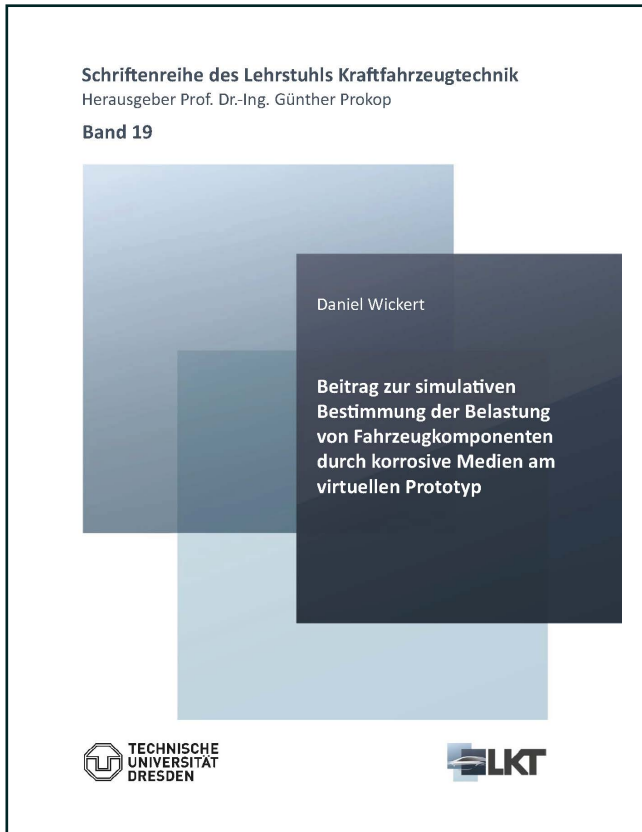




Daniel Wickert (Autor)

## **Beitrag zur simulativen Bestimmung der Belastung von Fahrzeugkomponenten durch korrosive Medien am virtuellen Prototyp**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8565>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Das Automobil als Produkt stellt ein hochkomplexes System dar, dessen Entwicklung viel Organisation sowie zeitliche und finanzielle Investition benötigt. Der zu erfüllende Funktionsumfang ist dabei stetig am Expandieren, während die verfügbaren Zeiträume für die Entwicklung sinken. Hinzu kommt, dass der Käufer eines Automobils nicht nur beim Kauf, sondern auch während der Haltedauer zufriedengestellt werden möchte. Das Fahrzeug muss in diesem Zeitraum sowohl mechanische als auch korrosive Anforderungen für eine gewisse Kilometerleistung und Alter im Rahmen kundenrelevanter Szenarien erfüllen. Waren früher beispielsweise der besondere Korrosionsschutz ein relevantes Kaufargument, so ist dies heute eine Voraussetzung des Kunden und die generelle Zuverlässigkeit des Produktes wird erwartet [2]. Um diese zu gewährleisten, ist ein Erkenntnisgewinn in frühen Phasen der jeweiligen Entwicklungsschritte dementsprechend erforderlich.

Je nach Entwicklungsbereich stehen dafür bereits zahlreiche virtuelle Methoden zur Verfügung, mit denen früh spezifische Eigenschaften analysiert und ausgelegt werden können, um die Funktionalität und Zuverlässigkeit zu gewährleisten und parallel die Entwicklungszeit und -kosten reduzieren. So werden beispielsweise die Bereiche der Fahrzeugdynamik, -sicherheit sowie Aerodynamik bereits in der virtuellen Phase analysiert [3], [4]. Doch nicht überall stehen solche Methoden zur Verfügung. In spezifischen Bereichen muss, statt durch den Einsatz virtueller Methoden, die Auslegung versuchs- und erfahrungsbasiert erfolgen [3]. Eine Überprüfung ist dann erst am realen Prototyp möglich. Das bedeutet nicht nur eine zeit- und kostenintensive Untersuchung. Entdeckte Schwachstellen oder unzureichend erfüllte Eigenschaften können in der Phase der Absicherung nur noch unter hohem Aufwand beseitigt werden, insofern das überhaupt noch möglich ist. Die Bereitstellung von virtuellen Methoden ist insbesondere für diese Entwicklungsbereiche äußerst wertvoll.

Einer dieser versuchs- und erfahrungstechnisch geprägten Bereiche ist der Korrosionsschutz [3], [5]. Korrosionsschäden sind häufig nur schwer sichtbar, aber für den Kunden bei Auftreten aufgrund wachsender Komplexität der Produkte häufig nur unter hohem Kosten- und Zeitaufwand behebbar, insofern noch reparabel [6]. Korrosion im Automobilbereich ist ein ständig wiederkehrendes Thema, welches über die Lebensdauer eines Fahrzeugs auch sicherheitsrelevante Auswirkungen haben kann, wie bspw. bei einem Verkehrsunfall [7], [8]. Die Korrosion besteht aus einem komplexen Zusammenhang zwischen der Benetzung und Benetzungsdauer von Oberflächen, der Zusammensetzung des korrosiven Mediums, der mechanischen Belastung sowie Werkstoffwahl, Schutzmaßnahmen und Mängel im Herstellungsprozess [2], [6], [7]. Virtuelle Methoden sind entsprechend nur rudimentär vertreten und mit starken Ungenauigkeiten behaftet.

Jahn [2] definiert besonders stark gefährdete Karosseriebereiche sowohl geometrisch als auch im Verlauf der Tages- und Jahreszeiten. Grundlage dafür ist die Benetzung und Benetzungsdauer von Oberflächen mit Wasser in Kombination mit einer hohen Luftfeuchtigkeit an einem realen Nutzungsprofil mit ~94% Standzeit, da diese die Grundlage für die am häufigsten auftretende elektrochemische Korrosion am Kraftfahrzeug sind [2]. Aufgrund der damit einhergehenden Komplexität für durchzuführende Simulationen folgt die Empfehlung eines Zwischenschrittes, in dem nicht die Korrosion selbst, sondern die zu Korrosion führenden Prozesse darzustellen sind, welche die Ableitung von Korrosionsrisiken ermöglichen. Explizit wird die Simulation der Feuchtigkeitsverteilung in der Karosserie empfohlen [2].

Wünsche [3] entwickelt ein Modell zur Simulation von Korrosion in Kanten und Flanschen. Auch hier zeigt sich, dass Korrosionssimulationen in der Regel nur an einfachen Geometrien mit hohen Rechenzeiten möglich sind, was die Empfehlung von Jahn stützt. Die dabei angesetzten Startbedingungen stammen zudem nicht zwangsläufig von der spezifischen Geometrie [3]. Die Simulation der Feuchtigkeitsverteilung auf Basis des Wassermanagements ist von daher erforderlich. Hochkomplexe Geometrien stellen die verfügbaren Simulationsmethoden vor eine große Herausforderung, insbesondere was die Vernetzung des

Simulationsraumes und die Berechnung im Tagesgeschäft der Entwicklung betrifft. Wie bei jeder Simulationsmethode besteht hier ein Zielkonflikt zwischen einer schnellen oder einer genauen Lösung. Zur Bestimmung von Fließwegen des Wassers und der daraus resultierenden Benetzung von Oberflächen untersucht Hermsdorf bereits unterschiedlichste methodische Ansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Genauigkeit an ausgewählten Geometrien. Hierbei zeigte sich die gitterfreie Partikelmethode deutlich effektiver als die konventionelle gitterbasierte Computational-Fluid-Dynamics (CFD) [9].

Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist die Zielsetzung dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Belastung realer Fahrzeugstrukturen mit korrosiven Medien. Unter Anwendung der partikelbasierten Simulationsmethoden erfolgt zunächst die Bestimmung der Fließwege des Wassers und der Benetzung von Oberflächen am Beispiel eines Gesamtfahrzeugs. Die anschließende Betrachtung thermodynamischer Prozesse unter einem kombinierten Einsatz der konventionellen und partikelbasierten Simulationsmethode ermöglicht Rückschlüsse auf die Benetzungsdauer spezifischer Komponenten und Bereiche. Zugunsten der notwendigen Rechenzeiten findet die Betrachtung der Strömung in verschiedenen Größenordnungen, in Abhängigkeit der zu betrachtenden Strömungsdetails, statt. Die daraus zu erlangenden Erkenntnisse hinsichtlich Benetzung und Benetzungsdauer von Oberflächen ermöglichen weitere Untersuchungen.

### **Strukturierung der Arbeit**

Kapitel 2 beinhaltet zunächst eine Vorstellung der relevanten wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die gitterbasierten und gitterfreien Simulationsmethoden der Strömungsmechanik sowie notwendige Grundlagen für thermische und Phasenwechselprozesse. Das Kapitel 3 beschreibt die Umsetzung und Validierung einer partikelbasierten Untersuchung zur Bestimmung der Fließwege an einem Gesamtfahrzeug. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 die Benetzungsdauer aus einer Kombination der zurückbleibenden Wassermengen in der Partikelmethode mit den thermischen Prozessen aus der gitterbasierten Strömungssimulation untersucht.

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen

Um das Ziel und den Inhalt dieser Arbeit präzise einzuordnen und zu vermitteln, fasst das Kapitel 2.1 zunächst aktuelle Methoden und Erkenntnisse zur Simulation mehrphasiger Strömungen im Kontext der Simulation von Fließwegen des Wassers an Fahrzeuggeometrien zusammen. Diese dienen als Grundlage für die Definition der zu bearbeitenden Forschungsfragen (Kapitel 2.2). In Vorbereitung auf die Methodenentwicklung folgt eine Beschreibung des Fahrzeugentwicklungsprozesses (Kapitel 2.3) sowie eine Einführung in die Grundlagen der Strömungssimulation (Kapitel 2.4) und der Thermodynamik nebst des Phasenwechsels (Kapitel 2.5).

### 2.1 Stand der Technik

Die Fließwege des Wassers am Gesamtfahrzeug werden maßgeblich durch die Konstruktion bestimmt. Die virtuelle Untersuchung des Wassermanagements kann mit verschiedenen Softwarelösungen erfolgen. Dieser Herausforderung widmeten sich auch Buscariolo, et. al. unter Einsatz der gitterbasierten Strömungsmechanik in Kombination mit der Volume-Of-Fluid Methode (VOF, vgl. Kapitel 2.4.2.5). Ziel ist es, ein Regenszenario an einem Teilfahrzeug darzustellen, an dem das auf dem Fahrzeugdach auftreffende Wasser durch Rinnen weg von den Türen geleitet wird und so die Insassen beim Öffnen der Türen nicht nass werden. Mittels einer Bewässerungsleiste werden sowohl in der Simulation als auch in der Validierung das Dach bewässert und die Fließwege beobachtet. Das finale Simulationsmodell besteht aus 14 Mio. Zellen, an denen mittels 68 Rechenkernen 12 Sekunden vom Wasserlauf simuliert werden. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen eine gute Korrelation, was die Fließwege am Dach betrifft. Leider gibt es in der Veröffentlichung keine Aussage zur Dauer der Berechnung sowie dem Vergleich mit quantitativen Daten. Ebenso stimmen zwar die Fließwege überein; optisch entsteht aber keine flächendeckende Benetzung der Oberfläche wie in der Realität. [10]

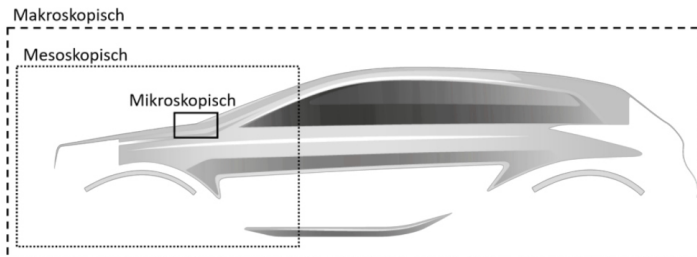
Die Benetzung von Karosserieteilen und die damit einhergehende Verschmutzung wird auch von Hagemeier, Hartmann und Thévenin für Fahrzeuge in Bewegung behandelt. Untersuchungen des äußeren Wassermanagements werden üblicherweise in einem Windkanal an realen oder realitätsnahen Körpern durchgeführt. Unter Anwendung der Euler-Lagrange Methode (vgl. Kapitel 2.4.2.5) in Kombination mit einem Fluid-Film Modell wird die Beregnung eines Fahrzeugs und die Benetzung der Oberfläche simuliert. Der Aufbau ist in drei Schritte unterteilt, bei dem zunächst die stationäre Luftbewegung simuliert wird. Darauf aufbauend folgt dann die Partikelströmung der Wassertropfen und abschließend die Benetzung der Fahrzeugoberfläche durch ein Filmmodell oder sogar lokal begrenzt der VOF-Methode. Leider dient die Publikation lediglich dem informativen Überblick mit Schwerpunkt auf die unterschiedlichen darstellbaren Szenarien und beinhaltet somit keinerlei Aussagen zur Simulationsdauer oder zu resultierenden Wasserströmungen innerhalb der Karosserie. Die enthaltenen Abbildungen zeigen vergleichend mit Prüfstandsergebnissen eine hohe Übereinstimmung der vorgestellten Vorgehensweisen. [11]

Mit der mehrphasigen Simulation eines Fahrzeugs in regnerischen Bedingungen haben sich auch Lombardi, et al. beschäftigt. Die Interaktion von Scheibenwischern und dem Design des Wassermanagements soll über einen Euler-Lagrange-Ansatz (vgl. Kapitel 2.4.2.5) der gitterbasierten CFD gelöst werden. Der Umfang beschreibt dabei sowohl die Beregnung über Wassertropfen durch lagrangesche Partikel als auch den Aufbau einer Flüssigkeitsschicht mit einem Fluid-Film Modell bis hin zum Abfließen größerer Wassermengen durch den Wasserableiter mittels der VOF-Methode. Das Modell des Gesamtfahrzeugs besteht für diese Betrachtung aus insgesamt 12 Mio. Zellen. Die Berechnung von 20s benötigte auf einem Cluster mit 256 Kernen je nach Methode 6-10 Tage. Die Veröffentlichung weist eine oszillierende Durchströmung des Wasserableiters aufgrund der Scheibenwischerbewegung nach. Die beim abfließenden Wasser entstehenden Tropfen sind zum Teil klein genug, um von der Ansaugung der Innenraumklimatisierung beeinflusst und sogar eingesogen zu werden. Die

generierten Ergebnisse sehen plausibel aus; jedoch fehlen Abgleiche mit der Realität oder Prüfstandsversuche. [12]

Mit der virtuellen Fluidverteilung infolge von Berechnung beschäftigte sich auch Hermsdorf. In seiner Arbeit werden u. a. verschiedene gängige Werkzeuge hinsichtlich der Darstellung mehrphasiger Strömungen analysiert. Diese stammen sowohl aus der konventionellen gitterbasierten sowie der gitterfreien CFD und hybriden Methoden. Hinsichtlich der Simulation mehrphasiger Fluidströmungen unterscheiden sich diese bezüglich Modellaufbau, Berechnungsdauer und Güte der Ergebnisse deutlich. Die gitterbasierten Methoden, vertreten durch Ansys und OpenFOAM, benötigen einen hohen Zeit- und Ressourcenaufwand. Dieser steigt überproportional mit der Komplexität der Geometrie, was allein bei der Vernetzung des Strömungsgebietes in einem Zeitaufwand von Tagen bis Wochen führt. Grund dafür ist die notwendige exakte Abbildung der zu erwartenden Phasengrenze im zeitlichen Verlauf der Strömung im Rechengitter. Die Güte der Ergebnisse hängt in dem Zusammenhang maßgeblich von der Gitternetzgüte ab. Die Rechenzeiten variieren hierbei zwischen 60 h für 0,26s simulierter Zeit auf einer Workstation für ein kleines Teilmodell eines Türbodens mit 8 Mio. Zellen und 46h einer Berechnung auf einem Cluster mit 128 Kernen für die gesamte Fahrzeugtür mit 30 Mio. Zellen und 4s simulierter Zeit. Als Vertreter der hybriden Methode kommt die Lattice-Boltzmann-Methode zum Einsatz. Diese befindet sich in einem verhältnismäßig frühen Entwicklungsstadium und wurde zunächst nur anhand einfacher Geometrien analysiert. Die Diskretisierung des Simulationsraumes ist hierbei methodisch bedingt deutlich schneller, benötigt jedoch ebenfalls mehrere Tage Vorbereitungszeit. Für den effektiven Einsatz ist die Methode jedoch noch nicht ausreichend entwickelt. [9]

Auch die von Hermsdorf eingesetzte gitterfreie Partikelmethode, vertreten durch die SPH-Methodik, befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, was bedeutet, dass physikalische Modelle nur begrenzt naturgetreu implementiert sind. Entsprechende Kalibrierungen der Rechenmodelle sind erforderlich und erfolgen in erster Linie durch einen optischen Abgleich von Strömungscharakteristiken. Eine Simulation der Fahrzeugtür benötigte auf der Workstation für 6s Simulationszeit 15h Berechnungszeit bei einem Gesamtumfang von 13,3 Mio. Partikeln. Analog zur geringen Rechenzeit ist auch das Pre-Processing effektiv und schnell abgeschlossen. Besonders im makro- und mesoskopischen Bereich (s. Abbildung 2.1) bietet die Methode viel Potential, um belastbare Ergebnisse mit hoher Übereinstimmung zu generieren, was den Einsatz an komplexen Geometrien ermöglicht und Problemstellen an diesen aufzeigen kann. [9]



**Abbildung 2.1: Definition der Skaleneinteilung mit Hinblick auf das Gesamtfahrzeug [9]**

Hermsdorf empfiehlt abschließend die Untersuchung der Einsatzgrenzen bezüglich der Übertragbarkeit auf die Realität, der damit einhergehenden Komplexität der Modelle und des Ressourcenbedarfs. Hinsichtlich der Benetzungsdauer soll auch die Betrachtung thermodynamischer Randbedingungen erfolgen, um Änderungen für die Korrosionsvorbeugung durch Kondensation und Verdunstung zu ermitteln [9]. Zu bemängeln ist an den Ergebnissen die nicht ausreichend belegte Definition eines höheren Reibwertes für die Fensterschachtdichtung

zur Kalibrierung der eindringenden Volumenströme sowie die resultierende Abweichung zwischen Simulation und Experiment. Auch ist die Kalibrierung der Parameterwerte im Detail nicht ausreichend. So sind bestehende Verhältnisse gut dokumentiert, die absolute Größenordnung aber nicht immer genau belegt.

Während des eigenen Forschungsprozesses hat sich auch die Audi AG mit dem Thema der Wassersimulation am Gesamtfahrzeug beschäftigt und präsentiert Simulationsergebnisse am Beispiel eines Teilfahrzeugs, reduziert auf die Windschutzscheibe, Motorhaube und Wasserkasten, ergänzt um die Bewegung der Scheibenwischer unter Einsatz der SPH-Methodik mittels PreonLab. Die Veröffentlichung weist u. a. variierende Volumenströme durch Wischerbewegungen nach. Leider mangelt es an einem Abgleich zwischen der Simulation und der Realität sowie zu Aussagen zu den vorgenommenen Einstellungen und damit einhergehenden Rechenzeiten [13].

## 2.2 Forschungsziele

Wie dem Stand der Technik in Kapitel 2.1 zu entnehmen ist, gibt es zahlreiche unterschiedliche Ansätze, die Benetzung von Fahrzeugoberflächen simulativ zu bestimmen. Die Ansätze unterscheiden sich dabei je nach dem zu simulierenden Szenario und dem zu betrachtenden Zeitraum. Die Beregnung eines Fahrzeugs inklusive dem Ausbilden der internen Wasserwege und Volumenströme bedarf einer zeitintensiven und allumfänglichen Untersuchung. Zur Nachbildung dieser in der numerischen Strömungsmechanik ist daher eine effiziente Berechnung notwendig. Die Nutzung der VOF-Methode in der gitterbasierten CFD zeigt sich als äußerst zeitintensiv und anfällig, sodass eine detaillierte Simulation eines Gesamtfahrzeugs mit einer verwertbaren Ergebnislösung in einem akzeptablen Zeitrahmen nicht abzusehen ist. Auch hybride Methoden haben sich für die Analyse externer und interner Wasserströmungen nur ungenügend qualifizieren können. Zusätzlich kann aufgrund der Berücksichtigung von zwei Sätzen von Erhaltungsgleichungen von einem hohen Zeitaufwand für eine entsprechende Simulation ausgegangen werden. Die gitterfreien Partikelmethode haben jedoch bereits gute Ergebnisse in einem akzeptablen Zeitrahmen bei einer hohen Komplexität der Geometrie geliefert. Mit der Berücksichtigung der Empfehlungen von Jahn und Hermsdorf ergeben sich hieraus die folgenden zu bearbeitenden Forschungsfragen [2], [9]:

1. *Welche Ergebnisse und Güte lassen sich mit der Partikelmethode erzeugen und wo liegen die Grenzen in der Anwendung?*
2. *Wie lässt sich mit der Partikelmethode das Frontloading hinsichtlich der Analyse des Wassermanagements im Rahmen des Korrosionsschutzes umsetzen?*

Die bisher vorgestellten Modelle betrachten thematisch bedingt methodische Einflussgrößen nur oberflächlich, was im Rahmen einer Methodenentwicklung jedoch weiter vertieft werden muss:

3. *Welche zu berücksichtigenden Sensitivitäten ergeben sich gegenüber der Simulation und dem Versuch?*

Im Rahmen des Korrosionsschutzes definiert die Arbeit von Jahn speziell zu berücksichtigende kritische Bereiche mit einer zeitlich gestreckten starken Benetzung der Oberflächen und einer hohen Luftfeuchtigkeit. Die Arbeit von Hermsdorf empfiehlt darauf aufbauend die Berücksichtigung thermodynamischer Prozesse zur Bestimmung der Benetzungsdauer von Geometrien. Da dies methodisch bedingt häufig nicht in der Partikelmethode enthalten ist, ergibt sich die letzte Frage:

4. *Wie lässt sich die Benetzungsdauer von Komponenten methodisch simulativ bestimmen?*

Um den Umfang der Fragestellungen einzuzugrenzen, ergeben sich daraus die folgenden Zielstellungen:

1. Entwicklung einer Methodik zur Simulation des Wassermanagements unter Nutzung der gitterfreien Partikelmethode am virtuellen Prototyp.

2. Analyse der methodischen Einsatzgrenzen der Partikelmethode im gewünschten Anwendungsbereich des Wassermanagements.
3. Analyse und Definition der auf die Ergebnisgüte auswirkenden Einflüsse.
4. Analyse der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere konventionelle korrosive Flüssigkeiten.
5. Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Benetzungsdauer am virtuellen Prototyp.

Um die Zielstellungen zu erfüllen sind zunächst methodentypische Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile sowohl für die gitterbasierten Simulationsmethoden als auch die gitterfreien Partikelmethoden zu erläutern (vgl. Kapitel 2.4.3 und 2.4.4). Im Rahmen der Bestimmung der Benetzungsdauer ist auch eine Betrachtung der Phasenwechselprozesse sowie die dafür notwendigen thermodynamischen Prozesse und Mechaniken notwendig (vgl. Kapitel 2.5).

## 2.3 Frontloading im Produktentstehungsprozess

Um den Mehrwert einer simulationsgestützten Produktentwicklung zu verstehen, ist zunächst der Produktentstehungsprozess im Allgemeinen als Wissensgrundlage notwendig. Das Automobil ist ein Produkt, zugeschnitten auf unterschiedlichste Kunden im weltweiten Einsatz mit dementsprechend zahlreichen unterschiedlichen und konzernspezifischen Anforderungen. Die Produktentwicklung ist ein hoch komplexer Prozess, dessen Ziel darin besteht, termingerecht zu einem Fahrzeug als Produkt zu führen, welches einen entsprechenden Absatz generiert und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Fahrzeugherstellers sichert [4]. Die im Wettbewerb sonst verlorenen Marktanteile lassen sich nur schwer wiedererlangen. Die Optimierung des Entstehungsprozesses ist somit von höchster Bedeutung.

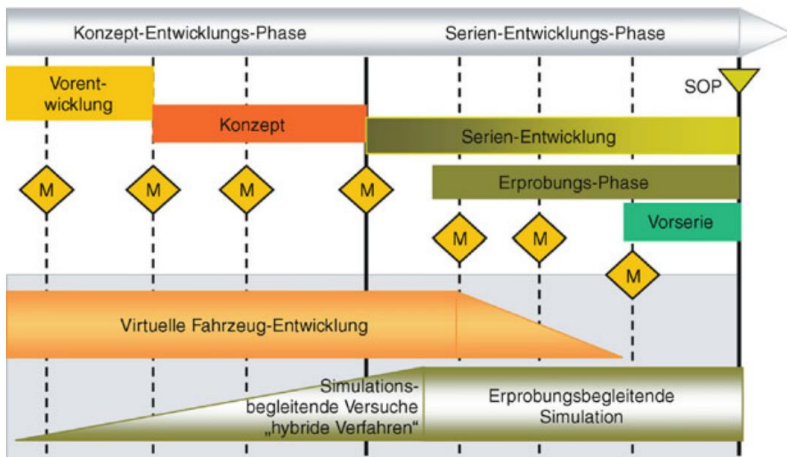


Abbildung 2.2: Übersicht des Produktentstehungsprozesses und dem Einsatz von virtuellen Methoden [4]

Der Prozess lässt sich grob in zwei Hauptphasen unterteilen (Abbildung 2.2). Diese bestehen aus der Konzeptphase und der Serienentwicklungsphase. Zu Beginn existieren viele Unbekannte, welche nicht selten einen Zielkonflikt darstellen. Der Entwicklungsprozess verläuft grundlegend vom Groben ins Feine, was bedeutet,

dass in der frühen Konzeptphase zunächst das Gesamtfahrzeugkonzept festgelegt wird. Dazu zählen beispielsweise die folgenden Eigenschaften [4]:

- Fahrzeugcharakter
- Proportionen
- Architektur
- Fahrleistung
- Herstellungskosten

Diese bilden die Grundlagen für die weiteren Konzeptarbeiten auf System- und Komponentenebene. Eine spätere Änderung am Konzept ist immer mit einem hohen finanziellen Aufwand und einem einhergehenden technischen Risiko verbunden. Um dies zu vermeiden, ist eine Optimierung der Aussagequalität in den entsprechenden Entwicklungsphasen anzustreben. Daraus resultiert ein Entwicklungsbedarf für eine verbesserte Konzeptfindung und der damit verbundenen Toolentwicklung für die Aufdeckung von Konflikten und deren Beseitigung. Diese Arbeiten geschehen in der Regel am digitalen Prototyp. Unter dem Einsatz zahlreicher CAE-Methoden werden Fahrzeugfunktionen im Rahmen des Möglichen abgebildet und getestet. Ein positiver Nebeneffekt davon ist die Reduktion der notwendigen Entwicklungszeit und der erforderlichen Prototypen für neue Produkte [4]. In der Serienentwicklungsphase steigt der Anteil der Prototypen und der Erprobungsprozeduren. Der effektive Einsatz von Simulationen ist hier nicht mehr in dem Maße gegeben und wird reduziert bzw. erprobungsbegleitend eingesetzt, um Wirkketten für zukünftige Projekte zu verstehen.

Ein häufig in diesem Zusammenhang fallender Begriff ist der des Frontloadings. Hierbei ist in früheren Projektphasen das Produktwissen zu erhöhen, um damit einhergehende konzeptbedingte Unsicherheiten zu reduzieren (Abbildung 2.3). In diesen Phasen ist die Entscheidungsfreiheit am Produkt noch deutlich umfangreicher gegeben, bei gleichzeitig geringen Kosten auf Grund von Änderungen. Ein ausgereifteres Produkt ist das Resultat. Dies benötigt entsprechende Grundlagen aus Simulationsdaten für eine fundierte Entscheidungsbasis. [14]

Weiterführende und zusätzliche Informationen zu den Entwicklungsprozessen sind der Literatur zu entnehmen (vgl. [4], [15]).

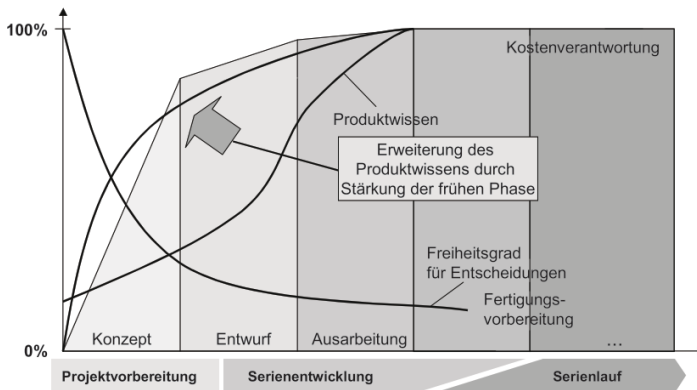


Abbildung 2.3: Frontloading im Entwicklungsprozess [14]



## 2.4 Grundlagen der CFD-Simulation

Der Begriff CFD ist eine Abkürzung für Computational-Fluid-Dynamics und steht als Synonym für die überwiegend rechnergestützte numerische Strömungsmechanik. Diese beschreibt ein sehr junges Fachgebiet im Vergleich zu experimentellen und analytischen Methoden wie sie u. a. von Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) oder George Gabriel Stokes (1819-1903) durchgeführt wurden. Dieses Kapitel behandelt grundlegende Aspekte der numerischen Strömungssimulation, welche für das Verständnis und der Einordnung der Arbeit notwendig sind. Beginnend mit den notwendigen Grundlagen in Kapitel 2.4.1 folgen in Kapitel 2.4.2 zahlreiche Erläuterungen zu den Eigenschaften der Simulationsmethoden. Abschließend befindet sich in Kapitel 2.4.3 und 2.4.4 eine detailliertere Betrachtung der in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Methoden.

Die ersten CFD-Verfahren stammen aus den 1970er Jahren. Diese ermöglichten die Berechnung von kompressiblen sowie inkompressiblen Strömungen auf zunächst einfachsten Gittern unter Einsatz der rechenaufwendigen Differenzenverfahren (FDM) [16]. Parallel entstanden erste Turbulenzmodelle wie das k- $\epsilon$ -Modell (vgl. Kapitel 2.4.2.4), welches bis heute eine hohe Relevanz hat. Seit den 1980er Jahren steigt die industrielle Bedeutung und damit auch die Anforderung für komplexere Geometrien und Strömungen. Das Resultat solcher Impulse ist unter anderem die Entwicklung der Finite-Volumen-Methode (FVM), welche die Berechnungen deutlich einfacher und robuster macht, bei geringen Genauigkeitseinbußen [16]. Die Weiterentwicklung ist dabei stets eng an die verfügbare Rechenleistung gebunden. So ermöglicht der Wechsel von Hochleistungs-Parallelrechnern zu Mehrkern-Workstations und Cluster die Berechnung von immer komplexeren Strömungsvorgängen. Entsprechende Untersuchungen benötigen die dafür notwendigen Grundlagen. So findet ein Wechsel von strukturierten Netzen zu unstrukturierten Netzen statt. Für eine höhere Flexibilität der Methodik wird die konventionelle Kontinuumsbetrachtung durch die Betrachtung von Strömungspartikeln oder hybride Lösungen ergänzt, bei denen die Generierung von Rechnernetzen deutlich einfacher ist oder gar ganz wegfällt [16]. Üblicherweise erfolgt die Beschreibung eines Fluides als Kontinuum anstelle seiner molekularen Struktur [17], [18].

Die Basis einer jeden Berechnung ist die Betrachtung der üblichen Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie in Form einer Differentialgleichung [19]. Dabei kommen zur Approximation des physikalisch-technischen Problems Modellgleichungen zum Einsatz, um den Rechenaufwand zu reduzieren [20]. Diese werden an diskreten Punkten in einem begrenzten Gebiet mit definierten Randbedingungen gelöst, um das Strömungsfeld zu ermitteln. Dabei ist eine analytisch exakte Lösung nur bei einer starken Idealisierung des Problems möglich. Bei den üblichen Anwendungen ist eine exakte Lösung in der Regel nicht bestimmbar. Für diese wird iterativ eine Näherungslösung für die genutzten Modellgleichungen ermittelt, welche idealerweise nahe an die exakte Lösung herankommt. Neben den genutzten Modellgleichungen und dem iterativen Lösungsprozess sind Abweichungen durch die notwendige Diskretisierung gegeben (vgl. Kapitel 2.4.2.3) [19], [20].

Die Anwendungsbereiche der CFD sind in den letzten Jahrzehnten enorm angestiegen. Industriell ist sie in allen Bereichen der Vorentwicklung, Produktentwicklung und Optimierung vertreten. Die Reduktion von Entwicklungskosten und die Generierung von Wettbewerbsvorteilen ist dabei eine wichtige treibende Kraft [20]. Zusätzlich ist eine experimentelle Untersuchung nicht immer möglich. Ursachen können hierfür heiße oder chemisch aggressive Fluide, ungeeignete Sensoren oder nur die damit einhergehenden Kosten- und Zeitbedarf sein [19]. Je nach Problem existieren dabei Softwarelösungen, die eine Lösung in Minuten auf einer Workstation oder in Tagen auf einem Cluster erzeugen. Übliche Anwendungsgebiete der CFD sind dabei beispielsweise die Umströmung von Körpern (Aerodynamik, Aggregatekühlung) oder die Innenströmung (Klimatisierung, Verbrennungsprozesse) [4], [19].

## 2.4.1 Grundlagen der Strömungsmechanik

Um die Strömungsmechanik und die damit einhergehende Komplexität der Numerik zu verstehen, folgt die Betrachtung einiger essentieller Grundlagen. Jede Berechnung einer Strömung basiert, parallel zur klassischen Mechanik, auf der Nutzung von Erhaltungssätzen. Für eine bessere mathematische Veranschaulichung werden diese im Folgenden in ihrer differentialen Form anhand eines infinitesimal kleinen Volumenelementes dargestellt. Die in dieser Arbeit eingesetzten Simulationsmethoden arbeiten hingegen mit der Integralform anhand eines Kontrollvolumens, auf welche zugunsten der Leserlichkeit an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen sei [18], [21]. Die Gleichungen besitzen alle einen ähnlichen Aufbau mit der Grundstruktur [22]:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{zeitliche Änderung}} + \underbrace{\nabla(\rho\phi\vec{v})}_{\text{Konvektiver Term}} = \underbrace{\nabla\Gamma\nabla\phi}_{\text{Diffusiver Term}} + \underbrace{Q}_{\text{Quellen und Senken}} \quad (2.1)$$

mit einer beliebigen Strömungsgröße  $\phi$ , der Fluiddichte  $\rho$ , dem Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  und dem Diffusionskoeffizienten  $\Gamma$ .

### 2.4.1.1 Massenerhaltungsgleichung

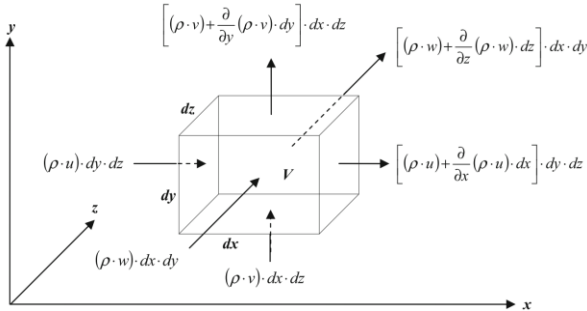


Abbildung 2.4: Ein- und austretende Massenströme über ein Volumenelement [21]

Der erste zu betrachtende Erhaltungssatz ist die Kontinuitätsgleichung für den Erhalt der Masse. Die Abbildung 2.4 zeigt die zu betrachtenden ein- und austretenden Massenströme über ein Volumenelement im kartesischen Koordinatensystem. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Änderung der Masse  $m$  mit dem Druck  $p$  in einem Volumenelement  $V$  [21]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial(p \cdot V)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz) \quad (2.2)$$

ergibt die Summation der ein- und austretenden Masseströmung die Massenerhaltungsgleichung [17], [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \frac{\partial}{\partial x}\rho \cdot u + \frac{\partial}{\partial y}\rho \cdot v + \frac{\partial}{\partial z}\rho \cdot w = 0 \quad (2.3)$$

Die Variablen  $u$ ,  $v$ ,  $w$  beschreiben die entsprechenden Geschwindigkeitsvektoren in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung. Die Gleichung lässt sich anschaulicher in der in Gleichung 2.1 vorgestellten Divergenzform, ohne Berücksichtigung zusätzlicher Quellen und Senken, darstellen [18], [19], [21]–[25]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.4)$$

### 2.4.1.2 Impulserhaltung

Der nächste zu betrachtende Erhaltungssatz ist die Impulserhaltung. Diese basiert auf dem zweiten Newtonschen Gesetz „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ [21]. Die Ursachen für wirkende Kräfte können zahlreich sein und lassen sich grob in Oberflächenkräfte (z. B. Scherspannungen  $\tau$ ) und Volumenkkräfte (z. B. Gravitation  $g$ ) unterteilen. Summiert über ein infinitesimal kleines Volumenelement (Abbildung 2.5) ergibt sich daraus für die  $x$ -Richtung die folgende Formel [21], [25]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot u \cdot v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot u \cdot w - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \quad (2.5)$$

Diese wird analog für die  $y$ - und  $z$ -Richtung hergeleitet. Eine detaillierte Herleitung der einzelnen Gleichungen ist aufgrund des Umfangs der Fachliteratur zu entnehmen [17], [21], [22]. In der Divergenzform wird diese mit der auf das Volumen wirkenden Kraft  $F_b$  vereinfacht zu [19], [23]–[25]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + F_b \quad (2.6)$$

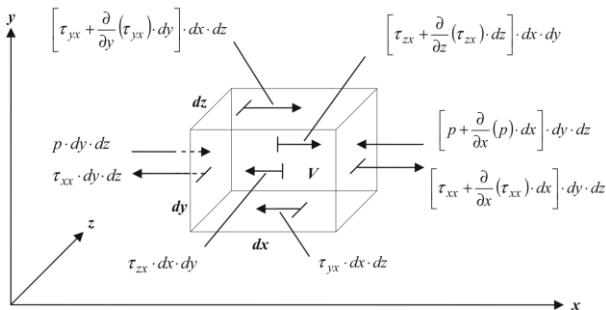


Abbildung 2.5: Kräfte am Volumenelement am Beispiel der  $x$ -Richtung [21]