 1992, S. 23), werden CFD-Simulationen eingesetzt. Diese abstrahieren die Navier-Stokes-Gleichung. Zur Annäherung der Lösung wird die Simulationsdomäne und die Zeit diskretisiert.

Diskretisierung des Raumes

Die Diskretisierungsansätze gliedern die Lösungsverfahren numerischer Methoden und lassen sich anhand der Diskretisierung des Raumes in netzbasierte und netzbasierte Methoden differenzieren (vgl. Abbildung 10).

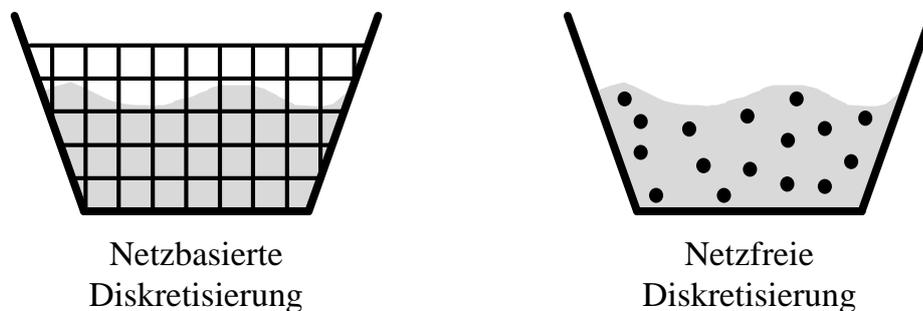


Abbildung 10: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur geometrischen Diskretisierung

Die netzbasierten Methoden können weiter unterteilt werden in eulersche Methoden, welche die Eigenschaften von Substanzen an stationären Punkten im Raum repräsentieren, und lagrangesche Ansätze, welche die Eigenschaften mit der Substanz bewegen (CHUNG 2002). Darüber hinaus gibt es Euler-Lagrangesche Methoden, welche partiell beide Ansätze nutzen (STAM 1999). In der netzbasierten Diskretisierung wird die ganze Simulationsdomäne unabhängig vom aktuellen Zustand der einzelnen Zellen vollständig vernetzt. So werden in der mathematischen Beschreibung auch Zellen inkludiert, welche kein Fluid enthalten. Darüber hinaus ist in der reinen eulerschen Diskretisierung die geometrische Position der Knoten und Volumina bis zu einer Neuvernetzung konstant.

Im Gegensatz dazu umfassen die netzfreien Methoden nur die lagrangeschen Ansätze. Das heißt, in der netzfreien Diskretisierung wird das Fluid direkt in Form von vielen (virtuellen) Partikeln abstrahiert (BELYTSCHOKO ET AL. 1996). Eine direkte Einschränkung der Fluidomäne gibt es somit nicht. Diese Art der Diskretisierung bildet oftmals die Grundlage für netzfreie Berechnungsverfahren. Die Art der räumlichen Diskretisierung definiert auch die grundlegende Definition einer Simulationsmethode. So ist nach DUARTE (1995) eine Methode netzfrei, wenn die Gleichungen des Randwertproblems nicht von einem eindeutig definierten Netz abhängen.

Diskretisierung der Zeit

Darüber hinaus werden Simulationen durch die zyklische Abarbeitung von Algorithmen durchgeführt. Dadurch verliert das System seine Kontinuität. Resultate werden in Zeitabständen Δt erzeugt, sog. Simulationsschritte. Somit sind in Simulationen nur alle Werte zum Abtastzeitpunkt

$$t = i * \Delta t \text{ mit } i = 1, 2, 3, \dots \quad 2.7$$

bekannt (ZIRN & WEIKERT 2006, S. 25). Darüber hinaus definiert nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (WERNER 2010, S. 77) die Nyquist-Frequenz

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2} f_{Abtast} \quad 2.8$$

die maximale Abtastfrequenz. Dies bedeutet, dass Effekte mit einer Frequenz höher als der Nyquist-Frequenz $f_{Nyquist}$ nicht erkannt werden und somit zu Simulationsfehlern führen.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Diskretisierung der Zeit in CFD-Simulationen ist die Courant-Friederichs-Lewy(CFL)-Zahl (COURANT ET AL. 1928)

$$C_{CFL} = \frac{\bar{u} \cdot \Delta t}{\Delta x}. \quad 2.9$$

Die CFL-Zahl definiert, um welche räumliche Diskretisierungsmenge sich eine betrachtete Größe pro Zeitschritt fortbewegt und stellt somit die räumliche und temporale Diskretisierung in einen Zusammenhang. Aus diesem Grund ist diese ein direkter Einfluss auf das numerische Verfahren, mit welchem die Simulation zeitlich propagiert wird.

Zur zeitlichen Integration der diskreten Schritte gibt es zahlreiche unterschiedliche Verfahren. Daher sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (DAVIS & RABINOWITZ 1984, LAURIEN & OERTEL 2011).

2.4.4 Verifikation und Validierung von Simulationen

Die Diskretisierungen führen einen Fehler in die Lösungen von Simulationen ein. Aus diesem Grund muss die Gültigkeit von Simulationen abgesichert werden.

Bei der Absicherung von Simulationen unterscheidet man zwischen Verifikation und Validierung. MAROPOULOS & CEGLAREK (2010) geben einen Überblick über geläufige Definitionen und unterscheiden dabei zwischen der digitalen und physischen Welt. Im Rahmen dieser Arbeit wird Validierung als eine Methode definiert, welche analysiert, ob „(...) das CFD-Modell eine hinreichend genaue Darstellung der zu untersuchenden realen Strömungen ermöglicht.“ (SCHWARZE 2013, S. 12) Darüber hinaus ist die Verifikation die Sicherstellung, dass das implementierte Modell den getroffenen Spezifizierungen und formulierten Anforderungen der Konzeption entspricht (SCHWARZE 2013, S. 12).

Somit treffen im Idealfall bei der Verifikation folgende Eigenschaften auf ein CFD-Modell zu (SCHWARZE 2013, S. 11):

- **Beschränktheit:** Jede berechnete Größe liegt in jedem Fall innerhalb eines physikalisch sinnvollen Wertintervalls.
- **Konservativität:** Die Gleichungen des CFD-Modells basieren auch in diskretisierter Form auf realen Werten.
- **Konsistenz:** Wird eine unendlich hohe Diskretisierungsauflösung gewählt, so geht der durch die Diskretisierung eingeführte algebraische Fehler gegen null.

- Konvergenz: Bei unendlich hoher Auflösung strebt die Lösung der Simulation die exakte Lösung an.
- Stabilität: Während einer Simulation wächst der Fehler nicht an.
- Transporteigenschaft: Die Diskretisierung berücksichtigt die konvektive Strömung

Da ein digitales Modell jedoch stets eine Simplifizierung der Realität darstellt, ist eine vollständige Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität mit vertretbarem Aufwand nicht möglich (JOHNSON ET AL. 2005). Aus diesem Grund unterteilt ZIRN & WEIKERT (2006) die Simulationsgenauigkeit in fallspezifische Klassen, wobei eine sehr gute Übereinstimmung (Abweichung $< 5\%$) für kleine Modelle erreicht werden kann. Darüber hinaus ist eine gute Übereinstimmung im Bereich von $5\% - 30\%$ unter der Bedingung definiert, dass wenige relevante Einflussfaktoren zu untersuchen sind. Simulationsabweichungen, welche darüber hinausgehen, sind noch immer für die Untersuchung von Tendenzen sowie für qualitative Aussagen von Systemparametern akzeptabel (ZIRN & WEIKERT 2006, S. 51-52).

2.5 Zusammenfassung

Zu Beginn des Kapitels werden zum besseren Verständnis dieser Arbeit zentrale, relevante Begriffe definiert. Zentraler Bestandteil hiervon ist die aufgabenorientierte Definition der frühen Phase und die Eingliederung der Arbeit im Produktentwicklungsprozess. In diesem Sinne wird die hohe ökonomische Bedeutung dargestellt, gefolgt von einem prinzipiellen Überblick heutiger Simulationsmethoden der digitalen Fabrik über den Ausschnitt des Produktlebenszyklus.

Darauf folgend werden die Grundlagen der computergestützten Simulation und Modellierung erklärt, welche das Verständnis der Arbeit erleichtern. Diese umfassen die wesentlichen Elemente heutiger Rechnerarchitekturen in Zusammenhang mit einem Vergleich der Entwicklungen der Leistungsfähigkeiten von CPU und GPU, welche aufgrund ihrer Architektur eine vielfach höhere Berechnungskapazität in parallelisierbaren Anwendungen aufweisen. Gefolgt wird diese Darstellung von einer Erläuterung der Beschreibungsmöglichkeiten von Geometrien sowie Möglichkeiten der konvexen Zerlegung und deren reduzierende Auswirkungen auf Kollisionsberechnungen. Darüber hinaus werden zum besseren Verständnis der Methode Szenegraphen als Modellstrukturierungsmethode in computergrafischen Anwendungen vorgestellt.

Anschließend werden CFD-Simulationen dargestellt. Zunächst erfolgt hierbei eine Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Problemstellungen. Diese umfassen im Wesentlichen inkompressible, mehrdimensionale und mehrphasige Strömungen von newtonschen Fluiden. Anschließend wird ein Überblick über die Diskretisierungsmethoden der Zeit und des Raumes gegeben, welche die Grundlage der iterativen Berechnungsverfahren bilden und im weiteren Verlauf ein Klassifizierungskriterium darstellen. Das Kapitel wird abgeschlossen durch eine Diskussion über die Verifikation und Validierung von Simulationen mit dem Fazit, dass die Ergebnisqualität stark von Einflussfaktoren und der Zielstellung abhängig ist.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden die für eine Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie der derzeitige Stand der Technik aufgezeigt.

3.1 Methodische Entwicklung mechatronischer Systeme

Aufgrund der Historie mechatronischer Systeme sowie des steten Wandels hin zu einer stärkeren Verknüpfung ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen wurden unterschiedliche methodische Vorgehensweisen entwickelt (TOMIYAMA ET AL. 2009). Die Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Einflussfaktoren bedingen problemspezifische Lösungswege, die meist nur auf abstrakter Ebene in ihrer Komplexität zusammengefasst werden können (DÖRNER 1999, LINDEMANN 2009, S. 33-64, FELDHUSEN & GROTE 2013).

Die unterschiedlichen Entwicklungsmethoden können in unterschiedliche Granularitätsstufen eingeteilt werden; von Mikrologiken, welche Entscheidungsprozesse, die sich nahezu unbewusst im Gehirn von Entwicklungsingenieuren abspielen, bis hin zu Makrologiken, welche in großen zeitlichen Dimensionen ablaufen (LINDEMANN 2009, S. 37-39). BRAUN (2005, S. 27-32) beschreibt zur Spezifikation der Granularität ein Spannungsfeld zwischen einer Mikroebene, welche durch einen deskriptiven Charakter und einem hohen Abstraktionsgrad gekennzeichnet ist, und einer Makroebene, welche domänenspezifische, konkrete Handlungsanweisungen sowie einen präskriptiven, prozeduralen Charakter umfasst.

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Entwicklungsmethoden erarbeitet. Dies resultiert aus der Notwendigkeit zur Flexibilisierung des Methodeneinsatzes. EHRENSPIEL (2002, S. 290-296) nennt eine Reihe an Gründen für diese Entwicklung:

- Ergebnisunsicherheit
- Problem-/Zielabhängigkeit
- Produktabhängigkeit
- Personenabhängigkeit
- Umsatz- und Zeitabhängigkeit
- Unternehmensabhängigkeit

Aus diesem Grund werden im Folgenden die wichtigsten Entwicklungsmethoden mit steigendem Abstraktionsgrad der Aufgabe vorgestellt. Wie in Abbildung 11 dargestellt umfassen diese die Modelle der Denk- und Handlungsabläufe und die Vorgehensmodelle der operativen Ebene. Abschließend werden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Phasenmodelle des Produktentwicklungsprozesses im Maschinen- und Anlagenbau betrachtet.

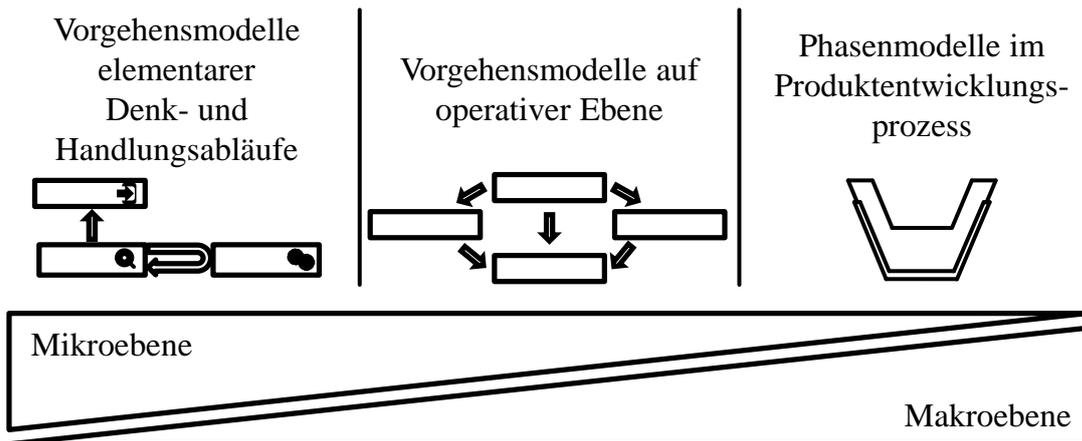


Abbildung 11: Strukturierung der unterschiedlichen Abstraktionsgrade der Entwicklungsmethoden (LINDEMANN 2009, S. 38)

3.1.1 Vorgehensmodelle elementarer Denk- und Handlungsabläufe

Denk- und Handlungsabläufe auf elementarer Ebene werden von Arbeitspsychologen mit dem Ziel einer Nachbildung des menschlichen Problemlösungsprozesses untersucht. Auf Basis dieses Wissens können Methoden zur besseren Unterstützung des Menschen entwickelt werden.

TOTE-Modell: Test-Operate-Test-Exit

Ein Vorgehen auf elementarer Denk- und Handlungsebene ist das TOTE-Modell. Es beschreibt das iterative Vorgehen der Schritte „Test“, d. h. des Überprüfens, ob ein Zielzustand bereits erreicht wurde, und „Operate“, welches die Durchführung einer Handlung beschreibt. Ist ein zulässiger Zielzustand erreicht, so kann die Prozessschleife beendet werden (MILLER ET AL. 1991).

Grundsätzlich ist das TOTE-Modell ein elementarer Mikrozyklus und ist in vielen Vorgehensmodellen ein elementarer Baustein.

VVR-Zyklus: Vergleich-Veränderung-Rückmeldung

HACKER (1998) erweitert das TOTE-Schema zum VVR-Zyklus. Die elementare Weiterentwicklung des Vorgehens ist zum einen die Berücksichtigung der Auswirkungen auf das Umfeld, zum anderen die Antizipation der Auswirkungen der Handlungen auf das Ergebnis, woraus eine bessere Zielorientierung resultiert.

DPS: Discursive Problem Solving

Die diskursive Lösungssuche zeichnet sich durch die Zielorientierung des Handelns aus, die für die Aktivitäten im Bereich der Produktentwicklung notwendig sind. Die Durchführung von Mikrozyklen auf Basis einer abstrakten Formulierung von Zielen soll zudem eine möglichst vollständige Überprüfung des Lösungsraumes ermöglichen (WULF 2001).

PDCA: Plan-Do-Check-Act

Der meist aus dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess bekannten PDCA-Zyklus (IMAI 1994) findet auch im Produktentwicklungsprozess Beachtung. Die vier Phasen des Zyklus werden in einer iterativen Abfolge durchlaufen. Beginnend mit dem Planungsschritt „Plan“ werden Probleme ermittelt und Lösungsideen generiert. Daraufhin erfolgen Explorationshandlungen zur Validierung des Lösungsprinzips. Dem folgend werden die Handlungen im „Check“-Schritt auf deren Wirksamkeit überprüft. Abschließend werden die Maßnahmen im „Act“ durchgeführt, woraufhin der Zyklus von neuem beginnt.

Rasmussenleiter

DÖRNER (1999) beschreibt die Lösungssuche als eine Brücke zwischen einer Situation und dem Ziel. Ist eine Problemlösung vorhanden, so wird dieser Weg beschritten. Ungelöste Problemstellungen werden daraufhin in einem iterativen Lösungsverfahren durch eine Zerlegung auf Unterprobleme untersucht. Ergibt auch dieses Verfahren keinen Lösungsweg, so werden Alternativen nach einem Trial-and-Error-Prinzip gesucht.

3.1.2 Vorgehensmodelle auf operativer Ebene

Die Modelle auf operativer Ebene umfassen komplexere Handlungsabläufe. Entwickelt von Betriebswissenschaftlern und Arbeitspsychologen wurden die Vorgehensmodelle auf operativer Ebene zur Unterstützung von Entwicklern zur Problemlösung entwickelt (LINDEMANN 2009, S. 41-43). Grundsätzlich lassen sich die unterschiedlichen Modelle in drei Standardschritte zusammenfassen:

1. Ziel bzw. Problem definieren (Zielsuche)
2. Lösungsalternativen generieren (Lösungssuche)
3. Entscheidung herbeiführen (Auswahl)

Im Folgenden wird eine Auswahl bekannter Vorgehensmodelle vorgestellt.

Algorithmus zur Lösung von Erfindungsaufgaben

Der Problemlösungszyklus nach ALTSCHULLER (1986) ist sehr detailliert formuliert und daher auf Entwicklungsaufgaben eingeschränkt. So wird ein Problem nicht nur analysiert, sondern es erfolgt auch eine Analyse der technischen Widersprüche, welche einem idealen Endresultat im Weg stehen. Darüber hinaus fokussiert sich die Lösungssuche stark auf das Überwinden der physikalischen Widersprüche. Dem Anwender werden hierfür detailliert unterschiedliche Verfahrensprinzipien aufgezeigt.

Allgemeine, rekursive analytisch-synthetische Konzeptamplifikation

Das erfolgreiche Vorgehen von Problemlösungsprozessen wurde auch in der Psychologie betrachtet. DÖRNER (1999) entwickelte auf dieser Basis ein deskriptives Modell des Vorgehens. Das sequentielle Modell umfasst die Schritte „Zielausarbeit“, „Modellbildung und Informationssammlung“, „Prognose und Extrapolation“, „Planung und Entscheidung“, „Durchführung von Aktionen“ sowie „Effektkontrolle und Revision“. Eine Besonderheit des Modells ist der Prozessschritt der „Prognose und Extrapolation“, welcher in vielen Modellen nicht betrachtet wird.

Problemlösezyklus

Der von DAENZER & HUBER (2002) entwickelte Leitfaden dient als Grundlage zur Lösung unterschiedlicher Arten von Problemen und beinhaltet definierte Prinzipien. Zu Beginn erfolgt eine Situationsanalyse gefolgt von einer Zielformulierung. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Situationsanalyse und der definierten Ziele werden in einem Synthese-Analyse-Zyklus auf iterative Weise unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten generiert, welche abschließend miteinander verglichen und bewertet werden. Auf Grundlage der Bewertung erfolgt eine Entscheidung.

Vorgehenszyklus

Der Vorgehenszyklus nach EHRENSPIEL (2002, S. 94-96) ist von dem Problemlösungszyklus nach DAENZER & HUBER (2002) abgeleitet. Nach einer Analyse, Strukturierung und Formulierung des Problems erfolgt eine systematische

Suche nach Lösungen. Abschließend wird eine Lösung ausgewählt. EHRENSPIEL (2002) erweitert das Modell durch eine Rückkopplung zwischen den Prozessschritten, welche im Regelfall zeitlich strikt sequentiell sind. Dadurch können Erkenntnisgewinne aus den unterschiedlichen Lösungsalternativen in die Zielstellung zurückfließen, welche auf dieser Basis modifiziert werden können.

3.1.3 Phasenmodelle im Produktentwicklungsprozess

Die Makroebene der Methoden in den Produktentwicklungsprozessen bilden unterschiedliche Phasenmodelle. Grundsätzlich umfassen diese meist prozessorientierte Richtlinien, welche in unterschiedlichen Phasen unitär oder zyklisch durchlaufen werden. Dabei wurden zahlreiche ingenieurdisziplinspezifische und -übergreifende Methoden entwickelt (EIGNER 2014, S. 15-52).

Die Entwicklung mechanischer Produkte wird in fast allen Vorgehensmodellen in vier Hauptphasen untergliedert EIGNER (2014, S. 15-52):

- Planungsphase
- Konzeptionsphase
- Entwurfsphase
- Detaillierungsphase

Im Folgenden werden die für diese Abhandlung bedeutendsten Methoden vorgestellt.

VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Die VDI 2221 beschreibt den Entwicklungsprozess mechanischer Produkte und folgt der dargestellten Gliederung. Dabei ist die Planungsphase geprägt durch eine Klärung und Präzisierung der Aufgabe, aus welcher eine Anforderungsliste abgeleitet wird. Auf dieser Basis werden in der Konzeptionsphase Funktionsstrukturen ermittelt und prinzipielle Lösungsprinzipien gesucht. Diese werden in realisierbare Module gegliedert und die maßgebenden Strukturen in der Entwurfsphase gestaltet. Die entwickelten Vorentwürfe werden abschließend in der Detaillierungsphase ausgestaltet und eine Produktdokumentation durchgeführt. Die einzelnen Phasen sind jedoch nicht als rein sequentielles Vorgehen zu verstehen, stattdessen werden die einzelnen Phasen und Prozessschritte in mehreren Iterationen durchlaufen (VAJNA ET AL. 2009, S. 24-27).

VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Ein Vorgehensmodell, welches auf die wachsende Interdisziplinarität in Entwicklungsprozessen und den damit einhergehenden Herausforderungen reagiert, stellt die VDI 2206 dar (REINHART ET AL. 2011). Die VDI Richtlinie setzt auf drei grundsätzliche Modelle,

- den „Problemlösungszyklus als Mikrozyklus“,
- das „V-Modell als Makrozyklus“
- sowie „Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte“.

Durch die formelle Anlehnung an das aus dem Software-Engineering stammende V-Modell werden die aus der Mechanik bekannten Ansätze im Produktentwicklungsprozess (z. B. VDI 2221) erweitert (VAJNA ET AL. 2009, S. 29). Grundsätzlich sind die Phasen der VDI 2206 mit den Phasen der VDI 2221 vergleichbar. Ausgehend von Anforderungen (Planungsphase) wird das System domänenübergreifend konzipiert (Konzeptionsphase). Das konzeptionelle System wird anschließend domänenspezifisch weiterentwickelt (Entwurfsphase). Anschließend erfolgt die Integration und Kombination der fachspezifischen Entwürfe hin zu einem Gesamtsystem (Detaillierungsphase). Abschließend wird das Gesamtsystem mit den Anforderungen verglichen. Darüber hinaus kann das beschriebene Vorgehen mehrfach durchlaufen werden (BAUMBERGER 2007, S. 74-75).

3-Ebenen Vorgehensmodell

Das 3-Ebenen Vorgehensmodell nach BENDER ET AL. 2005 konkretisiert das V-Modell der VDI 2206. Durch eine weitere Modularisierung des Gesamtsystems in Subsysteme und Komponenten wird die Komplexität reduziert. Auf Systemebene werden somit Fragen behandelt, welche das übergreifende System behandeln. Auf den hieraus resultierenden Anforderungen wird zunächst eine logische Partitionierung in Subsysteme vorgenommen. Die Mechanik arbeitet ab dieser Ebene eigenständig. Auf Basis einer erneuten, feingranulareren Anforderungsanalyse erfolgt eine weitere Untergliederung in eine Komponentenebene, welche daher vor allem für die Software und Elektrik von Bedeutung ist. Die Integration verläuft anschließend in konträrer Reihenfolge, d. h. hin zur Subsystemebene werden Elektrik und Software integriert. Anschließend erfolgt die Integration mit der Mechanik.

W-Modell

Auf Grundlage der VDI 2206 wurden weitere Vorgehensmodelle entworfen. Ein Beispiel hierfür ist das W-Modell (HENSEL 2011, NATTERMANN ET AL. 2013),

welches in seiner Grundstruktur dem V-Modell folgt. Das Grundmodell wird jedoch um die Betrachtungsweise der digitalen und virtuellen Methode erweitert. So wird der domänenspezifische Entwurfsschritt in drei Teilschritte aufgegliedert: Der erste Schritt ist eine domänenspezifische Konzeptionsphase. Darauf folgend werden die Konzepte in einem virtuellen System miteinander integriert. Auf Basis der Gesamtsystemmodelle kann durch Simulationen und Analysen das Systemverhalten überprüft werden. Erst nach eingehender Analyse erfolgt der domänenspezifische Entwurf.

Münchener Produktkonkretisierungsmodell

Geleitet durch die Abstraktionsdimensionierung unterschiedlicher Produktmodelle der VDI 2221 definieren PONN & LINDEMANN (2011) im Münchener Produktkonkretisierungsmodell vier unterschiedliche Modellebenen, welche ein Produkt definieren:

- Zuerst ein Anforderungsmodell, welches die Anforderungen sowie die gewünschten Produkteigenschaften definiert.
- Des Weiteren ein Funktionsmodell, in welchem die einzelnen Bestandteile nach deren Zweck beschrieben abstrahiert werden. Auch werden in dieser Ebene die Funktionsstrukturen und -zusammenhänge definiert.
- Darüber hinaus die Ebene der Wirkmodelle, welche die Wirkprinzipien und somit die prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten repräsentieren.
- Abschließend wird die Ebene des Baumodells definiert, welche die eigentliche Gestalt und Struktur der Bestandteile festlegt.

Die Ebenen sind nicht als einmalig definierte und fixe Struktur zu betrachten. Stattdessen bedarf das Modell einer flexiblen Anwendung, d. h. zum einen werden nach dem Münchener Produktkonkretisierungsmodell durch eine iterative Vorgehensweise unterschiedliche Lösungskonzepte generiert und spezifisch konkretisiert, zum anderen ist keine eindeutige Arbeitsrichtung zwischen den Ebenen definiert. Dies bedeutet, dass zwischen den unterschiedlichen Ebenen Rückkopplungen von Erkenntnisgewinnen erwünscht sind.

Axiomatic Design

Im Gegensatz zu anderen Entwicklungsmethodiken, welche stark prozessual geprägt sind, unterteilt Axiomatic Design (SUH 1998) den Entwicklungsprozess in vier Gestaltungsfelder:

- Die Kundendomäne stellt die Anforderungen der Kunden dar.

- Die Funktionsdomäne umfasst funktionale Produkthanforderungen und Randbedingungen.
- In der physischen Domäne werden Gestaltungsparameter beschrieben.
- Weiterhin wird in der Prozessdomäne der Bezug zum Herstellungsprozess abgebildet.

Die einzelnen Domänen (charakteristische Vektoren) werden über Matrizen in Zusammenhang gebracht. Darüber hinaus definiert SUH (1998) zum einen das Unabhängigkeitsaxiom, welche eine strikte Trennung der funktionalen Anforderungen festlegt, als auch das Informationsaxiom, welches bei der Auswahl der besten Alternative unterstützt. In diesem Zusammenhang ist die beste Alternative diejenige, welche die höchste Wahrscheinlichkeit zur Erfüllung der Funktionsanforderungen aufweist.

Trotz der nicht-prozessualen Methodik finden sich starke Parallelen zur VDI 2221. So finden sich beispielsweise die gleichen Domänen im Vorgehensmodell wieder. Darüber hinaus erfolgt auch der Systementwurf ähnlich der VDI-Norm in einem iterativen, teilproblemorientierten Vorgehen (BAUMBERGER 2007, S. 75-77)

Münchener Vorgehensmodell

Das Münchener Vorgehensmodell (LINDEMANN 2009) versucht, das grundsätzliche dreiphasige Vorgehen der operativen Ebene in die Phasenmodelle der Produktentwicklungsprozesse einfließen zu lassen. Die drei Phasen werden durch sieben Prozessschritte konkretisiert, welche in Tabelle 1 beschrieben sind. Zentraler Prozessschritt ist das ermitteln von Lösungsideen, d. h. das Generierung unterschiedlicher Lösungskonzepte und Alternativen.

Das Vorgehensmodell bricht das starr sequentielle Vorgehen auf; der Fokus wird auf die Ermittlung von Lösungsideen gesetzt. Auch werden die einzelnen Prozessschritte nicht in starrer Reihenfolge durchgeführt, stattdessen kann das Vorgehensmodell an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

3.1.4 Die frühe Phase im Produktentwicklungsprozess

Wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt ist die frühe Phase aus ökonomischen Gründen und aus Sicht der Produktqualität eine entscheidende Phase im Produktentwicklungsprozess. Aus diesem Grund erfolgt eine genauere Betrachtung dieser.

Prozessschritt	Erläuterung
Ziele planen	Analyse der Situation und Ableitung konkreter Maßnahmen
Ziele analysieren	Klärung und Beschreibung des Zielzustands
Problem strukturieren	Definition der Handlungsschwerpunkte
Lösungsidee ermitteln	Generierung unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten
Eigenschaften ermitteln	Analyse der Eigenschaften der Lösungsideen
Entscheidung herbeiführen	Bewertung der Lösungsideen und Auswahl
Zielerreichung absichern	Risikoabschätzung sowie Maßnahmen zur präventiven Absicherung der Zielerreichung

Tabelle 1: Sieben Prozessschritte des Münchner Vorgehensmodells (LINDEMANN 2009, S 46-54.)

Der Entscheidungsfindungsprozess in der frühen Phase der Produktentwicklung

Da die Entscheidungen der frühen Phase große Auswirkungen auf die Kosten und die Qualität des Endproduktes haben, sind richtige Entscheidungen von essentieller Bedeutung (ERNST 2005). Zur Unterstützung der Entscheidungen hin zu bestimmten Entwicklungsrichtungen werden in der Regel die unterschiedlichen entwickelten Lösungsprinzipien verglichen. Jedoch stellt vor allem die aufgrund des niedrigen technischen Reifegrads lückenhafte Wissensgrundlage ein Problem dar (TATARCZYK 2008).

Der Prozess der Entscheidungsfindung untergliedert sich in folgende diskursive Phasen (AVRAMENKO & KRASLAWSKI 2008, S. 25-48):

1. Definition des Problems zum Erfassen der erwünschten Funktionalitäten und Randbedingungen.
2. Identifikation der Anforderungen zur Definition der Akzeptanz mittels Mindestanforderungen.
3. Definition weiterer Ziele, die bei der Entwicklung erwünscht sind.

4. Generierung von Alternativen, welche durch unterschiedliche Prinzipien die Mindestanforderungen erfüllen.
5. Festlegung von Kriterien.
6. Klassifizierung der unterschiedlichen Lösungsprinzipien auf Basis des Kriterienkatalogs.
7. Validierung der präferierten Lösung, welche final die endgültige Lösung absichert.

Von essentieller Bedeutung ist somit die Verfügbarkeit von voraussichtlichen Eigenschaften der Lösungen, welche durch Entscheidungsfindungsmethoden klassifiziert und bewertet werden (DANKERS 2014). Als Bewertungsgrundlage dienen unterschiedliche Wissensgrundlagen (AVRAMENKO & KRASLAWSKI 2008, S.34-37):

- Deklaratives Wissen, welches Wissen über Sachverhalte, Fakten u. ä. umfasst.
- Prozedurales Wissen, welches die Zusammenhänge und Schrittfolgen umfasst.
- Meta-Wissen beschreibt das Wissen über Wissen, d. h. die Einordnung der Zuverlässigkeit, die Wissensquelle u. ä.

Das Wissen kann durch unterschiedliche Quellen akquiriert werden. Beispiele hierfür sind neben wissenschaftlichen und technischen Berichten auch Bücher, welche oftmals Faktenwissen umfassen, aber auch durch Prototypen oder Simulationen beschafft werden (AVRAMENKO & KRASLAWSKI 2008, S. 37).

Jedoch stellt die Beschaffung die Bewertung von Produkt- und Prozesswissen eine große Herausforderung dar (CHANDRASEGARAN ET AL. 2013).

Computergestützte Werkzeuge in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses

Die Akquisition des Produkt- und Prozesswissens wird durch unterschiedliche digitale Werkzeuge unterstützt. Einen guten Überblick über unterschiedliche Systeme und Methoden bieten WANG ET AL. (2002).

ROBINSON (2008A) nennt grundsätzliche Eigenschaften, welche konzeptionelle Modelle umfassen sollen: Validität, Glaubwürdigkeit, Einfachheit und Nützlichkeit. Ein kritischer Aspekt ist der Zeitaufwand. Weitere Aspekte sind Flexibilität, Ausführungsgeschwindigkeit, Visualisierung, benutzerfreundliche Bedienung und die Wiederverwendbarkeit von Modellen (ROBINSON 2008B). Im Bereich der

Simulationen, im speziell bei echtzeitfähigen Simulationen, nennt BRIDSON & MÜLLER-FISCHER (2007, S. 58) die Anforderungen einer hohen Berechnungseffizienz, Stabilität und Plausibilität.

Die bedeutendsten Werkzeuge in der frühen Phase sind Skizziertools, durch welche auf einfache und schnelle Art und Weise Konzepte generiert und im interdisziplinären Entwicklungsumfeld kommuniziert werden können. Im Regelfall basieren diese auf bekannten CAD Systemen (CHANDRASEGARAN ET AL. 2013). Da die Kriterien Einfachheit und Schnelligkeit aufgrund der Anforderung nach schneller und einfacher Änderungsmöglichkeit in der Bedienung eine große Rolle spielen, wurden auf dieser Basis weitere unterschiedliche Methoden entwickelt, welche beispielsweise auf einem Sketchpad (SUTHERLAND 1963) basieren (STAHOVICH 1998, COOK & AGAH 2009). Darüber hinaus zeigt TIAN ET AL. (2009), dass 2D Skizzen in ein 3D Objekt transformiert werden können. Diese Daten können daraufhin in einem sequentiellen Prozess für erste statische Simulationen genutzt werden. Die konzeptionellen Skizzen können zudem auch durch weitere Aufbereitung als Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte sowie den Feinentwurf genutzt werden (GHARIB & QIN 2013).

Jedoch ist auffällig, dass die frühe Phase kaum durch Simulationen unterstützt wird (WANG ET AL. 2002). „Es wird sich damit in einer für die Systementwicklung entscheidenden Phase auf ein Konzept festgelegt, das keinem Optimierungsprozess unterzogen wurde.“ (LANGERMANN 2008, S. 31).

3.2 Computational Fluid Dynamics

Die Simulationsmethode für fluiddynamische Problemstellungen, welche nur in Ausnahmen analytische Lösungen hat (ROGERS 1992, S. 23), ist die CFD-Simulation. Jedoch stellen auch iterative Lösungsverfahren noch immer eine große Herausforderung dar, da eine eindeutige Lösbarkeit von Problemstellungen nicht bewiesen ist (FEFFERMAN 2006). Aus diesem Grund wird in allen Fällen Erfahrungswissen zur Interpretation der Simulationsergebnisse benötigt (HÖLLING & HERWIG 2004). Außerdem existieren zahlreiche Lösungsmethoden, welche unterschiedliche Vor- und Nachteile besitzen. Jedoch ist keine Simulationsmethode für alle Problemstellungen geeignet.

3.2.1 Netzbasierte Berechnungsmethoden

Die netzbasierten Methoden werden historisch bedingt heute meist in kommerziellen Anwendungen eingesetzt. Unabhängig von der Methode, ist die Netzqualität der Diskretisierung der Simulationsdomäne von essentieller Bedeutung (BERZINS 1999). Die Vernetzung stellt jedoch heute noch einen großen manuellen und risikobehafteten Prozess dar (BERZINS 1999, BREWER ET AL. 2003, JOHNSON ET AL. 2005).

Eulersche Methoden

Eine Methodengruppe der netzbasierten Diskretisierung sind eulersche Methoden, in denen die Diskretisierungselemente stationär im Raum stehen.

Diese Euler-Verfahren basieren meist auf der

- Finite Elemente Methode,
- Finite Differenzen Methode (FDM) oder der
- Finite Volumen Methode (FVM).

Da in der Literatur bereits detaillierte Erklärungen der Ansätze (CHUNG 2002, LAURIEN & OERTEL 2011, LECHER 2014) zu finden sind, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht auf die mathematischen Zusammenhänge der Grundgleichungen eingegangen.

Am weitesten verbreitet ist in der Simulation von Ein- und Mehrphasenströmungen die FVM (HÖFLER 2013, S. 14), welche sich durch eine hohe Flexibilität der räumlichen Formulierung auszeichnet (LAURIEN & OERTEL 2011, S. 13). Jedoch stellt in netzbasierten Berechnungsmethoden die Diskretisierung von Phasengrenzflächen ein Problem dar. Durch unterschiedliche Methoden, bspw. das Volume of Fluid Verfahren (HIRT & NICHOLS 1981), welches jedoch anfällig für numerische Instabilität bei hohen Dichteunterschieden ist (JOSSELAND & ZALESKI 2003), oder das Level Set Verfahren (OSHER 1988, OSHER & FEDKIW 2001, SETHIAN & SMERAKA 2003), wird dieser Herausforderung nicht gerecht. Des Weiteren kann die Präzision der Rekonstruktion der Phasengrenzen, aber auch von interessanten Bereichen in der Fluidomäne, durch die Verfeinerung der räumlichen Diskretisierung erfolgen (CHUNG 2002, S. 607-643). Da dies während der Durchführung der Simulationsberechnungen erfolgen muss, können Methoden zur Anpassung der Netzstruktur (PLEWA ET AL. 2005) eingesetzt werden. Darüber hinaus werden zur weiteren Steigerung der Realitätsnachbildung unterschiedliche Modelle zur Simulation der Oberflächenspannung genutzt

(BRACKBILL ET AL. 1992), welche jedoch zum Bedarf weiterer Rekonstruktionstechniken führen (RUDMAN 1997, LAPPA 2005). Eine weitere Möglichkeit zur Simulation von Oberflächen sind die Fast Marching Algorithmen (SETHIAN 1996), welche durch die Ghost Cells erweitert (FEDKIW ET AL. 1999) wurden. Jedoch stellen vor allem turbulente Prozesse netzbasierte Methoden noch vor große Probleme, da sich diese oft in Frequenzbereichen außerhalb der räumlichen und temporalen Diskretisierung befinden. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Modelle zur Nachbildung des Turbulenzverhaltens entwickelt. Für hohe Reynolds-Zahlen Re eignet sich die direkte numerische Simulation, bei welcher die räumliche und zeitliche Diskretisierung so klein gewählt wird, dass die Turbulenzen in der Berechnung direkt aufgelöst werden (TRYGGVASON ET AL. 2011). Aufgrund der hohen Auflösung benötigt das Verfahren jedoch sehr viel Rechenleistung (PLETCHER ET AL. 2013) und ist daher für ingenieurwissenschaftliche Entwicklungsprozesse nicht geeignet. Eine weitere Methode ist die Detached Eddy Simulation (DES) (BERNARD & WALLACE 2002), bei welcher die Navier-Stokes-Gleichung örtlich und zeitlich Tiefpass gefiltert werden. Die Wirbelstrukturen können dadurch direkt berechnet und in einem Feinstrukturmodell abgebildet werden (AKULA ET AL. 2015). Statt einer Abbildung in einem Feinstrukturmodell verfolgt der Ansatz der Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) (PLETCHER ET AL. 2013) die Nachbildung der Turbulenzen durch Hinzunahme der Schwankungswerte. Dadurch kann das Turbulenzverhalten zeitgemittelt approximiert werden. RANS wird im ingenieurwissenschaftlichen Entwicklungsprozess aufgrund der vereinfachten Modellierung und der somit geringeren Berechnungszeit häufig eingesetzt (MENTER 2015). Durch die RANS-DES Modelle, bei denen situationsbedingt zwischen den Turbulenzmodellen umgeschaltet wird, kann der Detailgrad ohne den vollen Nachteil des hohen Berechnungsbedarfs gesteigert werden (GOPALAN ET AL. 2013, MENTER 2015).

Ein Problem der netzbasierten Methoden ist jedoch, dass bei sich bewegenden Geometrien oder freien Oberflächen eine rechenaufwändige Neugenerierung der Netzstruktur erfolgen muss (BARBA 2010). Darüber hinaus stellt trotz einer allgemeinen Reduktion der Berechnungsdauer (SENOCAK ET AL. 2009) durch die Nutzung der GPU die Neugenerierung sowie die Struktur der Systemmatrizen ein Problem dar, da die immer bedeutender werdende GPU nicht voll ausgenutzt werden kann (DUFFY ET AL. 2012, ITU ET AL. 2012). Da bisherige Verfahren mit steigender Skalierung nur schwach skalieren (KASHIYAMA ET AL. 2000, NAUMOV 2011), findet beim Lösen der Differenzialgleichungen das Mehrgitterverfahren eine immer höhere Beachtung (GÖDDEKE 2010). Jedoch fanden BRANDVIK &

PULLAN (2009) bei einer Untersuchung heutiger Lösungsalgorithmen heraus, dass diese weiter für die Nutzung der GPU verbessert und somit parallele Berechnungsverfahren gefunden werden müssen.

Eulersche-Lagranges Methoden

Ein anderer Ansatz zur Verbesserung von netzbasierten Verfahren sind hybride Euler-Lagrange Verfahren, beispielsweise das Particle in Cell (PIC) (ANDREWS & O'ROURKE 1996, ENRIGHT ET AL. 2002A), das Marker And Cell (CHENG & ARMPFIELD 1995, URAYENEZA 2000) Verfahren, das Lattice-Boltzmann-Verfahren (MOHAMAD 2011) und das Semi-Lagrangesche Verfahren (FOSTER & METAXAS 1997).

Die beiden erstgenannten Verfahren beruhen darauf, dass ein Teil der Navier-Stokes-Gleichung in einem eulerschen, ein anderer Teil in einem lagrangeschen Bezugssystem berechnet wird. Durch Interpolation werden die Werte darauf folgend in das jeweilig konträre Bezugssystem gebracht. Das Ziel ist die Nutzung der spezifischen Vorteile und somit die Kompensation der Nachteile des jeweiligen Bezugssystems.

Zur schnelleren Berechnung fluidischer Problemstellungen eignet sich beispielsweise das Lattice-Boltzmann-Verfahren (MOHAMAD 2011), welches auf einer stark vereinfachten Teilchen-Mikrodynamik basiert. In dieser Methode können sich die Teilchen im Gegensatz zu netzfreien Berechnungsmethoden nicht frei im Raum sondern nur auf der Netzstruktur bewegen. Da sich die Phasengrenzen auf Basis von Partikeln diskretisieren lassen, sind Mehrphasenströmungen einfacher als in bekannten netzbasierte Methoden zu modellieren (CHEN & DOOLEN 1998, GUZIK ET AL. 2014). Jedoch stellen in Simulationen sowohl die Energieerhaltung als auch die numerische Stabilität Herausforderungen dar (HE & LUO 1997, CONTRINO ET AL. 2014).

Eine weitere Simulationsmethode basiert auf einem Semi-Lagrangeschen Verfahren (FOSTER & METAXAS 1997), welches als Grundstruktur ein reguläres, strukturiertes Netz zugrunde legt und ähnlich dem PIC Verfahren ist. STAM (1999) verbesserte das Verfahren durch den Einsatz eines impliziten Lösungsverfahrens. Die Simulationsmethode wird dadurch zu einem stabilen echtzeitfähigen Verfahren. Es dient als Grundlage der netzbasierten Animationstechnik und wird in unterschiedliche Dimensionen verbessert und an die Computerhardware angepasst. Im Betrachtungsfokus der Animation sind vor allem Mehrphasenströmungen. So können beispielsweise Level Set Ansätze (ENRIGHT ET AL. 2002B) oder

Verfahren zur Berechnung der Oberflächenspannung (HONG & KIM 2003) adaptiert werden. Darüber zeigt ZHU & BRIDSON (2005) eine Methode zur detaillierten Oberflächenrekonstruktion anhand lagrangescher Partikel, durch welche komplexe Vorgänge simuliert werden können. Darüber hinaus konnten auch Ansätze zum Umgang mit sich bewegenden Objekten in der Fluiddomäne gefunden werden (CARLSON ET AL. 2004, KLINGNER ET AL. 2006). Das turbulente Verhalten von Fluiden kann durch mehrere Verfahren präziser modelliert werden. So kann die hohe Dissipation der Semi-Lagrangeschen Methode durch die Nutzung von Advektionsschemata höherer Ordnung (KIM ET AL. 2005, KIM ET AL. 2008, MOLEMAKER ET AL. 2008, SELLE ET AL. 2008) oder durch Sub-Grid Methoden (LOSASSO ET AL. 2004, KLINGNER ET AL. 2006, BATTY ET AL. 2010, CHENTANEZ & MÜLLER 2011, CHENTANEZ ET AL. 2014) reduziert werden.

3.2.2 Netzfrie Berechnungsmethoden

Im Gegensatz zu eulerschen Berechnungsmethoden benötigen rein lagrange Methoden keine Vernetzung der Fluiddomäne. Netzfrie Methoden sind daher nicht eingeschränkt in Bezug auf die räumlichen Ausdehnungen (KEISER 2006, LIU & LIU 2010). Stattdessen ist die räumliche Diskretisierung rein lagrange, wodurch durch die starke Abhängigkeit guter Vernetzungsqualität umgegangen werden kann (LIN & ATLURI 2000). In der Vergangenheit wurden zahlreiche Methoden entwickelt, beispielsweise die Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Methode (GINGOLD & MONAGHAN 1977, LUCY 1977), Element Free Galerkin Methode (BELYTSCHOKO ET AL. 1996), Reproducing Kernel Particle Methode (RKPM) (LIU ET AL. 1997), Finite Point Methode (FPM) (OÑATE ET AL. 1996), Meshless Local Petrov-Galerkin Methode (MLPG) (ATLUR & ZHU 1998) sowie die Position Based Fluids Methode (MACKLIN & MÜLLER 2013).

Im Folgenden werden die wichtigsten netzfrieen Methoden im Bereich der Simulation von Fluiden näher vorgestellt:

Eine der bekanntesten und validesten (SOLENTHALER 2010, VOROBYEV 2012) Verfahren ist die Smoothed Particle Hydrodynamics Methode. Die Methode wurde 1977 zur Lösung von astrophysikalischen Problemen (GINGOLD & MONAGHAN 1977, LUCY 1977) entworfen und beruht auf Kernschätzungen (SCHILLING 2007, S. 10). SPH ist eine statistische Methode (LUCY 1977), deren Fehler jedoch geringer sind als bei Monte-Carlo Verfahren (MONAGHAN 1982). Das Grundverfahren wurde zur Simulation von Flüssigkeiten sowie freier Oberflächen zur „Weakly Compressible SPH“ (WCSPH) weiterentwickelt

(MONAGHAN 1994). Heutige Algorithmen basieren auf dieser Basis (VOROBYEV 2012, S.11). Die rein-lagrangesche Formulierung bietet gegenüber netzbasierten Berechnungsmethoden den Vorteil, dass freie Oberflächen einfach modelliert und simuliert werden können (MONAGHAN ET AL. 1999). So kann mit der SPH-Methode eine detailgenaue Mehrphasenströmungen von Fluiden (COLLAGROSSI & LANDRINI 2003, SOLENTHALER 2010), bspw. das exakte Verhalten von Blasen (TAN & YAN 2009), simuliert werden. Darüber hinaus ist ähnlich netzbasierter Verfahren eine adaptive Anpassung der räumlichen Diskretisierung und somit der lokalen Präzision möglich (ADAMS ET AL. 2007). Zur weiteren Steigerung der Präzision von Mehrphasenströmungen kann die Oberflächenspannung präzise simuliert werden (MORRIS ET AL 1997, ADAMI ET AL. 2010). Des Weiteren steht die weitere Verfeinerung bei turbulenten Strömungen im Fokus. So konnte das aus den netzbasierten Berechnungsmethoden bekannte $k - \varepsilon$ Turbulenzmodell in die SPH-Methode integriert werden (VIOLEAU & ISSA 2007), wodurch bspw. die Simulationsgüte von Randproblemen gesteigert werden kann. Ein weiterer Fokus in der Entwicklung der SPH-Methode liegt auf der Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit. Aufgrund der Unabhängigkeit der einzelnen Partikel sind lagrangesche Methoden stark parallelisierbar (HÉRAULT ET AL. 2010). Eine weitere Möglichkeit bietet die Predictive-Corrective Incompressible SPH Methode (SOLENTHALER & PAJAROLA 2009), wodurch durch einen zusätzlichen Prädiktions-schritt die maximale Zeitschrittweite ohne Verletzung der CFL-Zahl vergrößert wird (SOLENTHALER & PAJAROLA 2009). Somit ist eine schnellere Durchführung ganzer Simulationsdurchläufe möglich.

Darüber hinaus entwickelte sich aus der SPH-Methode die RKPM (LIU ET AL. 1997), welche auf der schwachen Formulierung partieller Differentialgleichungen basiert. RKPM verfolgt in seiner Basis den gleichen Ansatz wie SPH, jedoch steigern Korrekturfunktionen, welche an den Rändern der Fluiddomäne eingesetzt werden, die Ergebnispräzision (LIU ET AL. 1995). Eine Weiterentwicklung der SPH-Methode bietet die Position Based Fluids Methode (MACKLIN & MÜLLER 2013), welche ihren Ursprung in der Position Based Dynamics Methode hat (MÜLLER ET AL. 2007). Der hauptsächliche Vorteil der Methode ist, dass durch die Einführung von Begrenzungsfunktionen die Zeitschrittweite vergrößert werden kann. Jedoch wird durch die Methode eine zusätzliche Dämpfung eingeführt. Diese kann aber beispielsweise durch Vortex-Partikel (SELLE ET AL. 2005) reduziert werden.

Exkurs: Die SPH-Methode

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Arbeit wird die SPH-Methode, welche von HÖFLER (2013) ausführlich und positiv evaluiert wurde, genauer beschrieben. Dies umfasst sowohl die Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge, der Algorithmik als auch die Darstellung von Implementierungsspezifika. Es ist jedoch zu betonen, dass sich die Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen nicht auf die SPH-Methode beschränkt. Der Exkurs dient somit nur dem besseren Verständnis sowohl der Methode als auch des späteren Anwendungsbeispiels.

Die SPH-Methode ist eine netzfreie, partikelbasierte, numerische Methode (GINGOLD & MONAGHAN 1977, LUCY 1977). Nach LIU & LIU (2010) basiert die Methode auf den zwei Grundprinzipien der Kernelapproximation und der Partikelapproximation.

Als Grundfunktion dient (LIU & LIU 2010)

$$f(\vec{x}) = \int_{\Omega} f(\vec{x}') \delta(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x}, \quad (3.1)$$

wobei $f(\vec{x})$ eine Funktion des Positionsvektor x und Ω die gesamte Simulationsdomäne ist. Darüber hinaus ist das Diracsche Deltadistribution $\delta(\vec{x} - \vec{x}')$ definiert als

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}') = \begin{cases} 1, & \vec{x} = \vec{x}' \\ 0, & \vec{x} \neq \vec{x}' \end{cases}. \quad (3.2)$$

In einem ersten Schritt wird die Diracsche Deltadistribution durch die Glättungsfunktion $W(\vec{x} - \vec{x}', h)$ ersetzt, woraus folgende Annäherung resultiert (LIU & LIU 2010):

$$f(\vec{x}) = \int_{\Omega} f(\vec{x}') \delta(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x} \approx \int_{\Omega} f(\vec{x}') W(\vec{x} - \vec{x}', h) d\vec{x} \quad (3.3)$$

In diesem Zusammenhang ist h die Glättungslänge (vgl. Abbildung 12).

Zur Sicherstellung der Exaktheit gilt die Normalisierungsbedingung

$$\int_{\Omega} W(\vec{x} - \vec{x}', h) d\vec{x} = 1 \quad (3.4)$$

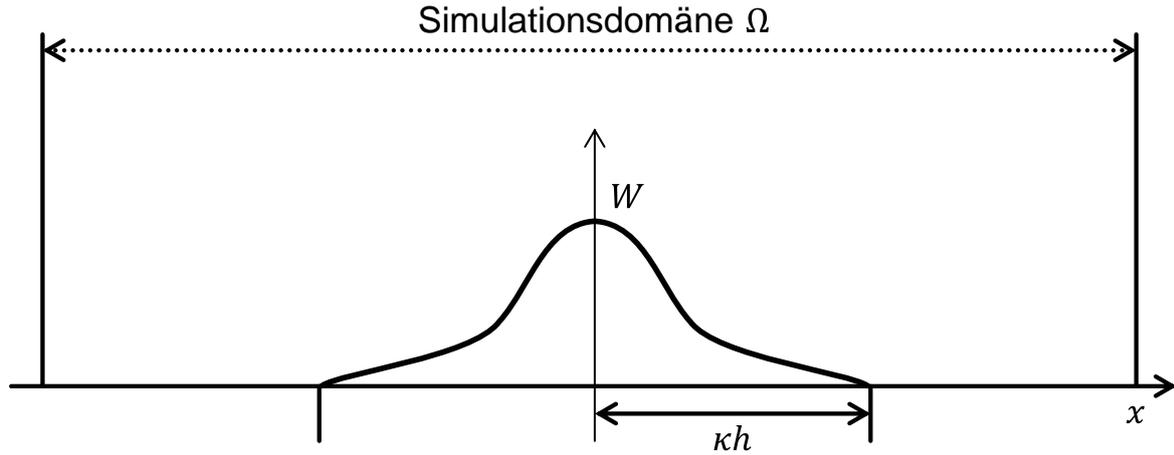


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Glättungsfunktion in der Simulationsdomäne in Anlehnung LIU & LIU (2010)

bzw. die Eigenschaft der Diracsche Deltadistribution

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{x} - \vec{x}', h) = \delta(\vec{x} - \vec{x}'). \quad (3.5)$$

Darüber hinaus gilt

$$W(\vec{x} - \vec{x}', h) = 0, \text{ wenn } |\vec{x} - \vec{x}'| > \kappa h, \quad (3.6)$$

wobei κ eine Konstante in Zusammenhang mit der Glättungsfunktion ist, welche die Glättungslänge skaliert, und somit durch κh eine effektive Wirkungszone auf einzelne Partikel definiert wird. Die Berechnungsgenauigkeit ist nach der Taylor-Reihenentwicklung von zweiter Ordnung, bzw. h^2 (LIU & LIU 2010).

Diese Grundlage kann in eine diskrete Approximation über eine Anzahl von Berechnungsstützen (Partikeln) umgewandelt werden. Folgt man dem lagrange-schen Ansatz, so repräsentiert jedes Partikel ein kleines Volumen des Mediums sowie dessen Eigenschaften in seinem Mittelpunkt. Somit ergibt sich zur Berechnung des Funktionswertes des i -ten Partikels

$$f_i(\vec{x}) = \sum_j f_j \frac{m_j}{\rho_j} W(\vec{x}_i - \vec{x}_j', h), \quad (3.7)$$

wobei m_j die Masse und ρ_j die Dichte des durch den j -ten Partikels repräsentierten Volumens sind.

Darüber hinaus ist nach MONAGHAN (1992) die Gradientenfunktion am i -ten Partikel der Glättungsfunktion:

$$\nabla f_i(\vec{x}) = \sum_j f_j \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W(\vec{x}_i - \vec{x}_j', h) \quad (3.8)$$

Abbildung 13 visualisiert die Zusammenhänge der Berechnung. Durch die Limitierung der Glättungsfunktion auf den maximalen Betrachtungsradius κh wird die für den i -ten Partikel relevante Simulationsdomäne Ω_i reduziert. Zur Berechnung der Funktionswerte dienen die Masse m_j und die Dichte ρ_j eines jeden Partikel j in der relevanten Simulationsdomäne Ω_i . Darüber hinaus werden diese durch die Glättungsfunktion W je nach Abstand r_{ij} gewichtet.

Die inkompressible Navier-Stokes Gleichung ist in seiner lagrangeschen Form (VOROBYEV 2012)

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + V_T + \vec{f}, \quad (3.9)$$

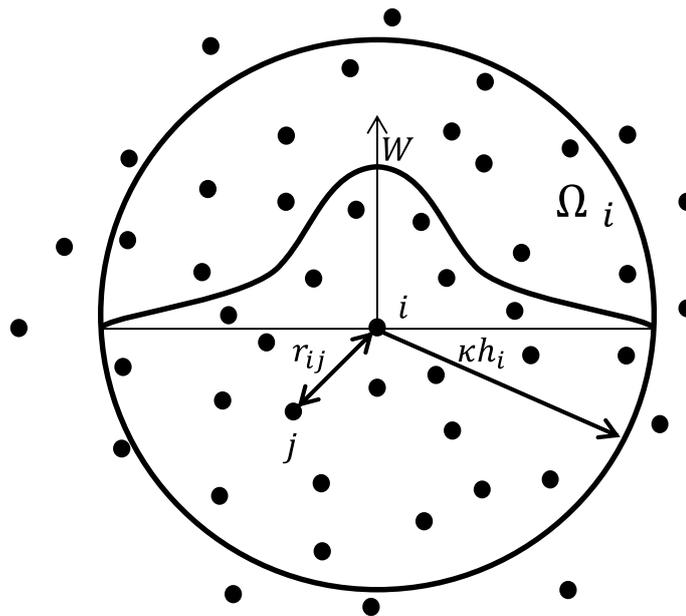


Abbildung 13: Partikelapproximation der SPH-Methode in einem 2D Fall in Anlehnung an LIU & LIU (2010)

wobei \vec{v} die Fließgeschwindigkeit, ρ die Dichte, p der Druck, V_T der Viskositätsterm und \vec{f} die volumetrische Kraft ist.

Somit ergibt sich folgende Formulierung zur Berechnung des Drucks (VOROBYEV 2012)

$$\nabla p_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} p_j \nabla_i W(\vec{r}_{ij}, h) = \rho_j \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) (\nabla_i W(\vec{r}_{ij}, h)), \quad (3.10)$$

wobei gilt:

$$\rho_i = \sum_j m_j W(\vec{r}_{ij}, h) \quad (3.11)$$

Darüber hinaus ist der Viskositätsterm für das Partikel i

$$V_{Ti} = \sum_j m_j \nabla_i \nabla W(\vec{r}_{ij}, h) * \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}}; \vec{v}_{ij} * \vec{r}_{ij} < 0 \\ 0; \vec{v}_{ij} * \vec{r}_{ij} > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\mu_{ij} = \frac{h \vec{v}_{ij} * \vec{r}_{ij}}{\vec{r}_{ij}^2 + 0.01 h^2} \quad (3.13)$$

wobei \bar{c}_{ij} der Mittelwert der Schallgeschwindigkeit, $\bar{\rho}_{ij}$ der Mittelwert der Dichten und α sowie β Konstanten sind (VOROBYEV 2012).

Wie zu sehen ist, werden die unterschiedlichen Terme stets partikelpezifisch berechnet. Gleiches gilt auch für den Umgang mit Starrkörpern, welche eine Randbedingung darstellen. Diese werden nach partikelspezifischer Detektion und Beeinflussung wie folgt berechnet (MONAGHAN 1994):

$$f(r_{bj}) = \frac{D}{r_{bj}} \left(\left(\frac{r_0}{r_{bj}} \right)^{p_1} - \left(\frac{r_{b0}}{r_{bj}} \right)^{p_2} \right) \quad (3.14)$$

In diesem Zusammenhang stellt r_{bj} den Abstand zwischen der Wand und dem Partikel dar und p_1 sowie p_2 sind parametrisierbare Koeffizienten. Darüber hinaus ist die Konstante D auf die Höhe der quadratischen maximalen Geschwindigkeit v_{max}^2 festzulegen (LIU & LIU 2010).

Auch können weitere Randbedingungen wie die Oberflächenspannung über den Term der Volumenkraft in den Lösungsalgorithmus integriert werden (MORRIS ET AL 1997).

Die erläuterten Zusammenhänge stellen den Basisalgorithmus zur Berechnung fluidischen Verhaltens mittels der SPH-Methode dar. Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, gibt es zahlreiche weitere Verbesserungen und Erweiterungen, welche jedoch nicht für das Verständnis der Online-Simulation von Fluiden

notwendig sind. Aus diesem Grund sei an den Stand der Wissenschaft und Technik verwiesen (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Aus den dargestellten mathematischen Zusammenhängen ergibt sich für die Berechnung eines Zeitschrittes der in Abbildung 14 als „Pseudocode“ dargestellte Grundalgorithmus (SOLENTHALER & PAJAROLA 2009). Da die Berechnung der Werte eines Partikels aufgrund der Gewichtungsfunktion stark vom geometrischen Umfeld abhängig ist, werden in einem ersten Schritt die Partikel sortiert. Auf dieser Grundlage erfolgt die Berechnung der Dichte sowie des Drucks jedes Partikels. Diese dienen daraufhin als Eingangsdaten zur Berechnung der Kräfte. In diesem Schritt erfolgt gleichzeitig die Integration von externen Kräften F_{ext} . Nachdem die Berechnung der Kräftegleichgewichte an jedem Diskretisierungspunkt, d. h. an jedem Partikel, erfolgt ist, wird abschließend die neue Geschwindigkeit des Partikels sowie die Modifikation der Partikelposition berechnet. Diese dienen im nächsten Zeitschritt als Grundlage der nächsten temporären Integration.

```

for all i do
  Sortiere alle Partikel  $N_i(t)$ 
  for all i do
    Berechne Dichte  $\rho_i(t)$ 
    Berechne Druck  $p_i(t)$ 
  for all i do
    Berechne Kräfte  $F_i^{p,v,F_{ext}}(t)$ 
  for all i do
    Berechne neue Geschwindigkeit  $v_i(t + 1)$ 
    Berechne neue Position  $x_i(t + 1)$ 

```

Abbildung 14: Pseudocode des Grundalgorithmus der SPH-Methode nach SOLENTHALER & PAJAROLA (2009)

3.2.3 Prozessuale Durchführung von CFD-Simulationen im Entwicklungsprozess

Die prozessuale Durchführung von CFD-Simulationen ist ähnlich anderer Simulationen geprägt von einem stark iterativen und sequentiellen Prozess (VDI 3633, BLATT 3, SIEDL 2008). Abbildung 15 veranschaulicht diesen Synthese-Analyse-Zyklus. Ein Simulationszyklus i_{sim} beginnt bei einer grundsätzlichen Erstellung eines Modells. Im Bereich der Simulation von Flüssigkeiten werden im ingenieurwissenschaftlichen Bereich meist CAD Modelle genutzt. Nach vollendeter

Konstruktion erfolgt die Synthese eines Simulationsmodells im Rahmen einer Simulationsvorbereitung. Dieser Prozessschritt kann in heutigen CFD-Simulationen bis zu 80 % des Arbeitsaufwandes in der Vorbereitung der Simulationsmodelle benötigen (VERSTEEG & MALALASEKRA 2007, S. 3). Anschließend dient das Simulationsmodell als Grundlage zur Durchführung der eigentlichen Simulation und resultiert in einem Simulationsergebnis, welches abschließend graphisch und numerisch aufbereitet wird. Der abschließende Schritt im Simulationszyklus ist die Analyse der Ergebnisse und die Aggregation von Wissen. Das gewonnene Wissen und die Erkenntnisse werden für eine Weiterentwicklung und Anpassung des CAD Modells genutzt. Anschließend erfolgt der nächste Simulationszyklus $i_{sim} + 1$ (ENGEL 1994, HEDTSTÜCK, 2013, HEFNER ET AL. 2014, LECHER 2014).

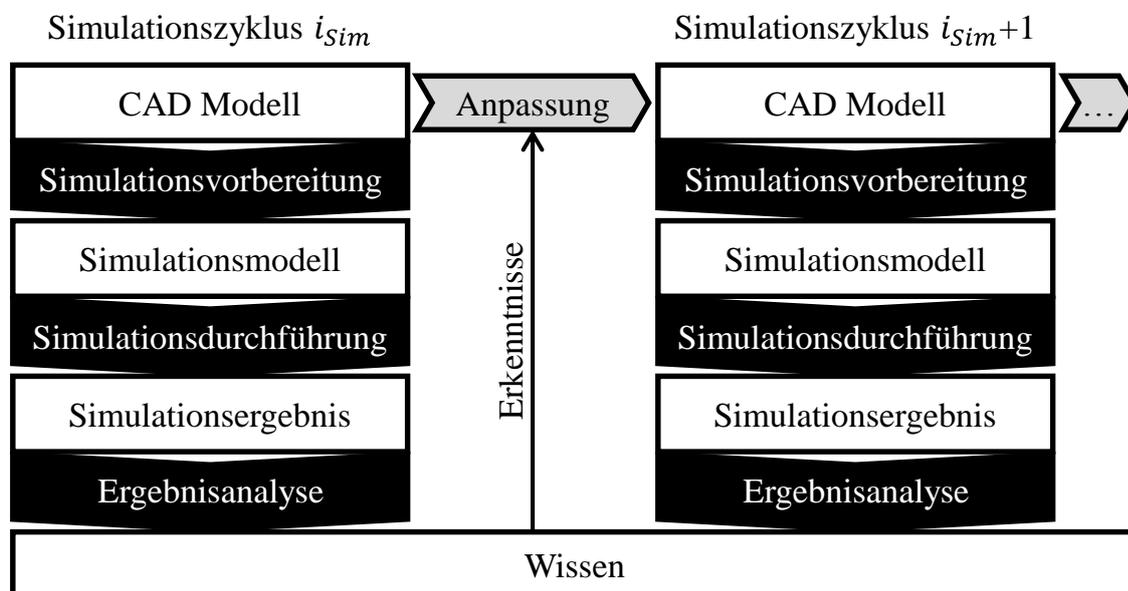


Abbildung 15: Heutiger sequentieller Analyse-Synthese Zyklus

Die drei Prozessschritte umfassen sowohl in den netzbasierten als auch in den netzfreien Berechnungsmethoden ähnliche Zielstellungen.

So erfolgt die Analyse der Ergebnisse in beiden Simulationsmethoden sowohl auf der Basis von graphischen Darstellungen als auch durch numerische Faktenauswertungen wie Mittelwerte u. ä. (VDI 3633, BLATT 3, LECHER 2014, S. 109, NIEBLING 2014). Daher ist für die Auswertung der Simulationsergebnisse und dem Erkenntnisgewinn die Simulationsmethode nicht relevant.

Auch folgt die Durchführung der eigentlichen Simulation ähnlicher Prozessschritte. Durch die iterative Propagation der Zeit durch diskrete Zeitschritte wird

sowohl in den netzfreien als auch in den netzbasierten Methoden das dynamische Verhalten von Fluiden nachgebildet. Dabei werden zu jedem Zeitschritt in allen CFD-Simulationen, welche auf der Navier-Stokes-Gleichung basieren, die physikalischen Variablen wie Dichte und Geschwindigkeit berechnet. Ansonsten unterscheiden sich innerhalb eines Zeitschrittes nur die Berechnungsalgorithmen, welche durch die Berechnungsmethode und Modelldiskretisierung bedingt werden (LECHELER 2014, S. 102-111).

Der größte Unterschied zwischen netzfreien und netzbasierten Methoden liegt im Prozessschritt der Simulationsvorbereitung (vgl. Abbildung 16).

In beiden Fällen dient ein CAD Modell als Grundlage. In netzbasierten Methoden werden zu Beginn die Randbedingungen an Festkörpern u. ä. definiert. Daraufhin erfolgt die Vernetzung der gesamten Fluiddomäne. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei in der Definition der Netzgranularität sowie der Definition von lokalen Netzverfeinerungen. Darüber hinaus werden bereits zu diesem Zeitpunkt mögliche Dynamiken der Geometrien, d. h. bspw. Modifikationen oder Verschiebungen der Starrkörper, festgelegt. Auf dieser Basis wird anschließend ein Netz erzeugt, welches abschließend mit weiteren Berechnungsparametern wie

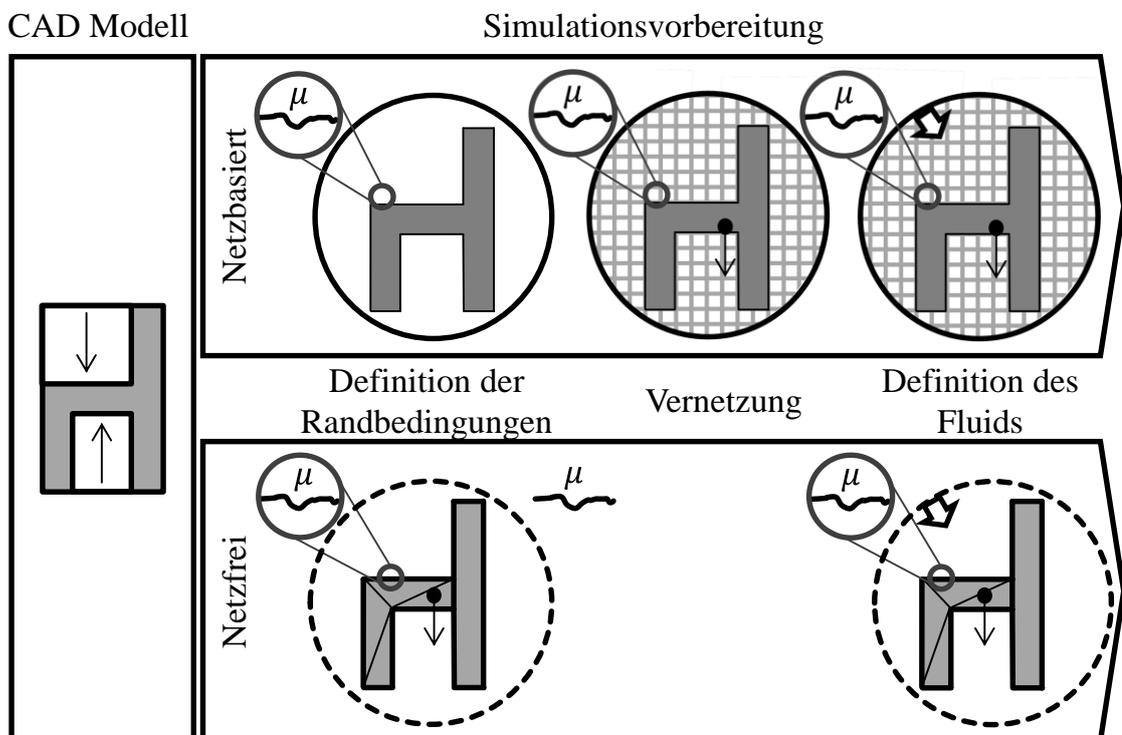


Abbildung 16: Vergleich der netzfreien und netzbasierten Prozessschritte in der Simulationsvorbereitung

Materialeigenschaften und der Definition weiterer Randbedingungen, welche z. B. Quellen und Senken aber auch externe Kräfte und kinematische Bewegungsabläufe sein können, angereichert wird (XIA & SUN 2002, LECHLER 2014, S. 104-108).

Folglich liegt in den netzbasierten Methoden ein besonderer Fokus auf der Vernetzung, da die Qualität und Granularität hohen und entscheidenden Einfluss sowohl auf die Berechnungszeit der Simulation als auch auf die Simulationsgüte und Ergebnisqualität haben (KORTELAJNEN 2009).

Im Gegensatz dazu ist in den netzfreien Methoden keine Vernetzung der gesamten Simulationsdomäne notwendig. Daher wird das Simulationsmodell in den netzfreien Methoden auf unterschiedliche Art und Weise generiert. Ähnlich der netzbasierten Simulationsvorbereitung erfolgt zuerst eine Definition der Randbedingungen. Diese werden jedoch nicht vernetzt und weiter verarbeitet. Auch werden diese nicht weiter abstrahiert, sondern werden in der Simulationsdurchführung direkt verarbeitet. Abschließend erfolgt die Definition des Fluids sowie der Einströmungsbereiche. Das Fluid ist in Form von Partikeln diskretisiert (LIU 2010).

3.3 Modellvariation in der Simulation

Heutige CFD-Simulationen sind gekennzeichnet durch die strikte Trennung der Phasen Simulationsvorbereitung, -durchführung und Ergebnisdarstellung. Dies resultiert u. a. durch die strikte Trennung der CAD und Simulationsprogramme. So ist die Übergabe der Geometrien noch meist ein manueller Prozess, wodurch viele Möglichkeiten der Parametrik und direkten Modellveränderung verloren gehen (BECHTHOLD 2006). Eine Modifikation des Simulationsmodells ist in CFD-Simulationen heute nicht möglich. Daher werden auch Ideen des Concurrent Engineering (YASSINE & BRAHA 2003), d. h. die Parallelisierung unterschiedlicher Aufgaben, innerhalb eines Simulationszyklus nicht aufgegriffen, da die Simulationsmodelle invariant sind. Ein Grund hierfür ist die starke Trennung zwischen Nutzer und Computer, bei welcher die Modellbildung primär die Aufgabe des Nutzers ist, der Simulationslauf die des Computers (HELMS & STROTHOTTE ET AL. 1993, S. 51). Somit ist eine Parallelisierung schwer möglich.

Einen Ansatz, die Anpassungsfähigkeit im frühen Entwicklungsprozess zu steigern, liefern TIAN ET AL. (2009). So werden basierend auf initialen Skizzen 3D Modelle durch eine Erkennung der Linien und der Rekonstruktion der Kanten

sowie einer anschließenden Identifikation der Oberflächen generiert. Das resultierende Modell kann anschließend durch Simulationen analysiert werden. Dem folgend fließen die gewonnenen Erkenntnisse wieder in die Skizze ein. TIAN ET AL. (2009) liefern somit die Grundidee, die Entwicklung von Konzepten direkt, jedoch sequentiell mit simulativen Methoden zu koppeln.

Eine Möglichkeit zu einer schnellen Modellbildung in einem solchen Prozess beschreibt LACOUR (2011) aufbauend auf SPITZWEG (2009) im Rahmen der Methode zur Erstellung von Simulationsmodellen in physikbasierten Simulationen. Diese gliedert sich in vier Phasen. Die Erste ist die Vorverarbeitung, welche CAD Daten zu einem aufbereiteten triangulierten Modell tesseliert, gefolgt von dem Prozessschritt der Ableitung dieses Modells. Im Prozessschritt der Ableitung wird manuell jede individuelle Geometrie auf ihren Partizipationscharakter in der Simulation spezifiziert und anschließend durch eine konvexe Zerlegung für die Simulation vorbereitet. Nach einer anschließenden Anreicherung mit physikalischen Daten erfolgt abschließend eine Kinematisierung der Objekte. Diese dargestellte Art der Modellierung ist jedoch Starrkörper eingeschränkt und bedarf einer Offline-Simulation.

Eine Art der Online-Simulation, d. h. eine direkte Kopplung durch externe Modifikation von Parametern und Variablen liefern multidisziplinäre Simulationen, in welchen unterschiedliche Simulationen miteinander gekoppelt sind. Abbildung 17 stellt die beiden prinzipiellen Methoden zur Kopplung von Simulationen dar. Die lose Simulationskopplung ist das Pendant zu heutigen Simulationszyklen, d. h. die Simulation A ist unabhängig von Simulation B. Dagegen fließen die Simulationsergebnisse der Simulation A als Anfangswerte in die Simulation B ein. Somit ist die lose Simulationskopplung rein sequentiell und unidirektional (LANGERMANN 2008).

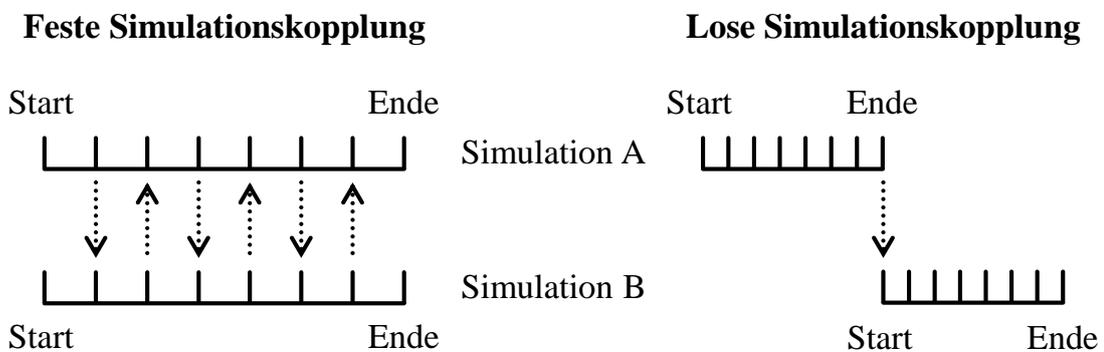


Abbildung 17: Unterschiedliche Kopplungsarten in multidisziplinären Simulationen (LANGERMANN 2008, S. 14-17)

Im Gegensatz dazu erfolgt in der festen Simulationskopplung der Informationsaustausch bidirektional auf der Basis von Zwischenresultaten der Simulationen. Die Simulationen werden somit zeitgleich durchgeführt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Dynamik der jeweiligen Prozesse Auswirkungen auf die jeweiligen Simulationen haben (LANGERMANN 2008).

3.4 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfes

Das Kapitel stellt den Stand der Wissenschaft und Technik in den Bereichen dar, welche für eine Online-Simulation von fluidischen Effekten in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses relevant sind.

Zunächst werden die unterschiedlichen Methoden für die Entwicklung von mechatronischen Systemen vorgestellt. Ein Fokus liegt auf der Diskussion der unterschiedlichen Abstraktionsebenen, beginnend im Mikrozyklus auf der Ebene elementarer Denk- und Handlungsabläufe, welche das grundsätzliche Verständnis der menschlichen Prozessabläufe des kreativen Problemlösens aufzeigen. Hierbei kann festgestellt werden, dass die unbewussten Lösungsvorgänge durch ein iteratives, agil geprägtes Trial-and-Error-Verfahren geprägt sind. Über die Diskussion unterschiedlicher Vorgehensmodelle der operativen Ebene, welche den allen gemeinen prinzipiellen Ablauf der Zielsuche, Lösungssuche und Auswahl erörtert, schließt die Diskussion in der Darstellung unterschiedlicher Phasenmodelle des Produktentwicklungsprozesses, welche alle eine frühe Phase inkludieren. In sämtlichen Entwicklungsmethoden fokussiert die frühe Phase die Findung von Lösungskonzepten. Sie dient der frühzeitigen Überprüfung prinzipieller potentieller Lösungen sowie der Validierung von Alternativen.

Anschließend wird die frühe Phase des Entwicklungsprozesses genauer betrachtet, beginnend bei der Erläuterung des Verfahrens der Entscheidungsfindung. Zentraler Bestandteil im Entscheidungsfindungsprozess ist die Bereitstellung von validen und hilfreichen Informationen und Wissen. Da Entschlüsse auf Wissensquellen basieren, wird darüber hinaus unterschiedliches Wissen kategorisiert. Dieses Wissen kann bereits durch unterschiedliche digitale Werkzeuge ergründet werden, welche heute in der frühen Phase eingesetzt werden. Auffällig ist hierbei, dass die frühe Phase v. a. im Bereich der fluidischen Problemstellungen kaum durch Simulationswerkzeuge unterstützt wird.

Des Weiteren umfasst der Stand der Wissenschaft und Technik die Vorstellung unterschiedlicher Simulationsmethoden für fluidische Problemstellungen. Auf-

grund des noch immer fehlenden vollständigen Verständnisses der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichung kennt die Wissenschaft und Technik viele unterschiedliche Simulationsmethoden. Dies resultiert aus dem Sachverhalt, dass es bis heute keine Simulationsmethode gibt, welche alle Problemstellungen simulieren kann. Stattdessen müssen für die unterschiedlichen Anwendungen jeweils unterschiedliche, spezifische Simulationsmethoden genutzt werden. Eine Strukturierung der Methoden erfolgt auf Basis der räumlichen Diskretisierungsmethoden, d. h. der netzbasierten Methoden, darunter Eulersche und Eulersche-Lagrange Methoden, sowie netzfreie Methoden. Darüber hinaus wird die stark sequentielle prozessuale Durchführung von CFD-Simulationen im Entwicklungsprozess vorgestellt. Fokussiert werden u. a. wesentliche Unterschiede der Vorgehensweisen in netzbasierten und netzfreien Methoden, so etwa die fehlende Notwendigkeit einer fixen Definition der gesamten Simulationsdomäne in netzfreien Methoden. Hierdurch wird eine höhere Flexibilität bewirkt.

Abschließend erfolgt eine kurze Erörterung über Simulationsmethoden, in denen das Modell während der Simulationsdurchführung modifiziert wird. Jedoch ist keine CFD-Simulationsmethode bekannt, in welcher das zugrundeliegende Simulationsmodell während der Durchführung vollständig modifiziert werden kann. So befasst sich die Wissenschaft und Technik mit der Beschleunigung und Vereinfachung des Modellbildungsprozesses, um die Analyse-Synthese-Zyklendauer zu reduzieren, ein vollständiges Aufbrechen der Sequentialität ist jedoch in CFD-Simulationen nicht existent.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf elementarer Ebene unbewusste Denk- und Handlungsabläufe grundsätzlich einem Trial-and-Error-Prinzip folgen. Die Literatur ist sich einig, dass die Suche nach Lösungen von Problemen ein sehr agiler und iterativer Prozess ist, welcher nur durch Erfahrungswissen abgekürzt werden kann (vgl. Abschnitt 3.1.1.). Zudem herrscht auf operativer Ebene grundsätzlich das gleiche Modell der Entscheidungsfindung, welches sich durch eine Generierung von Lösungsalternativen, einen iterativen Verbesserungsprozess und eine abschließende Auswahl anhand einer Bewertung unterschiedlicher Wissensquellen auszeichnet (vgl. Abschnitt 3.1.2). Weiterhin kann festgestellt werden, dass den unterschiedlichen Vorgehensmodellen gemein ist, dass auf Basis von Anforderungen auch in der makrozyklischen Betrachtung unterschiedliche Lösungsalternativen, welche iterativ verbessert werden, in der frühen Phase in Form von grundsätzlichen Konzepten notwendig sind (vgl. Abschnitte 3.1.3 und 3.1.4).

Jedoch wird aktuell diese wirtschaftlich bedeutende und qualitätsentscheidende Phase kaum durch Simulationen unterstützt (LANGERMANN 2008, S. 31). Darüber hinaus laufen heutige Simulationsmethoden sequentiell ab. Eine intuitive Unterstützung der elementaren Handlungsabläufe ist daher nicht gegeben; stattdessen sind Simulationen nur auf operativer bis makrozyklischer Ebene nutzbar (vgl. Abschnitt 3.2.3). Eine schnelle Durchführung von Simulationen, welche den konzeptuellen Anforderungen der frühen Phase genügt, kann den Entwicklungsprozess in mehreren Dimensionen unterstützen. So könnten durch schnelle Simulationen in der frühen Phase

- die unbewussten Handlungsabläufe unterstützt werden und
- Wissen zur Entscheidungsfindung sowohl im Denkablauf als auch auf operativer Ebene generiert werden.

Ein Idealfall wäre eine Online-Simulation, welche ein direktes Feedback über Änderungen an Konzepten liefert. Dabei soll der Zeitraum der Modellbildung, welche den Entwicklungsingenieur von seiner eigentlichen Entwicklungsaufgabe ablenkt, reduziert werden.

Diese Freiheit wird von den heutigen modellinvarianten Methoden nicht geliefert. Die rein sequentielle Durchführung vom Modellbildungsprozess bis hin zur Ergebnisanalyse ermöglicht keine Variabilität, Flexibilität oder Modifizierbarkeit innerhalb eines Synthese-Analyse-Zyklus. So ist es für den Einsatz des Online-Simulationsansatzes notwendig, dass sich das Simulationsmodell permanent ändern lässt und Resultate direkt visualisiert werden. Darüber hinaus darf die CFD-Simulation selbst keine Einschränkungen bezüglich des Simulationsmodells aufweisen.

Zusammenfassend leitet sich der Handlungsbedarf aus der Notwendigkeit einer wirtschaftlich sinnvollen und von Ingenieuren akzeptierten Simulation in der frühen Phase ab, um durch virtuelle Absicherung Wissen zu generieren. Diese Anforderungen werden jedoch im Bereich der fluidischen Prozesse aufgrund des hohen manuellen Aufwandes sowie der langen Wartezeiten auf Ergebnisse mit heutigen CFD-Verfahren nicht erfüllt.

Aus diesen Gründen ist es notwendig, für die frühe Phase des Entwicklungsprozesses eine Methode zu schaffen, welche den Ingenieur in der Wissensgewinnung über die Konzepte unterstützt. Zur besseren Akzeptanz muss diese Methode auf die unbewussten Handlungsabläufe des Menschen angepasst sein. Darüber hinaus sind die manuellen Aufwände wegen der phasenspezifischen Restriktio-

nen stark limitiert. Zudem müssen Ergebnisse sehr schnell zur Verfügung stehen. Heute industriell eingesetzte CFD-Methoden können u. a. aufgrund der stark sequentiellen Durchführung der einzelnen Phasen diese Anforderungen nicht erfüllen.

4 Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

Da die einzelnen Prozessschritte innerhalb einer Simulation abhängig von der Simulationsmethode sind, wird in einem ersten Schritt eine Auswahl einer Simulationsmethodenklasse für die Online-Simulation durchgeführt.

4.1 Methodische Vorgehensweise zur Auswahl einer anwendungsfallspezifischen Simulationsmethode

Wie in Kapitel 3 festgestellt, haben die unterschiedlichen Simulationsmethoden anwendungsfallspezifische Vor- und Nachteile. Darüber hinaus sind aufgrund der hohen Komplexität von CFD-Simulationen einzelne Simulationsmethoden nicht für alle Problemfälle und Anwendungsgebiete geeignet. Somit muss auch für einen ökonomischen Einsatz die gewählte Simulationsmethode anwendungsfall- und somit anforderungsspezifisch ausgewählt werden.

Abbildung 18 veranschaulicht das vierphasige Vorgehen zur Auswahl einer anwendungsfallspezifischen Methode für die Online-Simulation. Das Auswahlverfahren ist grundsätzlich in zwei Stufen zu gliedern:

Die erste Stufe umfasst die qualitative Auswahl einer für die Online-Simulation bestmöglichen Simulationsklasse, d. h. einer Gruppe von Simulationsmethoden, welche für die anwendungsfallunabhängigen Anforderungen zur Online-Simulation anwendbar sind. Somit werden in einem ersten Schritt Anforderungen für eine Online-Simulation auf Basis der methodischen Entwicklungsmodelle (vgl. die Abschnitte 2.2 und 3.1), den Spezifika der frühen Phase (vgl. Abschnitt 3.1.4), und weiteren Wissensquellen definiert. Jedoch eignen sich die prozessualen und technischen Anforderungen nicht direkt zur Auswahl einer Simulationsmethode. Aus diesem Grund werden simulationsspezifische Kriterien deduziert, welche für eine spätere Bewertung der Simulationsmethoden von fluidischen Prozessen geeignet sind. Daher ist das Ziel die Auswahl einer Simulationsklasse für die Online-Simulation in der frühen Phase, aus der sich anwendungsfallbezogen eine Methode auswählen lässt.

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

Die zweite Stufe ist die abschließende Auswahl der Simulationsmethode für den individuellen Anwendungsfall. Grundlage hierfür bieten die spezifischen Anforderungen sowie die Methodengültigkeit. Die Vorgehensweise dieses Schrittes wird aufgrund seiner Anwendungsorientierung in diesem Kapitel beschrieben und eine Evaluierung (vgl. Kapitel 6) durchgeführt.

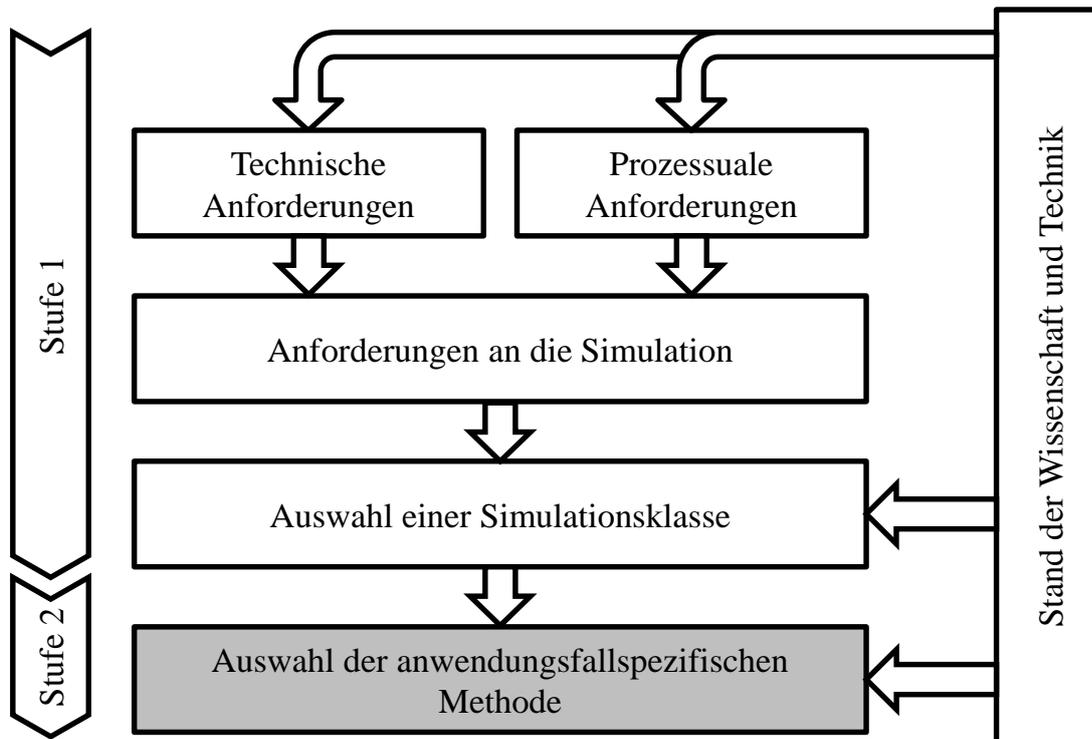


Abbildung 18: Methodische Vorgehensweise zur anwendungsfall-spezifischen Auswahl einer Simulationsmethode

4.2 Anforderungen an die Online-Simulation in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses

Durch eine abstrakte Modellierung komplexer Zusammenhänge und einer simulativen Erprobung können unterschiedliche Notwendigkeiten im Produktentwicklungsprozess erfüllt werden (LINDEMANN 2009, S. 11, KROTIL & REINHART 2015):

- Steigerung des Problem- und Systemverständnisses
- Erfassung und Analyse subjektiv relevanter Parameter
- Bestimmung der Struktur und des Verhaltens eines Systems

- Dokumentation und interdisziplinäre Kommunikation relevanter Merkmale

Um dieses Ziel für fluidspezifische Problemstellungen in der Konzeptionsphase zu erreichen, müssen sowohl prozessuale als auch technische Anforderungen erfüllt werden.

4.2.1 Prozessuale Anforderungen

Eine Durchführung einer online-simulativen Absicherung fluidischer Effekte in der Konzeptionsphase muss mehrere prozessuale Anforderungen erfüllen. Diese lassen sich direkt aus den drei Abstraktionsebenen von der Mikro- bis zur Makroebene ableiten (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Vorgehensmodelle elementarer Denk- und Handlungsabläufe (vgl. Absatz 3.1.1) umfassen die Nachbildung der menschlichen, kurzphasigen und hauptsächlich unbewussten Abläufe. Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich folgende Anforderungen:

- Heuristische Möglichkeit zur Tätigkeitsdurchführung, welche dem Trial-and-Error-Grundprinzip des menschlichen Handelns gerecht wird.
- Hohe Flexibilität zur einfachen Generierung unterschiedlicher Alternativen, um eine ganzheitliche Untersuchung des Lösungsraumes zu ermöglichen.
- Flexible Modifizierbarkeit im Lösungsraum, um den iterativen Denk- und Lösungszyklen gerecht zu werden
- Intuitive Ergebnispräsentation, welche die Schnelligkeit des Denkzyklus erlaubt.

Darüber hinaus ergeben sich auch aus den Vorgehensmodellen auf operativer Ebene Anforderungen an eine Simulation in der Konzeptionsphase (vgl. Abschnitt 3.1.2):

- Aufwandsminimale und kostenminimale Generierung von Alternativen, um in Synthese-Analyse-Zyklen unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten zu generieren.
- Modifikation bestehender Lösungen zur Weiterentwicklung von Lösungen, um Erkenntnisgewinne in den Lösungsraum einfließen zu lassen.

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

Des Weiteren ergeben sich insbesondere aus der frühen Phase des Entwicklungsprozesses als auch aus den Phasenmodellen im Produktentwicklungsprozess weitere Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.1.3):

- Interdisziplinäre Teilung komplexer Aufgaben, um der Komplexität heutiger Produkte durch fachliche Expertise gerecht zu werden.
- Skalierbarkeit der Modelldetaillierung, um eine durchgehende Modellführung von Grobkonzepten bis hin zu feindetaillierten Produktmodellen sicherzustellen.
- Konzeptionelle Modelle, welche in einer simulativen Erprobung korrekte qualitative Erkenntnisse bezüglich des Prozesses ermöglichen.

4.2.2 Technische Anforderungen

Darüber hinaus ergeben sich weitere rein technische Anforderungen (vgl. Abschnitte 2.4.4, 3.2.3 und 3.3):

- Hohe Validität, d. h. zum einen, dass das Modell alle zu untersuchenden Faktoren abbildet, zum anderen, dass eine genaue Lösungspräzision sichergestellt wird.
- Hohe Glaubwürdigkeit (Plausibilität), welche das Vertrauen in die Berechnungsmethode sicherstellt.
- Einfachheit in der Bedienung, welche eine schnelle Durchführung der Simulation ermöglicht.
- Hohe Flexibilität, welche sicherstellt, dass die Methode nicht auf spezielle Anwendungen beschränkt ist.
- Schnelle Berechnungsgeschwindigkeit, wodurch ein kurzer Analyse-Synthese-Zyklus ermöglicht wird.
- Gute Visualisierung der Ergebnisse, um ein schnelles Verständnis der Simulationsergebnisse durch den Anwender zu ermöglichen.
- Hohe Wiederverwendbarkeit der Modelle, um den Aufwand in den einzelnen Zyklen der Modellerstellung zu minimieren.
- Gute Anbindung an vorhandene Strukturen, d. h. vorhandene CAD Daten oder kinematische Abläufe können direkt zur Generierung des Simulationsmodells genutzt werden.

Prinzipiell genügen bereits heute eingesetzte Simulationsmethoden für die genannten technischen Anforderungen. Jedoch sind im Rahmen einer Online-

Simulation die Anforderungen von sehr hoher Bedeutung und werden somit speziell fokussiert.

4.3 Deduktion der Anforderungen an eine CFD-Simulation

Zusammengefasst sind somit die grundsätzlichen Anforderungen für eine Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses

- eine schnelle und einfache Modellbildung,
- eine schnelle Simulation und
- eine sofortige Bereitstellung der Ergebnisse.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die prinzipiellen technischen Anforderungen an eine Online-Simulation, welche im Folgenden genauer erörtert werden. Zu beachten ist, dass sich die Anforderungen an eine Simulation nicht gänzlich auf technische Prinzipien reduzieren lassen, da in heutigen CFD-Simulationen der Anwender eine große Rolle spielt. Somit umfassen die Anforderungen teilweise prozessuale Anforderungen (KROTIL ET AL. 2014).

Ein Beispiel hierfür stellt die Modellierungsgeschwindigkeit dar, welche sowohl von der Anwendbarkeit als auch von der technischen Realisierung abhängt. Somit ist die Modellierungsgeschwindigkeit ein zentrales Kriterium für eine Online-Simulation. Zum einen leitet sich der Bedarf aus den prozessualen Anforderungen ab. Beispiele hierfür sind die Notwendigkeit nach einer hohen Flexibilität sowie einer aufwandsminimalen und kostenminimalen Generierung von Alternativen. Darüber hinaus kann eine hohe Modellierungsgeschwindigkeit durch Einfachheit in der Bedienung und durch hohe Flexibilität unterstützt werden. Des Weiteren wird der Modellierungsprozess durch die Wiederverwendbarkeit von Modellen reduziert.

Ähnlich der Geschwindigkeit stellt die Komplexität der Modellierung einen erheblichen Einflussfaktor dar. Die Forderung nach hoher technischer und prozessualer Flexibilität sowie einer simplen Modifikation bestehender Lösungen benötigt eine möglichst geringe Komplexität im Modellierungsprozess. Darüber hinaus muss die Komplexität der Simulationsmodelle variabel sein, um die Möglichkeiten von CFD-Simulationen auf Basis von Konzepten zu gewährleisten.

**Auswahl einer Simulationsmethode für die
Online-Simulation von fluidischen Prozessen
in der frühen Phase**

X $\hat{=}$ erfordert		Modellierungsgeschwindigkeit	Modellierungskomplexität	Auflösungsadaptivität	Berechnungsgeschwindigkeit	Stabilität	Konvergenzgeschwindigkeit	Parallelisierbarkeit	Berechnungseffizienz	Ergebnisvisualisierung
Prozessuale Anforderungen	Heuristische Möglichkeit zur Tätigkeitsdurchführung	X	X		X					X
	Hohe Flexibilität	X	X	X	X	X				X
	Flexible Modifizierbarkeit	X	X							
	Intuitive Ergebnispräsentation				X					X
	Aufwandsminimale und kostenminimale Generierung von Alternativen	X		X	X					X
	Modifikation bestehender Lösungen	X	X	X				X		X
	Interdisziplinäre Teilung komplexer Aufgaben		X	X				X		
	Skalierbarkeit der Modelldetaillierung			X		X		X		
	Konzeptionelle Modelle		X	X						
Technische Anforderungen	Hohe Validität			X		X	X			
	Hohe Glaubwürdigkeit			X		X	X			X
	Einfachheit in der Bedienung	X	X							X
	Hohe Flexibilität	X	X	X		X				X
	Schnelle Berechnungsgeschwindigkeit			X	X	X	X	X	X	
	Gute Visualisierung der Ergebnisse									X
	Hohe Wiederverwendbarkeit	X								

Tabelle 2: Deduktion der Simulationsanforderungen aus den prozessualen und technischen Anforderungen

Eine Anforderung an die Simulation, die sowohl den Modellbildungsprozess als auch die Durchführung der Simulation selbst betrifft, ist die Auflösungsadaptivität, d. h. die Variabilität der räumlichen Diskretisierung. Betroffen davon ist sowohl die Simulationsvorbereitung als auch die Simulationsdurchführung. Je größer die Variabilität der räumlichen Auflösung, desto höher ist beispielsweise die Flexibilität in der Modifikation und Analyse bestehender Lösungen durch die einfache Möglichkeit von Detailanalysen. Des Weiteren wird durch die Adaptivität die Flexibilität in der Modelldetaillierung und somit die Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Modellreifegrade gewährleistet. Auch aus Sicht der Simulationsdurchführung ist die flexible Diskretisierung möglich, da dadurch Steigerungen der Berechnungsgeschwindigkeit erreicht werden können.

Die Berechnungsgeschwindigkeit selbst ist eine der zentralen Anforderungen für die Durchführung einer Online-Simulation. Aus prozessualer Sicht ermöglicht erst eine sehr hohe Geschwindigkeit eine schnelle Ergebnisbereitstellung, wodurch heuristische Vorgehensweisen und hohe Flexibilität in den unterschiedlichen Abstraktionsgraden und -aspekten erreicht werden können.

Im Rahmen der Berechnungsgeschwindigkeit spielt auch die Stabilität der Simulationsmethode eine bedeutende Rolle. Die maximale Zeitschrittweite, welche ein Stellrad zwischen Ergebnispräzision und Bereitstellungsgeschwindigkeit darstellt, ist maßgeblich durch die Stabilität, bspw. in Form der CFL-Zahl beschränkt (vgl. Abschnitt 2.4.3). Somit kann durch eine hohe Stabilität der Simulationsmethode eine Steigerung der Modelldetaillierungsflexibilität erreicht werden. Darüber hinaus bedingt die Validität und Glaubwürdigkeit ein stabiles System.

Ein weiterer Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit der Simulation ist die Konvergenzgeschwindigkeit der Algorithmen der CFD-Simulationen, wodurch eine schnelle Approximation der numerischen Lösung des Zeitschrittes ermöglicht wird. Des Weiteren kann durch eine schnelle Konvergenz der Gleichungen der Fehler pro Zeitschritt in einer Zeiteinheit minimiert werden, wodurch die Glaubwürdigkeit und Validität gesteigert wird.

Eine weitere Anforderung zum Erreichen einer möglichst geringen Berechnungszeit resultiert aus der Betrachtung der Entwicklung und Architektur heutiger Computer (vgl. Abschnitt 2.3.1). Unabhängig von der Methode sind heutige CFD-Simulationen sehr berechnungsaufwändig und bringen selbst modernste Workstations an ihre Grenzen. Somit gilt es die vorhandenen Ressourcen mög-

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

lichst effizient einzusetzen. Daraus ergibt sich die Forderung nach möglichst parallelisierbaren Algorithmen der Simulationsmethoden aus der Forderung nach einer schnellen Berechnungsgeschwindigkeit. Auch kann durch die Nutzung der gesamten Computerarchitektur sowohl eine interdisziplinäre Teilung der Teilaspekte einer Simulation als auch eine Modifikation der aktuellen Lösung erreicht werden.

In Anbetracht der Funktionsweise heutiger Computer ist ein weiterer Hauptfaktor eine hohe Berechnungseffizienz, d. h. dass die Anzahl der notwendigen Rechenschritte auf ein Minimum reduziert wird, wodurch die Dauer zur Berechnung eines Zeitschrittes minimiert werden kann. Durch die somit reduzierte Berechnungszeit kann der Nutzen der Simulation gesteigert werden.

Ein wichtiger Aspekt der Ergebnisbereitstellung ist eine schnelle und intuitive Ergebnisvisualisierung der (Zwischen-)Ergebnisse einer Simulation. Durch eine Online-Visualisierung, d. h. durch eine Analysefunktion erster Ergebnisse für den Anwender werden die Möglichkeiten heuristischer Tätigkeitsdurchführungen gesteigert. Darüber hinaus können Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden, wodurch die Möglichkeit eines vorzeitigen Simulationsabbruchs geschaffen wird. Ein weiterer Aspekt ist die Steigerung der Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse aufgrund des visuellen Feedbacks.

4.4 Auswahl einer Simulationsmethodenklasse

Auf der Grundlage der deduzierten simulationsspezifischen Anforderungen kann eine Klasse an Simulationsmethoden ausgewählt werden. Zur Definition der Grundklassen werden die beiden räumlichen Diskretisierungsmethoden netzbasiert und netzfrei herangezogen. Diese Simulationsmethodenklassen beinhalten unterschiedliche Simulationsmethoden, welche individuelle Validierungsgrade und anwendungsfallsspezifische Vor- und Nachteile beinhalten. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung qualitativ, sofern keine direkte Abhängigkeit von der Art und Weise der räumlichen Diskretisierung besteht (vgl. Tabelle 3).

Für eine Online-Simulation ist die Modellierungsgeschwindigkeit, d. h. bspw. die Geschwindigkeit der Modellbildung und Modelländerungen, ein Hauptkriterium. Dementsprechend ist es notwendig, dass bei Modifikationen nicht ein gänzlich neues Simulationsmodell generiert werden muss, stattdessen ist eine selektive Anpassung von Vorteil. So besteht in netzbasierten Methoden eine starke Kopp-

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

lung aufgrund der globalen Vernetzung zwischen den einzelnen Bestandteilen, da bspw. durch das Netz sowohl das Fluid selbst, aber auch die Geometrien repräsentiert werden. Im Gegensatz dazu ist in netzfreien Methoden diese Kopplung nicht gegeben, wodurch eine selektive Anpassung und somit eine schnellere Modellierungsgeschwindigkeit ermöglicht wird.

+ $\hat{=}$ hoch O $\hat{=}$ medium – $\hat{=}$ niedrig / $\hat{=}$ keine direkte Abhängigkeit	Modellierungsgeschwindigkeit	Modellierungskomplexität	Auflösungsadaptivität	Berechnungsgeschwindigkeit	Stabilität	Konvergenzgeschwindigkeit	Parallelisierbarkeit	Berechnungseffizienz	Ergebnisvisualisierung
<i>Optimum</i>	+	–	+	+	+	+	+	+	+
Netzbasierte Methoden	–	+	O	–	O	/	–	/	O
Netzfremde Methoden	+	–	+	+	+	/	+	/	O

Tabelle 3: Qualitative Bewertung der Simulationsmethodenklassen

Dieser Zusammenhang geht einher mit der Modellierungskomplexität. Durch eine selektive Anpassung reduziert sich der Aufwand und somit die Komplexität selbst. Darüber hinaus wird durch die Trennung in der Modellbildung des Fluids und der Geometrie eine Maximierung der interdisziplinären Teilung der Aufgaben vereinfacht. Im Gegensatz hierzu benötigen netzbasierte Methoden zum initialen Zustand eine genaue Definition des Netzes. Des Weiteren muss die netzbasierte Fluiddomäne in seiner gesamten Ausdehnung bereits vor der Simulationsdurchführung definiert sein.

Dies geht einher mit der Möglichkeit zur Auflösungsadaptivität, welche in der Simulationsdurchführung sowohl eine Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit als auch die Fokussierung der Simulation auf wesentliche zu untersuchende Merkmale ermöglicht. Die Auflösungsadaptivität ist in beiden Arten der Diskre-

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

tisierung möglich. Jedoch stellt die manuelle Vorabkonfiguration dieser in netz-basierten Simulationsmethoden eine erhöhte Komplexität dar.

Die Berechnungsgeschwindigkeit selbst hat einen großen Einfluss auf den Nutzen der Simulation und resultiert u. a. aus den simulationsspezifischen Kriterien Stabilität, Konvergenzgeschwindigkeit, Parallelisierbarkeit und Berechnungseffizienz. Neben der einfacheren Modellierung aufgrund der netzfreien Diskretisierung weisen netzfreie Methoden meist eine höhere Berechnungsgeschwindigkeit auf. Ein Grund hierfür ist die höhere Stabilität der netzfreien Methoden gegenüber den netzbasierten Methoden. So kann über unterschiedliche Verfahren die Annäherung an die Begrenzung der CFL-Zahl maximiert werden. Darüber hinaus werden die einzelnen netzfreien Diskretisierungselemente einzeln berechnet. Somit bedingt eine lokale Instabilität, wie das Überschreiten der CFL-Zahl, zwar eine Ungenauigkeit in der Gesamtlösung des Systems, jedoch nicht eine Destabilisierung der gesamten Simulation.

Ein weiterer Aspekt der Berechnungsgeschwindigkeit ist die Konvergenzgeschwindigkeit, für welche keine grundsätzlichen Aussagen getroffen werden können. Für das iterative Lösen der Gleichungssysteme werden unterschiedliche Lösungsverfahren genutzt, z. B. konjugierte Gradientenverfahren, deren Konvergenzgeschwindigkeit stark abhängig vom Startwert ist.

Die Parallelisierbarkeit der einzelnen Berechnungen hat einen hohen Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit. Im Anbetracht heutiger Rechnerarchitekturen gilt es, die vorhandene Rechenleistung möglichst effizient zu nutzen. Netzbasierte Methoden stellen zum Lösen ein globales Gleichungssystem auf. Im Gegensatz dazu können die einzelnen Diskretisierungselemente in netzfreien Methoden unabhängig voneinander berechnet werden. Das Gesamtsystem wird erst am Ende eines Zeitschrittes als Ganzes betrachtet. Durch das Auflösen der direkten Zusammenhänge werden somit für jedes Element die gleichen Berechnungsschritte durchgeführt, welches den höchsten Nutzungsgrad der GPU und somit heutiger Rechnerarchitekturen ermöglicht.

Ein weiterer Aspekt der Berechnungsgeschwindigkeit ist die Berechnungseffizienz, welche höher ist, je weniger einzelne Rechenschritte zum Lösen einer Gleichung benötigt werden. Für diesen Einflussfaktor kann keine prinzipielle Aussage in Abhängigkeit der Diskretisierungsmethode getroffen werden, da die spezifischen Algorithmen und deren individuelle Implementierungsarten sehr divergent sind.

Als letztes Kriterium zur Auswahl einer Simulationsmethodenklasse ist die schnelle, intuitive Visualisierung der (Zwischen-)Ergebnisse ein gewichtiger Faktor. Prinzipiell können aus beiden Diskretisierungsmethoden die gleichen Informationen gewonnen werden. Für die Online-Simulation stellt jedoch auch die Datenbereitstellungsgeschwindigkeit ein entscheidendes Kriterium dar. Auch in diesem Punkt haben sowohl die netzbasierten als auch die netzfreien Simulationsmethoden individuelle Vorteile. So können auf der Datengrundlage die netzbasierten Methoden aufgrund ihrer fixen Struktur ortsbasierte Daten schneller bereitgestellt werden. Dagegen können netzfreie Methoden die Nachverfolgbarkeit einzelner Volumeneinheiten schnell offerieren.

Zusammenfassend ergibt die qualitative Bewertung der Simulationsmethodenklassen, dass für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase aufgrund

- der schnelleren, variableren und einfacheren Modellierung der CFD-Simulation und
- der höheren Berechnungsgeschwindigkeit

die netzfreien Methoden besser geeignet sind.

4.5 Anwendungsfallsspezifische Auswahl einer Simulationsmethode

Die netzfreien Methoden stellen jedoch nur ein Klasse diverser Methoden dar. Somit ist ein letzter Schritt die Auswahl der eigentlichen Simulationsmethode aus der Klasse der netzfreien Methoden.

Die simulative Abbildung von Fluiden stellt im heutigen Stand der Technik und Wissenschaft ein großes Problem dar. So ist z. B. nicht jeder Problemfall mit jeder Simulationsmethode nachbildbar. Aus diesem Grund ist die Methodenevalidität, welche zum einen den Validierungsstand der Simulationsmethode, zum anderen die Simulationsmöglichkeit der anwendungsfallsspezifischen Anforderungen beinhaltet, ein bedeutendes Kriterium in der Auswahl einer Simulationsmethode. Darüber hinaus haben bei der Auswahl der Simulationsmethode Verfügbarkeit der Methode und Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse eine grundsätzliche Bedeutung.

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

Das Vorgehen zur Auswahl einer anwendungsfallspezifischen Simulationsmethode ist in Abbildung 19 beispielhaft dargestellt. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, eignet sich die Simulationsklasse der netzfreien Methoden für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen (Schritt 1).

Auf dieser Basis erfolgen in Schritt 2 die Betrachtung der verfügbaren Methoden und deren validierten Simulationseinsätze. Auf dieser Grundlage wird anschließend eine anwendungsfallspezifische Anforderungsanalyse durchgeführt (Schritt 3), welche sowohl die physikalischen Eigenschaften des betrachteten Fluides (z. B. newtonsche oder nichtnewtonsche Fluide) als auch die physikalischen Größen (z. B. Temperaturabhängigkeit) und den Prozess selbst (z. B. Mehrphasenströmungen, Grad der Verwirbelung, Geschwindigkeiten, Anzahl der unterschiedlichen Fluide) umfasst. Dem folgend werden die Anforderungen mit den verfügbaren Simulationsmöglichkeiten der verfügbaren Simulationsmethoden abgeglichen (Schritt 4). Bei einer vollständigen Erfüllung der Anforderungen werden die jeweiligen Simulationsmethoden als potentielle Kandidaten der Auswahl der endgültigen Auswahl der Simulationsmethode hinzugefügt. Darüber hinaus muss basierend auf den anwendungsfallspezifischen Anforderungen die Validität der Simulationsmethode bereits erwiesen sein. Abschließend erfolgt in Schritt 5 die endgültige Auswahl der anforderungsspezifischen Simulationsmethode. Hierfür werden in einem ersten Schritt die Validität und Glaubwürdigkeit der Simulationsmethoden bewertet. Einflussfaktoren sind neutrale Benchmarks, jedoch auch das Erfahrungswissen des Anwenders sowie Expertenwissen. Anhand der Summe der Bewertungen erfolgt anschließend die Auswahl der spezifischen Simulationsmethode, mit welcher die Navier-Stokes Gleichung propagiert wird. Sind zu diesem Zeitpunkt noch mehrere Methoden gleich bewertet, so entscheidet im Anschluss die Berechnungsgeschwindigkeit über die eindeutige Entscheidungsfindung, da somit die Ergebnisbereitstellungsgeschwindigkeit global verbessert werden kann. Die resultierende Simulationsmethode dient in der Online-Simulation der Zeitschrittpropagation um den Zeitschritt Δt (vgl. Abschnitt 5.3).

4.6 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik und Wissenschaft werden die Anforderungen an eine Online-Simulation von fluidischen Prozessen gesammelt und in technische und prozessuale Anforderungen klassifiziert. Auf

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase



Abbildung 19: Vorgehen zur Auswahl einer anwendungsfallsspezifischen Simulationsmethode

Auswahl einer Simulationsmethode für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase

Basis dieser Anforderungen werden simulationsspezifische Anforderungen abgeleitet, welche als Bewertungsgrundlage zur Auswahl einer Simulationsmethode dienen. Da heutige Simulationsmethoden jedoch spezifische Vor- und Nachteile haben und nicht jeder Anwendungsfall mit jeder Simulationsmethode simuliert werden kann, erfolgt eine Auswahl einer Simulationsmethodenklasse, welche die grundsätzlichen Anforderungen an eine Online-Simulation von fluidischen Prozessen erfüllt. Neben der Berechnungsgeschwindigkeit liegt ein Hauptfokus auf dem Modellbildungsprozess, welcher in heutigen Simulationen einen Hauptaufwand darstellt und ein Ausschlusskriterium für die Online-Simulation ist. Es wird abgeleitet, dass sich die Klasse der netzfreien Methoden auf Grundlage der simulationsspezifischen Anforderungen für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase des Maschinen- und Anlagenbaus am besten eignet. Aus dieser Klasse von Simulationsmethoden erfolgt auf Basis der anwendungsfallbezogenen Anforderungen eine Auswahl einer Simulationsmethode für den spezifischen Fall, wobei die Kriterien sowohl die Verfügbarkeit, Machbarkeit als auch die Validität der Methoden sind.

5 Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse in der frühen Phase

Auf Grundlage der Vorteile und Eigenschaften der netzfreien Simulationsmethoden kann die Simulation von fluidischen Prozessen in den frühen Entwicklungsphasen wesentlich beschleunigt werden. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel die Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse und deren Methodenschritte und Bausteine vorgestellt, wodurch eine CFD-Simulation für die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses ermöglicht wird. Darüber hinaus wird die Verteilung der Berechnungsschritte auf die unterschiedlichen Hardwareressourcen spezifiziert. Abschließend erfolgt die Darstellung der prozessualen und technischen Integration in den Entwicklungsprozess.

5.1 Übersicht des Gesamtkonzepts

Ähnlich der heutigen Durchführung von CFD-Simulationen (vgl. Abschnitt 3.2.3) können die unterschiedlichen Teilschritte der Methode in die vier Phasen der Modellerstellung und -konzeption, Simulationsvorbereitung, Simulationsdurchführung und Ergebnisbereitstellung aufgeteilt werden. Wie in Abbildung 20 dargestellt, unterscheidet sich die Methode im Wesentlichen von heutigen Vorgehensweisen in den folgenden drei Punkten:

- Ähnlich des iterativen Vorgehens, in welchem die unterschiedlichen CAD Modelle stets weiterentwickelt und angepasst werden, werden die Simulationsmodelle in der laufenden Simulation synchron zum Entwicklungsfortschritt modifiziert.
- Die Simulation kann dauerhaft ohne Unterbrechung durchgeführt werden. Eine Modifikation und Aktualisierung des Eingangsmodells muss nicht zwingend zu einem Neustart der Simulation führen. Dies ist nur in Fällen irreversibler Simulationsfortschritte notwendig.
- Die Simulations(teil-)ergebnisse können permanent durch den Nutzer analysiert werden. Somit kann das durch die Simulation generierte Wissen direkt und ohne Verzögerung in den Konzeptionsprozess eingebracht werden.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen die jeweiligen Prozessschritte an die daraus resultierenden Anforderungen angepasst werden.

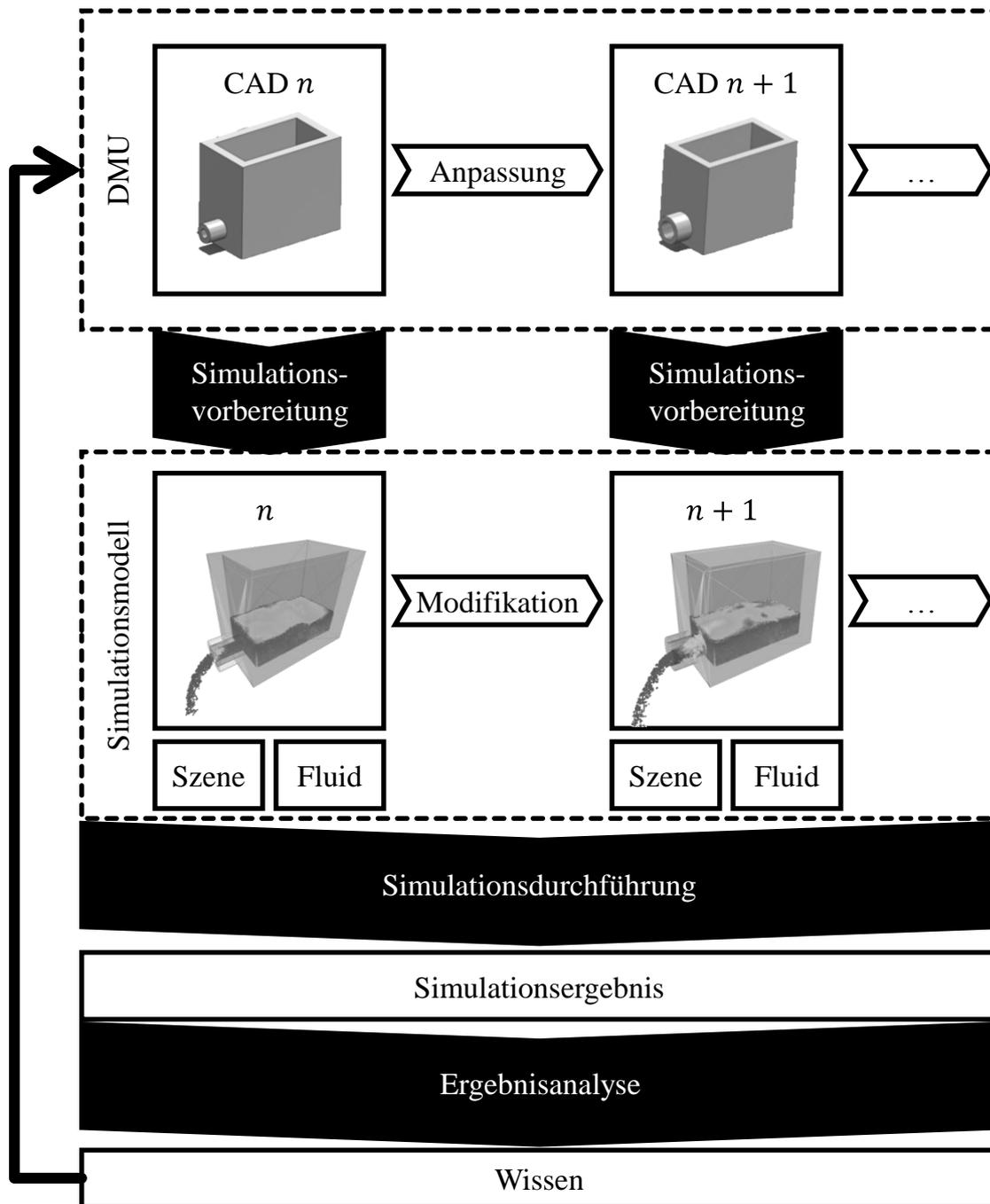


Abbildung 20: Gesamtkonzept der Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse in der Konzeptionsphase

Im Betrachtungsfokus liegt nicht die geometrische Anpassung der Konzepte, welche durch heutige CAD Software bereits ermöglicht wird (SHETTY ET AL. 2012). In einem ersten Schritt wird der vorgelagerte Prozessschritt der Initialisierung dargestellt, welcher einmalig vor einer Simulation hardware-spezifisch durchgeführt wird. Dem folgend erfolgt die Darstellung der Simulation, welche den Kern der Simulation darstellt. Über die Schnittstelle

der Simulationsmodellaktualisierung erfolgt eine Überleitung zum Prozessschritt der Simulationsvorbereitung, in welchem das Modell auf Grundlage von Eingangsdaten präpariert wird. Eingangsdaten sind in beiden Fällen sowohl fluidspezifische als auch geometriespezifische Parameter. Abschließend wird die Entkopplung des Prozessschrittes der Ergebnisanalyse erläutert.

Im Gegensatz zu heutigen Simulationsverfahren erfolgt die Abarbeitung der drei Prozessschritte Simulationsvorbereitung, -durchführung und Ergebnisanalyse nicht sequentiell, sondern parallel. Somit wird in der Simulationsvorbereitung das Simulationsmodell für die eigentliche Simulation aufbereitet, während in der Simulationsdurchführung noch an einer älteren Version des Simulationsmodells Berechnungen durchgeführt werden. Sobald jedoch das neue Simulationsmodell zur Verfügung steht, wird dieses für die weiteren Berechnungen genutzt, wobei der aktuelle fluidische Zustand, d. h. bspw. die Position von Fluidpartikeln, erhalten bleibt. Entsprechend dieses Vorgehens erfolgt auch die Ergebnisanalyse.

5.2 Initialisierung

Die Initialisierung muss vor der eigentlichen Online-Simulation als einmaliger Prozessschritt durchgeführt werden. Eine Simulation muss mehrere Rahmenbedingungen erfüllen, z. B. falls die Online-Simulation als WYSIWYG-Simulation genutzt werden soll, muss eine Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden.

Mit der hohen Divergenz unterschiedlicher möglicher Hardwarekonfigurationen besitzt nahezu jede Workstation eine unterschiedliche Hardwarezusammenstellung. Diese hat jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.1) und somit auf die mögliche Simulationsdomäne. Bei gewählter Simulationsmethode (Vorgehen nach Kapitel 4) sind die Haupteinflüsse auf die notwendige Hardwarevoraussetzung neben Implementierungsspezifika auch

- die Zeitschrittweite Δt
- Partikelanzahl n_p und die
- Anzahl der Geometrien n_G .

In der Initialisierung werden die Grenzen der drei Einflussfaktoren individuell dimensioniert. Hierzu wird vor der eigentlichen Simulation ein Benchmark-Szenario in unterschiedlichen Konfigurationen schrittweise validiert:

1. Als erstes wird die GPU auf die maximale Partikelanzahl n_p untersucht. Durch eine iterative Steigerung der Partikelanzahl wird die Zykluszeit so lange erhöht, bis das CFL-Kriterium nicht mehr erfüllt wird. Somit ist eine hardware-spezifische, maximale Partikelanzahl festgelegt.
2. Die einzelnen Iterationen werden in einer zweiten Dimension mit einer steigenden Anzahl an Geometrien erneut durchgeführt. Angenommen wird der schlechteste Fall, d. h. alle Partikel befinden sich innerhalb eines konkaven Objektes. Somit wird eine maximale Anzahl an Kollisionsauflösungen untersucht.

Auf dieser Wissensbasis können im späteren Simulationsverlauf die kritischen Simulationsfaktoren bzgl. temporärer und räumlicher Auflösung in Verbindung mit der gewünschten Ergebnisbereitstellungsgeschwindigkeit durch den Nutzer angepasst werden.

5.3 Simulationsdurchführung

Im Rahmen der Online-Simulation wird die Simulationsdurchführung, d. h. die Berechnung der einzelnen Zeitschritte, permanent durchgeführt. Sie bildet somit den Kern der Simulation. Aufbauend auf dem Input der Initialisierung und den Modifikationen der Simulationsvorbereitung wird das physikalische Verhalten simuliert. Die (Teil-)Ergebnisse werden anschließend zur direkten Ergebnisdarstellung genutzt.

Wie in Kapitel 4 deduziert, eignen sich für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen die netzfreien Methoden vor allem aufgrund ihrer Flexibilität in der Modellierung. Die Modelländerungen, d. h. Input aus der Simulationsvorbereitung, sollen keinen direkten Einfluss auf den Algorithmus haben. Somit wird die Flexibilität und Austauschbarkeit der unterschiedlichen netzfreien Methoden sichergestellt. Aus diesem Grund dürfen Modifikationen an der Geometrie sowie den Parametern des Fluids nicht innerhalb eines Zeitschrittes vorgenommen werden.

Abbildung 21 stellt den Ablauf eines Zeitschrittes dar. Die Grundlage ist eine Propagation der Simulationszeit um den Zeitschritt Δt , in welchem die Simulationmethode, welche nach dem Vorgehen aus Kapitel 4 ausgewählt wurde, genutzt wird. Der Simulationszyklus, welcher in jeder Propagation durchlaufen wird und $\Delta t_{\text{Berechnung}}$ in der Realzeit benötigt, besteht jedoch aus drei Phasen.

Zu Beginn des Simulationszyklus wird, falls notwendig, das Simulationsmodell aktualisiert. Dies umfasst sowohl fluidische Parameter, Quellen und Senken als auch die geometrischen Strukturen, jedoch bleibt der fluidische Zustand erhalten. Somit dient als Grundlage das vorbereitete Simulationsmodell, welches in der Simulationsvorbereitung präpariert wird (vgl. Abschnitt 5.4). Es werden daher erst zu diesem Zeitpunkt mögliche Änderungen am Simulationsmodell für die Simulation übernommen. Danach erfolgt die Propagation der Simulationszeit, d. h. die Berechnung des Zeitschrittes in der CFD-Simulation. Abschließend werden die Zwischenergebnisse gesichert. Somit ist eine Aktualisierung des Simulationsmodells nur vor der Durchführung der einzelnen, verketteten und voneinander abhängigen Berechnungsschritte in der Zeitschrittpropagation möglich. Dies ist notwendig, da ansonsten ein Fehler zwischen zweier Berechnungsschritte induziert würde.

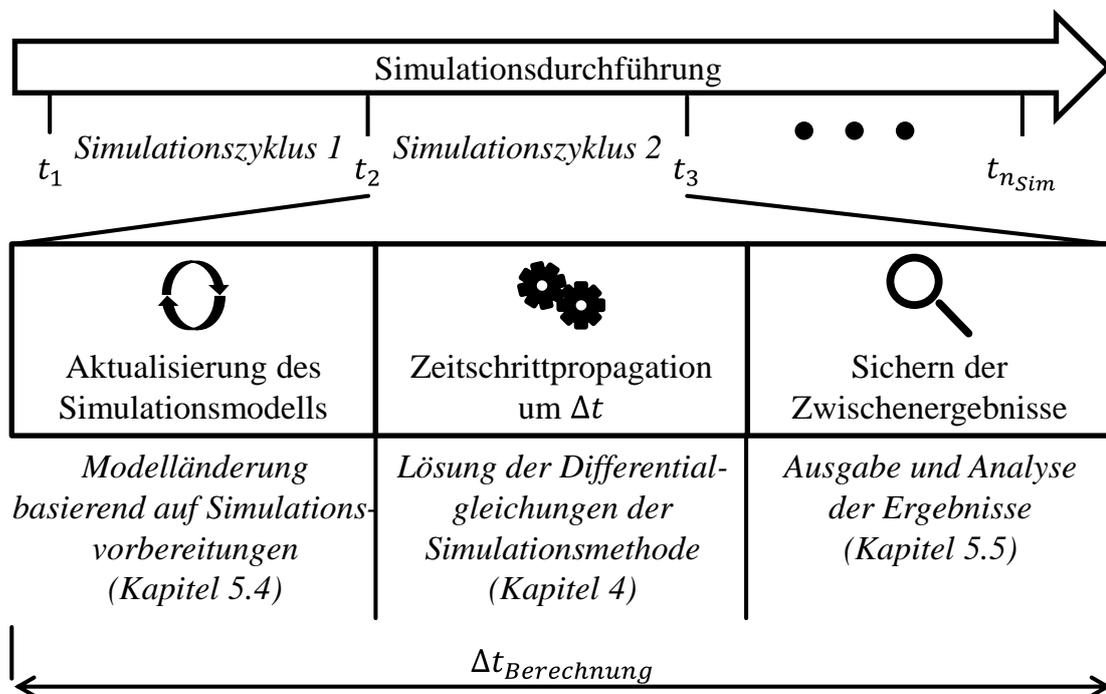


Abbildung 21: Ablauf eines Simulationszyklus

Die Online-Simulation ermöglicht somit die Variation des Simulationsmodells zu jedem Simulationszyklus. Ein Teilaspekt der Online-Simulation ist der WYSIWYG-Ansatz. Dieser ist nicht nur definiert, dass sich das Simulationsmodell an das CAD Modell online anpasst, auch ist die Echtzeitfähigkeit der Simulation gefordert, um ein unverfälschtes simulatives Abbild der Realität zu gewährleisten, welches keinen temporalen Verzug beinhaltet. Das Verhältnis zwischen dem Simulationszeitschritt Δt und der Berechnungszeit des Zeitschrittes

$\Delta t_{\text{Berechnung}}$ hat direkten Einfluss auf die Echtzeitfähigkeit der Simulation. Sobald die Bedingung

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{Berechnung}} \quad 5.1$$

erfüllt ist, ist die Simulation echtzeitfähig. Falls diese Bedingung nicht mehr erfüllt werden kann, werden die Ergebnisse dem Anwender verlangsamt dargestellt.

5.4 Simulationsvorbereitung

Die Simulationsvorbereitung ist ein wesentlicher Bestandteil einer Online-Simulation. In diesem Prozessschritt wird das Simulationsmodell für die parallel ablaufende Simulation ausgelöst durch Modifikationen generiert. Sobald dieses zur Verfügung steht, ersetzt dieses im Prozessschritt der „Aktualisierung des Simulationsmodells“ (vgl. Abschnitt 5.3) das Simulationsmodell in der Simulationsdurchführung. Der Prozessschritt umfasst sowohl fluidspezifische Präparationen wie

- die Parametrisierung des Fluides und
- die Definition von Quellen und Senken

als auch eingangsmodellspezifische Präparationen wie

- den grundsätzlichen Import eines Eingangsmodells,
- die Aufbereitung des Modells,
- die Diskretisierung der Fluiddomäne,
- die Konfiguration der Modellparameter und
- die Definition der Randbedingungen.

Prinzipiell bleibt der prozessuale Verlauf in der Online-Simulation von fluidischen Prozessen ähnlich der aus klassischen CFD-Simulationen bekannten Vorgehensweise. Um den zeitlichen Anforderungen einer Online-Simulation gerecht zu werden, ist jedoch vor allem eine Modifikation der Simulationsmodellauflösungsschritte notwendig.

Zur Erfüllung der Anforderungen werden unterschiedliche Ansätze verwendet:

- Die genutzte Klasse der Simulationsmethoden ist netzfrei. Dadurch ist eine vollständige Vernetzung und somit eine resolute Definition aller Randbedingungen, bspw. der Größe der Fluiddomäne, nicht notwendig.

- Quellen und Senken können dynamisch in der Simulationsumgebung angepasst werden.
- Zur Aufwandsreduktion in der modellspezifischen Präparation werden Modifikationen detektiert. Auf dieser Basis werden nur möglichst minimale und somit aufwandsarme Änderungen am Simulationsmodell durchgeführt.
- Das Simulationsmodell wird stetig in Laufzeit bezüglich der Berechnungsperformanz optimiert.

Darüber hinaus ist ein wesentlicher Unterschied zu klassischen netzbasierten Methoden das persistente Simulationsmodell. Statt einer vollständigen Neudefinition und -berechnung der Simulationsmodelle überdauert das Simulationsmodell einzelne Simulationszyklen. Auch bei grundsätzlichen Konzeptänderungen werden nach einer Analyse der Modifikationen auf minimalistische Art und Weise Simulationsmerkmale geändert, unveränderte Simulationselemente bleiben jedoch konstant.

Im Folgenden werden daher die einzelnen methodischen Schritte der Synthese der Simulationseingangsdaten beschrieben. Dabei wird zwischen den fluid- und geometriespezifischen Präparationen unterschieden.

5.4.1 Fluidspezifische Präparationen

Die Definition des Fluids selbst ist unabhängig vom geometrischen Modell. Deshalb ist die Lokalisierung und Parametrisierung des Fluids unabhängig von den Entwicklungszyklen der Konzepte. Die primäre Aufgabe der fluidischen Präparation ist somit die Integration des Fluids sowie die Definition globaler Randbedingungen der Simulationsdomäne. Der Prozessschritt umfasst die Definition zweier Grundelemente: Quellen und Senken (vgl. LACOUR 2011).

Durch die Quelle werden der Ursprung, der Initialzustand und die Menge des Fluides definiert. Der Ursprung kann durch virtuelle, modifizierbare 3D-Objekte definiert werden. Darüber hinaus sind je nach Anwendungsfall unterschiedliche Unterarten möglich, welche sich vor allem durch den zeitlichen Verlauf voneinander unterscheiden. Quellentypen können mehrere Einflussparameter haben:

- Die Quelle kann nach unterschiedlichen zeitlichen Strategien neues Fluid in die Simulationsdomäne hinzufügen:
 - Einmalig
 - Periodisch

- Bedingt
- Darüber hinaus wird die Art der Quelle auf der Grundlage der physikalische Bezugsgröße definiert:
 - Druck
 - Geschwindigkeit
 - Masse
- Zusätzlich muss die Position und vektorielle Orientierung im Simulationsmodell definiert sein.

Des Weiteren werden die fluidischen Partikel quellenspezifisch mit Naturkonstanten wie Viskosität und Dichte als auch mit simulationsspezifischen Parametern, bspw. Partikelgröße und Repräsentationsmassen, konfiguriert. Die hierfür notwendigen Informationen können aus einer Datenbank extrahiert werden. Somit können auch während des Simulationsdurchlaufes unterschiedliche Fluidspezifikationen ohne Neustart durch simple Neukonfiguration der Quelle evaluiert werden. In Fällen irreversibler Simulationszustände, welche aufgrund der durchgängigen evolutionären Simulationsmodelle möglich ist, ist jedoch ein Entfernen des Fluids notwendig. Auch kann in Fällen irreversibler Verfälschungen des Simulationsergebnisses ein Neustart notwendig sein.

Abbildung 22 stellt beispielhaft zwei Quelltypen dar. In beiden Fällen kann die Position der Quelle manuell definiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Definition ähnlich heutiger Vorgehensweisen, wobei die Form und Position im 3D CAD als Festkörper modelliert und durch entsprechende Parametrisierung als Fluidquelle definiert werden. Basierend auf dieser Geometrie erfolgt die Parametrisierung der fluidischen Eigenschaften, d. h. bspw. Dichte und Viskosität. Des Weiteren erfolgt die Klassifizierung der Quelleigenschaften..

Im Beispiel der einmaligen Quelle wird einmalig zum Zeitpunkt t_{init} die CAD Geometrie mit einer bestimmten Masse gleichmäßig gefüllt, d. h. im Fall einer lagrangeschen Diskretisierung mit der entsprechenden Anzahl und Größe von Partikeln, welche die konfigurierte Masse repräsentieren. Ein weiterer Quellentyp ist die periodische Quelle, in welcher in periodischen Abständen Fluid erzeugt wird, d. h. es wird im Fall einer lagrangeschen Diskretisierung eine bestimmte Anzahl konfigurierter Partikel erzeugt. Auf diese Art und Weise kann ein bestimmter Volumenstrom erzeugt werden, welcher durch eine initiale Geschwindigkeit an der Quelle forciert werden kann.

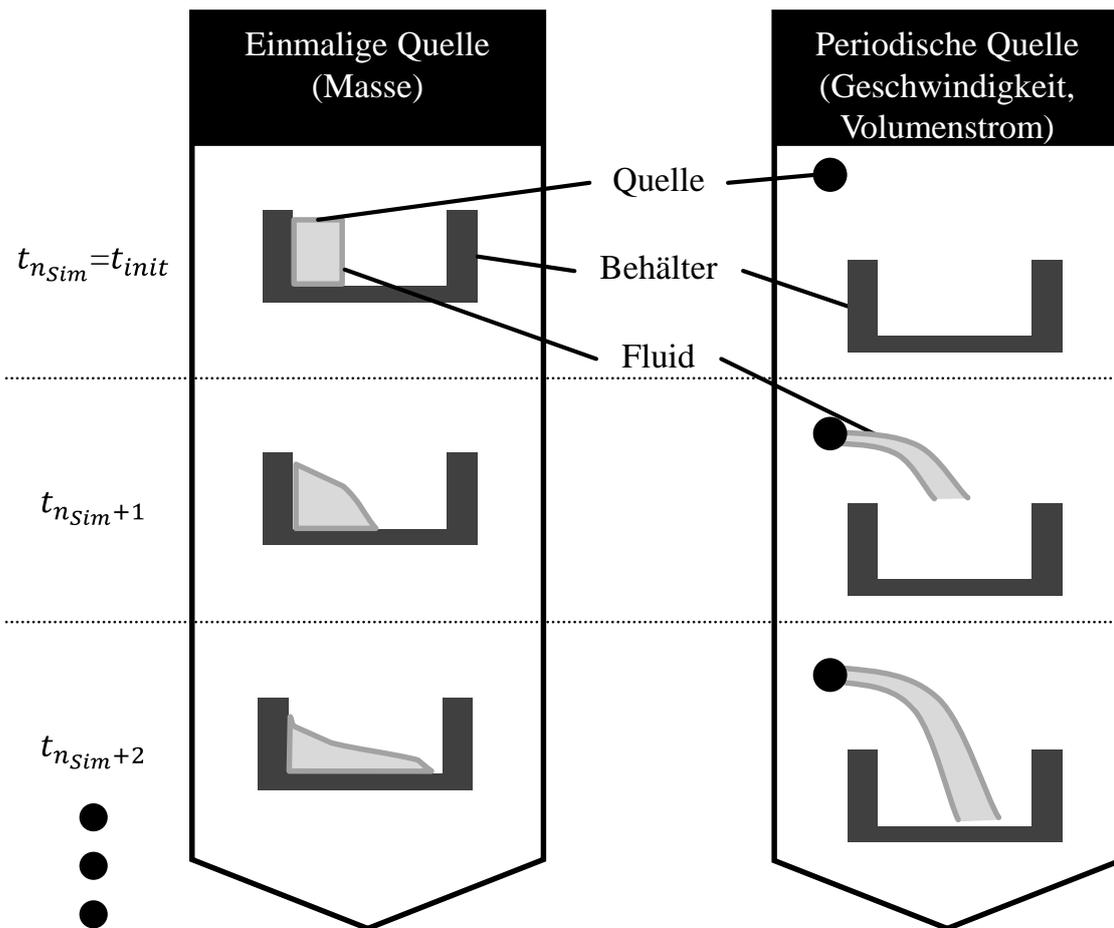


Abbildung 22: Beispiel für unterschiedliche Quelltypen

Ein weiteres Grundelement stellen die Senken dar, welche die fluidischen Partikel nach ähnlichen Regeln wie bei den Quellen aus den Berechnungen eliminieren. Einflussfaktoren auf Seiten der Partikel sind beispielsweise die Position, die Geschwindigkeit und die Lebensdauer, auf der Seite der Senke bspw. der Zeitpunkt oder der anliegende Druck. Fluidische Senken sind nicht in jedem Anwendungsfall zwingend notwendig. Jedoch kann durch die Integration dieser die Berechnung des Fluids auf relevante Bereiche reduziert werden, wodurch eine Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit erreicht wird. Darüber hinaus kann auch weiteren Restriktionen, wie bspw. verfügbarer Speicher, welcher direkt aus den Hardwareressourcen der Arbeitsplätze resultiert, entgegengewirkt werden.

5.4.2 Modellspezifische Präparationen

Neben dem Fluid ist die Geometrie ein essentieller Teil des Simulationsmodells. Ausgehend von Konzepten bedarf es eines Vorgehens zur Erstellung von Simulationsmodellen. Da bisherige Simulationsverfahren keine Online-Modifikation des

Simulationsmodells zulassen, müssen in aktuellen Modellerstellungsverfahren alle Ereignisse, Modelle und Parameter vorab definiert werden. Interaktive Änderungen von Modellen oder Abläufen können im Bereich der Fluidodynamik nicht simuliert werden. Aus diesem Grund können die bisherigen Verfahren wegen der speziellen Anforderungen für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen nicht eingesetzt werden.

Jedoch kann das bekannte vierstufige Modellerstellungsverfahren nach LACOUR (2011) als Grundlage dienen. Grund hierfür ist, dass bereits in dieser Modellierungsmethode der Fokus auf einer einfachen und schnellen Modellerstellung liegt. Dieses erfüllt jedoch nicht die Anforderungen, da das Verfahren auf Starrkörper limitiert ist. Auch muss der Prozess der Modellerstellung vor der Simulation durchführung vollständig abgeschlossen sein. Jedoch kann das grundsätzliche Vorgehen zur Modellaufbereitung für die Online-Simulation der fluidischen Prozesse adaptiert werden. Wie in Abbildung 23 dargestellt, erfolgt ähnlich wie in LACOUR (2011) die Erstellung des Simulationsmodells in vier Prozessschritten. Jedoch ist neben Modifikationen der Prozessschritte Vorverarbeitung, Anreicherung und Kinematisierung vor allem der Prozessschritt der Ableitung des triangulierten Modells hin zu einem Kollisionsmodells durch den Prozessschritt der Aufbereitung an die Anforderungen einer Online-Simulation angepasst.

Im Folgenden werden daher die einzelnen Prozessschritte genauer beschrieben.

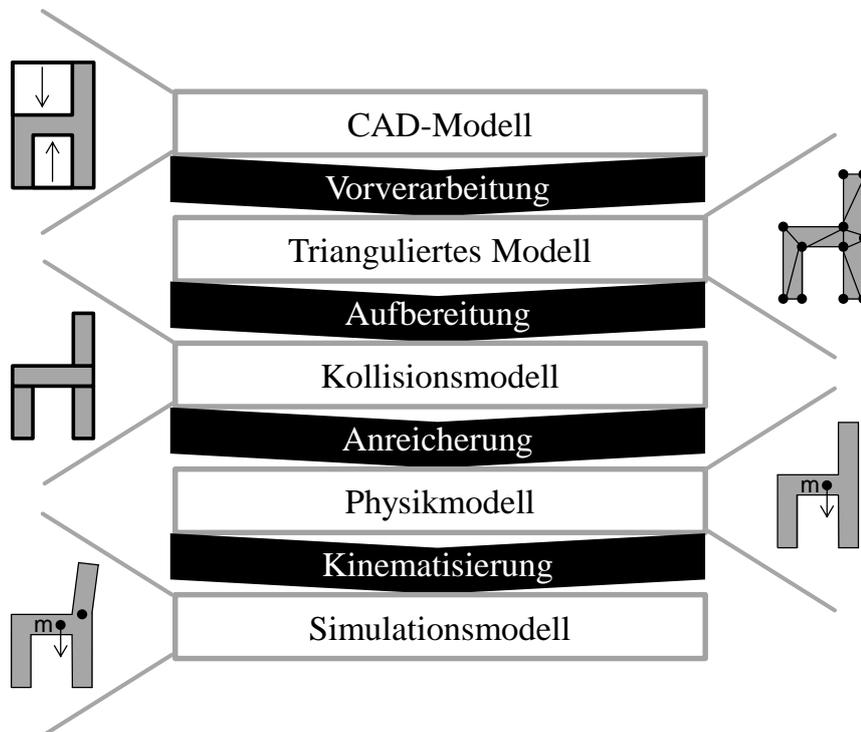


Abbildung 23: Vier Phasen des Modellerstellungsprozesses

5.4.2.1 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung ist der erste Prozessschritt bei der Generierung eines Simulationsmodells aus einem CAD Modell. Wesentlicher Bestandteil des Prozessschritts ist der Export der Baugruppen- und -teilhierarchie sowie die Tessellierung der einzelnen Bauteile.

Tessellierung

Die konstruktiven Elemente des 3D CAD Modells werden innerhalb von Bauteilen definiert, welche im Rahmen des Simulationsmodells in tesselierte Simulationsgeometrien umgewandelt werden. Das Ziel ist die Zerlegung komplexer Geometrien in planare Flächen. Die meist genutzte Methode ist die Triangulation, d. h. die Zerlegung der Oberflächen in Dreiecksnetze. Die bauteilspezifische Tessellierung wird heute von kommerziellen Produkten standardgemäß unterstützt. Aus diesem Grund sei für weiterführende Literatur über die mathematischen Überführungsvorschriften sowie die Reparatur und Rekonstruktion bei auftretenden Fehlern auf die Literatur hingewiesen (LACOUR 2011).

Einen noch nicht betrachteten, kritischen Einfluss auf die Online-Simulation von Fluiden hat die Auflösung des resultierenden Modells. Aufgrund der Reduktion der Modellelemente zu rein planaren Elementen, wird die Modellauflösung durch die Tessellierung bei runden Objekten reduziert (vgl. Abbildung 24).

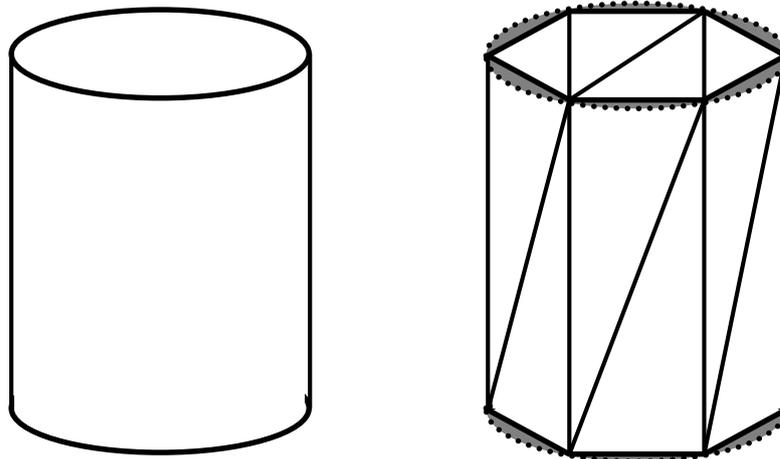


Abbildung 24: Reduktion der Modellauflösung durch Tessellierung

Damit der durch die Modellerstellung entstehende Fehler möglichst reduziert wird, ist es daher notwendig, dass die maximale Abweichung der tesselierten Geometrie $\varepsilon_{\text{Tessellierung}}$ nicht die Auflösung der Simulationsdiskretisierung, in der SPH-Methode bspw. P_G , unterschreitet. Daher soll gelten:

$$\varepsilon_{\text{Tesselierung}} < P_G \quad (5.2)$$

Export der Baugruppen- und Bauteilhierarchie

Die Bauteile sind wie in heutigen CAD Systemen in Baugruppen zusammengefasst. Zur schnellen Online-Simulation von fluidischen Prozessen sind die Modularität sowie die Wiederverwendbarkeit einzelner Konstruktionselemente von essentieller Bedeutung. Um die Verarbeitung und den Export bezüglich der Geschwindigkeit zu optimieren, erfolgt in der Online-Simulation im Gegensatz zu LACOUR (2011) die Vorverarbeitung in der gleichen hierarchischen Struktur. Die Struktur des Simulationsmodells und des CAD Modells sind somit bijektiv. Diese Vorgehensweise birgt zwei Vorteile. Zum einen ist zwischen Simulations- und CAD Modell ein direkter Verweis möglich, d. h. die Kongruenz der Modelle bleibt erhalten. Zum anderen kann der Export der Daten verschlankt werden.

In Abbildung 25 ist die Datenstruktur nach der Vorverarbeitung dargestellt. Das 3D CAD Modell wird in einem baumstrukturähnlichen Szenegraph und eine Liste von Konstruktoren exportiert. Der Szenegraph beinhaltet eine Menge von Baugruppen. Baugruppen können beliebig oft ineinander verschachtelt sein. Die Lokalität und Ausrichtung der Baugruppen wird durch eine harmonische Transformationsmatrix definiert. Auch bleiben weitere Zusammenhänge wie Verknüpfungseigenschaften, Freiheitsgrade oder simulationsspezifische, physikalische Parameter über weitere baugruppenspezifische Parameter erhalten. Gestaffelte Baugruppen müssen mindestens auf der untersten Ebene eine Simulationsgeometrie beinhalten. Die tesselierten Simulationsgeometrien werden separat zum Szenegraphen als Konstruktoren K gespeichert. Bei der Vorverarbeitung neuer Baugruppen erfolgt immer zuerst ein Abgleich mit vorhandenen Konstruktoren zur Sicherstellung des singulären Auftretens. Rein translatorische und rotatorische Differenzen resultieren in einem Verweis auf den Konstruktor im Szenegraphen in Form einer Transformationsmatrix M , während dessen neue oder skalierte tesselierte Simulationsgeometrien neue Konstruktoren K erzeugen. Diese Differenzierung ist aufgrund des variablen und evtl. größeren Diskretisierungsfehlers notwendig.

Bei einer Modellaktualisierung wird das neue CAD Modell zunächst vollkommen losgelöst vom aktuellen Simulationsmodell, d. h. unabhängig vom momentan simulierten Szenegraph einschließlich der jeweiligen Konstruktoren, vorverarbeitet. Somit werden die neuen Daten im Fall einer Modellaktualisierung in

einem temporären Szenegraphen und temporären Konstruktorenvektor abgespeichert.

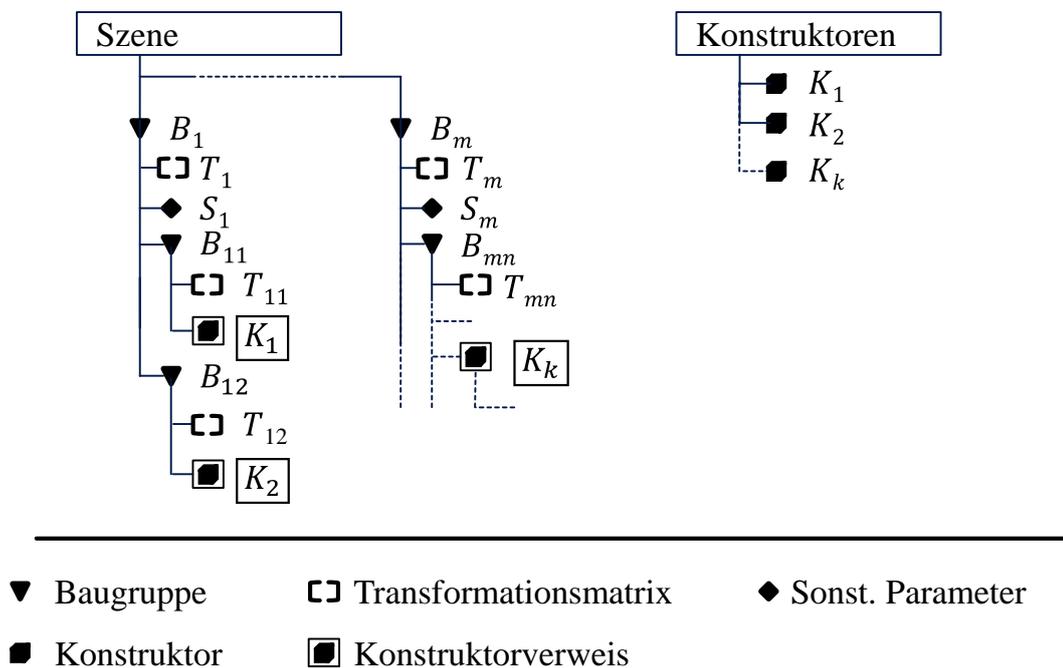


Abbildung 25: Datenstruktur des triangulierten Modells

5.4.2.2 Aufbereitung

Nachdem der Szenegraph sowie die Konstruktoren aus dem CAD Modell extrahiert worden sind, erfolgt als nächster Prozessschritt die Aufbereitung des Kollisionsmodells. Die Aufbereitung definiert im Wesentlichen die Modellreduktion sowie die spätere Berechnungsgeschwindigkeit des Simulationsmodells.

Die Geschwindigkeit der Modellerstellung kann im Wesentlichen durch die Reduktion der notwendigen Berechnungen gesteigert werden. Die Berechnungsgeschwindigkeit der Simulation selbst ist maßgeblich abhängig von zwei Parametern,

- der Anzahl der Simulationsobjekte,
- sowie von der Geometrie der einzelnen Objekte.

Durch eine Vereinfachung der Geometrie und eine Reduktion nicht relevanter Merkmale kann die Simulationsgeschwindigkeit erheblich gesteigert werden (LACOUR 2011, S. 80-89). Jedoch können in der Simulation von Fluiden geometrische Merkmale nicht allgemeingültig reduziert werden, da bspw. bereits kleine geometrische Merkmale wie Verschraubungen Auswirkungen auf das fluidy-

namische Strömungsverhalten haben. Aus diesem Grund und wegen des manuellen Charakters ist der Prozessschritt Ableitung von LACOUR (2011) nicht für die Online-Simulation adaptierbar. Dessen ungeachtet ist der Grundgedanke der Objektvereinfachung zur Reduktion der Berechnungszeit praktikabel. Aus diesem Grund gliedert sich die Aufbereitung des triangulierten Modells hin zum Kollisionsmodell in mehrere Phasen. Abbildung 26 zeigt den prozessualen Ablauf der Teilschritte. Zuerst erfolgt eine Delta-Analyse, welche die Unterschiede zwischen dem aktuellen und neuen Modell untersucht. Diese wird gefolgt durch eine Untersuchung der Konvexität. Anschließend erfolgt der Prozessschritt der Verlinkung. Darüber hinaus wird bei einem konkaven Ergebnis der Konvexitätsanalyse gleichzeitig die konvexe Zerlegung der Geometrie gestartet. Im Folgenden die vier Prozessschritte detailliert dargestellt

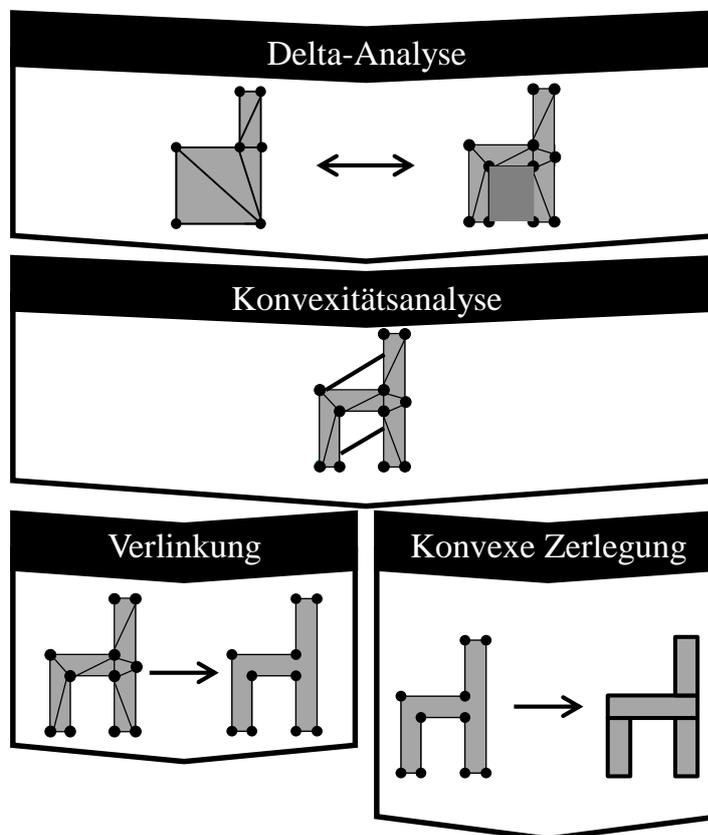


Abbildung 26: Teilschritte der Aufbereitung des triangulierten Modells

Die Durchführung der Prozessschritte erfolgt in Abhängigkeit der Baugruppen bzw. -teile. Darüber hinaus werden je nach aktuellem Simulationsmodell für jedes Bauteil und -gruppe nicht alle Teilschritte durchgeführt. Stattdessen werden in Abhängigkeit der Resultate der individuellen Überprüfungen unterschiedliche Teilschritte durchgeführt.

Delta-Analyse

Die Delta-Analyse stellt den ersten Prozessschritt der Aufbereitung dar. Das primäre Ziel des Prozessschrittes ist das Erkennen und Lokalisieren von Modelländerungen sowie die Klassifizierung der temporären Konstrukteure. Hierfür werden mehrere Überprüfungen durchgeführt, welche in ihrer möglichen Ausprägung in Abbildung 27 dargestellt sind.

Zentraler Bestandteil ist der Abgleich des temporären und aktuellen Konstrukteurenvektors auf den Erhalt der Konstrukteure. Da Modifikationen im CAD Modell auch zu Veränderungen in der Reihenfolge im Strukturbaum führen können, werden die temporären Konstrukteure mit den aktuellen verglichen. Besteht eine gänzliche und eindeutige Übereinstimmung der tesselierten Daten, d. h. alle Koordinaten und Verknüpfungen stimmen überein, so wird der temporäre Konstrukteur dem aktuellen Konstrukteur zugewiesen. Ist dies nicht der Fall, so muss eine genauere Untersuchung der Konstrukteure erfolgen, da diese entweder neue oder veränderte Bauteile oder -gruppen sein können.

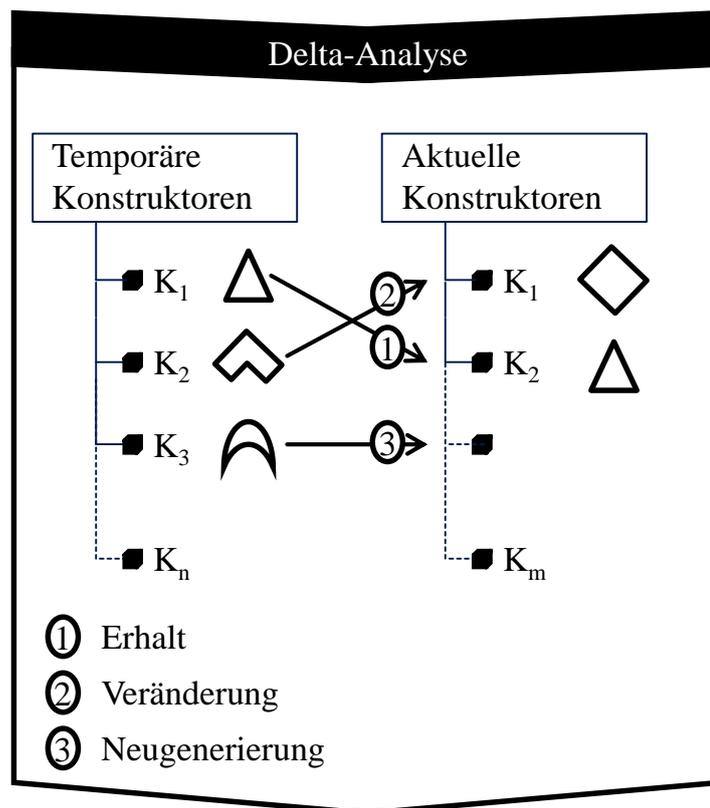


Abbildung 27: Unterschiedliche Erkennungsmerkmale der Delta-Analyse

Aus diesem Grund erfolgt ein Abgleich zwischen dem temporären und aktuellen Konstrukteur, welcher sowohl die Vertices als auch die Kanten beinhaltet. Abbil-

Abbildung 28 stellt die unterschiedlichen zu untersuchenden Möglichkeiten der Geometrieänderungen dar:

- (1) Modifikation der Koordinaten eines Vertices
- (2) Hinzufügen eines Vertices
- (3) Entfernen eines Vertices
- (4) Hinzufügen einer Kante
- (5) Entfernen einer Kante
- (6) Modifikation der Informationen der Kantenverknüpfung

Nach diesem Schritt ist sichergestellt, dass alle noch nicht zugeordneten Konstrukte des temporären Konstruktorenvektors entweder neue oder modifizierte Geometrien beinhalten. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt nach sich stark ähnelnden Konstruktoren gesucht. Unterstützt wird diese Suche durch einen Vergleich der beiden Szenengraphen. Treten mögliche Partnerinstanzen an selbiger Stelle im Szenengraphen auf, ist davon auszugehen, dass es sich beim Kandidaten um ein modifiziertes Bauteil handelt. Bei hoher Übereinstimmung werden darauf hin für eine spätere Weiterverarbeitung Bereiche markiert, welche sich voneinander unterscheiden. Grundlage hierfür sind sowohl die Koordinaten als auch die Verknüpfungen zwischen diesen.

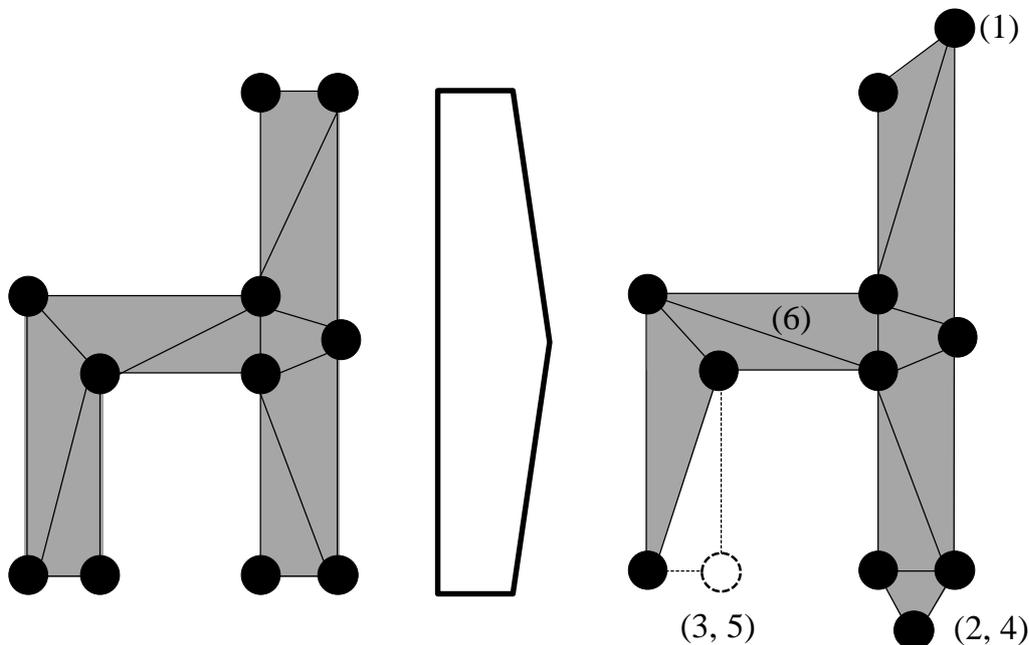


Abbildung 28: Mögliche unterschiedliche Modifikationen einer Geometrie

Da für die verbleibenden Konstruktoren keine genauen oder ähnlichen Gegenstücke gefunden wurden, werden diese zur Neugenerierung markiert. Darüber hin-

aus werden im aktuellen Konstruktorenvektor partnerlose Konstruktoren als obsolet gekennzeichnet. Die weiteren Prozessschritte der Aufbereitung sind konstruktorenspezifisch und hängen direkt von der Klassifizierung der Delta-Analyse ab. Im Fall einer kompletten Übereinstimmung der gefundenen Partner ist keine Neugenerierung des Kollisionsmodells notwendig. Stattdessen kann der bisherige Konstruktor erhalten werden, da eine Modifikation im Simulationsmodell nicht notwendig ist. In den anderen beiden Fällen erfolgt als nächster Schritt die Konvexitätsanalyse der einzelnen Konstruktoren.

Konvexitätsanalyse

Die Konvexität einer Geometrie in der Simulationsdomäne hat in der netzfreien Simulation einen erheblichen Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit. Die Berechnung der Randbedingungen erfolgt in netzfreien Methoden wie die Erkennung von Kollisionen. Aus diesem Grund ist eine Konvexität der Objekte sinnvoll, da somit durch die Broad-Phase in der Kollisionsprüfung eine schnellere Auflösung der Kollision ermöglicht wird.

Daher werden im Prozessschritt der Konvexitätsanalyse die modifizierten oder neugenerierten Konstruktoren auf Konvexität überprüft. Durch die Reduktion der Baugruppeninstanzen auf die singulären Konstruktoren kann der Aufwand des Analyseschritts reduziert werden. Je nach Analyseergebnis erfolgen weitere Prozessschritte: Ist der Konstruktor konvex, so wird das triangulierte Modell ohne weitere Modifikationen als Kollisionsmodell genutzt. In den anderen Fällen erfolgt parallel sowohl der Prozessschritt der Verlinkung als auch die konvexe Zerlegung zur Optimierung der Baugruppengeometrien bzgl. des Berechnungsaufwands. Somit wird das Simulationsmodell im Gegensatz zu heutigen Verfahren permanent bzgl. der Berechnungsgeschwindigkeit verbessert.

Verlinkung

Der Aufwand der konvexen Zerlegung ist sehr hoch und bedarf daher einer langen Berechnungszeit (vgl. Abschnitt 2.3.5). Aus diesem Grund erfolgt die Repräsentanz der Bauteile und -gruppen im Simulationsmodell in einem zweistufigen Verfahren.

Die erste Repräsentanz ist die Verlinkung der planaren Flächen des Konstruktors. Hierfür wird jede planare Fläche des Konstruktors K in einzelne Kollisionsflächen K' zerlegt. Das bedeutet, dass für eine Geometrie mit n triangulierten Flächen n eigenständige Kollisionsflächen generiert werden, welche virtuell in dem Konstruktor K hinterlegt werden. Darüber hinaus werden die einzelnen Kollisi-

onsflächen in den nächsten Prozessschritten wie eigenständige Geometrien behandelt. Um die Struktur der Gesamtgeometrie zu erhalten, werden die Eckpunkte der Kollisionsflächen fix in ihrer Lokalität definiert. Wie in Abbildung 29 dargestellt, werden die neu generierten Flächen zu eigenständigen Strukturen K' transformiert, welche jedoch dem ursprünglichen Konstruktor K eindeutig zugewiesen werden. Darüber hinaus ist die Erzeugung der einzelnen planaren Konstrukturen K' eine einfache Aufbereitung der Flächen aus dem triangulierten Modell. Die Erzeugung der Konstrukturen ist somit mit sehr geringem Zeitaufwand verbunden. Aus diesem Grund ist auch bei komplexen, konkaven Baugruppen eine schnelle Aktualisierung des Simulationsmodells möglich. Diese Konstrukturen sind jedoch nicht zugunsten kurzer Berechnungszeiten der Simulationdurchführung optimiert, da keine Vereinfachung oder Gruppierung der einzelnen planaren Konstrukturen erfolgt.

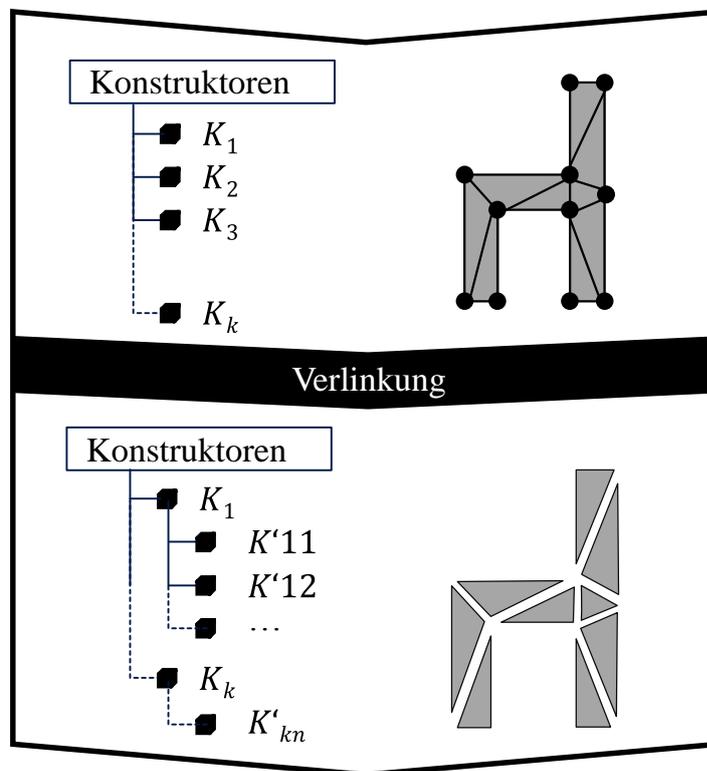


Abbildung 29: Verlinkung und Generierung der planaren Flächen

Konvexe Zerlegung

Da die direkte Verlinkung der Geometrien sehr schnell in einer sehr hohen Anzahl an Kollisionsgeometrien resultiert, wird die Berechnungsgeschwindigkeit aufgrund der vielen Kollisionsüberprüfungen in der Simulationdurchführung schnell stark reduziert. Aus diesem Grund wird in einem parallel ablaufenden

Scheduler nach dem First In First Out-Prinzip die sequentielle Berechnung der konvexen Ersatzkonstruktoren K'' durchgeführt, welche die planaren Konstruktoren in berechnungseffizientere Strukturen zusammenfasst. Diese ersetzen nachfolgend den ursprüngliche Konstruktor K . Die Anzahl der konvexen Ersatzgeometrien ist wesentlich geringer als die Anzahl der einzelnen Kollisionsflächen K' , welche im verlinkten Kollisionsmodell genutzt werden. Somit ist nach der konvexen Zerlegung ein berechnungseffizientes Kollisionsmodell generiert. Sobald dieses zur Verfügung steht, werden die Kollisionsmodelle der Verlinkung durch die konvexen Kollisionsmodelle ersetzt.

Darüber hinaus werden ähnlich der Verlinkung die konvexen Konstruktoren K'' dem ursprünglichen Konstruktor eindeutig zugeteilt (vgl. Abbildung 30).

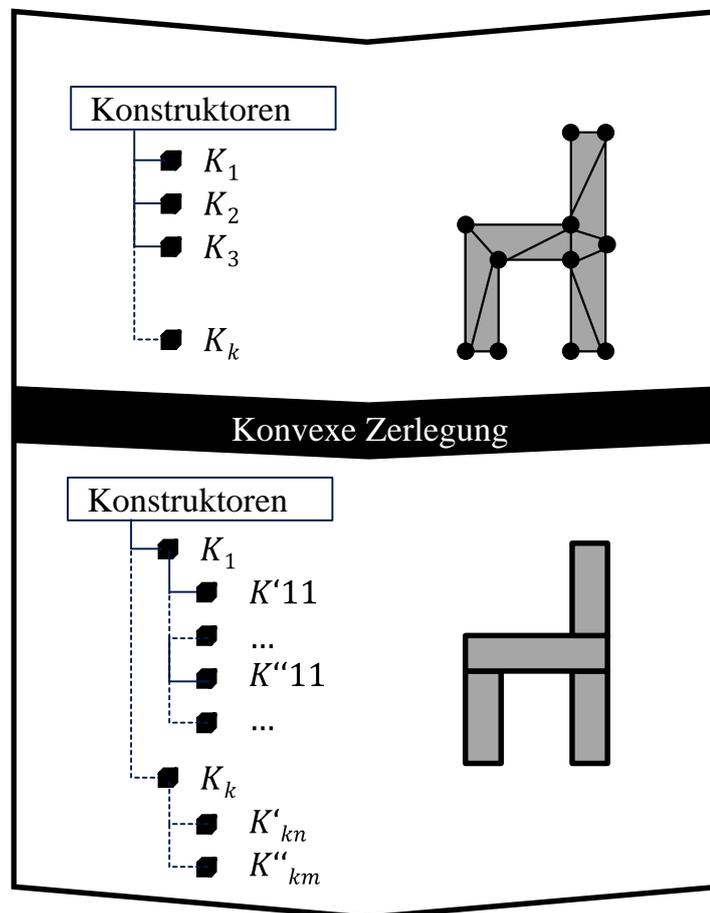


Abbildung 30: Konvexe Zerlegung des triangulierten Modells

Die Generierung der konvexen Ersatzgeometrien kann sowohl durch Algorithmen der exakten oder auch der approximativen konvexen Zerlegung erfolgen, jeweils unter der Prämisse, dass die Toleranz und somit der durch die Zerlegung eingeführte Fehler geringer ist als die Auflösung der Partikel. Da die konvexe

Zerlegung sehr berechnungsaufwändig ist, ist eine weitere Möglichkeit die Zerlegung der konkaven Geometrie in Ersatzgeometrien mit geringerem Konkavitätsgrad.

5.4.2.3 Anreicherung

Ausgehend von den in der Aufbereitung erzeugten Kollisionsmodellen erfolgt in der nächsten Phase die Anreicherung der Geometrien mit relevanten physikalischen Parametern. SPITZWEG (2009) folgend können dem resultierenden Physikmodell Parameter wie bspw. Massen und Massenschwerpunkte, aber auch Oberflächeneigenschaften, hinterlegt werden. Die notwendigen Daten können zum einen direkt aus dem 3D CAD Modell als sonstige Parameter extrahiert werden. Optional kann sowohl eine manuelle als auch datenbankunterstützte, bspw. mit Hilfe eines Produktdatenmanagement(PDM)-Systems, die Eingabe erfolgen. Sind bei initialem Bauteilaufreten weder im CAD Model als auch im PDM-System Daten hinterlegt, so wird auf vorab definierte Standardmaterialwerte zurückgegriffen, welche online modifiziert werden können.

Jedoch ist in der Online-Simulation aufgrund der Zerlegung der importierten Konstruktoren eine objektorientierte Zuweisung physikalischer Parameter nicht mehr korrekt. Wie in Abbildung 31 dargestellt, besteht das verlinkte Kollisionsmodell nur aus einer Vielzahl von 2D-Flächen, wodurch sich eine Masse nicht definieren lassen würde. Darüber hinaus besteht das konvex zerlegte Modell aus mehreren Geometrien, welche ihre jeweiligen eigenen Parameter besitzen, bspw. Massen sowie Massenschwerpunkte. Aus diesem Grund werden die einzelnen Parameter der Geometrien auf die ursprüngliche Geometrie projiziert.

Somit wird sichergestellt, dass das Verhalten der individuellen Geometrien in der CFD-Simulation trotz der Modifikationen zu Gunsten der Berechnungszeiten weiterhin korrekt ist. Darüber hinaus kann sich das Ergebnis der konvexen Zerlegung je nach eingesetztem Algorithmus unterscheiden. Durch die Projektion der physikalischen Parameter wird somit zusätzlich sichergestellt, dass das physikalische Verhalten unabhängig von der internen Neuordnung der geometrischen Struktur ist.

Nach der Anreicherung des Kollisionsmodells mit physikalischen Parametern hin zu einem Physikmodell, kann das Modell als starre Struktur in die Simulationsumgebung übernommen werden.

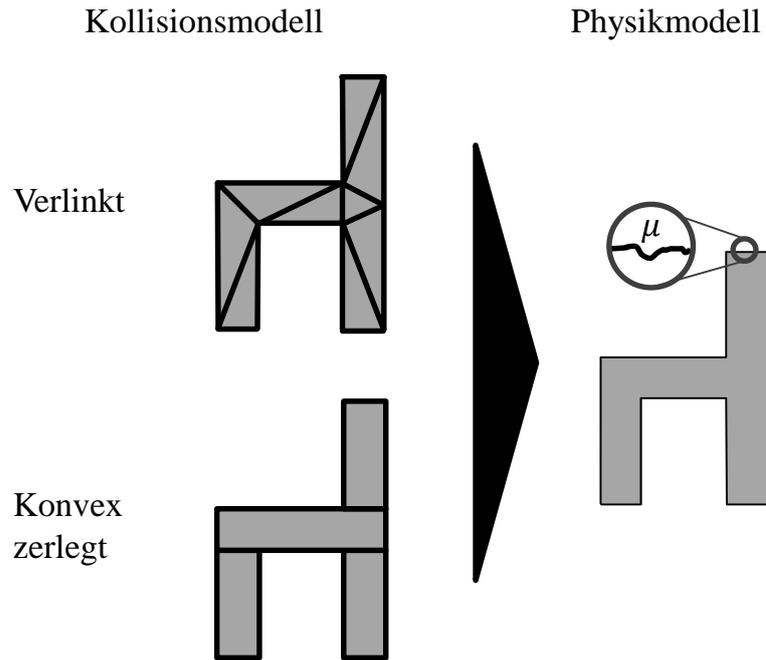


Abbildung 31: Projektion der unabhängigen Parameter der Kollisionsmodelle in ein ganzheitliches Physikmodell

5.4.2.4 Kinematisierung

Um jedoch bereits in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses erste einfache Abläufe simulieren zu können, ist es notwendig, dass einfache Zusammenhänge zwischen den Bauteilen und -gruppen als einfache Bewegungsabläufe ermöglicht werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, die einzelnen Elemente des Szenengraphen zueinander in Beziehung zu bringen. Unterschieden wird zwischen einer aktiven und passiven Kinematik. Die jeweiligen Kinematiken werden spezifisch nach Bauteil und -gruppen eingeordnet (vgl. Abbildung 32). Darüber hinaus kann durch die interaktive Kinematisierung auch zyklisches Verhalten, bspw. das Erscheinen von Bauteilen aus Quellen, definiert werden.

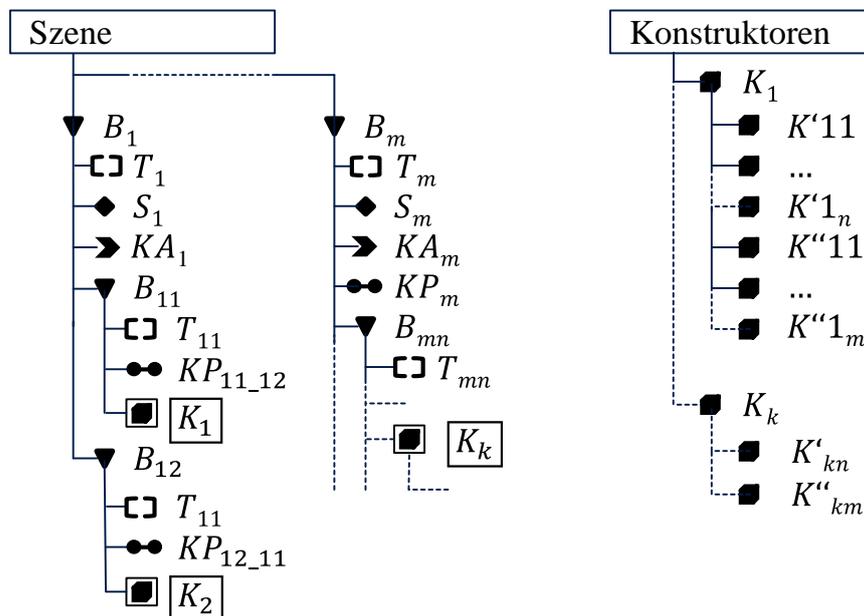
Passive Kinematik

Passive Kinematiken ermöglichen die Übertragung des Bewegungsverhaltens zwischen den einzelnen Bauteilen und -gruppen innerhalb eines Simulationsmodells. Durch passive Kinematiken ist somit die gegenseitige Beeinflussung zweier Bauteile bzw. -gruppen zueinander, bspw. anhand von Gelenken, definiert. Die Definition kann sowohl manuell im Simulationsmodell oder direkt im CAD Modell erfolgen. Die daraus resultierende Einschränkung sowie die Übertragung auf das Physikmodell erfolgen ähnlich den Methoden aus der physikbasierten

Simulation (LACOUR 2011, SPITZWEG 2009). Zur schnelleren Auflösung der passiven Kinemattketten werden die passiven Kinematiken immer bei beiden Baugruppen hinterlegt. Folglich muss in der Simulation bei auftretenden Kräften nicht der gesamte Szenegraph nach kinematischen Zusammenhängen durchsucht werden.

Aktive Kinematik

Zur Darstellung von Prozessen ist es notwendig, dass auch präzise Abläufe und Bewegungen durch aktive Kinematiken, bspw. Motoren, in die Simulation integriert werden können. Zur Funktionsüberprüfung ist jedoch eine präzise Definition der genauen Antriebstypen in der frühen Phase noch nicht notwendig.



-
- ▼ Baugruppe □ Transformationsmatrix ◆ Sonst. Parameter
 - Konstruktor ➤ Aktive Kinematik ●● Passive Kinematik
 - Konstruktorverweis

Abbildung 32: Vollständiger Szenegraph und Konstruktorenvektor als Resultat der Simulationvorbereitung

Oftmals erfüllen bereits simple Bewegungsabläufe die Anforderungen. Im Gegensatz zur Methode nach LACOUR (2011) können aus diesem Grund die Bewegungsabläufe in der laufenden Simulation online angepasst werden, d. h. die Modifikation der Kinematik erfordert keine vollständige Neugenerierung des Simulationsmodells. Stattdessen können die Bewegungsabläufe der Simulation

online interaktiv angepasst werden. Die Bewegungsabläufe (aktive Kinematiken) werden baugruppenspezifisch im Szenegraphen hinterlegt, wobei sich Bewegungen auf untergeordnete Baugruppen und -teile vererben.

Zur einfachen Erstellung von Bewegungsabläufen, aber auch zur Definition von Simulationsspezifika, kann ein interaktiver Motioneditor genutzt werden (STICH ET AL. 2015). Statt über komplexe Gleichungen und Kräfteverhältnisse Bewegung zu definieren, können zur Definition der Bewegungsabläufe in der Online-Simulation Ansätze aus der Animation von Filmen genutzt werden, welche heute im ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen nur in der Robotik bekannt sind (WILHELMS 1986). Dabei wird auf visuelle Art und Weise ein einfaches Positions-Zeit-Diagramm erstellt, welches zyklische Wiederholungen erlaubt.

Durch die interaktive Veränderung der Bewegungsbahnen kann der Anwender sofort die Auswirkungen veränderter Konzepte und Pläne am Simulationsmodell verfolgen. Das Positions-Zeit-Diagramm wird nach jeder Änderung dem jeweiligen Physikmodell zugeordnet. Somit wird bei einer Aktualisierung des Bewegungsverlaufes nicht das ganze Modell neu generiert. Stattdessen muss nur die aktive Kinematik überschrieben werden.

5.4.3 Modellaktualisierung in der Simulation

Das Simulationsmodell kann zu Beginn eines jeden Simulationszyklus modifiziert werden. Als Grundlage für die Modellaktualisierung dient das Simulationsmodell, welches in der Simulationsvorbereitung unabhängig von der parallelen Simulationsdurchführung berechnet wurde. Somit werden die vorab unabhängig präparierten fluidischen und geometrischen Simulationsmodelldaten genutzt.

Die fluidischen Präparationen wie Quellen und Senken können direkt im Simulationsmodell übernommen werden.

Im Gegensatz dazu kann die Modifikation der Geometrien unterschiedliche Auswirkungen auf die Simulation haben. Eine Modifikation einer Geometrie ist grundsätzlich mit einer Addition oder Subtraktion der räumlichen Maße der Konstruktoren verbunden. Diese können je nach Anwendungsfall die Simulation stören und zur Notwendigkeit eines Neustarts mit veränderten Anfangsbedingungen führen. Der Grund hierfür ist, dass je nach Modifikation Energie der Simulation hinzugefügt oder entfernt wird. Dies ist die Folge der Änderungen der geometrischen Randbedingungen.

Abbildung 33 stellt zwei Verfahrensweisen zur Reduktion der Verfälschung der Simulationsergebnisse bei der Vergrößerung der Geometrie dar. In diesem Beispiel ist die instanziierte Geometrie des Konstruktors K^{alt} von Fluid umgeben und soll in K^{neu} umgewandelt werden. Durch eine direkte Übernahme des Konstruktors K^{neu} in die Simulation überschneidet sich diese vom fluidbesetzten Raum und der instanziierten Geometrie. Dieser Fall ist ein undefinierter und somit nicht erlaubter Zustand und führt zu Instabilitäten der Simulation. Der Zustand kann durch die Verfahrensweisen Remotion bzw. Motion verhindert werden. Bei der Remotion wird das Fluid, welches sich in der Geometrie befindet, in einer virtuellen Senke vernichtet. Durch die Maßnahme reduziert sich jedoch die Gesamtmasse des Fluids, welches von kritischen Verfälschungen bis hin zur Unbrauchbarkeit der Ergebnisse führt. Dies ist der Fall, wenn die Gesamtmasse ein Untersuchungsparameter des spezifischen Anwendungsfalls ist.

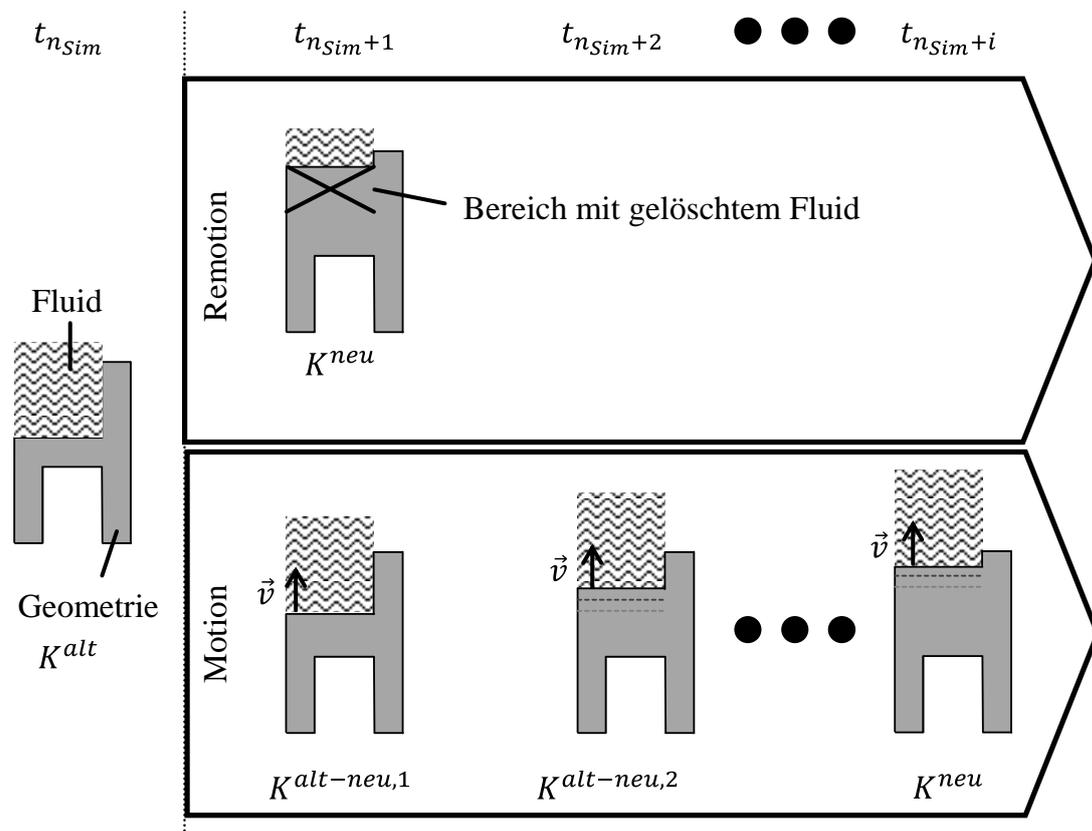


Abbildung 33: Verfahrensweisen zur Geometrieaddition in fluidbesetzte Räume

In diesen Fällen kann durch die Maßnahme der Motion Abhilfe geschaffen werden, welche auch für den Fall der Subtraktion der räumlichen Maße von Relevanz ist. Statt einer sofortigen gesamtheitlichen Übernahme des neuen Konstruk-

tors K^{neu} wandelt sich der Konstruktor über mehrere Zeitschritte. Die Wandlungsgeschwindigkeit ist für die Menge der zugeführten Energie ein wichtiger Faktor. Jedoch wird auch in diesem Fall durch die Zuführung von Energie in das Fluid die Simulation verfälscht. Die Maßnahme eignet sich daher nicht, wenn die Gesamtenergie des fluidischen Prozesses im Fokus steht. Falls sich durch die Maßnahmen induzierte Verfälschungen nicht im Laufe der weiteren Simulation entfernen, bspw. durch das Hinzufügen neuen Fluids aus einer definierten Quelle, so muss die Simulation mit dem aktuellen Modell und somit neuen Startbedingungen neu gestartet werden.

5.5 Ergebnisanalyse

Die Analyse der Ergebnisse folgt in der Online-Simulation von fluidischen Prozessen den bewährten Methoden der Offline-Simulation. Aus diesem Grund müssen wegen der Komplexität und Varietät der Anwendungen sowohl eine graphische 3D-Darstellung als auch diagrammbasierte Möglichkeiten zur Analyse der Simulationsergebnisse bereitgestellt werden. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls und der zu betrachteten Größen sind beispielsweise folgende Möglichkeiten notwendig (LECHELER 2014, S. 109, NIEBLING 2014):

- Visualisierung von Strömungen und freien Oberflächen in Form von Partikeln
- Visualisierung des Strömungsverhaltens in Form von Stromlinien und Strömungsvektoren
- Visualisierung skalarer Größen, z. B. Druck, durch Isoflächen
- Zeitdiagramme zur Darstellung der errechneten Größen wie beispielsweise Druck auf der Oberfläche

Im Gegensatz zu heutigen Offline-Simulationen, deren Analyseprozess sequentiell dem Syntheseprozess folgt, werden die Ergebnisse dem Nutzer sofort visualisiert, d. h. neue Zwischenergebnisse sind nach jedem Zeitschritt für den Anwender verfügbar. Somit ist eine sofortige Wissensgenerierung bereits auf Basis von Teilschritten möglich.

Der Anwender kann die große Informationsmenge der komplexen Simulationen nicht sofort erfassen. Aus diesem Grund erfolgt nach jedem Zeitschritt eine histogrammbasierte Aufzeichnung, welche für Feinanalysen genutzt werden kann. Das heißt, der Syntheseprozess, welcher die Ergebnisse berechnet, und der Analyseprozess sind voneinander entkoppelt. Abbildung 34 visualisiert den Zusam-

menhang zwischen der Simulationsdurchführung und der Ergebnisdarstellung. Alle Ergebnisse des Syntheseprozesses werden in einer Ergebnisdatenbank, bspw. die aktuellen Geometriedaten sowie die Fluidinformationen mit den entsprechenden physikalischen Größen, gesichert. Auf dieser Grundlage erfolgt unabhängig und entkoppelt die Datenaufbereitung für den Anwender. Somit ist eine Parallelisierbarkeit der Simulationsdurchführung und der Analyse möglich. Darüber hinaus ist der intuitive WYSIWYG-Ansatz erfüllt, wenn die Ergebnisse der Simulationsdurchführung dem Anwender direkt visualisiert werden und die Berechnungszeit eines Zeitschrittes $\Delta t_{\text{Berechnung}}$ kleiner ist als der Simulationszeitschritt Δt .

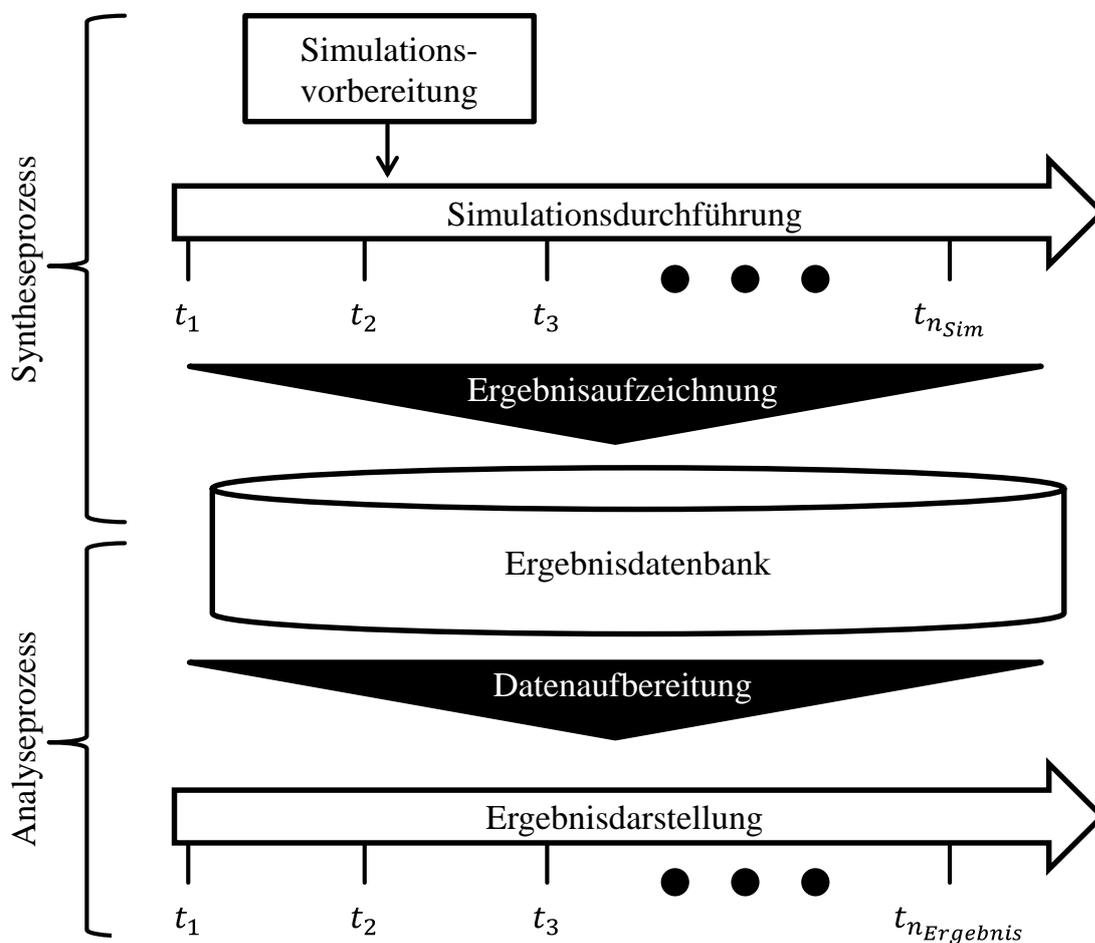


Abbildung 34: Zeitliche Abhängigkeit zwischen der Simulationsdurchführung und Ergebnisdarstellung

5.6 Nutzung der Hardwareressourcen

Die Simulation von Fluiden hat aufgrund der inhärenten Komplexität pro Zeitschritt einen großen Berechnungsaufwand und stellt heutige Workstations in

Maximalkonfiguration vor große Herausforderungen. Aus diesem Grund ist für den Online-Nutzung der Methode eine effiziente Nutzung der für den Anwender zur Verfügung stehenden Computerhardware notwendig.

Heutige Workstations beinhalten meist sowohl eine CPU als General als auch eine GPU. Wie in Abschnitt 2.3.1 dargestellt, eignet sich die CPU als Generalist zur Abarbeitung unterbrechbarer, unterschiedlichster Aufgaben. Der Fokus der GPU wiederum liegt auf der parallelen Berechnung gleicher Aufgaben.

Analysiert man die drei simulationsrelevanten Prozessschritte (Vorbereitung, Durchführung und Darstellung), so unterscheiden sich diese grundsätzlich in ihrer Auftrittshäufigkeit (KROTIL & REINHART 2015):

- Die Simulationsvorbereitung ist nur bei einer Änderung der vom Nutzer gegebenen Randbedingungen notwendig. Eine Vorhersage sowohl über den Eintritt als auch über die fallspezifischen Aufgaben ist nicht möglich.
- Die Simulationsdurchführung ist aufgrund der Grundbeschaffenheit der Online-Simulation ein permanent durchgeführter Prozessschritt. Dieser besteht im Wesentlichen in der Durchführung gleicher Berechnungsschritte. Die individuellen Berechnungsschritte sind unabhängig von Modellspezifika.
- Der Prozessschritt der Ergebnisdarstellung ist durch den Einsatz der Datenbank von der Simulationsdurchführung entkoppelt und kann in Abhängigkeit des Nutzers zyklisch und azyklisch geprägt sein. Zyklisches Auftreten ist beispielsweise bei der Online-Betrachtung des aktuellen Simulationsfortschrittes gegeben. Im Gegensatz hierzu ist eine Auswertung globaler Werte, wie bspw. Maxima, azyklisch historienbasiert.

Durch die Projektion des Auftrittsverhaltens ergeben sich die zur Durchführung am besten geeigneten Hardwareressourcen (vgl. Tabelle 4). Das hohe Potential der GPU zu hoher Parallelisierung gleicher Aufgaben kann durch die Beschränkung auf zyklische und prädestinierte Berechnungsschritte genutzt werden. Die CPU berechnet die azyklischen Aufgaben wie bspw. die Modellaufbereitung oder die Berechnung von historienbasierenden Auswertungen. Eine Ausnahme bildet die Initialisierung. Diese tritt nur einmalig (also azyklisch) auf, jedoch erfolgen in diesem Prozessschritt Analysen über die Hardware. Aus diesem Grund benötigt dieser Prozessschritt beide Hardwareressourcen.

Prozessschritt	Auftreten		Hardwareressource	
	zyklisch	azyklisch	CPU	GPU
Initialisierung		X	X	X
Simulationsvorbereitung		X	X	
Simulationsdurchführung	X			X
Ergebnisdarstellung	X	X	X	X

Tabelle 4: Auftreten der Prozessschritte und Projektion auf die Hardwareressourcen

5.7 Prozessuale und technische Integration in den Entwicklungsprozess

Um die Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der Industrie einzusetzen, muss diese sowohl technisch in die bestehende Softwareinfrastruktur als auch prozessual in den Entwicklungsprozess eingegliedert werden.

5.7.1 Prozessuale Integration in den Entwicklungsprozess

Die Entwicklung mechatronischer Systeme umfasst mehrere Abstraktionsebenen, von der Mikro- bis hin zur Makroebene (Abschnitt 3.1). Im Folgenden wird die Integration der Online-Simulation in die drei unterschiedlichen Abstraktionsebenen eingliedert.

Integration in die elementaren Denk- und Handlungsabläufe

Die elementaren Denk- und Handlungsabläufe repräsentieren das meist unbewusste Agieren des Ingenieurs in kurzen Zyklen. In Abschnitt 3.1.1 werden hierzu unterschiedliche Theorien aus den Arbeitswissenschaften vorgestellt, welche in ihren Grundzügen dem Trial-and-Error-Prinzip folgen.

Auf der Denkebene kann repräsentativ für die unterschiedlichen Theorien die Online-Simulation in das TOTE-Modell integriert werden, welches die Grundlage für unterschiedliche weitere Theorien ist. Das TOTE-Prinzip modelliert für unbekannte Lösungen den menschlichen Denkprozess als ein iteratives Testen der Lösung. Stellt der Mensch Diskrepanzen in der vorhandenen Lösung fest, so erfolgt ein Verbesserungsprozess; bei Kongruenz wird der Prozess beendet.

Wie in Abbildung 35 dargestellt, kann die Online-Simulation gut in das vorhandene Denk- und Handlungsablaufmodell integriert werden. Heutige Offline-Simulationen folgen grundsätzlich dem TOTE-Modell, wobei vor allem die Zykluszeit sehr lange und dadurch nicht dem menschlichen Wesen nachempfunden ist. Die Online-Simulation gliedert sich in gleicher Weise in den Prozess des TOTE-Modells ein, jedoch ist der Diskrepanzzyklus, d. h. die Dauer zwischen zwei Evaluierungsphasen (Test), durch die Online-Simulation reduziert, wodurch der Ablauf des unterbewussten Vorgehensmodells durch technische Hilfsmittel unterstützt wird. Die Ausführungsphase (Operate) deckt die Konzeptänderungen ab, welche gleichzeitig simulativ erprobt werden. Im Gegensatz zu heutigen Verfahren ist hervorzuheben, dass sich die Zykluszeit zwischen der Test- und Ausführungsphase $t_{syn-Ana}$ reduziert, was den schnellen unbewussten Verhaltensmechanismen entspricht.

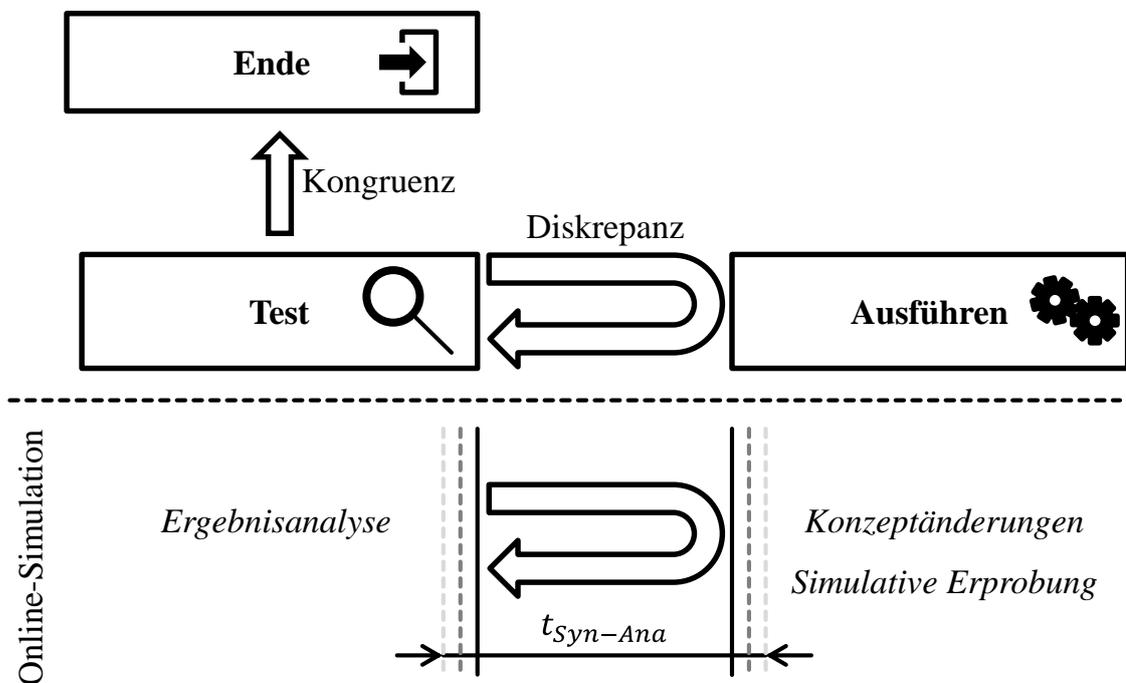


Abbildung 35: Prozessuale Integration in die Denk- und Handlungsabläufe am Beispiel des TOTE-Modells

Integration auf operativer Ebene

Darüber hinaus kann die Online-Simulation von fluidischen Prozessen auch auf höherer Abstraktionsebene in den mechatronischen Entwicklungsprozess integriert werden. Die unterschiedlichen Methoden auf operativer Ebene gliedern sich im Wesentlichen in die drei Phasen

1. Ziel bzw. Problem definieren (Zielsuche)
2. Lösungsalternativen generieren (Lösungssuche) und
3. Entscheidung herbeiführen (Auswahl).

Ein Problem in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses ist oftmals die Generierung einer validen Wissensbasis, welche jedoch für eine gute Entscheidungsfindung notwendig ist.

Somit ist die Online-Simulation zur Generierung der Lösungsalternativen einsetzbar, wobei während der Konzeption der Ideen die Überprüfung der Anforderungen und Funktionsweisen für eine spätere Bewertung abgeleitet werden kann. Darüber hinaus eignet sich die schnelle Simulation zu ersten Parametrisierungen und genaueren Dimensionierungen, wodurch die Konzepte bereits in dieser Phase weiter präzisiert werden können.

Integration in die Phasenmodelle im Produktentwicklungsprozess

Die Online-Simulation von fluidischen Prozessen ist eine Simulation für die frühen Phasen, in welcher eine schnelle, hinreichend genaue Aussage bezüglich des tendenziellen Verhaltens im Fokus steht. Zur Integration in den Produktentwicklungsprozess wird das Vorgehen der VDI 2206 herangezogen, da die meisten Maschinen und Anlagen mechatronische Produkte sind. Die Online-Simulation eignet sich hauptsächlich in den Phasen des Systementwurfs zu einer ersten, interdisziplinären Auswahl von Konzepten, sowie einer ersten Konzeptionierung der mechanischen Strukturen (vgl. Abbildung 36). Auch profitiert die Elektro- und Informationstechnik aus den bereits konzeptionell untersuchten kinematischen Abläufen und Abhängigkeiten. Durch die Unterstützung der Simulation sowie die schnelle Modellbildung kann der in der VDI 2206 definierte Systementwurf in unterschiedlichen Aspekten unterstützen.

Prozessual kann die Entwicklung neuer Anlagen und Maschinen in einem interdisziplinären Team besser abgestimmt werden. Aufgrund der hohen Simulationszeiten und somit langen Synthese-Analyse-Phasen ist ein permanent interdisziplinäres Entwickeln in der frühen Phase heute nur schwer und unter Verzicht von Simulationen praktikabel. Die Konzepte werden von Ingenieuren entwickelt und später von Simulationsexperten simuliert. Die Auswertung erfolgt anschließend interdisziplinär. Durch die Online-Simulation wird dieser Prozess synchronisiert, da Ingenieure in Absprache mit dem Simulationsexperten synchron die Modelle modifizieren können. Die Ingenieure, deren Fokus auf der funktionalen Betrachtung der Konzepte liegt, können sowohl kinematische als auch geometrische

Methode zur Online-Simulation fluidischer Prozesse in der frühen Phase

Modifikationen online vornehmen. Der Simulationsexperte selbst muss die Randbedingungen sowie die Fluidparameter konfigurieren.

Durch das direkte simulative Feedback kann somit die Erkennung von wesentlichen Problemen und Herausforderungen intuitiv optimiert und das mikrozyklische Trial-and-Error-Vorgehen unterstützt werden. Darüber hinaus wird die Kommunikation der unterschiedlichen mechatronischen Disziplinen durch die visuelle Darstellung verbessert. Des Weiteren erfolgt in dieser Prozessphase die Bewertung der unterschiedlichen Lösungsprinzipien, welche durch die Schaffung einer validen Datengrundlage simulativ unterstützt wird.

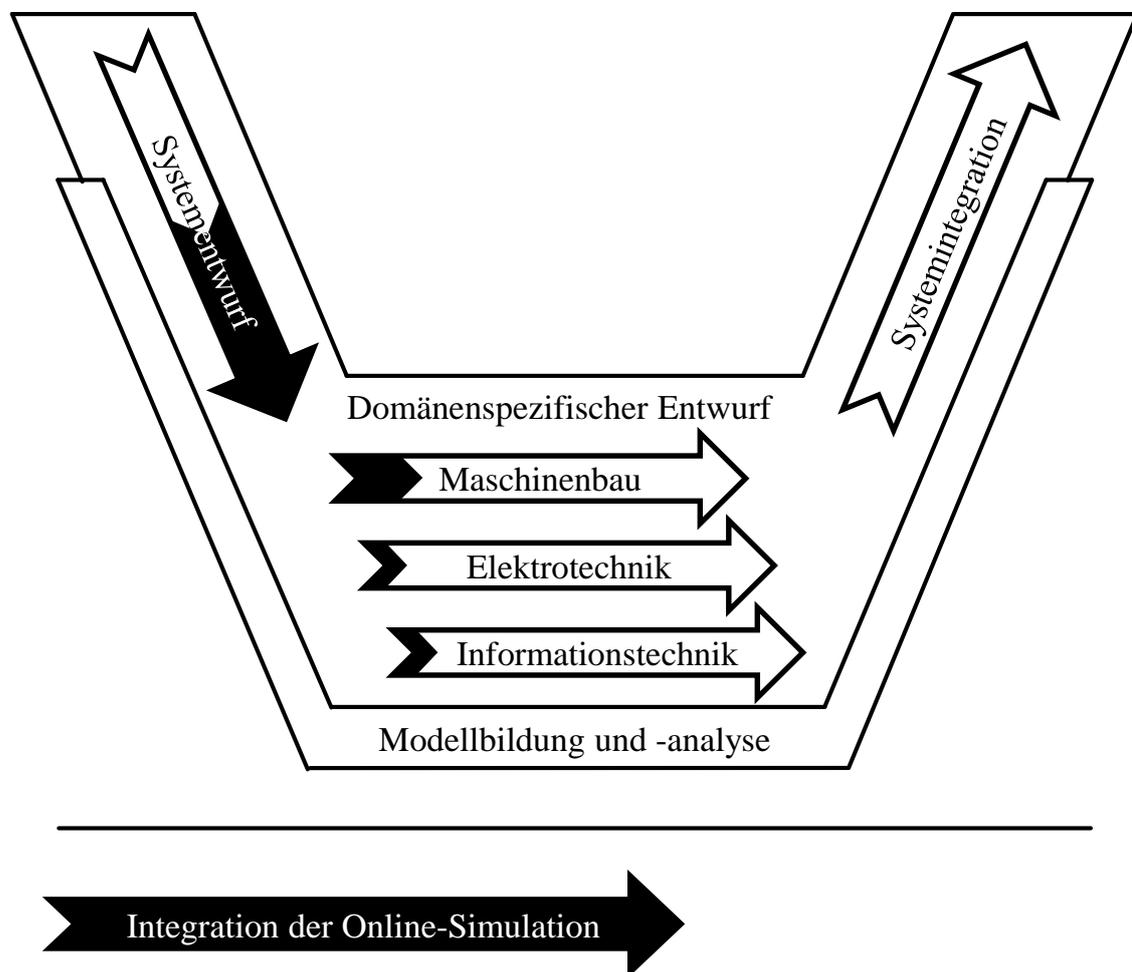


Abbildung 36: Prozessuale Integration der Online-Simulation in den Produktentwicklungsprozess am Beispiel des Vorgehens nach VDI 2206

5.7.2 Technische Integration in die Softwareinfrastruktur

Um den technischen Anforderungen an eine Online-Simulation gerecht zu werden, ist es notwendig, dass sich Implementierung und Umsetzung der Methode in die technische Infrastruktur einbinden. Durch die Untersuchung der Hardwarekonfiguration in der Initialisierungsphase kann sich die Simulation an die gegebene Infrastruktur anpassen. Darüber hinaus ermöglicht der direkte Import der CAD Modelle in Bezug auf die geometrische Modellbildung eine Wiederverwendung der bereits vorhandenen Modelle. Die Einbindung der aktiven Kinematiken und der fluidischen Quellen und Senken kann direkt sowohl durch fremde Wissensquellen wie auch durch eine graphische Konfigurationsoberfläche geschehen. Somit kann aufgrund der offenen Schnittstellen die direkte Einbindung in bereits vorhandene PDM-Systeme erfolgen.

Zudem ist die Ergebnisdarstellung durch die Entkopplung des Synthese- und Analysezyklus in vorhandene Systeme integrierbar. Die Simulationsresultate können in vorhandene Datenbanken eingebunden werden. Darüber hinaus kann die graphische Auswertung der Simulationsresultate sowohl in einer eigenen graphischen Oberfläche als auch innerhalb eines Konstruktionsprogrammes visualisiert werden.

5.8 Zusammenfassung

Das Kapitel umfasst die Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung. Nach einer Darstellung des Gesamtkonzeptes werden die einzelnen unterschiedlichen Methodenbausteine vorgestellt.

Als erster Prozessbaustein wird die Initialisierung beschrieben. Aufgrund der Varianz der unterschiedlichen Hardwareausstattungen der Entwicklungsworkstations analysiert der vorgelagerte Prozessschritt einmalig die Infrastruktur, um die Simulationsparameter anzupassen. Darüber hinaus erfolgt die Darstellung des Ablaufs der Simulationsdurchführung, welche die Berechnung des Simulationsalgorithmus, d. h. die Lösung der Differentialgleichungen der Navier-Stokes Gleichung, umfasst und somit zentraler Bestandteil der Methode ist. Da im Gegensatz zu bisherigen Methoden in jedem Simulationszyklus das Simulationsmodell modifizierbar und das Ergebnis analysierbar ist, besteht ein direkter Informationsaustausch mit der Simulationsvorbereitung. Diese umfasst die fluidspezifi-

schen Präparationen wie die Definition von Quellen und Senken sowie die Parametrisierung des Fluids. Darüber hinaus wird das fünfstufige Vorgehen zur Modifikation des geometrischen Simulationsmodells vorgestellt. Das Vorgehen basiert im Gegensatz zu heutigen Verfahren auf der bedarfsgerechten Modifikation, in welcher nur Veränderungen gegenüber dem bereits existierenden Simulationsmodell betrachtet werden. Des Weiteren erfolgt eine stetige, im Hintergrund parallel ablaufende Optimierung des Simulationsmodells bezüglich der Berechnungsgeschwindigkeit netzfreier Simulationsmethoden auf Basis der konvexen Zerlegung. Ein weiterer Aspekt ist die Kinematisierung des Modells.

Auch wird der Prozess der Ergebnisanalyse dargestellt, welcher durch die datenbankbasierte Entkoppelung der Simulationssynthese und -analyse die Notwendigkeit eines sequentiellen Vorgehens heutiger Methoden eliminiert. Abschließend wird die prozessuale und technische Integration der Methode in den heutigen Entwicklungsprozess beschrieben. Aufgrund des gesteigerten Systemverständnisses profitieren durch die vorgestellte Methode sowohl die Phase des Systementwurfs als auch die anfänglichen Prozesse der domänenspezifischen Entwürfe.

6 Umsetzung und Evaluierung der Methode

In diesem Kapitel wird anhand eines Anwendungsbeispiels die Methode evaluiert. In einem ersten Schritt erfolgt die Auswahl eines repräsentativen Anwendungsfalls. Darauf aufbauend wird eine Simulationsmethode abgeleitet und vorgestellt, welche für die Evaluierung zwingend notwendig ist. Der Fokus des folgenden Kapitels ist die Umsetzung und Evaluierung der Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen, d. h. der Modifizierbarkeit des Simulationsmodells in der laufenden Berechnung. Hierbei wird sowohl die Funktionalität der gesamten Implementierung dargestellt als auch der Nutzen einzelner Prozessschritte quantifiziert.

6.1 Auswahl eines Anwendungsfalls

Zur Validierung der Methode, zur Evaluierung der Prozessbausteine und zur Quantifizierung des Nutzens einzelner Methodenschritte ist wie in Kapitel 4 beschrieben eine Auswahl der spezifischen Simulationsmethode aus der Simulationsmethodenklasse notwendig. Als Kriterium zur Auswahl fungiert die Validität der Simulation unter Erfüllung der anwendungsspezifischen Anforderungen.

Der Anwendungsfall dient der Validierung der implementierten Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen. Folgende Grundkriterien werden der Auswahl zugrunde gelegt:

- Hohe Industrierelevanz sowie eine möglichst hohe Anzahl ähnlicher Problemstellungen
- Gute Überprüfbarkeit der Ergebnisse und der Methode, sowohl analytisch als auch durch reale Messwerte
- Simplizität, wodurch in der Modellbildung eine Beschränkung des Modells auf alle wesentlichen Faktoren zur Vermeidung von nicht kalkulierbaren Einflussgrößen gesichert wird.
- Vollständigkeit, welche eine Überprüfung aller relevanten und fokussierten Eigenschaften sichert.

Unter dem Aspekt der Kriterien wird ein einfacher Abfüllprozess ausgewählt, welcher in Abbildung 37 dargestellt ist. Bei Raumtemperatur fließt ein Fluid (Wasser) vom Becken 1 über eine Kante mit der Fallhöhe h_{Fall} in das Becken 2. Durch ein Ventil kann der Prozess gestartet und gestoppt werden.

Es handelt sich somit um eine Mehrphasenströmung im Rahmen einer freien Oberfläche, welche die Betrachtung der Oberflächenspannung erzwingt. Darüber hinaus kann aufgrund der geringen Geschwindigkeiten eine Inkompressibilität der newtonschen Fluide angenommen werden. Da eine konstante Temperatur vorherrscht, kann der Einfluss möglicher Temperaturveränderungen negiert werden.

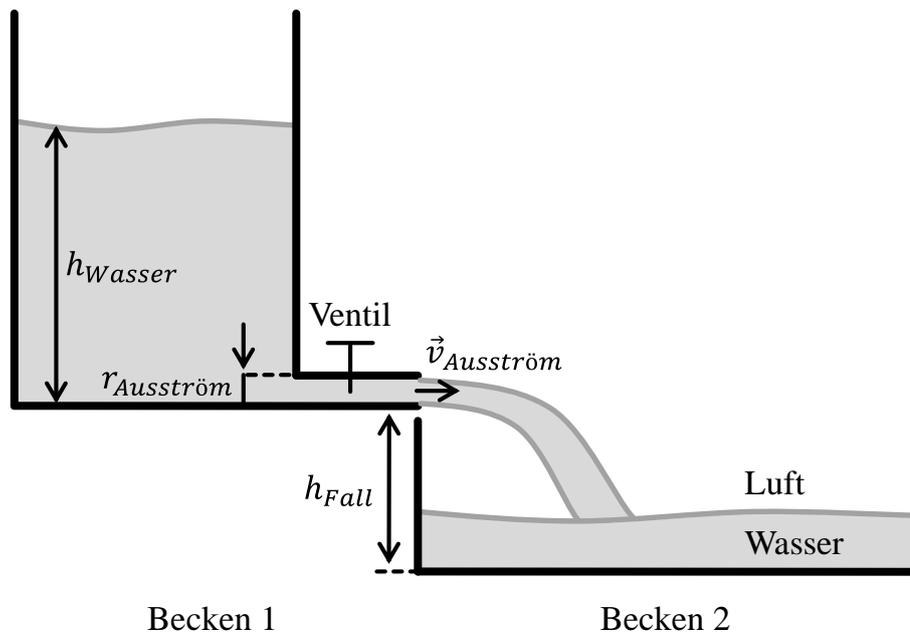


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Testfalls

Ähnliche Prozesse mit weitestgehend gleichen Anforderungen sind weit verbreitet. Ein Beispiel ist der Abfüllprozess von Flüssigkeiten innerhalb einer Abfüllanlage (BLEISCH ET AL. 2011). Innerhalb einer Anlage kann jedoch nicht nur der Abfüllprozess selbst betrachtet werden, sondern auch das (Über-)Schwappen und Vergießen durch ruckartige Bewegungen in einem Transportprozess. Somit ist die industrielle Relevanz des Anwendungsfalls sichergestellt.

Ein weiterer Grund für die Auswahl des Szenarios ist die gute Überprüfbarkeit der Ergebnisse. Zum einen kann die Simulation selbst durch die einfache Messung der Höhe der Wassersäule in Becken 1 gemessen werden und durch das Wissen auf die geometrischen Gegebenheiten die Ausströmungsgeschwindigkeit $\vec{v}_{Ausström}$ geschlossen werden. Zum anderen kann die ideale Ausströmungsgeschwindigkeit im reibungsfreien Fall auch analytisch durch die Ausflussformel von Toricelli berechnet werden:

$$\vec{v}_{Ausström} = \sqrt{2\vec{g}h_{Wasser}} \quad (6.1)$$

Des Weiteren sichert der einfache Aufbau die Simplität und forciert die Fokussierung auf die wesentlichen zu untersuchenden Faktoren.

Alle zur untersuchenden Faktoren sind in dem Modell inkludiert: der Anwendungsfall kann schrittweise konzipiert und die Modifikationen online betrachtet werden. Darüber hinaus kann durch die Variation des Radius der Ausströmungsöffnung $r_{Ausström}$ das Verhalten des Fluids in dem varianten Simulationsmodell beobachtet und analysiert werden.

Somit ist das Szenario als repräsentativer Anwendungsfall mit hoher industrieller Relevanz zur Evaluierung der vorgestellten Methode geeignet.

Die Auswahl der Simulationsmethodenklasse wird in Kapitel 4 dargestellt. Auf dieser Grundlage erfolgt eine anwendungsfallspezifische Auswahl der Simulationsmethode, welche die Anforderungen erfüllen kann.

Da alle Anforderungen durch die SPH-Methode simuliert werden können und die SPH-Methode in dem Anwendungsgebiet bereits validiert ist, wird aufgrund dieser beiden Fakten sowie des hohen Reifegrads (VOROBYEV 2012, HÖFLER 2013) und der guten Parallelisierbarkeit (BELYTSCHOKO ET AL. 1996) die Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen unter Zuhilfenahme der SPH-Methode durchgeführt.

6.2 Softwaretechnische Realisierung

6.2.1 Softwarestruktur und Kommunikationsinfrastruktur

Zur Evaluierung der Online-Simulation wurde die dargestellte Methode softwaretechnisch umgesetzt. Aufgrund der Anforderungen sowie einer guten technischen Integration wurde für die Simulation eine neue Softwareinfrastruktur entwickelt, welche in Abbildung 38 dargestellt ist (KROTIL & REINHART 2015).

Als Konzeptionstool wurde das CAD Konstruktionswerkzeug Dassault SolidWorks gewählt. Über die Schnittstelle des Konzeptionstools zum Fluidsimulator müssen hauptsächlich die geometrischen Informationen sowie die Baugruppenstruktur ausgetauscht werden. Zur Sicherstellung der Werkzeugunabhängigkeit wurde daher als Austauschformat das IFC Dateiformat eingesetzt, welche durch die ISO 16739 spezifiziert ist. Darüber hinaus ist der Fluidsimulator durch ein Konfigurationsinterface kontrollierbar. Über dieses kann der Nutzer sowohl

Quellen, Senken oder externe Kräfte definieren also auch aktive Kinematiken konfigurieren und online modifizieren. Die Online-Ausgabe der Simulation erfolgt sowohl direkt auf einer direkt visualisierten interaktiven 3D Ausgabe, welche direkt mit OpenGL die Partikel rendert, als auch zur weiteren Verarbeitung in eine Ergebnis-Datenbank. In dieser werden die Ergebnisse eines jeden Zeitschrittes innerhalb einer Textdatei gesichert. Diese umfasst für jeden Partikel die Informationen der Position, der Geschwindigkeit und des Drucks. Zur Sicherung der Erweiterbarkeit können noch weitere Informationen angefügt werden.

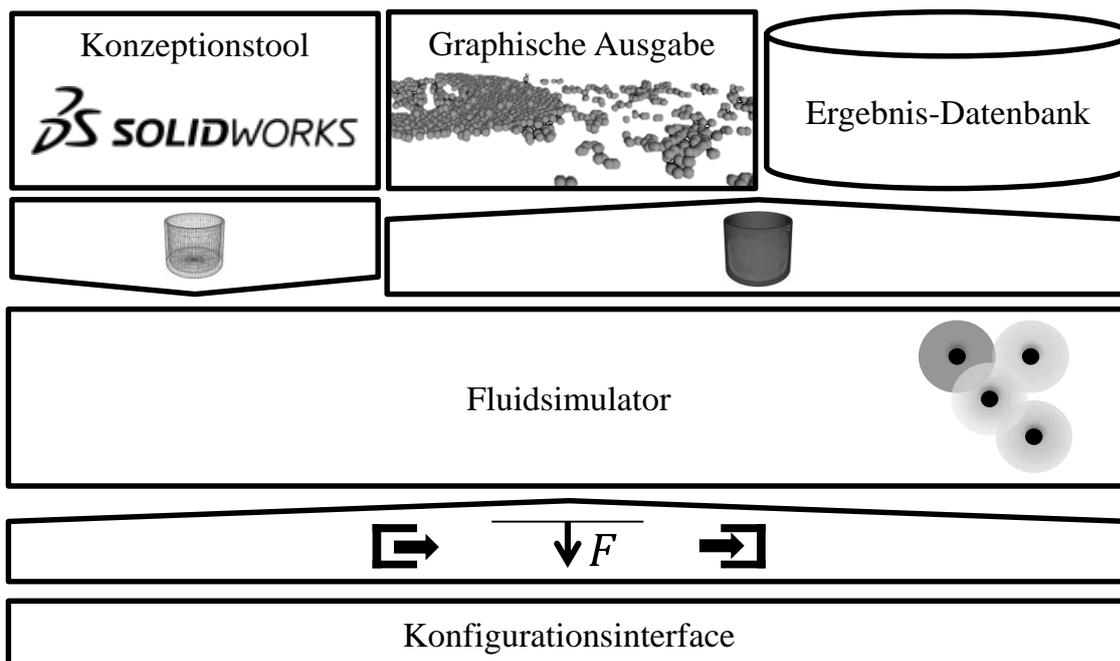


Abbildung 38: Software- und Kommunikationsstruktur des Fluidsimulators

6.2.2 Klassenstruktur und Ablaufdiagramm

Da die Online-Simulation permanent auf Eingaben reagieren muss, ist ein rein sequentieller Ablauf nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die in Abbildung 39 dargestellte Grundstruktur implementiert. Die im Diagramm abgebildeten Kommunikationspfade bilden die Hauptkommunikation ab.

Die zentrale Verwaltung der einzelnen Module übernimmt der Controller. Dieser verwaltet die unterschiedlichen Hardwareressourcen und stößt je nach Bedarf unterschiedliche Algorithmen an. Darüber hinaus obliegt dem Controller die Weitergabe der Datenstruktur.

Der Datenimport wird durch einen Observer gesteuert, welcher permanent nach sich ändernden Informationen sucht. Konfigurationsinformationen wie Quellen

und Senken werden direkt durch den Observer verarbeitet und dem Controller gemeldet. Komplexere Eingabeinformationen werden durch spezielle Module, welche bspw. eine Delta-Untersuchung durchführen, importiert. Aus diesem Grund wird bei Modifikation der Eingabegeometrie ein Prozess im Geometrie-Importer angestoßen. Falls die Modifikation bspw. eine aktive Kinematik umfasst, wird diese durch den Motion-Importer bearbeitet.

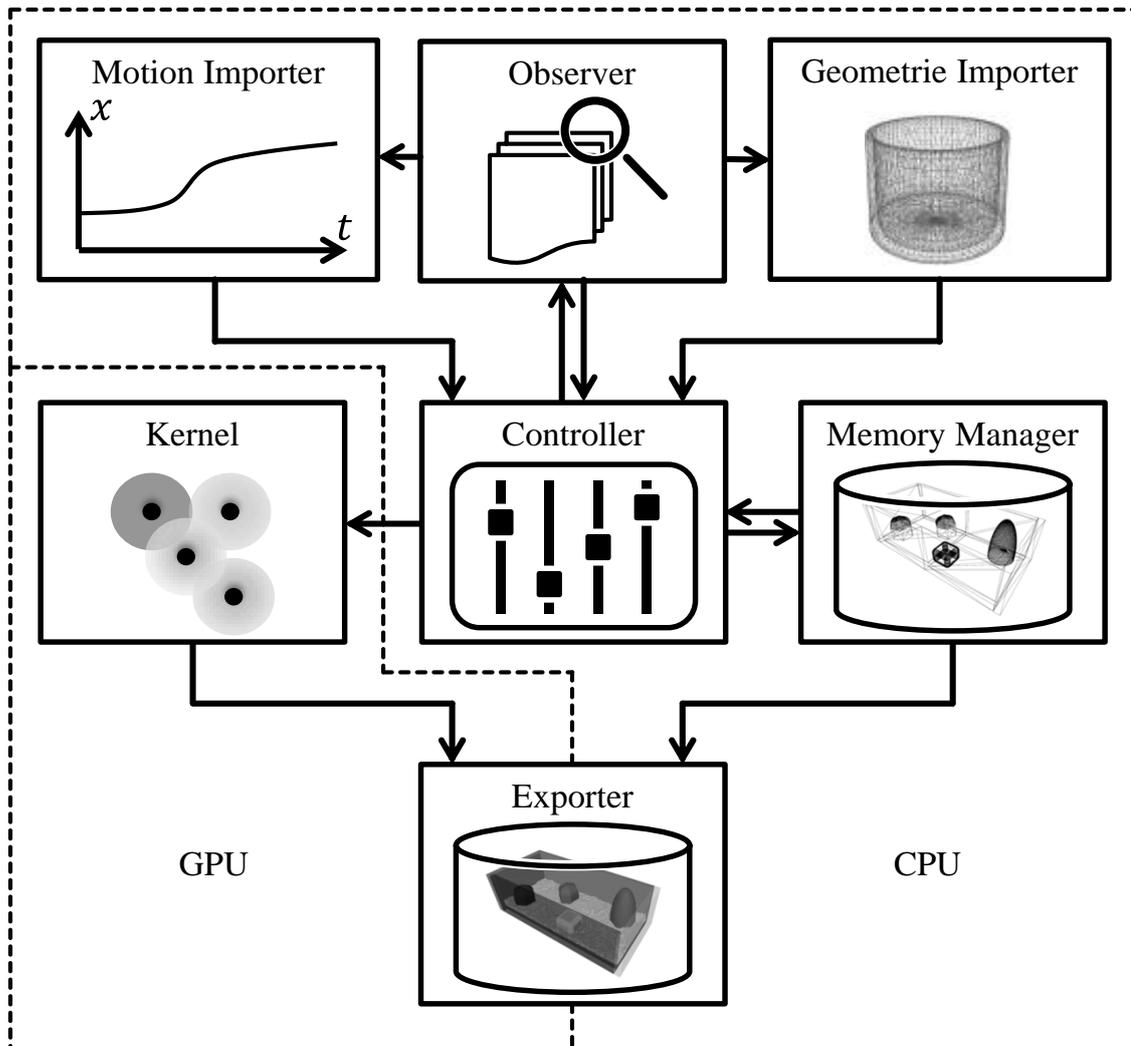


Abbildung 39: Schematisches Klassendiagramm der Implementierung

Die importierten Informationen werden durch den Controller in den Memory Manager geleitet, welcher die zentrale interne Datenbank darstellt. Die geometrischen Informationen werden, je nach Verarbeitungsstand, durch den Controller in den Kernel übermittelt.

Der Kernel selbst umfasst die Algorithmen der eigentlichen Simulationdurchführung. In dem vorgestellten, spezifischen Anwendungsfall beinhaltet dieser den SPH-Algorithmus.

Nur der Kernel und die Visualisierungsberechnungen des Exportes nutzen die GPU. Alle anderen Programmteile, d. h. der Observer, der Importer, der Controller in Verbindung mit dem Memory Manager werden vollständig auf der CPU ausgeführt.

Hervorzuheben ist, dass durch den modularen Aufbau der eigentliche Simulationsalgorithmus und somit die netzfreie Simulationsmethode durch einfache Modifikation des Kernelmoduls austauschbar ist. Darüber hinaus wird nur der Kernel sowie die Echtzeitvisualisierung des Exporters durch die GPU ausgeführt werden. Alle weiteren Prozesse werden auf der CPU durchgeführt. Somit wird eine möglichst gute Auslastung der vorhandenen Hardwareressourcen gewährleistet.

Auf Grundlage der Softwarestruktur werden im Folgenden die für die Evaluierung bedeutenden Abläufe und die softwaretechnische Umsetzung genauer erörtert. Die Threadstruktur ist schematisch in Abbildung 40 dargestellt (für präzise Ablaufdiagramme vgl. Anhang 10.1). Grundsätzlich ist in der softwaretechnischen Gestaltung die Methodenstruktur für die Online-Simulation von fluidischen Prozessen wiederzufinden.

Simulationsvorbereitung

Aufgrund der Anforderung offener Schnittstellen erfolgen die Modifikationen am Modell und an den Konzepten dateibasiert. Daher überprüft ein Observer-Thread dauerhaft die Modelldateien nach Modifikationen. Liegt eine Modifikation einer Datei vor, so wird je nach Typ ein neuer Thread zu dessen Import gestartet.

Falls es sich um Modifikationen des Fluids, bspw. Änderungen der Parameter, Hinzufügen oder Entfernen von Quellen und Senken o. ä., handelt, so können diese in das Simulationsmodell direkt übernommen werden.

Bei Modifikationen der geometrischen Informationen wird für jedes Bauteil ein Geometrie-Thread gestartet. Dieser führt die Vorverarbeitung durch, wobei ein Thread die Baugruppenhierarchie überprüft. Darauf folgend wird jedes Bauteil wie in Abschnitt 5.4.2 abgeleitet. Wird in der Konvexitätsanalyse der Aufbereitung festgestellt, dass das Bauteil konkav ist, so wird ein Thread zur konvexen Zerlegung gestartet. Der Geometrie-Thread selbst verlinkt die tesselierte Oberfläche und fügt diese nach der Kinematisierung dem Simulationsmodell hinzu. Sobald die konvexe Zerlegung fertiggestellt wurde, ersetzt die kinematisierte konvexe Geometrie die verlinkte Geometrie. Dies erfolgt, um den Berechnungsalgorithmus auf der GPU zu beschleunigen. Stellt der Observer eine

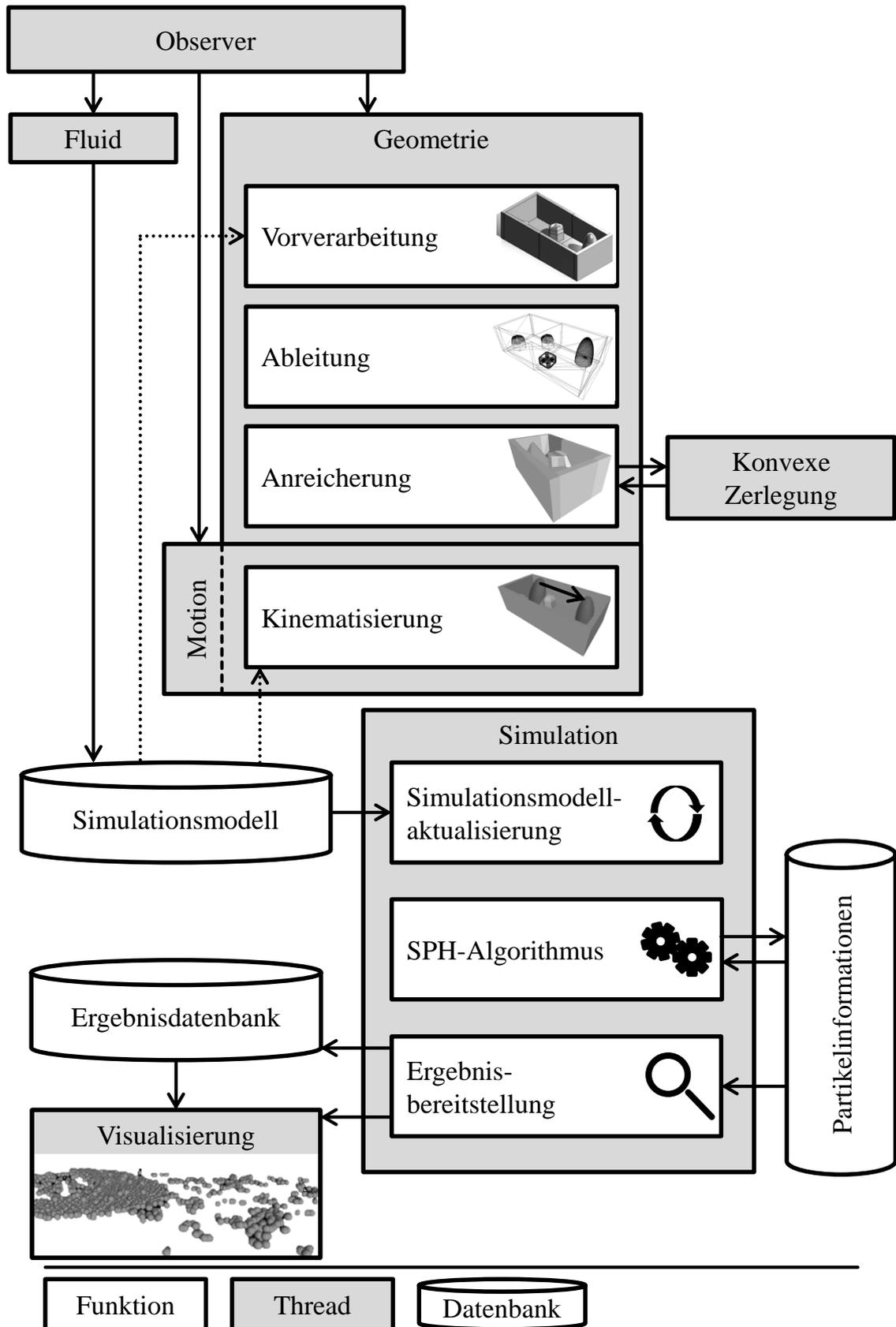


Abbildung 40: Thread-und Funktionsaufbau zur synchronen Berechnung der Prozessschritte in der Online-Simulation von Fluiden

Modifikation der aktiven Kinematisierungsinformationen fest, so wird in einem Motion-Thread die betroffene Geometrie aus dem Simulationsmodell extrahiert und mit den kinematischen Informationen modifiziert. Diese Änderung wird anschließend zurück in das Simulationsmodell integriert.

Simulationsdurchführung

Die Simulation selbst erfolgt in einem Simulationsthread. Dieser ist, wie in Abschnitt 5.3 dargestellt, in drei Phasen gegliedert. Zu Beginn jeder Simulationsphase wird überprüft, ob das Simulationsmodell modifiziert wurde. Falls dies so ist, wird das Modell direkt in die Simulation ohne weitere Berechnungen auf die GPU übertragen. Anschließend erfolgt die Durchführung des eigentlichen Simulationsschrittes des SPH-Algorithmus. Die Programmierung der GPU erfolgt durch die Nutzung der Nvidia CUDA, welche eine einfache Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit in verschiedenen Hardwarekonfigurationen zulässt. Neben den für den Zeitschritt statischen Informationen wie die Position der Geometrien, Quellen und Senken, werden die Partikelinformationen, bspw. Dichte, Geschwindigkeit u. ä., direkt auf der GPU gespeichert. Nach Abschluss der Berechnungen werden die Ergebnisse bereitgestellt.

Ergebnisanalyse

Das Rendern der aktuellen Zwischenergebnisse erfolgt direkt auf Basis der GPU Daten, d. h. die Simulationsergebnisse werden in der direkten Visualisierung nicht erst von der GPU auf die Festplatte kopiert, stattdessen werden diese ohne zusätzlichen Kopiervorgänge direkt verarbeitet. Zur nachhaltigen Speicherung werden die Simulationsergebnisse asynchron, d. h. ohne Beeinflussung der Simulationsdurchführung, auf die Festplatte übertragen.

Um auch eine Offline-Analyse der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, können zudem die in der Ergebnisdatenbank vorgehaltenen Resultate in einem von der Simulation unabhängigen Visualisierungs-Thread ausgewertet werden. Auch in diesem Modus kann die Simulation weiterhin neue Daten generieren.

6.3 Evaluierung und Quantifizierung des Nutzens einzelner Prozessschritte

Ein kritischer Faktor bei der Simulation von Fluiden ist die Berechnungsgeschwindigkeit. Zur Steigerung dieser wird das Modell, bspw. durch die konvexe Zerlegung, stets verbessert. Auch ist die Trennung der Simulationsvorbereitung

von der Simulationsdurchführung auf die unterschiedlichen Hardwareressourcen heutiger Entwicklungsworkstations ein essentieller Punkt. Im Folgenden wird der Nutzen der durch die neuen mittels der Online-Simulation eingeführten Bausteine evaluiert und der Nutzen an Beispielen quantifiziert.

6.3.1 Nutzen der Separation der Geometrievorbereitung

Ein Aspekt der Methode ist die Separation der Simulationsvorbereitung auf die CPU und das somit möglichst schnelle Hinzufügen und Anpassen des Simulationsmodells in der laufenden Simulation auf der GPU. Somit ist eine Anforderung, dass die Simulation selbst möglichst wenig von den Modellmodifikationen in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt wird. Um den Nutzen und die Auswirkungen der Trennung der beiden Effekte zu bewerten, wurde eine konkave Schüssel als Testgeometrie gewählt (vgl. Abbildung 41). Diese stellt einen der Fälle mit dem geringsten Nutzen der konvexen Zerlegung dar. Darüber hinaus wurde die Testgeometrie in unterschiedlichen Auflösungsgraden der tesselierten Oberfläche evaluiert.

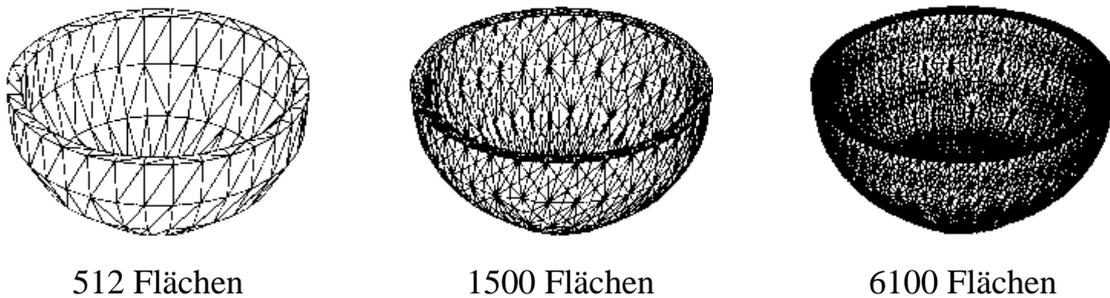


Abbildung 41: Testgeometrie zur Evaluierung des Nutzens der Simulationsvorbereitung.

Die konvexe Zerlegung ist ein Teilaspekt des Prozessschrittes der Anreicherung. In diesem Prozessschritt werden konkave Baugruppen konvex zerlegt. Diese Berechnung ist aufgrund des hohen Aufwandes und somit der hohen Berechnungszeit nicht online durchzuführen. Deshalb erfolgt diese im Hintergrund und aktualisiert das verlinkte Simulationsmodell erst nach Abschluss der Berechnung.

Zur beispielhaften Quantifizierung des Nutzens der Vorbereitungen des modifizierten Simulationsmodells auf der CPU wurden die Modifikationen bei unterschiedlichen Auflösungen zeitlich gemessen. Die Zeit einer einfachen, direkten Modifikation einer tesselierten Geometrie setzt sich zusammen aus der Durchführung des Geometrie-Threads auf der CPU und dem Berechnungsschritt der

Simulationsmodellmodifikation des Simulations-Threads auf der GPU. Wie in Tabelle 5 dargestellt, benötigte bspw. im Fall der höchsten untersuchten Auflösung von 6100 verlinkten Geometrien die CPU-seitige Vorbereitung 10,25 s und die Geometrieaktualisierung des Simulations-Threads 0,11 s. Somit konnten ca. 90 % des Berechnungsaufwandes aus dem eigentlichen Simulationszyklus ausgelagert werden. Daher bemerkt der Anwender die Modifikation der Geometrie in der direkten Visualisierung nur durch ein kurzes Ruckeln.

Ein weiterer Aspekt ist die Evaluierung der Berechnungszeiten der konvexen Zerlegung. Im Fall der Testgeometrie Schlüssel betrug die Rechenzeit bis zu 977,44 s, was 95-mal länger ist als die Modifikation des Simulationsmodells durch verlinkte Geometrien. Daher ist wegen der hohen Berechnungszeiten für die konvexe Zerlegung der Zwischenschritt von verlinkten Geometrien im Fall von konkaven Bauteilen ein notwendiger Schritt, da durch die langen Wartezeiten eine Online-Simulation nicht praktikabel ist.

Auflösung (Anzahl der Flächen)	512	1500	6100
Geometrie-Thread (verlinkt)	0,16 s	1,11 s	10,25 s
Geometrieaktualisierung (Simulation)	0,01 s	0,09 s	0,11 s
Gesamtzeit (verlinkt)	0,17 s	1,20 s	11,36 s
Geometrie-Thread (konvex) + Konvexe-Zerlegung-Thread	5,63 s	207,99 s	977,44 s
Gesamtzeit (konvex)	5,64 s	218,18 s	977,54 s

Tabelle 5: Zeitmessung der geometrischen Simulationsvorbereitung

6.3.2 Nutzen der konvexen Zerlegung der Online-Simulation

Durch die Zerlegung der Geometrien soll eine Beschleunigung der Simulationsdurchführung ermöglicht werden. Der Nutzen der konvexen Zerlegung unter dem Aspekt der Berechnungszeit der Zerlegung als auch unter dem Aspekt der dadurch erzielten Berechnungszyklen der Simulation variiert stark in Abhängigkeit des Anwendungsfalles. Auch kann bereits durch eine teilweise (konvexe) Zerlegung eine Beschleunigung der Berechnungsgeschwindigkeit erzielt werden. Aus diesem Grund wird für die Evaluierung ein Becken als Testgeometrie genutzt. Abbildung 42 stellt neben der verlinkten, konkaven Geometrie eine voll-

ständige konvexe Zerlegung dar. Da die Zerlegung durch einen heuristischen Algorithmus (MAMOU & GHORBEL 2009) durchgeführt wurde, können die Zerlegungsergebnisse variieren.

In diesen Fall benötigt der Prozess der vollständig konvexen Zerlegung ca. 19,4 s. Die lange Berechnungszeit bestärkt erneut die These, dass zu einer Online-Simulation von Fluiden eine direkte konvexe Zerlegung bei der Simulationvorbereitung ohne die Zwischenlösung einer verlinkten Geometrie nicht möglich wäre, da die Aktualisierungszeiten bei neuen Modelleingangsdaten zu lange wären.

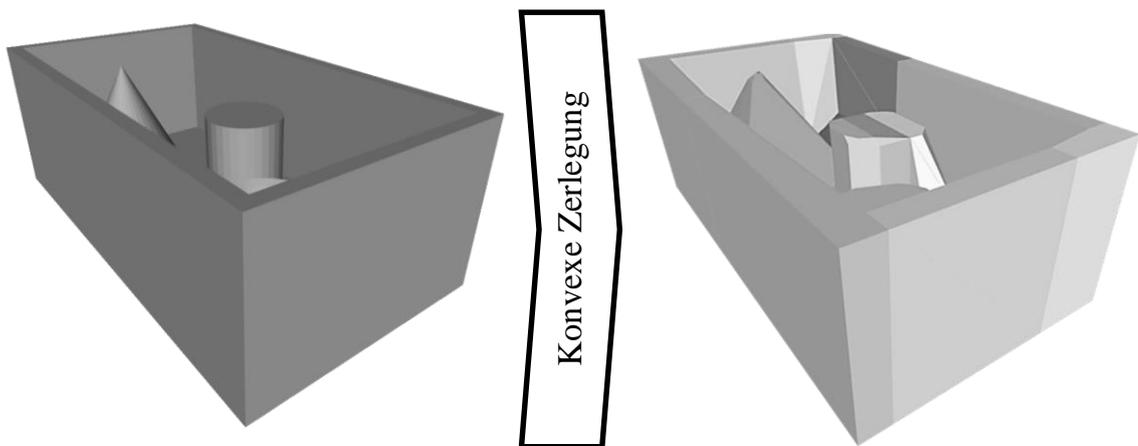


Abbildung 42: Testobjekt zur Evaluierung der konvexen Zerlegung

Der zu untersuchende Aspekt ist der Nutzen der Zerlegung für die einzelnen Simulationszyklen. Durch die konvexe Zerlegung ist hauptsächlich die Berechnung der Randbedingungen, d. h. die Kollisionsauflösung, in der SPH-Methode betroffen, welche in der Evaluierung fokussiert wird. Darüber hinaus wurde zur Evaluierung des Nutzens die Testgeometrie in unterschiedliche Zerlegungsgrade aufgeteilt, wobei Zerlegungsgrad 1 die verlinkte Geometrie ist. Dagegen ist Zerlegungsgrad 12 die vollständig zerlegte konvexe Geometrie. Durch dieses Vorgehen ist der Nutzen einer weniger berechnungsaufwändigen, teilweisen Zerlegung ersichtlich.

Abbildung 43 stellt anhand des Beispiels den Vorteil eines hohen (konvexen) Zerlegungsgrades für die Berechnungszeit der Kollisionsauflösung dar. Als weitere Haupteinflussgröße wird die Anzahl der Fluidpartikel betrachtet. Diese befinden sich zu den evaluierten Zeitschritten innerhalb des Beckens. Durch eine vollständige konvexe Zerlegung kann die Berechnungszeit der Kollisionsauflösung von 12,1 ms auf 4,3 ms bei im Fall von 1.000.000 Fluidpartikeln reduziert werden, was einer Reduktion auf 35,6 % entspricht.

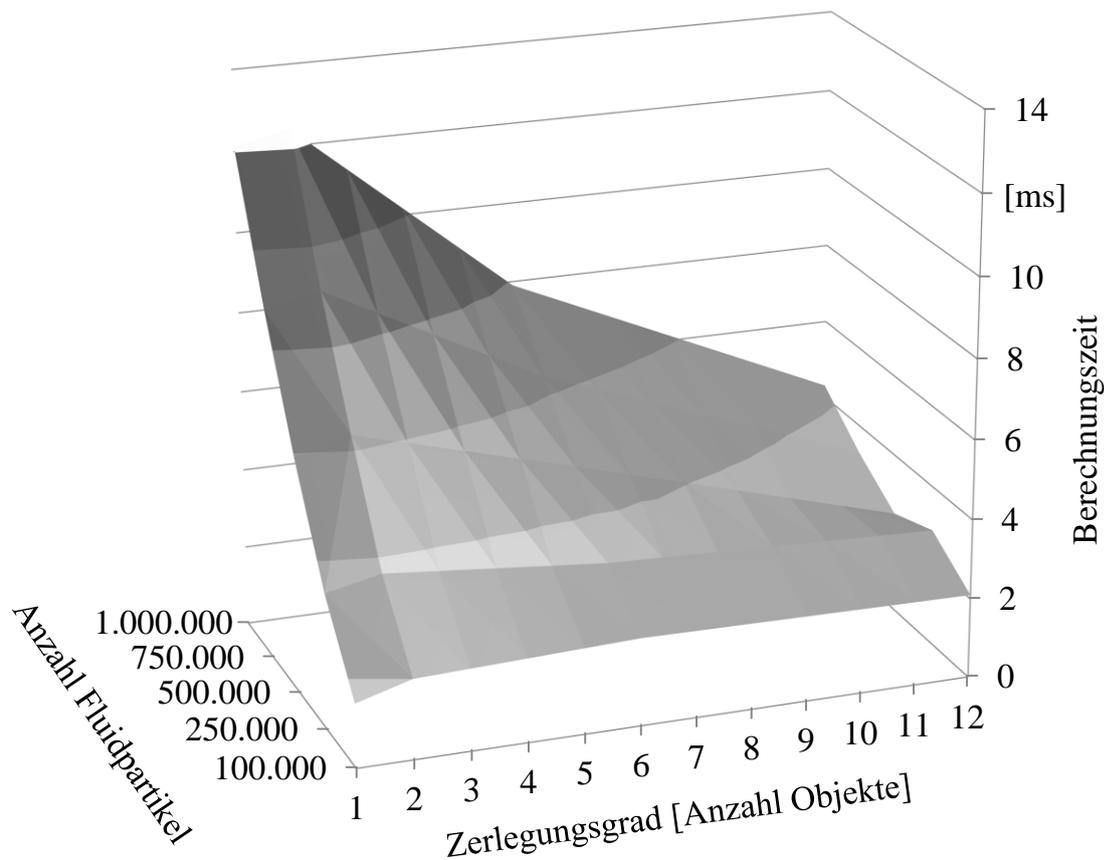


Abbildung 43: Reduktion der Berechnungszeit der Kollisionsauflösung durch die konvexe Zerlegung.

Darüber hinaus ist jedoch festzustellen, dass bei geringerer Anzahl an Partikeln der Nutzen der konvexen Zerlegung nicht mehr erkennbar ist. Somit ist nachgewiesen, dass die permanente Optimierung des Simulationsmodells bzgl. der Berechnungsgeschwindigkeit hohen Nutzen hat.

6.4 Online-Simulation von fluidischen Prozessen im Anwendungsfall

Abschließend wurde die Methode zur Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase gesamtheitlich validiert. Hierfür wurde eine Neuentwicklung mit gleichzeitiger Simulation des Abfüllprozesses, welcher in Abschnitt 6.1 dargestellt ist, durchgeführt.

Abbildung 44 stellt zehn ausgewählte Ausschnitte des Entwicklungsprozesses des Anwendungsfalls dar.

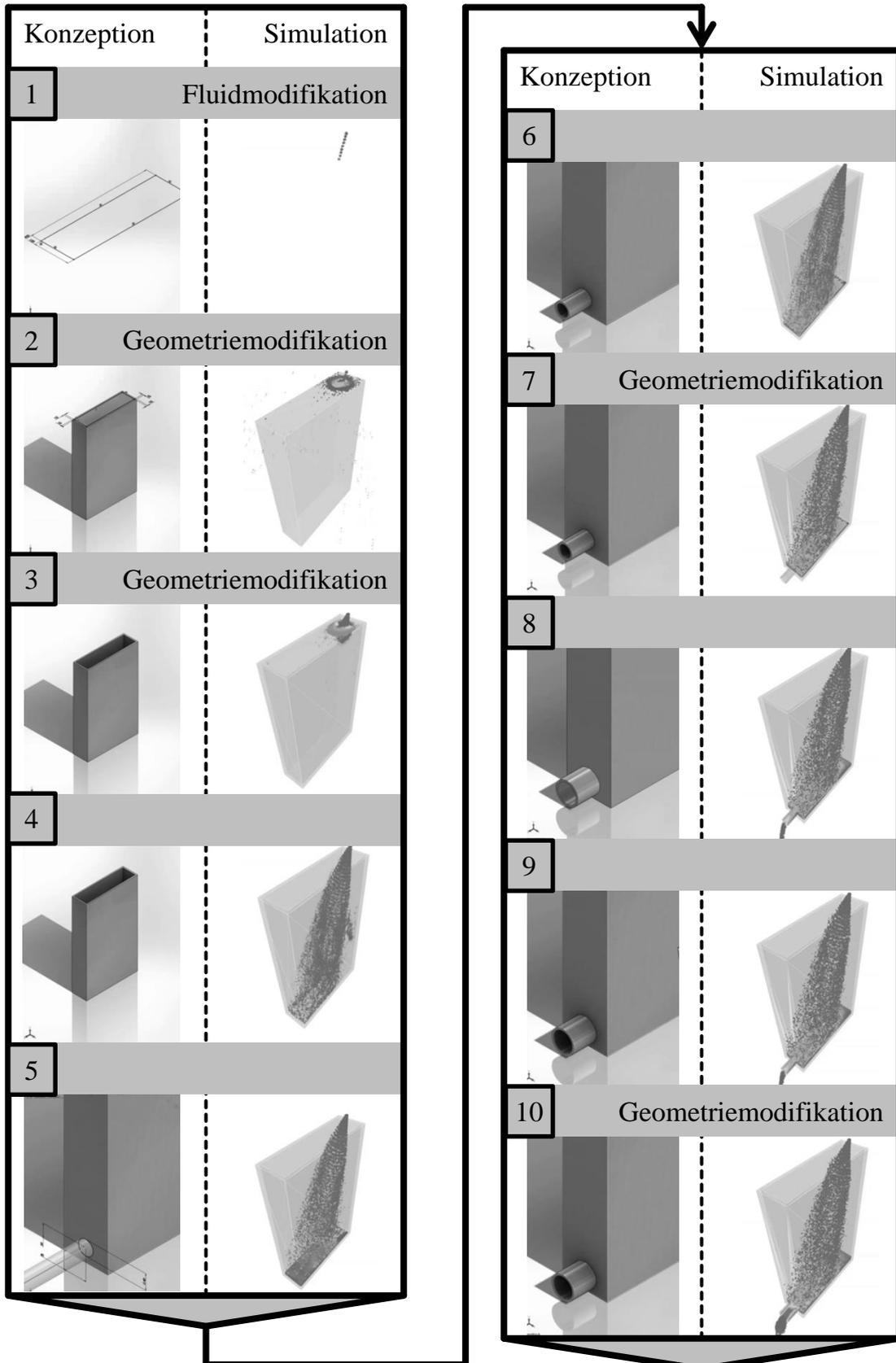


Abbildung 44: Auszug der Entwicklungsschritte als CAD Modell mit direktem Feedback aus der Simulation

Dabei erfolgt die Konstruktion in Dassault SolidWorks gleichzeitig zur ablaufenden Simulation, welche sich ständig an die modifizierten Eingangsmodelle anpasst und das inhärente Simulationsmodell sofort aktualisiert.

Im ersten Schritt (1) wird das Simulationsmodell bezüglich seiner fluidischen Quellen modifiziert. Diese ist eine permanente Fluidquelle, welche Partikel mit den physikalischen Eigenschaften von Wasser parametrisiert.

Die Simulation läuft nun stetig weiter, währenddessen der Konstrukteur in einem ersten Konstruktionsschritte einen virtuellen Block konzipiert (2) und diesen danach aushöhlt (3). Daraufhin erfolgt die Konstruktion einer ersten Version eines Ausflusses (7). Wie zu sehen ist, wird je nach Entwicklungsfortschritt das Simulationsmodell stetig, direkt und ohne Verzögerungen an die Modifikationen in der Konstruktion angepasst. Auf Grundlage des stetigen visuellen Feedbacks des Fluidverhaltens sowie der schnellen Möglichkeit der Überprüfung von relevanten Konzeptigenschaften (8, 9) können vom Anwender weitere Modifikationen durchgeführt werden. Dies ist in diesem Beispiel die Modifikation des Ausflusses (10).

Nach Fertigstellung der Konzeption konnte direkt auf der Grundlage des 3D CAD Modells, welches auch die Grundlage für die CFD-Simulation war, ein realer Prototyp gebaut werden. Diese sind in Abbildung 45 dargestellt. Auf dieser Grundlage erfolgte ein detaillierter Vergleich der Simulationsergebnisse sowohl mit der Lösung der idealisierten Ausflussformel nach Toricelli als auch mit realen Messwerten (Anhang 10.2). Somit wurde die Funktionalität der Methode zur Online-Simulation von Fluiden nachgewiesen.

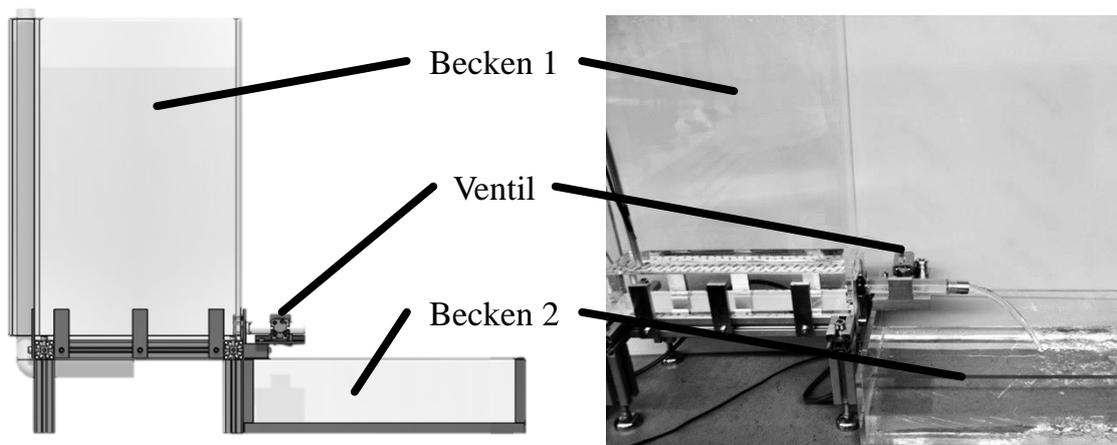


Abbildung 45: *Simulativ-unterstütztes Konzeptionsresultat und dessen reale Umsetzung des Anwendungsfalls*

6.5 Zusammenfassung

Zu Beginn des Kapitels wird für den Anwendungsfall der Entwicklung eines Aufbaus für einen Abfüllprozesses, welcher alle relevanten Merkmale der Online-Simulation beinhaltet, die Simulationsmethode SPH zur Evaluierung der Methode ausgewählt. Zum besseren Verständnis der netzfreien CFD-Methode erfolgt daraufhin ein kurzer Exkurs über die Theorie und die Algorithmik der Simulationsmethode.

Darauf basierend ist die softwaretechnische Realisierung der einzelnen Methodenbausteine dargestellt. Durch die hohe Modularität ist ein einfacher Austausch der netzfreien Simulationsmethode gewährleistet. Darüber erfolgt die Vorstellung der Algorithmik. Im Fokus stehen vor allem die individuelle Berechnung und Synchronisation der unterschiedlichen Methodenbausteine wie etwa Simulationvorbereitung, Simulationsdurchführung und die Ergebnisbereitstellung.

Des Weiteren wird der Nutzen einzelner Methodenbestandteile dargestellt. So konnte an einem Beispiel gezeigt werden, dass durch die Trennung der Simulationvorbereitung von der Simulation der Einfluss von Geometriemodifikationen für den Anwender kaum bemerkbar ist, da ca. 90 % der Berechnungen in einem separaten Prozess durchgeführt werden. Ein noch höherer Nutzen entsteht durch die prozessuale Trennung der Modelloptimierung durch die konvexe Zerlegung. Aufgrund der festgestellten langen Rechenzeiten der Zerlegung ist eine Online-Simulation, welche nur anhand von berechnungsoptimierten Simulationsmodellen agiert, nicht praktikabel. Die verlinkten Geometriemodelle bieten für diesen Einsatz ein Ersatzmodell. Jedoch ist die zur Simulation parallelisierte konvexe Zerlegung zur Reduktion der Berechnungszeiten in der Simulationsdurchführung sehr nützlich. So wird dargestellt, dass mithilfe einer konvex zerlegten Simulationsmodellgeometrie die Berechnungsdauer auf ca. 35,6 % reduziert werden konnte.

Abschließend umfasst das Kapitel die Darstellung der Anwendung der Online-Simulation im Rahmen des Anwendungsfalls. Durch die Online-Simulation erhält der Anwender direktes und sofortiges simulativ-abgesichertes Feedback über fluiddynamische Auswirkungen der Modifikationen am Modell, wodurch eine schnelle Anpassung der Konzepte erfolgen kann. Die Methode zur Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses ist somit in diesem Kapitel prototypisch umgesetzt und anhand eines Anwendungsbeispiels erfolgreich angewendet.

7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

In diesem Kapitel wird zusammenfassend beurteilt, inwieweit die Methode zur Online-Simulation die gestellten Anforderungen aus Kapitel 4 erfüllt. Ausgehend von den in der Evaluierung gesammelten Erkenntnissen wird die Methode zur Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses hinsichtlich der prozessualen und technischen Kriterien bewertet. Nach einer Darstellung der Vorteile der neuen Methode werden Einschränkungen sowie Aufwände aufgeführt. Diese bilden die Grundlage zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

7.1 Erfüllungsgrad der prozessualen und technischen Anforderungen

Für die Online-Simulation von Fluiden in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses werden in Abschnitt 4.2 sowohl technische als auch prozessuale Anforderungen aus dem Stand der Technik und Wissenschaft abgeleitet, welchen die Methode nun gegenübergestellt wird. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Resultate, welche im Folgenden erörtert werden.

In der Basis wird *eine heuristische Möglichkeit zur Tätigkeitsdurchführung* durch den schnellen Synthese-Analyse-Zyklus, d. h. durch den schnellen und einfachen Modellbildungsprozess sowie durch die schnelle Ergebnisbereitstellung geschaffen. Die Freiheit in der heuristischen Vorgehensweise wird jedoch durch die Notwendigkeit einer Festlegung auf eine Simulationsmethode, welche nicht alle physikalischen Effekte abbilden kann, eingeschränkt.

Diese Einschränkung des Erfüllungsgrades ist auch für die *Flexibilität* zulässig. Trotzdem konnte vor allem unter dem Gesichtspunkt der Modellerstellung eine *flexible Modifizierbarkeit* erreicht werden.

Durch den flexiblen Simulationssyntheseprozess wird jedoch eine vollständige Erfüllung der Anforderungen nach einer *aufwandsminimalen und kostenminimalen Generierung* von Alternativen geschaffen. Dies erfolgt durch die Möglichkeit einer vollständigen *Modifizierbarkeit der bestehenden Lösung*.

Technische und wirtschaftliche Bewertung

	Anforderungen	Erfüllungsgrad
Prozessuale	Heuristische Möglichkeit zur Tätigkeitsdurchführung	●
	Hohe Flexibilität	●
	Flexible Modifizierbarkeit	●
	Intuitive Ergebnispräsentation	●
	Aufwandsminimale und kostenminimale Generierung von Alternativen	●
	Modifikation bestehender Lösungen	●
	Interdisziplinäre Teilung komplexer Aufgaben	●
	Skalierbarkeit der Modelldetaillierung	●
	Konzeptionelle Modelle	●
Technische	Hohe Validität	●
	Hohe Glaubwürdigkeit	●
	Einfachheit in der Bedienung	●
	Hohe Flexibilität	●
	Schnelle Berechnungsgeschwindigkeit	●
	Gute Visualisierung der Ergebnisse	●
	Hohe Wiederverwendbarkeit	●

- Anforderung nicht erfüllt Ansätze vorhanden
 Wichtige Aspekte umgesetzt Anforderung überwiegend erfüllt
 Anforderung vollständig erfüllt

Tabelle 6: Überblick über den Erfüllungsgrad der Anforderungen

Darüber hinaus schafft die vollständige Freiheit in der Modellerstellung eine einfache Möglichkeit, Ideen durch *konzeptionelle Modelle* vollständig zu erproben und durch die Wissensschöpfung, welche durch die sofortige Ergebnispräsentation erzielt wird, den *Detaillierungsgrad der Modelle* im Entwicklungsprozess zu skalieren.

Des Weiteren kann das Simulationsmodell teilweise durch unterschiedliche Experten gleichzeitig an gegebene Anforderungen angepasst werden, bspw. durch die Modifikation der Geometrie durch einen Konstrukteur und die Parametrisierung des Fluids durch einen Simulationsexperten. Eine gleichzeitige Bedienung der Simulation durch mehrere Workstations ist nicht möglich, was die *interdisziplinäre Aufgabenteilung* einschränkt. Dieser Aspekt schränkt auch die Auswer-

tung der Ergebnispräsentation ein, da die unterschiedlichen Disziplinen verschiedene Interessensgebiete haben.

Die technische *Validität* und *Glaubwürdigkeit* hängt stark von der gewählten Simulationsmethode ab und liegt nicht exakt im Fokus der Methode. Die im Anwendungsfall eingesetzte SPH-Methode wurde bereits für die gegebenen Anforderungen evaluiert, wodurch sichergestellt ist, dass diese sowohl eine hohe Glaubwürdigkeit als auch Validität besitzt. Diese Aussage ist jedoch vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig.

Im Gegensatz dazu ist die *Bedienung* durch die automatische Modellübernahme aus dem CAD Programm in die Simulation sehr einfach. Auch können die fluidischen Parameter leicht modifiziert werden. Darüber hinaus können mithilfe des Motion-Editors erstellten aktiven Kinematiken dem Simulationsmodell schnell und interaktiv hinzugefügt werden. Jedoch ist die Komplexität im Zusammenspiel der unterschiedlichen Eingabemöglichkeiten groß, wodurch die Bedienung nicht trivial ist. Auch muss Expertenwissen über die Funktionsweise der Simulationsmethode vorhanden sein.

Der Gesamtnutzen selbst ist stark vom Anwendungsfall abhängig und muss dem Aufwand und den Kosten gegengerechnet werden. Jedoch fokussiert die Methode eine sehr zeitnahe Ergebnisbereitstellung, wodurch kurzfristig ein hoher Nutzen erreicht werden kann. So liegt ein Fokus auf der *schnellen Berechnungsgeschwindigkeit*, welche durch eine permanente Simulationsmodellierung beschleunigt wird. Jedoch ist hier weiteres Verbesserungspotential bspw. durch verteiltes Berechnen möglich. Zudem kann eine Verbesserung der schnellen und *guten Visualisierung der Ergebnisse* erzielt werden. Darüber hinaus wird der Nutzen durch das Erreichen einer teilweisen *guten Wiederverwendbarkeit* der Simulation und des Simulationsmodells vergrößert. Durch die modulare Struktur der technischen Integration ist die Simulationsmethode austauschbar. Auch können die geometrischen Modelle gut wiederverwendet werden, allerdings nur eingeschränkt, da in der momentanen Implementierung weitere Informationen wie bspw. Quellen, Senken oder Kinematiken nicht direkt an die Simulationsgeometrie gekoppelt sind und somit neu konfiguriert werden müssen.

Zusammenfassend werden die Anforderungen an eine CFD-Simulation in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses zufriedenstellend erfüllt.

7.2 Nutzenpotential, Einschränkungen und Aufwände

Nach VDI 3633, BLATT 8 resultiert die Entscheidung zum Einsatz von Simulationen auf folgenden Kriterien:

- Kosten-Nutzen-Verhältnis
- Komplexität des Problems
- Aufwand für eine geschlossene analytische Lösung
- Verhältnis zwischen Datenqualität und Modellqualität
- Wiederholte Anwendbarkeit des Modells

Im Folgenden werden die Kriterien auf einen praktischen industriellen Einsatz der Methode zur Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase angewandt.

In heutigen Entwicklungsprozessen wird die Fluidodynamik, welche nur in Ausnahmefällen analytisch zu lösen ist, nur selten simuliert. CFD-Simulationen werden somit nur in seltenen Fällen, in welchen der fluiddynamische Prozess im Fokus steht, eingesetzt. Ein Hauptgrund für die Einschränkung ist der hohe Aufwand in der Modellierung, die langen Berechnungszeiten und die lange Wartezeit auf erste Ergebnisse. Durch die Methode der Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase können diese Restriktionen gebrochen werden, wodurch eine CFD-Analyse bereits in der frühen Phase einsetzbar ist. Daher ergibt sich folgender Nutzen der Methode:

- Bisher existiert keine Methode, welche in industriellen Anwendungsfällen schnell grundsätzliche Aussagen über das dynamische Verhalten von Fluiden treffen kann. Demnach füllt die Methode eine Wissenslücke und eröffnet unterschiedliche neue Möglichkeiten innerhalb der frühen Phase des Entwicklungsprozesses.
- Darüber hinaus wird durch die einfache und schnelle Simulationsmodellbildung der Aufwand und damit ein Hemmnisfaktor zum Einsatz der Simulation erheblich reduziert.
- Auch ist die Berechnungsgeschwindigkeit der Simulationemethode nicht mehr direkt von der Vorab-Modellerstellung abhängig. Durch die konvexe Zerlegung wird permanent und ohne explizite Aufgabe des Nutzers das Simulationsmodell bzgl. einer schnelleren Berechnung optimiert.
- Zudem ermöglicht die automatische Anpassung des Simulationsmodells eine intuitive, flexible und dynamische Arbeitsweise. So ist nach einmaliger Konfiguration der Ausgangssituation eine durchgängige und ununterbrochene, mit dem CAD Modell synchrone Arbeitsweise möglich.

- Des Weiteren ist durch die automatisierte Anpassung des Simulationsmodells an die Konstruktionsdaten eine durchgängige Nutzung des Modells über einen größeren Zeitraum im Entwicklungsprozess möglich. Angefangen mit den groben Konzepten der frühen Phase kann mit der Verfeinerung der Konzepte der Detaillierungsgrad der Simulation synchron gesteigert werden.
- Die Bereitstellung der Simulationsergebnisse erfolgt bereits während der Simulation. Dadurch können Fehlentwicklungen in Kombination mit der sofortigen Simulationsmodellaktualisierung direkt und ohne Verzögerung durch den Anwender erkannt werden. Im Entwicklungsprozess reduziert sich somit die Dauer eines Synthese-Analyse-Zyklus erheblich.
- Dies geht einher mit dem dadurch ermöglichten WYSIWYG-Ansatz, welcher den unbewussten Denk- und Handlungsweisen von Menschen gleicht. Daher ermöglicht die Online-Simulation eine an den Menschen angepasste und folglich ergonomische Arbeitsweise.
- Des Weiteren können durch den Einsatz der Online-Simulation die Entscheidungen der frühen Phase, welche einen Großteil der Produktqualität und -kosten festlegen, aufgrund einer fundierten Wissensgrundlage verbessert werden.
- Auch ist die direkte Visualisierung von Konzepten ein Hilfsmittel zur Verbesserung der Kommunikation und Transparenz zwischen den unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen.
- Darüber hinaus eröffnet die Online-Simulation neue Handlungsgebiete in weiteren Phasen des Produktlebenszyklus. Zum Beispiel kann der Vertrieb mit den Kunden schnell Konzepte erarbeiten, in denen die Simulation das notwendige Vorstellungvermögen reduziert und direkt eine visuelle Plausibilitätsüberprüfung der Prozessabläufe ermöglicht. Dies würde die notwendige Marktakzeptanz von Produkten steigern (WUNDER & BAUSCH 2014).

Diesen Nutzenfaktoren stehen folgende Einschränkungen und Aufwände gegenüber:

- Die Methode zur Online-Simulation wurde anhand von inkompressiblen, newtonschen Fluiden in einer Umgebung mit konstanter Temperatur überprüft. Durch die Dynamisierung der weiteren Variablen kann der Aufwand der Simulationsmodellbildung steigen.
- Da es bis dato bei der Durchführung von CFD-Simulationen kein Standardvorgehen gibt, ist bei der Auswahl der Simulationsmethode und -

durchführung Expertenwissen und Erfahrung notwendig. Auch kann die Simulationsmethode Spezifika aufweisen, die die Anwendbarkeit der dargestellten Methode einschränken.

- Darüber hinaus basiert der bisherige Entscheidungsprozess in nicht simulativ abgesicherten Anwendungsfällen auf dem Erfahrungswissen der Ingenieure. Durch ein fehlendes Wissen über die Simulationsmethode oder durch eine Fehlinterpretation der Simulation kann es zu Fehlern in der Wissensschöpfung kommen. Auch stellt das blinde Vertrauen auf die Simulationsergebnisse, welche nur der Konzeptfindung dienen und somit die Tendenzen nicht hinreichend genau abbilden, einen Risikofaktor dar.

7.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Um eine quantitative Einschätzung des wirtschaftlichen Nutzwertes der Methode zu erhalten, wird nachfolgend eine exemplarische Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Die Online-Simulation bietet jedoch viele nicht direkt monetär kalkulierbare Vorteile, bspw. die Schaffung von Transparenz oder die an die menschlichen Handlungs- und Denkmuster angepassten Methoden, welche die Arbeitsweise vereinfachen. Diese können jedoch in dieser Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht erfasst werden.

Zur Durchführung einer Online-Simulation wird von den nachfolgenden Kosten ausgegangen, wobei die Bezugsgröße ein Entwicklungsprozess ohne simulative Absicherung des fluidischen Verhaltens ist.

- Die Kosten für die Workstation sowie für die Software von üblichen Entwicklungsworkstations, bspw. das Betriebssystem oder die CAD Entwicklungsumgebung, werden nicht berücksichtigt, da diese dem Entwickler bereits zur Verfügung stehen.
- Die Anschaffungs- und Einrichtungskosten für die Software zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen werden mit 25.000 € angesetzt. Enthalten sind alle notwendigen Schnittstellen sowie zusätzliche Konfigurationsmöglichkeiten. Darüber hinaus entstehen Kosten für die jährliche Wartung und Schulung in Höhe von 10 % der Anschaffungskosten. Des Weiteren beträgt nach einer Vorgabe des OFD Chemnitz² die Abschreibungsdauer für Software fünf Jahre. Der Zinssatz wird mit 5 % angenommen.

² OFD Chemnitz vom 28.07.2005, DStR 2005: S. 1409.

Jährliche Kosten des Softwaresystems			
Investitionskosten	I_{SW}	25.000	€
Nutzungsdauer	T_{SW}	5	a
Kalkulatorische Abschreibung	$Af A_{SW} = \frac{I_{SW}}{T_{SW}}$	5.000	€/a
Zinssatz	Z_{SW}	5	%
Kalkulatorische Zinsen	$K_{SW} = Z_{SW} * I_{SW}$	1.250	€/a
Wartungs- und Schulungskosten	W_{SW}	2.500	€/a
Jährliche Kosten	$F_{SW} = Af A_{SW} + K_{SW} + W_{SW}$	10.250	€/a

Tabelle 7: Exemplarische Kostenkalkulation für das Softwaresystem der Online-Simulation von fluidischen Prozessen

Somit entstehen pro Jahr Kosten in Höhe von 10.250 € für die Online-Simulation. Diesen Kosten wird beispielsweise folgender monetärer Nutzen entgegengesetzt:

- Zu einem großen Teil werden in der frühen Phase die Produktlebenskosten definiert. Darüber hinaus sind zu diesem Zeitpunkt die Kosten noch weitgehend beeinflussbar. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird daher angenommen, dass bei jährlich 12 Anlagenneuentwicklungen im Wert von 200.000 € (ohne Simulationseinsatz) die Kosten des Produktes um 1 % aufgrund des besseren Prozessverständnisses reduziert werden können.
- Darüber hinaus werden durch die simulative Absicherung und Funktionsüberprüfung jährlich 10.000 € an Versuchsaufbauten in Form von eingesparten Materialkosten und Arbeitsaufwand weniger benötigt.

Daher stehen den jährliche Kosten von 10.250 € (vgl. Tabelle 7) ein monetärer Nutzen von 18.000 € (vgl. Tabelle 8) entgegen. Dies führt zu einem jährlichen monetären Vorteil von 7.750 €, wodurch die statische Amortisationszeit der Online-Simulation von Fluiden in der frühen Phase ca. 10,4 Monate beträgt.

Jährlicher Nutzen des Softwaresystems			
Entwicklungskosten	E_{An}	200.000	€
Entwicklungsprojekte	I_{An}	12	1/a
Kosteneinsparung	Z_{An}	1	%
Kalkulatorische Produktkostensenkung	$W_{K,An} = E_{An} * I_{An} * Z_{An}$	24.000	€/a
Simulative Absicherung	$W_{A,An}$	10.000	€
Jährlicher Nutzen	$S_{An} = W_{K,An} + W_{A,An}$	34.000	€
Jährlicher monetärer Vorteil vor Zins	$G_{VZ} = S_{An} - F_{SW}$	23.750	€/a
Amortisationszeit (statisch)	$T_A = \frac{I_{SW}}{AfA_{SW} + S_{AN}}$	0,87	a

Tabelle 8: *Exemplarische Nutzenkalkulation der Online-Simulation von fluidischen Prozessen*

In einer anderen Betrachtungsweise kann man die jährlichen Kosten mit den reinen Personalkosten eines Anwenders verrechnen. Unter der Annahme eines Stundensatzes von 76 €³ entsprechen die jährlichen Kosten einen Personalaufwand von ca. 134,9 Arbeitsstunden, was weniger als einen Arbeitsmonat entspricht.

7.4 Zusammenfassung

Das Kapitel umfasst die Beschreibung sowohl des technischen als auch des wirtschaftlichen Nutzens sowie der Risiken der dargestellten Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses.

Es wird festgestellt, dass die in dieser Arbeit dargestellte Methode zu einem großen Teil die Anforderungen an eine Simulation von Fluiden in der frühen

³ GULP 2014

Phase erfüllt. Dies trifft insbesondere auf die Forderungen nach einer maximalen Flexibilität bei einer zur selben Zeit schnellen, aufwandsarmen und kostengünstigen Modellerstellung zu. Da die Methode zur Online-Simulation nicht auf eine einzige, für einen Anwendungsfall spezifische Simulationsmethode eingeschränkt ist, ist sie zudem für eine Vielzahl an Herausforderungen von fluidischen Prozessen geeignet. Diese liegen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit und bergen noch das Risiko einer notwendigen (fallspezifischen) Erweiterung der dargestellten Methode. Grundsätzlich wird jedoch durch die Methode der Online-Simulation von fluidischen Prozessen eine neuartige Möglichkeit zur Durchführung von Simulationsanalysen geschaffen, wodurch den CFD-Simulationen aufgrund des reduzierten Modellbildungs- und Simulationsdurchführungsaufwands neue Anwendungsfelder eröffnet werden. In einer Maximalkonfiguration ist eine starke Reduktion der Synthese-Analyse-Zyklusdauer sichergestellt, welche bis hin zu einer direkten WYSIWYG-Arbeitsweise reicht.

Neben diesen Erläuterungen wird in diesem Kapitel eine beispielhafte monetäre Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt, welche eine Amortisationszeit von weniger als einem Jahr errechnet.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Resümee

Die Forderung nach innovativen und neuen Produkten, aber auch der Aspekt sich verkürzender Produktlebenszyklen zwingt den Maschinen- und Anlagenbau zu qualitativ hochwertigen Entwicklungsprozessen, welche Produkte schnell am Markt platzieren lassen. Die Qualität sowie die Produktkosten werden vornehmlich durch die frühe Phase im Entwicklungsprozess definiert. Diese entscheidende Prozessphase wird bisher jedoch aufgrund des hohen Aufwands, der langen Berechnungszeiten und der folglich fehlenden Praktikabilität kaum durch simulative Methoden unterstützt. Davon sind vor allem fluidische Prozesse betroffen.

Aus diesem Grund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Schaffung einer neuartigen Methode, welche den Ingenieuren auf intuitive Art und Weise eine schnelle und einfache Unterstützung in der Entwicklung von Maschinen und Anlagen mit fluidischen Prozessen bereitstellt. In diesem Rahmen beschreibt die Arbeit die Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses des Maschinen- und Anlagenbaus.

Zu diesem Zweck werden zu Beginn der Arbeit wichtige Begriffe definiert und Grundlagen aus dem Bereich des Produktentwicklungsprozesses, der Funktionsweise von Computern und der Simulation von Fluiden vorgestellt. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen Abstraktionsgrade des methodischen Vorgehens in der Entwicklung von mechatronischen Produkten, vor allem die spezifischen Eigenschaften der frühen Phase, und die methodischen und technischen Eigenschaften heutiger Simulationsmethoden detailliert betrachtet.

Davon ausgehend werden die phasenspezifischen prozessualen und technischen Anforderungen abgeleitet. Durch ein deduktives Vorgehen wird anschließend festgestellt, dass sich die netzfreien Simulationsmethoden für die frühe Phase eignen.

Darauf aufbauend werden die Funktionsweise der Methode und deren einzelne Schritte vorgestellt. In der Online-Simulation wird das Simulationsmodell permanent an den aktuellen Konzeptionsstand angepasst. Durch die daraus resultie-

rende Beschleunigung der Synthese-Analyse-Zyklen wird die CFD-Simulation zum Einsatz in der frühen Phase befähigt.

Die Methode umfasst im Wesentlichen vier Prozessschritte. Zu Beginn erfolgt eine Initialisierungsphase, welche durch eine Analyse der Computerhardware die Wissensgrundlage für eine individuelle Anpassung der Simulationsgeschwindigkeit und -detaillierung ermöglicht. Dem folgend wird das Vorgehen der eigentlichen Simulationsdurchführung dargestellt, welche durch die Sequenzierung der Simulationsmodell Anpassung eine modulare, anwendungsfallsspezifische Simulationmethode ermöglicht. Die Simulationsvorbereitung umfasst die Generierung des Simulationsmodells. Hervorzuheben ist, dass das Modell nicht in jedem Syntheszyklus neu generiert wird, sondern eine aufwandsminimale Anpassung auf Grundlage der detektierten Modifikationen erfolgt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die permanente Optimierung des Simulationsmodells bezüglich der Rechenzeit. Der letzte Methodenschritt ist die Ergebnisbereitstellung, wodurch der heutige sequentielle Ansatz aufgelöst wird und eine sofortige, zeitschrittsynchrone Analysemöglichkeit für den Anwender geschaffen wird. Zudem wird die prozessuale und technische Integration aufgezeigt.

Danach werden mithilfe eines implementierten, prototypischen Softwaresystems die Umsetzbarkeit und der Nutzen der Methode zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen belegt. Abschließend wird sowohl das hohe Potential als auch die Neuartigkeit diskutiert. Die in dieser Arbeit dargestellte Methode der Online-Simulation von fluidischen Prozessen bietet eine neuartige Möglichkeit zur Einbindung von Simulationen in die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses, in welcher im Gegensatz zu heutigen Verfahren der manuelle Aufwand stark reduziert wird und eine WYSIWYG-Entwicklungsweise ermöglicht wird.

8.2 Ausblick

Die Online-Simulation ist ein neuer Ansatz zum Einsatz von Simulationswerkzeugen in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses. Dieser Ansatz kann in mehrere Richtungen weiterentwickelt werden.

Eine Möglichkeit ist die Steigerung der Durchgängigkeit der Simulationsmodelle. Die netzfreien Simulationsmodelle, welche während der Konzeptionsphase entstehen, werden in der Feinanalyse durch herkömmliche Methoden nicht genutzt. Das Wissen über Spezifika findet somit nur über den Anwender Eingang in das neue Simulationsmodell. Eine Weiterentwicklung ist die Übertragung der

Resultate in die Vernetzung, bspw. werden stark verwirbelte Regionen automatisiert stärker vernetzt. Die netzfreie Simulation bietet sozusagen einen Ausblick über das Verhalten des Fluids. Darüber hinaus kann der Ausblick auch während der Berechnung der netzbasierten Simulation durchgeführt werden. Durch eine parallele Simulationsdurchführung können die netzfreien, schnell zur Verfügung stehenden und groben Resultate als Input für die adaptive Netzverfeinerung der netzbasierten Methode dienen.

Ein weiterer Ansatz zur Weiterentwicklung der Online-Simulation ist das verteilte Bearbeiten der Konzepte. Die Interdisziplinarität heutiger Entwicklungsprojekte schränkt den Nutzen der Online-Simulation ein, da diese in der dargestellten Ausprägung nicht für parallelisiertes Arbeiten gestaltet ist. Abhilfe kann bspw. eine netzwerkbasierte Variante schaffen.

Die Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess kann durch die Online-Simulation aber auch gesteigert werden. Im Maschinen- und Anlagenbau gestaltet der Vertrieb schon heute erste Konzepte mit den Kunden. Eine direkte Ausgabe des Verhaltens durch die Online-Simulation kann das Verständnis über das Fluidverhalten und somit die Funktionsweise steigern. Jedoch wird in diesem Fall die visuelle Plausibilität noch weiter in den Fokus gerückt, weshalb die methodische Vorgehensweise sowie die Eignung der Simulationsmethode untersucht werden müssen.

Im Rahmen der Arbeit wird die Online-Simulation lediglich für das Verhalten innerhalb eines Abfüllprozesses im Anlagenbau untersucht. Untersucht werden kann zudem, welche methodischen Modifikationen bei der Übertragung des Grundprinzips auf weitere Felder notwendig sind. So ist die Online-Simulation etwa auch zur Simulation von Granulaten oder Sand vorstellbar.

9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chance. 1 Aufl. München: Carl Hanser Verlag 2011. ISBN: 978-3-44642-595-8.

ADAMI ET AL. 2010

Adami, S.; Hu, X. Y.; Adams, N. A.: A new surface-tension formulation for multi-phase SPH using a reproducing divergence approximation. Journal of Computational Physics 229 (2010) 13, S. 5011-5021.

ADAMS ET AL. 2007

Adams, B.; Pauly, M.; Keiser, R.; Guibas, L.: Adaptively Sampled Particle Fluids. ACM Transaction on Graphics 26 (2007) 3, S. 48:1-48:7.

AKULA ET AL. 2015

Akula, B.; Roy, P.; Razi, P.; Anderson, S.; Girimaji, S.: Partially-Averaged Navier-Stokes (PANS) Simulations of Lid-Driven Cavity Flow-Part 1: Comparison with URANS and LES. In: Girimaji, S. et al. (Hrsg): Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Berlin: Springer 2015, S. 359-369. ISBN: 978-3-31915-140-3.

ALTSCHULLER 1986

Altschuller, G. S.: Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme. 2. Aufl. Cottbus: PI - Planung und Innovation 1986. ISBN: 3-000-02700-9.

ANDREWS & O'ROURKE 1996

Andrews, M. J.; O'Rourke, P. J.: The Multiphase Particle-In-Cell (MP-PIC) Method for Dense Particulate Flows. International Journal of Multiphase Flow 22 (1996) 2, S. 379-402.

ATLUR & ZHU 1998

Atluri, S. N.; Zhu, T.: A new Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics. Computational Mechanics 22 (1998) 2, S. 117-127.

AVRAMENKO & KRASLAWSKI 2008

Avramenko, Y.; Kraslawski, A.: Case Based Design. 1. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-54075-705-4. Göttingen: Cuvillier 2007. ISBN: 978-3-86727-126-4.

BAJAJ 1990

Bajaj, C.: Convex Decomposition of Polyhedra and Robustness. Computer Science Technical Reports (1990) 842, S. 1-28.

BARBA 2010

Barba, L. A.: New Frontiers of CFD. In: Biswas, R.(Hrsg): Parallel Computational Fluid Dynamics: Recent Advances and Future Directions. Lancaster: DES-tech Publications 2010, S. 160-166. ISBN: 978-1-60595-022-8.

BATTY ET AL. 2010

Batty, C.; Xeons, S.; Houston, B.: Tetrahedral Embedded Boundary Methods for Accurate and Flexible Adaptive Fluids. Computer Graphics Forum 29 (2010) 2, S. 695-704.

BAUMBERGER 2007

Baumberger, G. C.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. Diss. Technische Universität München (2007).

BECHTHOLD 2006

Bechthold, J.: Experimentelle Absicherung virtueller Produktoptimierungen. Diss. Universität Duisburg Essen (2006). Göttingen, Cuvillier 2007. ISBN: 978-3-86727-126-4.

BEIELSTEIN ET AL. 2003

Beielstein, T.; Mehnen, J.; Schönemann, L.; Schwefel, H.-P.; Surmann, T.; Weinter, K.; Wiesmann, D.: Design of Evolutionary Algorithms and Applications in Surface Reconstruction. In: Schwefel, H.-P. et al. (Hrsg.): Advances in Computational Intelligence. Berlin: Springer 2003, S. 145-193. ISBN: 978-3-64207-758-6.

BEINERT 2007

Beinert, C.: Eignung numerischer Strömungssimulation zur Bestimmung des Betriebsverhaltens von Industriearmaturen. Diss. Technische Universität Darmstadt (2007).

BELYTSCHOKO ET AL. 1996

Belytschoko, T.; Krongauz, Y.; Organ, D.; Fleming, M.; Krysl, P.: Meshless Methods An Overview and Recent Developments. Computer methods in applied mechanics and engineering 139 (1996) 1, S. 3-47.

BENDER ET AL. 2005

Bender, K.; Dominka, S.; Koç, A.; Pöschl, M.; Russ, M.; Stützel B.; Bender, K. (Hrsg.): Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. 1. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN 3-54022-995-7.

BERNAND & WALLACE 2002

Bernand, P. S.; Wallace, J. M.: Turbulent Flow. New Jersey: Wiley & Sons 2002. ISBN: 0-47133-219-4.

BERZINS 1999

Berzins, M.: Mesh Quality: A Funtion of Geometry, Error Estimates or Both?. Engineering with Computers 15 (1999), S. 236-247.

BIERSCHENK ET AL. 2005

Bierschenk, S; Kuhlmann, T. Ritter, A.: Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen. 1. Aufl. Suttgart: Fraunhofer IRB 2005. ISBN: 978-3-81676-725-1.

BLEISCH ET AL. 2011

Bleisch, G.; Majschak, J.-P.; Weiß, U.: Verpackungstechnische Prozesse. 1. Aufl. Hamburg: B. Behr's Verlag 2011. ISBN: 978-3-89947-281-3.

BRACHT ET AL. 2011

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenze, S.: Digitale Fabrik. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-54088-973-1.

BRACKBILL ET AL. 1992

Brackbill, J. U.; Kothe, D. B.; Zemach, C.: A Continuum Method for Modeling Surface Tension. Journal of Computational Physics 100 (1992) 2, S. 335-354.

BRANDVIK & PULLAN 2009

Brandvik, T.; Pullan, G.: An Accelerated 3D Navier-Stokes Solver for Flows in Turbomachines. In: American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Orlando, 8.-12 Juni 2009. New York: ASME 2009, S. 619-629.

BRAUN 2005

Braun, T. E.: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. Diss. Technische Universität München (2005). München: Dr. Hut 2006. ISBN: 3-89963-274-5.

BREWER ET AL. 2003

Brewer, M.; Diachin, L. F.; Knupp, P.; Leurent, T.; Melander, D.: The Mesquite Mesh Quality Improvement Toolkit. In: Lee, D. T.(Hrsg.): 12th International Meshing Roundtable (IMR). Santa Fe, 14.-17. September 2003. Singapur: World Scientific 2003, S. 239-250. <

http://imr.sandia.gov/papers/imr12/12th_IMR_CD.pdf> -2. April 2015.

BRIDSON & MÜLLER-FISCHER 2007

Bridson, R.; Müller-Fischer, M.: Fluid simulation. In: McMains, S. et al. (Hrsg.): SIGGRAPH '07 Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference. San Diego, 5.-9. August 2007. New York: ACM 2007, S. 1-81. ISBN: 978-1-45031-823-5.

CARLSON ET AL. 2004

Carlson, M.; Mucha, P. J.; Turk, G.: Rigid Fluid: Animating the Interplay Between Rigid Bodies and Fluid. ACM Transaction on Graphics 23 (2004) 3, S. 377-384.

CHANDRASEGARAN ET AL. 2013

Chandrasegaran, S. K.; Ramani, K.; Sriram, R. D.; Horváth, I.; Bernard, A.; Harik, R. F.; Gao, W.: The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. Computer-Aided Design 45 (2013), S. 204-228.

CHAZELLE 1984

Chazelle, B.: Convex Partitions of Polyhedra: A Lower Bound and Worst-Case Optimal Algorithm. SIAM Journal on Computing 13 (1984) 3, S. 488-507.

CHEN & DOOLEN 1998

Chen, S.; Doolen, G. D.: Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows. Annual Review of Fluid Mechanics 30 (1998) 1, S. 329-364.

CHENTANEZ & MÜLLER 2011

Chentanez, N.; Müller, M.: Real-Time Eulerian Water Simulation Using a Restricted Tall Cell Grid. *ACM Transaction on Graphics* 30 (2011) 4, Nummer 82. New York: ACM 201, S. 174. ISBN: 978-3-90567-461-3.

CHENTANEZ ET AL. 2014

Chentanez, N.; Müller, M.; Kim, T.-Y.: Coupling 3D Eulerian, Heightfield and Particle Methods for Interactive Simulation of Large Scale Liquid Phenomena. In: Koltun, V. et al. (Hrsg.): *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*. Kopenhagen, 21.-23. Juli 2014. Aire-la-Ville: Eurographics Association 2014. ISBN: 978-3-90567-461-3.

COLLAGROSSI & LANDRINI 2003

Collagrossi, A.; Landrini, M.: Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics* 191 (2003) 2, S. 448-475.

CONTRINO ET AL. 2014

Contrino, D.; Lallemand, P.; Asinari, P.; Luo, L.-S.: Lattice-Boltzmann simulations of the thermally driven 2D square cavity at high Rayleigh numbers. *Journal of Computational Physics* 275 (2014), S. 257-272.

COOK & AGAH 2009

Cook, M. T.; Agah, A.: A survey of sketch-based 3-D modeling techniques. *Interacting with computers* 21 (2009), S. 201-211.

COURANT ET AL. 1928

Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H.: Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen* 100 (1928) 1, S. 32-74.

CHENG & ARMFIELD 1995

Cheng, L.; Armfield, S.: A simplified marker and cell method for unsteady flows on non-staggered grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 21 (1995) 1, S. 15-34.

CHUNG 2002

Chung, T. J.: *Computational Fluid Dynamics*. 1. Aufl. Cambridge: Cambridge University 2002. ISBN: 0-521-59416-2.

Literaturverzeichnis

DAENZER & HUBER 2002

Daenzer, W. F.; Huber, F.: System Engineering. 11. Aufl. Zürich: Industrielle Organisation 2002. ISBN: 3-85743-998-X.

DANKERS 2014

Dankers, W.: Decision Making. In: Laperrière, L. et al. (Hrsg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. 1. Aufl. Berlin: Springer 2014, S. 363-367. ISBN: 978-3-64220-616-0.

DAVIDSON 2002

Davidson, D. L.: The role of computational fluid dynamics in process industries. The Bridge (2002) 4, S. 9-14.

DAVIS & RABINOWITZ 1984

Davis, P. J.; Rabinowitz, P.: Methods of Numerical Integration. 2. Aufl. San Diego: Academic Press 1984. ISBN: 0-12206-360-0.

DÖBLER 2008

Döbler, T.: Simulation und Visualisierung in der Produktentwicklung. Fazit Forschung (2008) 12.

DÖRNER 1999

Dörner, D.: Bauplan für eine Seele. Reinbek: Rowohlt (1999). ISBN: 978-3-498-01288-5.

DIN 60050

DIN IEC 60050: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch, Teil 351: Leittechnik. Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: Beuth 2009.

DUARTE 1995

Duarte, C. A.: A Review of Some Meshless Methods to Solve Partial Differential Equations. Technical Report 95-05, TICAM. The University of Texas (1995).

DUFFY ET AL. 2012

Duffy, A. C.; Hammond D. A.; Nielsen, E. J.: Production Level CFD Code Acceleration for Hybrid Many-Core Architectures. NASA Technical Report 217770 (2012).

DYLLA 1991

Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. München: Hanser 1991. ISBN: 978-3-44616-327-0.

EGERMEIER 2008

Egermeier, H.: Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen. Diss. Technische Universität München 2008. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2008. ISBN: 978-3-83160-833-1. (Forschungsberichte iw 222).

EHMANN & LIN 2001

Ehmann, S. A.; Lin, M. C.: Accurate and Fast Proximity Queries between Polyhedra Using Convex Surface Decomposition. In: Deussen, O. et al. (Hrsg.): Computer Graphics Forum 20 (2001) 3, S. 500-511.

EHRENSPIEL 2002

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 2. Aufl. Wien: Hanser 2002. ISBN: 978-3-44622-119-2.

EHRENSPIEL ET AL. 2007

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. 6. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-54074-222-7.

EIGNER 2014

Eigner, M.: Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer 2014, S. 15-52. ISBN: 978-3-66243-815-2.

EITZ & LIXU 2007

Eitz, M.; Lixu, G.: Hierarchical Spatial Hashing for Real-time Collision Detection. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI '07). Lyon, 13.-15. Juni 2007. Piscataway: IEEE 2007, S. 61-70. ISBN: 0-76952-815-5.

Engel 1994

Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1994. ISBN: 978-3-54058-258-8. (Forschungsberichte iw 78).

ENRIGHT ET AL. 2002A

Enright, D.; Fedkiw, R.; Ferziger, J.; Mitchell, I.: A Hybrid Particle Level Set Method for Improved Interface Capturing. *Journal of Computational Physics* 183 (2002) 1, S. 83-116.

ENRIGHT ET AL. 2002B

Enright, D.; Marschner, S.; Fedkiw, R.: Animation and rendering of complex water surfaces. *ACM Transaction on Graphics* 21 (2002) 3, S. 736-744.

ERNST 2005

Ernst, H.: Neuproduktentwicklung. In: Albers, S. et al.(Hrsg.): *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement*. Wiesbaden: Gabler 2005, S. 249-264. ISBN: 3-40912-671-6.

ERNST 2014

Ernst, J.: Humanfaktoren in der Produktentwicklung. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung*. Berlin: Springer 2014, S. 349-368. ISBN: 978-3-66243-815-2.

FEDKIW ET AL. 1999

Fedkiw, R. P.; Aslam, T. Merriman, B.; Stanley, O.: A Non-Oscillatory Eulerian Approach to Interfaces in Multimaterial Flows (The Ghost Fluid Method). *Journal of Computational Physics* 152 (1999) 2, S. 457-492.

FEFFERMAN 2006

Fefferman, C. L.: Existence and Smoothness of the Navier-Stokes Equation. In: Calson, J. et al.(Hrsg.): *The Millenium Prize Problems*. 1. Aufl. Providence: American Mathematical Society 2006, S. 57-70. ISBN: 0-8218-3679-X.

FELDHUSEN & GROTE 2013

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Der Produktentstehungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J. et al. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8 Aufl. Berlin: Springer 2013, S. 11-24. ISBN: 978-3-64229-568-3.

FOSTER & METAXAS 1997

Foster, N.; Metaxas, D.: Modeling the motion of hot, turbulent gas. In: Owen, G. S. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Los Angeles, 3.-8. August 1997. New York: ACM 1997, S. 181-188. ISBN: 0-89791-896-7.

GAUSEMEIER ET AL. 2013

Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Steffen, D.; Czaja, A.; Wiederkehr, O.; Tschirner, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. 1. Aufl. Paderborn: 2013.

GHARIB & QIN 2013

Gharib, I.; Qin, S.: Integration of sketch-based conceptual design and commercial CAD systems for manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68 (2013) 9-12, S. 2669-2681.

GINGOLD & MONAGHAN 1977

Gingold, R. A.; Monaghan, J. J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly notices of the royal astronomical society 181 (1977) 3, S. 375-389.

GOPALAN ET AL. 2013

Gopalan, H. Heinz, S.; Stöllinger, M. K.: A Unified RANS-LES Model. Part 2. Model Accuracy and Computational Cost. Journal of Computational Physics 249 (2013), S. 249-274.

GÖDDEKE 2010

Göddeke, D.: Fast and Accurate Finite-Element Multigrid Solvers for PDE Simulations on GPU Clusters. Diss. Technische Universität Dortmund (2010).

GULP 2014

Gulp Redaktion: Angebot und Nachfrage: Verteilung der Stundensatz-Forderung der IT-/Engineering-Freiberufler - GULP Stundensatz-Auswertung August 2014 < <https://www.gulp.de/knowledge-base/stundensaetze/angebot-und-nachfrage-verteilung-der-stundensatz-forderung-der-it-engineering-freiberufler.html> > - 6.07.2015.

GUZIK ET AL. 2014

Guzik, S. M.; Weisgraber, T. H.; Colella, P.; Alder, B. J.: Interpolation methods and the accuracy of lattice-Boltzmann mesh refinement. Journal of Computational Physics 259 (2014), S. 461-487.

GÜNTHER 1998

Günther, J.: Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozeß. Diss. Technische Universität München (1998).

Literaturverzeichnis

HACKER 1998

Hacker W.: Allgemeine Arbeitspsychologie. 1. Aufl. Bern: Hans Huber 1998. ISBN: 3-456-82917-5.

HAUKE 2008

Hauke, G.: An introduction to fluid mechanics and transport phenomena. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-1-40208-536-9

HABLINGER & KLEMENT 1990

Haßlinger, S.; Klement, K.: Die Entwicklung der Körpermodellierung basierend auf Freiformflächen. In: Envarnaco, J. L. et al. (Hrsg.): Geometrische Verfahren der Graphischen Datenverarbeitung. Berlin: Springer 1990, S. 229-247. ISBN: 978-3-54053-011-4.

HÄBERLEIN 2011

Häberlein, T.: Eine praktische Einführung in die Informatik mit Bash und Python. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2011. ISBN: 978-3-48670-423-5.

HE & LUO 1997

He, X.; Luo, L.-S.: Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. Physical Review E 56 (1997) 6, S. 6811-6817.

HEDTSTÜCK 2013

Hedtstück, U.: Simulation diskreter Prozesse. 1. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-34870-9.

HEFNER ET AL. 2014

Hefner, F.; Krottil, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Physikbasierte Simulation von Produktionssystemen. Forschungsreport für den Maschinenbau in Bayern (2014) Sommersemester, S. 41-43.

HELMS & STROTHOTTE ET AL. 1993

Helms, C.; Strothotte, T.: Was sagen Computeranimationen ihren Betrachtern?. In: Böcker, H.-D. et al.(Hrsg.): Mensch-Computer-Kommunikation. Berlin: Springer 1993, S. 48-60. ISBN: 978-3-64278-273-2.

HENSEL 2011

Hensel, T.: Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen. Diss. Technische Universität München (2011). München: Herbert Utz 2013. ISBN: 978-3-83164-167-3. (Forschungsberichte iw 258).

HÉRAULT ET AL. 2010

Héroult, A.; Bilotta G.; Dalrymple, R. A.: SPH on GPU with CUDA. Journal of Hydraulic Research, 48 (2010) 1, S. 74-79.

HIRT & NICHOLS 1981

Hirt, C. W.; Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics 39 (1981) 1, S. 201-225.

HONG & KIM 2003

Hong, J.-M.; Kim, C.-H.: Animation of Bubbles in Liquid. Computer Graphics Forum 22 (2003) 3, S 253-262.

HÖFLER 2013

Höfler, C.: Entwicklung eines Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Codes zur numerischen Vorhersage des Primärzerfalls an Brennstoffeinspritzdüsen. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2013).

HÖLLING & HERWIG 2004

Hölling, M.; Herwig, H.: CFD-TODAY: Anmerkungen zum kritischen Umgang mit kommerziellen Software-Programmpaketen. Forschung im Ingenieurwesen 68 (2004) 3, S. 150-154.

IMAI 1994

Imai, M.: Kaizen. 4. Aufl. Berlin: Ullstein 1994. ISBN: 3-54835-332-0.

IRGENS 2014

Irgens, F.: Rheology and Non-Newtonian Fluids. 1. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-31901-052-6.

ISO 16739

ISO 16739: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Berlin: Beuth (2013).

ITU ET AL. 2012

Itu, L.; Puneet, S.; Kamen, A. Suci, C.; Postelnicu, A.; Moldoveanu, F.: GPU Accelerated Simulation of the Human Arterial Circulation. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). Brasov, 24.-26. Mai 2012. Piscataway: IEEE 2012, S 1478-1485. ISBN: 978-1-46731-652-1.

JOHNSON ET AL. 2005

Johnson, F. T.; Tinoco, E. N.; Yu, N. J.: Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle. *Computer & Fluids* 34 (2005) 10, S. 1115-1151.

JOSSERAND & ZALESKI 2003

Josserand, C.; Zaleski, S.: Droplet Splashing on a thin liquid film. *Physics of Fluids* 15 (2003) 6, S. 1650-1680.

KASHIYAMA ET AL. 2000

Kashiyama, K.; Tamai, T.; Inomata, W.; Yamaguchi, S.: A parallel finite element method for incompressible Navier-Stokes flows based on unstructured grids. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 190 (2000) 3-4, S. 333-344.

KEISER 2006

Keiser, R.: Meshless Lagrangian Methods for Physics-Based Animations of Solids and Fluids. Diss. ETH Zürich (2006)

KIEFER 2007

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Diss. Universität des Saarlandes (2007). Saarbrücken: LKT 2007. ISBN: 978-3-93042-972-1. (Schriftenreihe Produktionstechnik 43).

KIM ET AL. 2005

Kim, B.; Liu, Y.; Llamas, I.; Rossignac, J.: FlowFixer: Using BFECC for Fluid Simulation. In: Galin, E. et al. (Hrsg.): Proceedings of the First Eurographics conference on Natural Phenomena (NPH'05). Aire-la-Ville /Schweiz, 5. September 2005. Aire-la-Ville: Eurographics Association 2005, S. 51-56. ISBN: 3-90567-329-0.

KIM ET AL. 2008

Kim, D.; Song, O.-Y.; Ko, H.-S.: A Semi-Lagrangian CIP Fluid Solver without Dimensional Splitting. *Computer Graphics Forum* 27 (2008) 2, S. 467-475.

KIM & WILEMON 2002

Kim, J.; Wilemon, D.: Focusing the fuzzy front-end in new product development. *R&D Management* 32 (2002) 4, S. 269-279.

KLINGNER ET AL. 2006

Klingner, B. M.; Feldman, B. E.; Chantanez, N.; O'Brien, J. F.: Fluid Animation with Dynamic Meshes. *ACM Transaction on Graphics* 25 (2006) 3, S. 820-825.

KOEN ET AL. 2001

Koen, P.; Ajamian, G.; Burkart, R.; Clamen, A.; Davidson, J.; D'Amore, R.; Elkins, C.; Herald, K.; Incorvia, M.; Johnson, A.; Karlo, R.: Providing Clarity and a Common Language to the "Fuzzy Front End". *Research-Technology Management* 44 (2001) 2, S. 46-55.

KORTELAJNEN 2009

Kortelainen, J.: Meshing Tools for Open Source CFD – A Practical Point of View. VTT Ergebnisbericht VTT-V-27856-08. CSC - IT Center for Science (2009).

KROTIL 2012

Krottil, S.: Schnellere Inbetriebnahme von Produktionsanlagen. *Digital-Engineering-Magazin* 15 (2012) 5, S. 64-65.

KROTIL & REINHART 2015

Krottil, S.; Reinhart, G.: Online-Simulation fluiddynamischer Prozesse in der Konzeptionsphase. *Entwurf mechatronischer Systeme. Wintesys 2015*. Paderborn, 23.-24. April 2015.

KROTIL ET AL. 2014

Krottil, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten der Fluidsimulation in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses. In: Wittmann, J. et al.(Hrsg.): *ASIM 2014: 22. Symposium Simulationstechnik*, Berlin, 3.-5. September 2014. 1. Aufl. Wien: ARGESIM, 2014, S. 259-266. ISBN: 978-3-90160-844-5. (ARGESIM Report 43).

LACOUR 2011

Lacour, F.-F. R.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. Diss. Technische Universität München (2011). München: Herbert Utz 2011. ISBN: 978-3-83164-162-8. (Forschungsberichte iw 257).

LANGERMANN 2008

Langermann R.: Beitrag zur durchgängigen Simulationsunterstützung im Entwicklungsprozess von Flugzeugsystemen. Diss. Technische Universität Braunschweig (2008). <<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00026819>> - 22.03.2015.

LAPPA 2005

Lappa, M.: Coalescence and Non-coalescence Phenomena in Multi-material Problems and Dispersed Multiphase Flows: Part 2, A Critical Review of CFD Approaches. Fluid Dynamics and Materials Processing 1 (2005) 3, S. 213-234.

LAURIEN & OERTEL 2011

Laurien, E.; Oertel, H.: Numerische Strömungsmechanik. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011. ISBN: 978-3-83481-503-3-

LE GRAND 2007

Le Grand, S.: Broad-phase collision detection with CUDA. In: Nguyen, H. (Hrsg.): GPU Gems 3. Boston: Addison-Wesley 2007, S. 697-721. ISBN: 978-0-32151-526-1.

LECHELER 2014

Lecheler, S.: Numerische Strömungsberechnung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-65805-200-3.

LEE ET AL. 2010

Lee, V. W.; Kim, C.; Chhugani, J.; Deisher, M.; Kim, D.; Nguyen, A.; Satish, N.; Smelyanskiy, M.; Chennupaty, S.; Hammarlund, P.; Singhal, R.; Dubey, P.: Debunking the 100X GPU vs. CPU Myth: An Evaluation of Throughput Computing on CPU and GPU. ACM SIGARCH Computer Architecture News 38 (2010) 3, S. 451-460.

LIEN 2006

Lien, J.-M.: Approximate convex Decomposition and its applications. Diss. Texas A&M University, Bryan (2006).

LIN & ATLURI 2000

Lin, H.; Atluri, S. N.: Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method for Convection-Diffusion Problems. *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 1 (2000) 2, S. 45-60.

LIN & GOTTSCHALK 1998

Lin, M. C.; Gottschalk, S.: Collision Detection Between Geometric Models: A Survey. In: Robert Cripps (Hrsg.): *Proceedings of the 8th IMA Conference on the Mathematics of Surfaces (IMA-98)*. Winchester: Information Geometers 1998, S. 37-56.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-64201-422-2.

LIU 2010

Liu, G. R.: *Meshfree Methods*. 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press 2010. ISBN: 978-1-42008-209-8.

LIU & LIU 2010

Liu, M.B.; Liu, G. R.: Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering* 17 (2010) 1, S. 25-76.

LIU ET AL. 1995

Liu, W. K.; Jun, S.; Li, S.; Adee, J.; Belytschko, T.: Reproducing Kernel Particle Methods for Structural Dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 38 (1995) 10, S. 1655-1679.

LIU ET AL. 1997

Liu, W. K.; Hao, W.; Chen, Y.; Jun, S.; Gosz, J.: Multiresolution reproducing kernel particle methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 24 (1997) 12, S. 1391-1415.

LOSASSO ET AL. 2004

Losasso, F.; Gibou, F.; Fedkiw, R.: Simulating Water and Smoke with an Octree Data Structure. *ACM Transaction on Graphics* 23 (2004) 3, S. 457-462.

LUCY 1977

Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal* 82 (1977) 12, S. 1013-1024.

MACKLIN & MÜLLER 2013

Macklin, M.; Müller, M.: Position Based Fluids. *ACM Transaction on Graphics* 32 (2013) 4, Nummer 4.

MAMOU & GHORBEL 2009

Mamou, K.; Ghorbel, F.: A simple and efficient approach for 3D mesh approximate convex decomposition. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 2009 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2009). Cairo, 7.-12. November 2009. Piscataway: IEEE 2009, S. 3501-3504. ISBN: 978-1-42445-653-6.

MAROPOULOS & CEGLAREK 2010

Maropoulos, P. G.; Ceglarek, D.: Design verification and validation in product lifecycle. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 2, S 740-759.

MENTER 2015

Menter, F.: Elements and Applications of Scale-Resolving Simulation Methods in Industrial CFD. In: Fröhlich, J. et al. (Hrsg.): *Direct and Large-Eddy Simulation IX*. Berlin: Springer 2015, S. 179-195. ISBN: 978-3-31914-447-4.

MILLER ET AL. 1991

Miller, G. A.; Galanter, E.; Pribram, K. H.: *Strategien des Handelns*. 2. Aufl. Stuttgart: Ernst-Klett 1991. ISBN: 3-60895-102-4.

MOHAMAD 2011

Mohamad; A. A.: *Lattice Boltzmann Method*. 1. Aufl. London: Springer 2011. ISBN: 978-0-85729-454-8.

MOLEMAKER ET AL. 2008

Molemaker, J.; Cohen, J. M.; Patel, S.; Noh, J.: Low Viscosity Flow Simulations for Animation. Fiume, E. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Dublin, 7.-9. Juli 2008. Aire-la-Ville: Eurographics Association 2008. S. 9-18. ISBN: 978-3-90567-410-1

MONAGHAN 1982

Monaghan, J. J.: Why Particle Methods Work. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 3 (1982) 4, S. 422-433.

MONAGHAN 1992

Monaghan, J. J.: Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual review of astronomy and astrophysics* 30 (1992), S. 543-574.

MONAGHAN 1994

Monaghan, J. J.: Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics* 110 (1994) 2. S. 399-406.

MONAGHAN ET AL. 1999

Monaghan, J. J.; Cas, R. A. F.; Kos, A. M.; Hallworth, M.: Gravity currents descending a ramp in a stratified tank. *Journal of Fluid Mechanics* 379 (1999) 1, S. 39-69.

MOORE & WILHELMS 1988

Moore, M.; Wilhelms, J.: Collision Detection and Response for Computer Animation. In: Beach, R. J. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '88)*, New York: ACM 1988, S. 289 - 299. ISBN: 0-89791-275-6.

MORRIS ET AL 1997

Morris, J. P.; Fox, P. J.; Zhu, Y.: Modeling Low Reynolds Number Incompressible Flows Using SPH. *Journal of Computational Physics* 136 (1997) 1, S. 214-226.

MÜLLER ET AL. 2007

Müller, M.; Heidelberger, B.; Hennix, M.; Ratcliff, J.: Position based dynamics. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 18 (2007) 2, S. 109-118.

NATTERMANN ET AL. 2013

Nattermann, R.; Anderl, R.: The W-Model - using Systems Engineering for Adaptronics. *Procedia Computer Science* 16 (2013), S. 937-946.

NAUMOV 2011

Naumov, M.: Incomplete-LU and Cholesky preconditioned iterative methods using CUSPARSE and CUBLAS. Nvidia white paper (2011).

<<http://docs.nvidia.com/cuda/incomplete-lu-cholesky/>> - 31. März 2015

NIEBLING 2014

Niebling, F.: 2014. Diss. Universität Stuttgart (2013).

NVIDIA CORPORATION 2015

Nvidia Corporation: CUDA C Programming Guide.

<<http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/>>-30.03.2015.

OÑATE ET AL. 1996

Oñate, E.; Idelsohn, S., Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Sacco, C.: A stabilized finite point method for analysis of fluid mechanics problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 139 (1996) 1-4, S. 315-346.

OPPELT ET AL. 2015.

Oppelt, M.; Barth, M. Urbas, L.: The Role of Simulation within the Life-Cycle of a Process Plant. Siemens Ag & HS Pforzheim & TU Dresden 2015. DOI:

10.13140/2.1.2620.7523.

OSHER 1988

Osher, S.: Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations. Journal of Computational Physics 79 (1988) 1, S. 12-49.

OSHER & FEDKIW 2001

Osher, S.; Fedkiw, R. P.: Level Set Methods: An Overview and Some Recent Results. Journal of Computational Physics 169 (2001) 2, S. 463-502.

PEDDIE 2006

Peddie, J: An Analysis of the GPU Market. Jon Peddie Research (AIB report) 2011. <<http://jonpeddie.com/publications/whitepapers/an-analysis-of-the-gpu-market/>>-30.03.2006.

PLETCHER ET AL. 2013

Pletcher, R. H.; Tannehill, J. C.; Anderson, D. A.: Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. 1. Aufl. Boca Raton: CRC Press 2013. ISBN: 978-1-59169-037-5.

PLEWA ET AL. 2005

Plewa, T.; Linde, T.; Weirs, V. G.: Adaptive Mesh Refinement - Theory and Applications. 1. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-54021-147-0.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. 2. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64220-579-8.

PRANGGONO ET AL. 2015

Pranggono, B.; Alboaneen, D.; Tianfield, H.: Simulation Tools for Cloud Computing. In: Pathan, A.-S. K. et al. (Hrsg.): Simulation Technologies in Networking and Communications. Boca Raton: CRC 2015, S. 311-336. ISBN: 978-1-48222-550-1.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Stich, P.; Krottil, S.; Hofmann, D.: Entwicklungspotentiale und Trends in der mechatronischen Simulation. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching, 11. November 2011. München: Herbert Utz 2011, Kapitel 1. ISBN: 978-3-83164-149-9. (Seminarberichte 101)

REN ET AL. 2013

Ren, Z.; Yuan, J.; Liu, W.: Minimum Near-Convex Shape Decomposition. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence 35 (2013) 10, S. 2546-2552.

ROBINSON 2008A

Robinson, S.: Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. Journal of the Operational Research Society 59 (2008), S. 278-290.

ROBINSON 2008B

Robinson, S.: Conceptual modelling for simulation Part II: a framework for conceptual modelling. Journal of the Operational Research Society 59 (2008), S. 291-304.

ROGERS 1992

Rogers, D. F.: Laminar Flow Analysis. Cambridge: Cambridge University 1992. ISBN: 0-521-41152-1.

RUDMAN 1997

Rudman, M.: Volume Tracking Methods for Interfacial Flow Calculations. International Journal for Numerical Methods in Fluids 24 (1997) 7, S. 671-691.

SANTO 2009

Santo, B.; Adee, S.: Multicore Made Simple. IEEE Spectrum (2009) 1, S.33-36.

SCHACK 2008

Schack, R. J.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Diss. Technische Universität München (2007). München: Herbert Utz 2008. ISBN: 978-3-83160-748-8. (Forschungsberichte iwB 207).

SCHILLING 2007

Schilling, O.: Über eine implizite Partikelmethode zur Simulation von Umformprozessen. Diss. Ruhr-Universität Bochum (2005). 1. Aufl. Bochum: Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum 2007. ISBN: 978-3-935892-14-8. (Mitteilungen aus dem Institut für Mechanik Nr. 139).

SCHWARZE 2013

Schwarze, R.: CFD-Modellierung. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64224-377-6.

SELLE ET AL. 2005

Selle, A.; Rasmussen, N.; Fedkiw, R.: A Vortex Particle Method for Smoke, Water and Explosions. ACM Transaction on Graphics 24 (2005) 3, S. 910-914.

SELLE ET AL. 2008

Selle, A.; Fedkiw, R.; Kim, B.; Liu, Y.; Rossignac, J.: An Unconditionally Stable MacCormack Method. Journal of Scientific Computing 35 (2008) 2-3, S. 350-371.

SENOCAK ET AL. 2009

Senocak, I.; Thibault, J.; Caylor, M.: Rapid-response Urban CFD Simulations using a GPU Computing Paradigm on Desktop Supercomputers. Eighth Symposium on the Urban Environment. Phoenix Arizona, 10.-15. Januar 2009.

SETHIAN 1996

Sethian, J. A.: A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93 (1996) 4, S. 1591-1595.

SETHIAN & SMERAKA 2003

Sethian, J. A.; Smereka, P.: Level Set Methods for Fluid Interfaces. *Annual Review of Fluid Mechanics* 35 (2003) 35, S. 341-372.

SHETTY ET AL. 2012

Shetty, D.; Manzione, L.; Ali, A.: Survey of Mechatronic Techniques in Modern Machine Design. *Journal of Robotics* 12 (2012).

SIEDL 2008

Siedl D. J.: Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen . Diss. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2008. ISBN: 978-3-83160-779-6. (Forschungsberichte iw 213).

SIEGLOCH 2012

Siegloch, H.: Technische Fluidmechanik. 8. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-64222-844-5.

SOLENTHALER 2010

Solenthaler, B.: Incompressible Fluid Simulation and Advanced Surface Handling with SPH. Diss. ETH Zürich (2010).

SOLENTHALER & PAJAROLA 2009

Solenthaler, B; Pajarola, B.: Predictive-corrective incompressible SPH. *ACM Transaction on Graphics* 28 (2009) 3, Nummer 40.

SONNENBURG 2009

Sonnenburg, A.: Strömungssimulation in der Umwelttechnologie. *Hessen Umwelttech* 9 (2009). http://www.hessen-umwelttech.de/mm/cfd_09_screen.pdf- 8. April 2015

SPATH ET AL. 2013

Spaht, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S. (Hrsg.): *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. <<http://www.produktionsarbeit.de/>>-2. April 2015

SPITZWEG 2009

Spitzweg, M.: Methode und Konzept zum Einsatz eines Physikmodells für die Entwicklung von Produktionsanlagen. Diss. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2009. ISBN: 978-3-83160-931-4. (Forschungsberichte iw 233).

STACHOWIAK 1973

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer 1973. ISBN: 978-3-21181-106-1.

STACHOVICH 1998

Stahovich, T. F.; Davis, R.; Shrobe, H.: Generating multiple new designs from a sketch. Artificial Intelligence 104 (1998), S. 211 - 264.

STAM 1999

Stam, J.: Stable fluids. In: Waggenspack, W. (Hrsg.): Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '99). Los Angeles, 8.-13. August 1999. New York: ACM 1999, S. 121-128. ISBN: 0-20148-560-5.

STARK ET AL. 2011

Stark, R.; Hayka, H.; Israel, J. H.; Kim, M.; Müller, P.; Völlinger, U.: Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. Informatik Spektrum 34 (2011) 1, S. 20-28.

Stich et al. 2015

Stich, P.; Krottil, S.; Reinhart, G.: Interaktive simulationsgestützte Programmierung bei der Entwicklung mechatronischer Verpackungsanlagen. In: TU Dresden et al. (Hrsg.): VVD 2015. Dresden, 12.-13. März 2015. Dresden: Technische Universität 2015, S. 275-292. ISBN: 978-3-86780-430-1.

SUH 1998

Suh, N. P.: Axiomatic Design Theory for Systems. Research in Engineering Design 10 (1998) 4, S. 189-209.

SUTHERLAND 1963

Sutherland, I. E.: SketchPad: A man-machine graphical communication system. AFIPS Conference Proceedings 23 (1963), S.323-328.

TAN & YAN 2009

Tan, J.; Yan, X.: Physically-based Fluid Animation: A Survey. Science in China Series F: Information Sciences 52 (2009) 5, S. 723-740.

TATARCZYK 2008

Tatarczyk, B.: Organisatorische Gestaltung der frühen Phase des Innovationsprozesses. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2008). Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-83491-618-1.

TIAN ET AL. 2009

Tian, C.; Masry, M.; Lipson, H.: Physical sketching: Reconstruction and analysis of 3D objects from freehand sketches. Computer-Aided Design 41 (2009), S. 147-158.

TOBLER 2011

Tobler, R. F.: Separating semantics from rendering: a scene graph based architecture for graphics applications. The Visual Computer 27 (2011) 6-8, S 687-695.

TOMIYAMA ET AL. 2009

Tomiyaama, T.; Gu, P.; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, C.; Kimura, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 2, S. 543-565.

TRYGGVASON ET AL. 2011

Tryggvason, G.; Scardovelli, R.; Zaleski, S.: Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flows. Cambridge: Cambridge University 2011. ISBN: 978-0-52178-240-1.

URAYENEZA 2000

Urayeneza, P.: Bestimmung instationärer Strömungsfelder in Lufträumen mit dem modifizierten MAC-Verfahren. Diss. Bergische Universität GH Wuppertal (2000).

VAJNA ET AL. 2009

Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-54036-038-4.

VDI 2206

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth 2004.

Literaturverzeichnis

VDI 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VDI 2222

VDI 2222: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth 1997.

VDI 2223

VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth 2004.

VDI 2235

VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen. Berlin: Beuth 1987.

VDI 3633

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. Berlin: Beuth 1996.

VDI 3633, BLATT 3

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung (Blatt 3). Berlin: Beuth 1997.

VDI 3633, BLATT 8

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Maschinennahe Simulation (Blatt 8). Berlin: Beuth 2008.

VERSTEEG & MALALASEKRA 2007

Versteeg, H.; Malalasekera, W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2. Aufl. New Jersey: Prentice Hall (2007). ISBN: 978-0-13127-498-3.

VERWORN & HERSTATT 2007

Verworn, B.; Herstatt, C.: Bedeutung und Charakteristika der frühen Phase des Innovationsprozesses. In: Herstatt, C. et al. (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2007. ISBN: 978-3-8349-0375-4.

VIOLEAU & ISSA 2007

Violeau, D.; Issa, R.: Numerical modelling of complex turbulent free-surface flows with the SPH method: an overview. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 53 (2007) 2, S. 227-304.

VOROBYEV 2012

Vorobyev, A.: A Smoothed Particle Hydrodynamics Method for the Simulation of Centralized Sloshing Experiments. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2012). 1. Aufl. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2013. ISBN: 978-3-86644-953-4.

WANG ET AL. 2002

Wang, L.; Shen, W.; Xie, H.; Neelamkavil, J.; Pardasani, A.: Collaborative conceptual design - state of the art and future trends. *Computer-Aided Design* 34 (2002), S. 981-996.

WANG ET AL. 2009

Wang, X.-R.; Wang, M.; Li, C.-G.: Research on Collision Detection Algorithm Based on AABB. In: Wang, H. et al. *Fifth International Conference on Natural Computation (ICNC 2009)*, 6 Volumes. Tianjian/China, 14.-16. August 2009. Los Alamitos: IEEE Computer Society (2009), S. 422-424. ISBN: 978-0-76953-736-8.

WERNER 2010

Werner, M.: *Nachrichtentechnik*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010. ISBN: 978-3-83480-905-6.

WIENDAHL ET AL. 2002

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 11/12, S. 650-655.

WILHELMS 1986

Wilhelms, J.: Virya - A motion control editor for kinematic and dynamic animation. *Proceedings on Graphics Interface* (1986), S. 141-146.

WULF 2001

Wulf, J. E.: *Elementarmethoden zur Lösungssuche*. Diss. Technische Universität München (2001).

WUNDER & BAUSCH 2014

Wunder, T.; Bausch, J.: Unternehmerische Kreativität zielgerichtet entfalten. *Controlling and Management Review* 4 (2014), S. 46-57.

XIA & SUN 2002

Xia, B.; Sun, D.-W.: Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34 (2002) 1-3, S. 5-24.

YASSINE & BRAHA 2003

Yassine, A.; Braha, D.: Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method. *Concurrent Engineering* 11 (2003) 3, S. 165-176.

YEH ET AL. 2009

Yeh, T. Y.; Reinman, G.; Patel, S. J.; Faloutsos, P.: Fool Me Twice: Exploring and Exploiting Error Tolerance in Physics-Based Animation. *ACM Transactions on Graphics* 29 (2009) 1, S. 60-71.

ZÄH ET. AL. 2006

Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A.: Feldstudie Virtuelle Inbetriebnahme. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 10, S. 767-771.

ZEICHEN & FÜRST 2000

Zeichen, G.; Fürst, K.: *Automatisierte Industrieprozesse*. 1. Aufl. Wien: Springer 2000. ISBN: 978-3-21183-560-9.

ZEIDLER 2004

Zeidler, A.: *Modellierung grafischer Dialogsysteme mit Ereignisstellen-Diagrammen in WYSIWYG-orientierter Darstellung*. Diss. Technische Universität München (2004).

ZHU & BRIDSON 2005

Zhu, Y.; Bridson, R.: Animating Sand as a Fluid. *ACM Transaction on Graphics* 24 (2005) 3, S. 956-972.

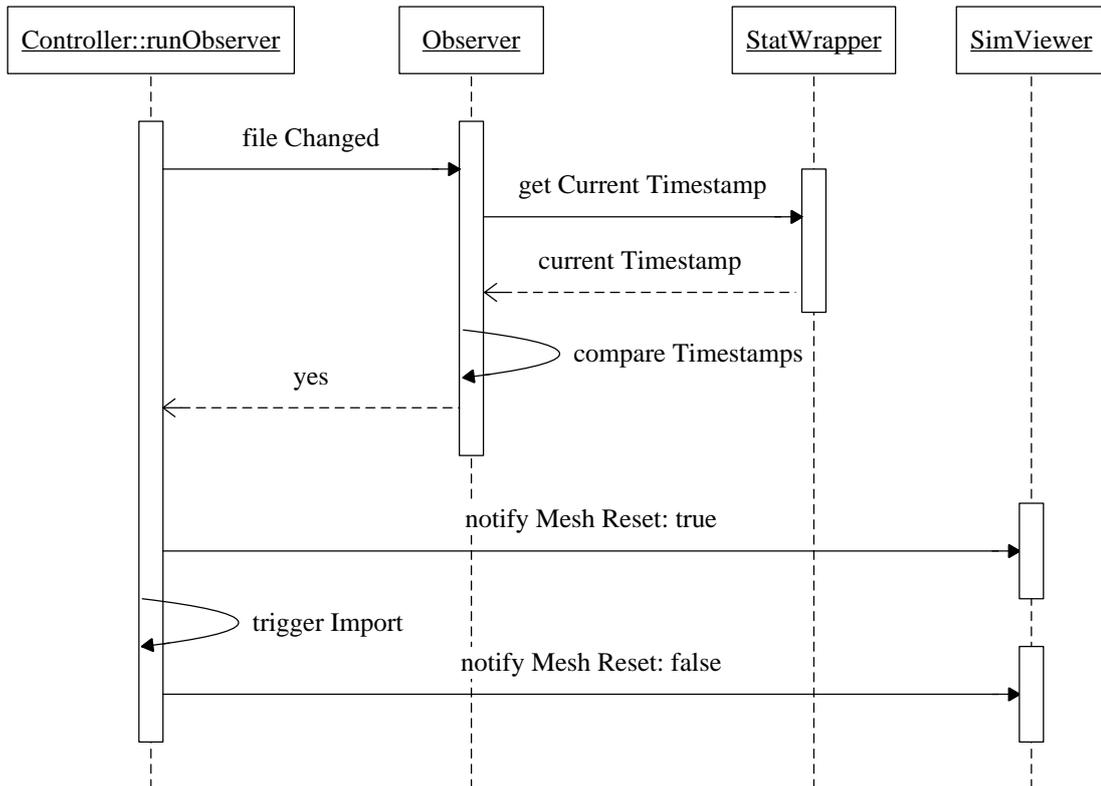
ZIRN & WEIKERT 2006

Zirn, O.; Weikert, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme*. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-54029-279-1.

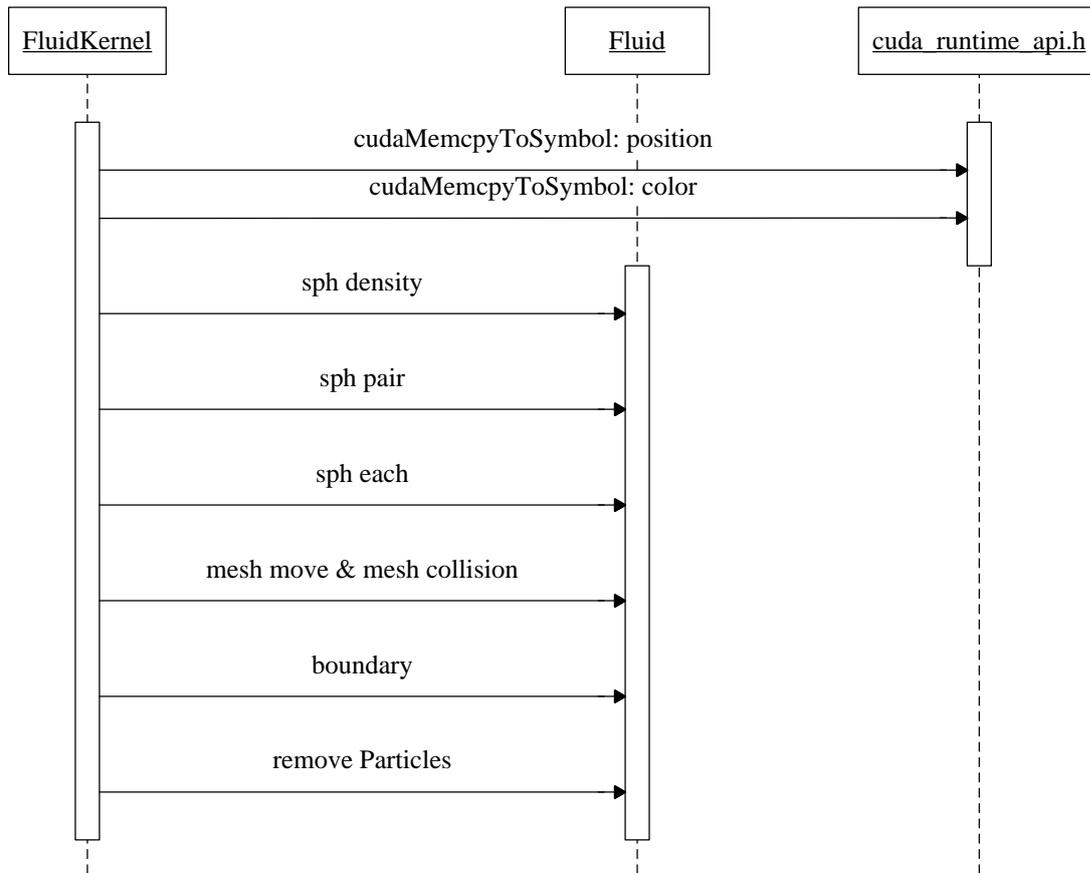
10 Anhang

10.1 Ablaufdiagramme der Online-Simulation

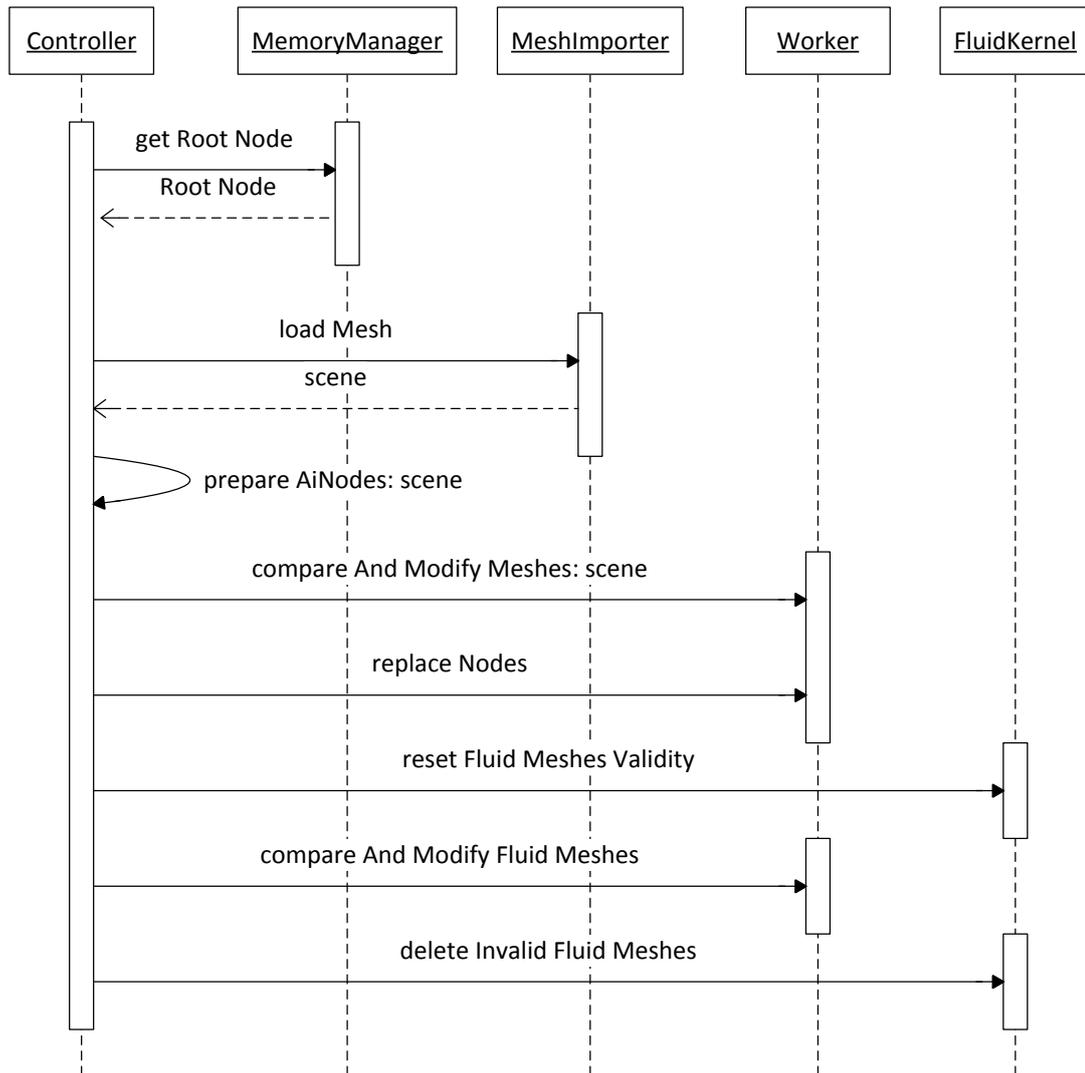
10.1.1 Beobachter



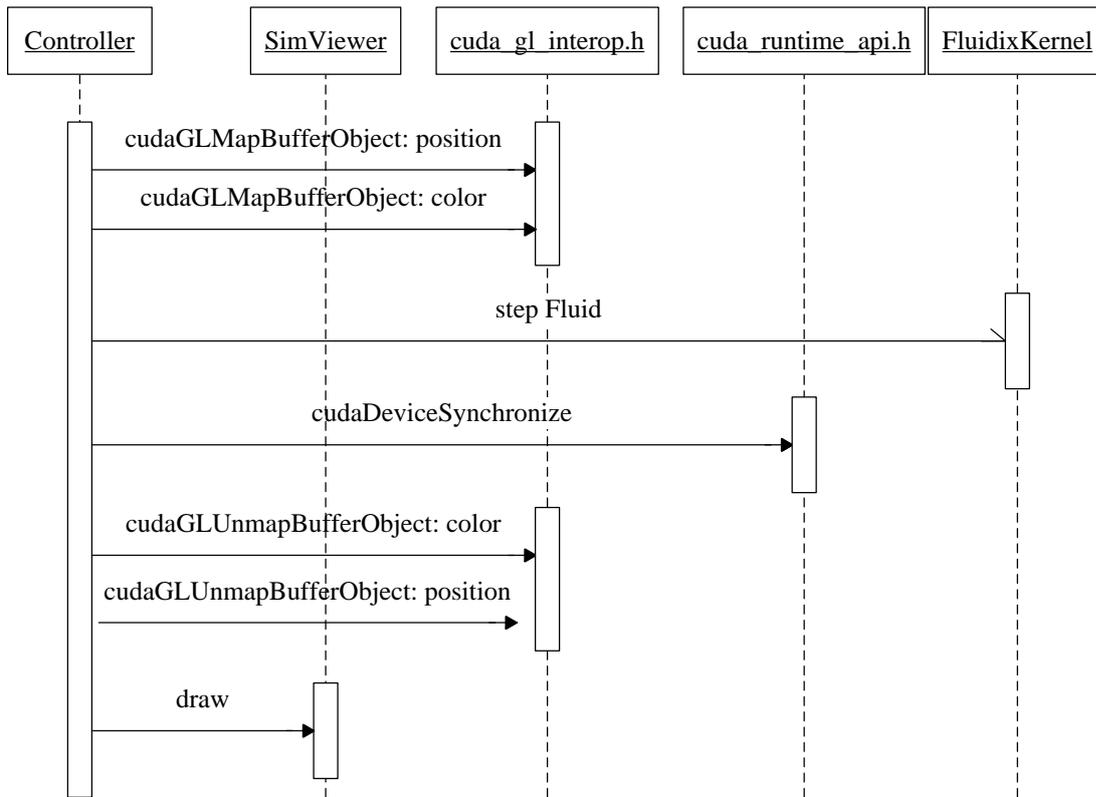
10.1.2 Simulationsschritt



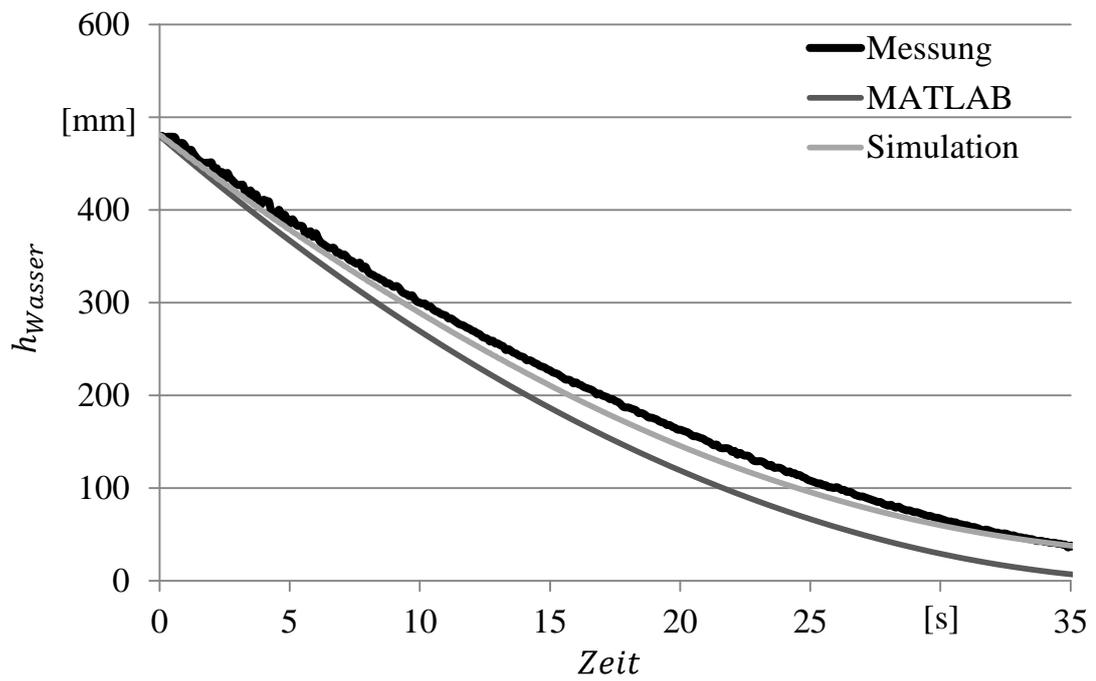
10.1.3 Geometrieimport



10.1.4 Simulationsschleife



10.2 Abgleich der Realität mit der Simulation



11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden an der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen des Fraunhofer Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in den Jahren von 2011 bis 2012 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zur Online-Simulation von fluidischen Prozessen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r	Studienarbeit
Enslin, M.	Neue Technologien und Interaktionsansätze für zukünftige Mensch-Maschine-Schnittstellen
Hildenbrand, C.	Grenzflächen in einer physikbasierten Simulation unter Nutzung von CUDA
Klaß, M.	Untersuchungen zu Abstraktion der GPU-Programmierung in Java am Beispiel Fluid-Simulation
Plötze, A.	Entwicklung und Evaluierung von Verfahren zur numerischen Umsetzung der Kontinuitätsbedingung bei inkompressiblen Strömungsproblemen auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen
Rehekampff, C.	Methode zur Validierung von fluidmechanischen Problemstellungen
Sach, D.	Erweiterung einer Fluidynamiksimulation um eine auf dem WENO-Schema basierende Interpolationsmethode