2 Einleitung und Motivation

Der moderne Fahrzeugentwicklungsprozess erfordert schnelle und kostengünstige Erkenntnisse über physikalische sowie chemische Wirkketten, um ein ständiges Weiterentwicklungspotential und einen frühen Erkenntnisgewinn ausschöpfen zu können.

Die Optimierung des kompletten Entwicklungsprozesses erfordert, dass Design-, Werkstoff- sowie Package-relevante Bauteildefinitionen möglichst zeitig nach den zu erwartenden Belastungen ausgelegt werden. Hierbei stellt insbesondere die Korrosionsvermeidung sowie -vorbeugung im Gesamtfahrzeugabsicherungsprozess ein kundenrelevantes Szenario dar.

Jedoch lassen sich Aussagen über die Korrosionsneigung neuer Fahrzeugentwicklungen aufgrund komplexer Zusammenhänge zwischen Fluidfließwegen, mechanischen Belastungen, Abtrocknungsvorgängen und chemischen Zusammensetzungen der Belastungsmedien auf experimenteller Ebene erst spät im Entwicklungsprozess treffen. Etwaige Bauteiländerung im Sinne der Korrosionsabsicherung im Prototypenstadium ziehen kostenintensive Aufwände nach sich oder sind nicht mehr umsetzbar.

Neben Versuchen auf Prüfständen oder Versuchsstrecken etabliert sich die numerische Belastungssimulation in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Ein wichtiger Vertreter der virtuellen Werkzeuge ist die Computersimulation zur Nachbildung korrosionsklimatischer Belastungssimulationen und Optimierung technischer Systeme.

Die Basis einer solchen Simulation stellen die physikalischen Grundgleichungen der jeweiligen Problemstellung dar. Aufgrund der Komplexität der Wirkzusammenhänge des Korrosionsvorganges ist es erforderlich, dass sich die numerische Methode zur Vorhersage dieser Vorgänge aus verschiedenen Simulationsszenarien zusammensetzt. Zum einen interagieren unter anderem mechanische Einflussgrößen (Bauteilschwingungen, Beschädigungen etwaiger Schutzschichten), chemische Reaktionen sowie die physikalische Beschreibung der Strömungswege in den zu untersuchenden Bauteilen miteinander.

Weiterhin stellt die oft hochkomplexe Geometrie von Fahrzeug- und Bauteilstrukturen bestehende Berechnungsalgorithmen vor große Herausforderungen, insbesondere im Rahmen der notwendigen Diskretisierung des Berechnungsraumes zum Lösen der numerischen Gleichungen.

Diese Diskretisierung erlaubt die Beschreibung n-dimensionaler Räume in infinitesimale Kontrollflächen oder -volumina und bildet dementsprechend die Grundlage für eine erfolgreiche numerische Bauteilberechnung. Hierbei stellen die geometrischen Skalen sowie Detailierungsgrade eine Beschränkung in der effizienten Durchführung der Diskretisierung und letztendlich der

Ergebnisgüte dar. Ein dabei entstehender Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Rechendauer muss dementsprechend anwendungsorientiert aufgelöst werden.

Eine effiziente Detailbetrachtung eines Strömungsraumes, ausgehend von den gesamtheitlichen Strömungseigenschaften, soll mittels einer Multiskalenmethode ermöglicht werden, um somit den Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Bearbeitungszeit zu minimieren, wie schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt.

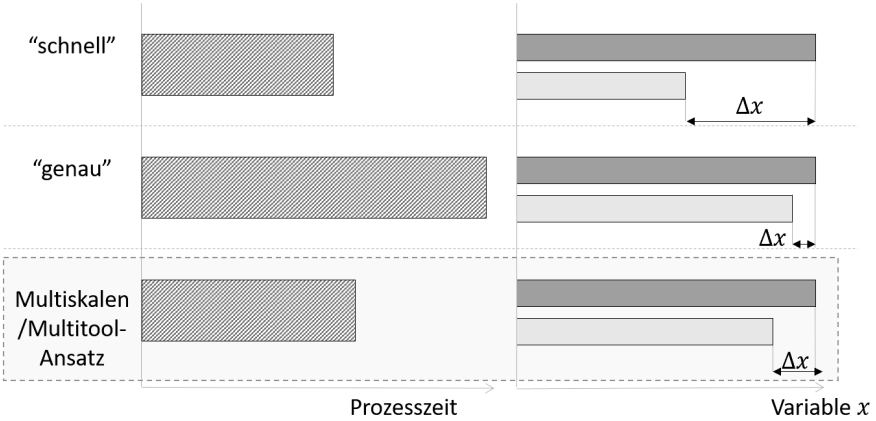

Abbildung 2-1: Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Berechnungsdauer

Ein Kerngedanke des Multiskalenansatzes ist die Kombination unterschiedlicher Simulationsmethoden für variierende geometrische Skalen. Den Simulationsmodellen sollen die Eingangsgrößen sowie weitere Randbedingungen automatisiert übergeben werden, welche zuvor aus einer über- oder untergeordneten Skala als Referenzgröße herausgelesen wurden.

Während in den aktuellen Entwicklungszyklen umfangreiche Berechnungsmodelle auf Hochleistungsrechenzentrum ausgelagert werden, soll dieser Ansatz eine schnelle Berechnung des Strömungsverhaltens in komplexen Betrachtungsräumen auf handelsüblichen Desktop-Rechnern ermöglichen. Somit können bereits im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses effiziente und richtungsweisende Aussagen getroffen werden. Diese Anforderung gilt als zentraler Untersuchungsschwerpunkt.

In der vorliegenden Arbeit wird ausgehend von den naturwissenschaftlichen und numerischen Grundlagen der Strömungsmechanik die Idee des Multiskalenansatzes umgesetzt und dabei auf fahrzeug- als auch softwarespezifische Eigenschaften eingegangen.

In Kapitel 5 können notwendige Voruntersuchungen an Referenzkörpern beschrieben werden, welche die Grundlagen experimentell sowie numerisch bestätigen. Darauf aufbauend werden die gewonnenen Erkenntnisse auf Fahrzeugbaugruppen überführt. So können numerische Berechnungen von der Durchströmung eines Fahrzeugwasserkastens im Vorderwagen sowie einer Fahrzeugtür ausgewertet und anhand von Prüfstandergebnissen bewertet werden. Abgerundet wird die Arbeit ab Kapitel 7 mit einer Effizienzbewertung der untersuchten Software sowie des gesamten Berechnungsprozesses.

Aus dieser Motivation heraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Ist es möglich, eine komplexe Bauteilstruktur mit globalen Strömungsparametern zu versehen und die Strömungsverhältnisse durch Zuhilfenahme von Teilmodellen auf Detailebene numerisch zu berechnen?

3 Grundlagen und Stand der Technik

3.1 Einführung Strömungslehre

3.1.1 Elementare Begrifflichkeiten

Um die Fragestellungen und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zu beschreiben, werden grundlegende Begrifflichkeiten und physikalische Zusammenhänge kurz erläutert.

Für die nachfolgenden Untersuchungen spielen die Umströmung sowie Durchströmung, oft auch kombiniert, eine entscheidende Rolle. Bei der *Umströmung* kann im Außenbereich eines Bezugskörpers ein Strömungsfeld beschrieben werden, während für die *Durchströmung* ein Innenraum beschrieben wird. Dabei sind die Untersuchungsschwerpunkte unterschiedlich und können kombiniert werden.

Die Strömungslehre untersucht physikalische Eigenschaften und Effekte für die Hydro- sowie Aerostatik als auch die Hydro- und Aerodynamik. Während die Begriffe *Hydro* (Flüssigkeit) sowie *Aero* (Luft) das zu untersuchenden Medium definiert, kann mittels der *Statik* ein ruhendes Medium, mittels der *Dynamik* ein bewegtes Medium beschrieben werden [1].

Für ein weiterführendes Verständnis wird im Folgenden auf mathematisch-physikalische Zusammenhänge näher eingegangen, welche zur Beurteilung von Strömungsphänomenen essenziell sind.

3.1.2 Phasen- und Komponentenströmungen

Die vorliegende Arbeit umfasst die Untersuchung von effektiven numerischen Methoden zur Darstellung von Mehrphasenströmungen. Für die Zusammensetzung der Strömung kann zwischen *Ein*- sowie *Mehrphasenströmungen* und *Ein*- sowie *Mehrkomponentenströmungen* unterschieden werden. Dabei beschreibt die Phasenzusammensetzung Fluide nach dem Aggregatzustand fest, flüssig oder gasförmig, während die Komponenten nach der chemischen Zusammensetzung definiert werden. Für eine mehrphasige- oder Mehrkomponentenströmung interagieren mindestens zwei Medien dieser Aggregatszustände miteinander [2] [3].

Die rechnerische Beschreibung von instationären und stochastischen Strömungsphänomenen kann nach aktuellem Stand der Technik lediglich interpoliert und statistisch verteilt erfolgen, da für die exakte numerische Lösung der jeweiligen Strömungsgleichungen erforderliche Rechenleistung noch nicht bereitgestellt werden kann, respektive eine unverhältnismäßig lange Rechenzeit zu erwarten ist.

Demnach können selbst bei identischen Umgebungsrandbedingungen die Ausprägung der Strömung stark variieren. Ursächlich sind hierfür variierende Grenzflächenspannungen, Dichteverhältnisse, Gravitationswirkungen oder auch elektrostatische Kräfte zwischen den Partikeln in Abhängigkeit der Komponentenzusammensetzungen.

Aufgrund dieser Komplexität und Inhomogenität ist die Modellierung dieser Strömungen aufwendig. Daher werden Modelle zur Klassifizierung der Strömungszusammensetzung eingeführt.

Für Fluide, welche nicht, beziehungsweise schwer mischbar sind (separierte Fluide), können scharfe Grenzflächen generiert werden, welche keinen Massenaustausch zulassen. Für mischbare Flüssigkeiten können disperse Modelle erstellt werden, in welchen ein interagierendes Fluid in einem Trägerfluid implementiert ist und je nach physikalischer Zusammensetzung transportiert wird. Zwischen den Phasen ist der Übergang fließend. So können Strömungen mit Gasblasen oder festen Partikeln dispers betrachtet werden; in unmittelbarer Nähe zur Partikeloberfläche liegen diese Fluide jedoch separiert vor [3].

Dieser Einteilung folgend können insbesondere Modellierungsansätze für die numerische Strömungsberechnung abgeleitet werden, welche ebenfalls den jeweiligen Klassen zugeordnet werden können.

3.1.3 Newtonsche und Nicht-Newtonsche Fluide

Für die Berechnung von Strömungen ist die Kenntnis der Art der zu berechnenden Flüssigkeit grundlegend. [4] Dabei wird zwischen den Newtonschen[1] sowie den Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten unterschieden. Während für Newtonsche Fluide, zu welchen Wasser, Gase, technische Öle sowie eine Vielzahl dünnflüssiger Einphasenfluide zählen, ein linearer Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ sowie der der Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$ besteht, kann diese Linearität für Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten [2] nicht festgestellt werden [5].

[1] Sir Isaac Newton, englischer Naturforscher (1642-1726)
[2] Beispielsweise Blut, Lack, Honig, Flüssigbeton [118]

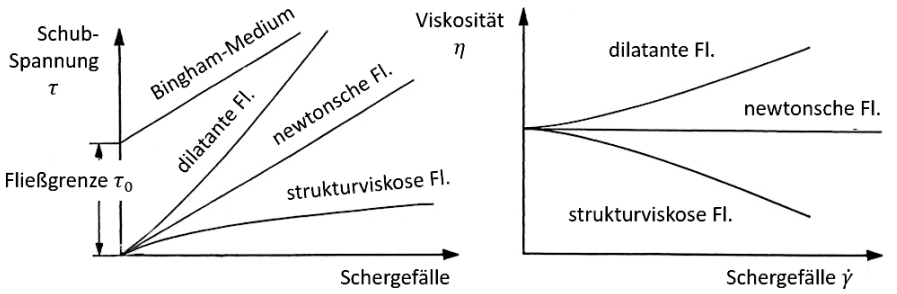

Abbildung 3-1: Abhängigkeit Schubspannung und Viskosität über Geschwindigkeit für Newtonsche sowie Nicht-Newtonsche Fluide [6]

In Abbildung 3-1 ist eine Unterteilung der Nicht-Newtonschen Fluide, welche in der *Rheologie*[3] behandelt werden, in *dilatante* und *strukturviskose* Flüssigkeiten zu erkennen [7]. Zudem gelten noch *Bingham-Fluide* sowie *Casson-Fluide* als plastische Fluide mit Nicht-Newtonschen Eigenschaften. Demnach lassen sich per Definition die Fluide also scherverfestigend oder scherverdünnend beschreiben. Hierbei steigt oder sinkt die Viskosität nicht zeitabhängig, sondern beispielsweise in Abhängigkeit der Kraft, eines Bewegungsimpulses oder bei zu- oder abnehmender Schergeschwindigkeit.

Für die vorliegende Arbeit sind Nicht-Newtonsche Fluide von unbedeutender Relevanz und werden somit nicht näher betrachtet.

Für weiterführende Informationen sei auf die Fachliteratur verwiesen ([8], [9] und weitere).

3.1.4 Kinematische Beschreibung der Fluide

Um die strömungsmechanischen Bewegungen eines Fluidteilchens bewerten zu können, ist zu jedem Zeitpunkt die genaue Kenntnis über die Lage des Teilchens erforderlich. Dabei kann zwischen der materiebezogenen Lagrangeschen Beschreibung sowie der Eulerschen Beschreibung, welche als raumfest definiert ist, unterschieden werden. Grundlegend differenzieren sich beide Beschreibungen im Betrachtungsort des Beobachters.

In der raumfesten Betrachtung nach Euler (Abbildung 3-2 – links) kann die Betrachtung der Zustandsänderung zum Zeitpunkt t am Betrachtungsort beschrieben werden.

Demnach befinden sich zeitabhängig variierende Fluidteilchen am Betrachtungsort [10] [11]. Demgegenüber kann für die Lagrangesche Beschreibung (Abbildung 3-2 – rechts) der gesamte Pfad eines Fluidteilchens in Abhängigkeit der Zeit betrachtet werden [10] [11].

[3] griech., Lehre von den Fließeigenschaften der Stoffe

So können die Geschwindigkeiten v der Fluidteilchen für die beiden Methoden wie folgt bestimmt werden:

Nach Euler $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}\,(\vec{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{t})$ **(3-1)**

Nach Lagrange $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(\vec{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{0}}, \boldsymbol{t}_{\boldsymbol{0}}, \boldsymbol{t})$ **(3-2)**

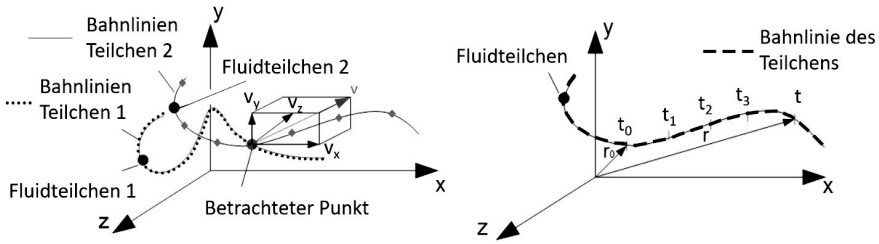

Abbildung 3-2: Betrachtungsweise des Strömungsverlaufes Euler (links) | Lagrange (rechts) nach [12]

Aus Abbildung 3-2 verknüpft mit den Gleichungen (3-22) sowie (3-23) kann abgeleitet werden, dass sich mittels der Betrachtungsweise nach Euler das Geschwindigkeitsfeld an jedem Punkt in Abhängigkeit von der Zeit bestimmen lässt, während zudem der Startpunkt $\vec{x}_0 = \vec{x}(t = t_0)$ für die Lagrangesche Betrachtung essenziell ist [13] [14].

Aufgrund der hohen Anzahl der Freiheitsgrade für die Darstellung nach Lagrange, wird diese in der technischen Strömungsmechanik selten angewandt [12]. Für die vorliegende Arbeit wird lediglich auf Eulersche- sowie eine Kombination der Betrachtungsweise nach Euler und Lagrange eingegangen. Daher werden nachfolgende Beschreibungen der Erhaltungssätze basierend auf der Eulerschen Betrachtung im kartesischen Koordinatensystem durchgeführt.

Zur eindeutigen kinematischen Beschreibung von Fluiden sind zudem noch die Begriffe Strom- sowie Bahnlinie zu definieren. Während für stationäre Strömungen keine Unterschiede zwischen den genannten Raumkurven vorliegen, können für instationäre, also zeitlich abhängige Strömungen signifikante Unterscheidungen beschrieben werden. Als *Bahnlinie* kann die Beschreibung der Trajektorie *eines* materiellen Punktes als Tangentenkurve gekennzeichnet werden. Dahingegen beschreiben *Stromlinien* tangentiale Geschwindigkeitsvektoren eines Geschwindigkeits*feldes* für

verschiedene materiebezogene Teilchen und vermitteln somit einen anschaulichen Verlauf der Strömung in Abhängigkeit von der Zeit. Eine *Streichlinie* beschreibt zu einem Zeitpunkt t' alle materiellen Punkte, welche einen festen Ort y' durchqueren. Diese Definition ist insbesondere für die Strömungsuntersuchung mittels Rauchfäden oder einer zusätzlich eingefärbten Fluidströmung zu beachten. Eine Darstellung dieser Linien ist in nachfolgender Abbildung ersichtlich.

Zum weiteren Verständnis muss zudem eine Unterscheidung zwischen Absolut- und Relativsystem getroffen werden. Auch wenn es keinen direkten Zusammenhang zwischen Strom- und Bahnlinien gibt, können diese Kurven dennoch zusammenfallen. Bewegt sich der Betrachtungspunkt mit der Strömung (Relativsystem), wird die umgebende Strömung als stationär definiert. Wird die Strömung hingegen aus dem Absolutsystem, also von außerhalb betrachtet, kann von einer instationären Strömung gesprochen werden [12] [1]. Demnach entsprechen die Beschreibungen der Stromlinien lediglich im stationären Zustand den Bahnlinien, wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

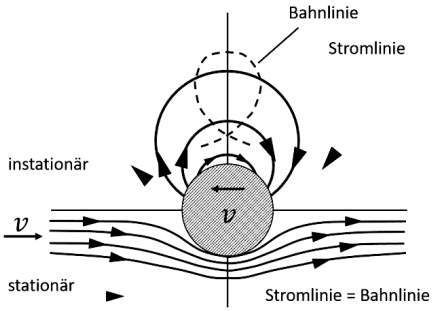

Abbildung 3-3: instationäre sowie stationäre Strömung in Abhängigkeit vom Betrachtungspunkt nach [11]

3.1.5 Essenzielle Grundgleichungen

3.1.5.1 Navier-Stokes- sowie Euler-Gleichung

Die Navier-Stokes-Gleichung gilt als grundlegendste nichtlineare, partielle Differentialgleichung in der Strömungsmechanik und lässt die Beschreibung der Dynamik von Flüssigkeiten für inkompressible Flüssigkeiten zu. Für das Geschwindigkeitsfeld $u(t,x)$ sowie den Druck $p(x,t)$ gilt zeitlich abhängig folgende Gleichung:

$$\boldsymbol{\rho(u_t + (u,\nabla)u) = \eta\Delta u - \nabla p + f} \qquad \textbf{(3-3)}$$

Es gilt als Voraussetzung, dass die Viskosität η sowie Dichte ρ größer 0 sei, während das äußere Kraftfeld als $f(t,x)$ definiert ist.

$$(\boldsymbol{\nabla}, \boldsymbol{u}) = \mathbf{0} \qquad \textbf{(3-4)}$$

Die dazugehörige Inkompressibilitätsbedingung vervollständigt die Beschreibung des inkompressiblen Mediums, wenn zudem der Druck eliminiert und durch das Kraft- sowie das Geschwindigkeitsfeld beschrieben wird [15].

Für die Integration der Viskosität in die Fluidbetrachtung sind die Unterscheidungen von trockenem und nassem Wasser entscheidend. Nach J. v. Neumann[4] gilt *trockenes Wasser* als Flüssigkeit, deren Viskosität vernachlässigt werden kann [16]. Hierfür können die Eulerschen-Gleichungen der Strömungsmechanik angewandt werden.

$$\frac{\boldsymbol{\partial \vec{v}}}{\boldsymbol{\partial t}} + (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{\nabla})\vec{\boldsymbol{v}} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\rho}} \boldsymbol{grad}(\boldsymbol{p}) = \vec{\boldsymbol{k}} \qquad \textbf{(3-5)}$$

Dabei gilt k als eine äußere volumenverteilte Beschleunigung, während der Vektorgradient $(v \cdot \nabla)\vec{v}$ dem Produkt aus Geschwindigkeitsgradienten und Geschwindigkeit entspricht und ebenfalls ort- und zeitabhängig ist.

Für die physikalische Beschreibung realer Fluide sind Reibungs- und Scherkräfte zwischen benachbarten Fluidschichten zu berücksichtigen. Diese Definition des nach Neumann als *nasses Wasser* bezeichneten Fluids wird um die Viskosität η erweitert.

3.1.5.2 Erhaltungssätze und Zustandsgleichung

Das Grundgerüst der Fluidmechanik bilden die drei Navier-Stokes Erhaltungsgleichungen, welche die Strömungsbewegungen eines Newtonschen Fluids beschreiben. Parallel zur klassischen Mechanik können in der Strömungsmechanik ebenfalls die Erhaltungssätze für den Impuls, die Masse sowie die Energie aufgestellt werden. Diese besitzen für das kleinstmögliche Volumenelement die differentielle, für ein endliches Fluidvolumen oder ein raumfestes Kontrollvolumen die integrale Form. Anschließende Betrachtungen erfolgen der Übersicht wegen in differentieller Form. Das dabei betrachtete infinitesimal kleine Fluidelement ist in folgender Abbildung 3-4 dargestellt.

[4] John von Neumann: US-amerikanischer Mathematiker (1903-1957)

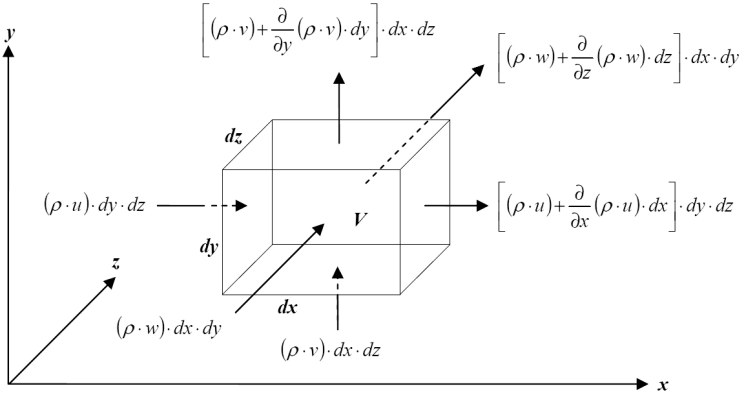

Abbildung 3-4: Infinitesimal kleines Volumenelement mit den Massenströmen [17]

Der Massenerhaltungssatz beschreibt die Massenänderung aufgrund der Bilanzierung aller Massenzu- sowie -abflüsse und ist wie folgt definiert:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \sum_i \frac{\partial m_{ein,i}}{\partial t} - \frac{\partial m_{aus,i}}{\partial t} \tag{3-6}$$

Weiterhin darf die Masseänderung aufgrund der zeitlichen Änderung der Dichte nicht vernachlässigt werden:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz)}{\partial t} \tag{3-7}$$

Diese zeitliche Änderung kombiniert mit (3-6) und nach Einhaltung der Volumenstromdefinition aus Abbildung 3-4 definiert die gesamte Kontinuitätsgleichung (3-8), welche sich für inkompressible Strömungen nach (3-9) vereinfachen lässt.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial t} = 0 \tag{3-8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \tag{3-9}$$

Für die Impuls- sowie Energieerhaltungsgleichungen sind jedoch folgende Schemen der Volumenelemente essenziell. Dabei werden in Abbildung 3-5 alle auf das Volumenelement einwirkende Kraftkomponenten, sowie in Abbildung 3-6 sämtliche Leistungs- und Wärmeflüsse an dem Volumenelement dargestellt.