



Martin Dellner (Autor)

# Modellbasierte Applikation Thermomanagement

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

**ENERGIE & NACHHALTIGKEIT**  
Elektrische Energiespeichersysteme

Martin Dellner

## Modellbasierte Applikation Thermomanagement

Elektrische  
Energiespeichersysteme



Nachhaltige  
CO<sub>2</sub>-Kreisläufe



Elektromobilität &  
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8871>

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 Modellbasierte Applikation Thermomanagement

Zur Erreichung globaler Klimaziele und zur Verringerung der Luftbelastung in Ballungsräumen ergeben sich auch Zielvorgaben für die Automobilindustrie. Durch die Reduzierung des Kraftstoffverbrauches jedes einzelnen Fahrzeuges erfolgt eine verringerte  $CO_2$ -Immission in die Atmosphäre. Für jedes verkaufte Fahrzeug werden diese Werte durch Messung in länderspezifischen standardisierten Testverfahren ermittelt. Überwiegend finden diese Tests auf Rollenprüfständen statt. Die darüber ermittelten Werte dienen dazu, eine modell- und herstellerübergreifende Bewertungsgrundlage für den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen zu schaffen. Außerdem werden darüber Flottenverbräuche einer Marke und beispielsweise die zu entrichtende Kraftfahrzeugsteuer ermittelt. Da Umgebungstemperatur- und Geschwindigkeitsverlauf, wie auch die Einstellungen am Fahrzeug im realen Kundenbetrieb, von den Testvorschriften abweichen können, ergeben sich folglich auch abweichende Kraftstoffverbräuche und Emissionen.

Ein Beispiel dafür ist der in Europa aktuell noch gültige „Neue Europäische Fahrzyklus“, kurz NEFZ. Dieser wird bei einer Umgebungstemperatur von 20–28 °C mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von  $33,6 \frac{km}{h}$  gefahren. Im realen Fahrbetrieb liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit mit ca.  $60 \frac{km}{h}$  deutlich höher [1]. Zudem ist dieser Fahrzyklus synthetisch erzeugt. Die Dynamik entspricht in vielen Fällen nicht der eines realen Fahrers. Des Weiteren sind alle zuschaltbaren Verbraucher, wie z.B. die Innenraumklimatisierung während der Zulassungsmessung deaktiviert. Ein wichtiger Teilnehmer des Thermomanagement-Systems ist der Fahrzeuginnenraum. Setzt man die für die Erwärmung des Innenraums erforderliche Heizleistung im Kaltstart zu der Antriebsleistung eines Mittelklassefahrzeuges bei  $60 \frac{km}{h}$  ins Verhältnis, so ergibt sich bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C ein Wert von 64 %. Bei –20 °C steigt dieses Verhältnis auf 152 % [47].

Das bedeutet, dass ein Fahrzeug im Stadtverkehr zur Aufheizung des Innenraums bei –20 °C etwa 1,5-mal so viel Energie benötigt wie für den Vortrieb. Im stationären Fahrbetrieb kann die Abwärme des Verbrennungsmotors nahezu kostenlos genutzt werden. Jedoch gilt dies nicht für den instationären Aufheizbetrieb. Dieser offensichtliche Energieumsatz wird im Zulassungszyklus nicht erfasst.

Eine Reduzierung dieses Unterschiedes ist durch die Einführung des „Worldwide harmonized Light vehicles Test Process“ (WLTP) teilweise zu erwarten. Dieser wird ab September 2017 eingeführt. Eine Zielsetzung besteht darin, ein dem Kundenfahrverhalten näherliegendes Geschwindigkeits- und somit Lastprofil zu bewerten. Des Weiteren werden realistische Standzeiten zwischen den Messungen vorgeschrieben, die thermische Speichermaßnahmen positiv durch eine höhere Starttemperatur der Medien

berücksichtigen. In einer zweiten Phase werden die Tests bei niedrigen Umgebungstemperaturen durchgeführt und in einem weiteren Schritt auch Nebenverbraucher, wie die Klimatisierung des Innenraums, dabei berücksichtigt [54]. In Kapitel 3.4 werden verschiedene Fahrzyklen dargestellt und beschrieben, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Bewertung des Energieumsatzes herangezogen werden.

Unabhängig vom jeweiligen Testprogramm führt jedoch eine kontinuierliche Wirkungsgradoptimierung der Verbrennungskraftmaschinen zwangsläufig dazu, dass insbesondere bei niedrigen Umgebungstemperaturen die erforderliche Heizleistung nicht mehr zur Verfügung steht. Es müssen folglich neue Komponenten und Technologien in die Fahrzeuge integriert werden, um auch unter extremen Bedingungen einen hohen Kundenkomfort zu gewährleisten. Beispiele auf Seite des Kühlkreislaufes sind elektrische Zuheizler, Wärmespeichersysteme oder komplexe Regelorgane, um bedarfsgerecht Kreislaufteile und die darin eingebundenen Komponenten zu durchströmen oder abzusperrern. Um die luftseitige Durchströmung des Kühlpaketes bedarfsgerecht zu gewährleisten, kommen dazu die Regelorgane Kühlerlüfter und ein steuerbarer Kühlluft eintritt.

Bis vor wenigen Jahren lagen die Aufgaben der Entwicklung Thermomanagement überwiegend in den klassischen Umfängen der Aggregatekühlung. Die beiden wichtigen Betriebspunkte einer Bergfahrt und einer Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit stellen für die Motorkühlung wichtige Eckpunkte dar. Dies sind jeweils sehr hochlastige Fahrzustände, die zudem bei hohen Umgebungstemperaturen gefahren werden. Die bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  durchgeführte „Heizleistungsmessung“ stellt einen weiteren Extrempunkt dar, allerdings bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen und niedrigen Motorlasten. Eine der großen Aufgaben der Entwicklung Thermomanagement ist, neben der Sicherstellung des zuverlässigen und komfortablen Fahrzeugbetriebes an den Extrempunkten, die energieoptimierte Regelung des gesamten Systems in genau diesem häufigen und somit sehr wichtigen Kundenbetriebsbereich.

Eine weitere Herausforderung ist die deutlich ansteigende Variation der Schaltzustände im Thermomanagement-System. Diese nehmen mit der Anzahl der integrierten Komponenten exponentiell zu. Mehrere verschiedene Technologien in Kombination weisen meist nicht das aufsummierte Potential der einzelnen Maßnahmen auf. Zur energetisch optimierten Abstimmung des Gesamtsystems müssen aber genau diese Wechselwirkungen berücksichtigt und quantifiziert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Werkzeuge, Methoden und Vorgehensweisen untersucht und entwickelt. Dabei werden vorhandene Simulationsmodelle aus einem Simulationsbaukasten zusammengesetzt, weiterentwickelt und an die Anforderungen der modellbasierten Applikation angepasst. Die grundlegende Erstellung der Modelle der Kältemittel- und Kühlmittelkreisläufe sowie der Fahrzeugkabine ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Auf Quellen und Entwicklungspartner wird in den entsprechenden Kapiteln verwiesen. Das Ziel liegt darin, basierend auf Simulationsmodellen, das maximale Potential der in ein Fahrzeug integrierten Thermomanagement-Maßnahmen bei vertretbarem zeitlichen Aufwand in den gegebenen Produktentwicklungszyklen auszuschöpfen.

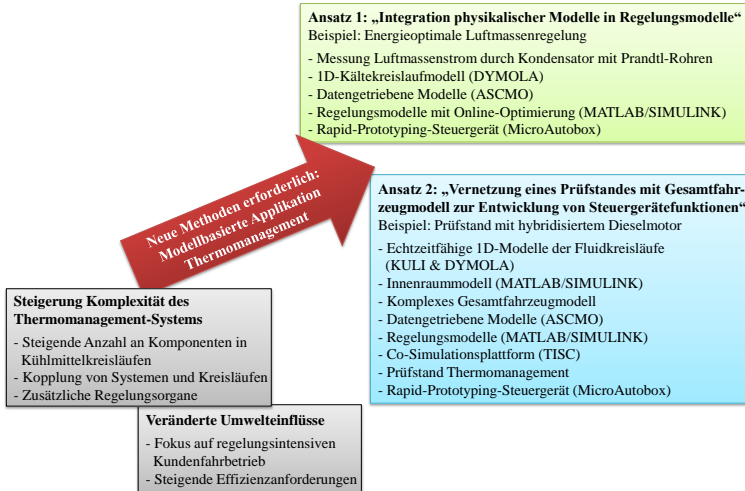


Abbildung 1.1: Ansätze Modellbasierte Applikation Thermomanagement

In Abbildung 1.1 sind die beiden in der Arbeit verfolgten Ansätze dargestellt. Der erste Ansatz in Kapitel 4 basiert auf der Erstellung einer neuen Steuererätefunktion, in welche physikalische Modelle direkt integriert werden. In einem nachgeschalteten Optimierer werden die berechneten Daten genutzt, um den energetisch optimierten Schaltzustand zu ermitteln. In Kapitel 5 wird beginnend mit der Beschreibung eines neu entwickelten Prüfstandes zum zweiten Ansatz der modellbasierten Applikation übergeleitet. Diese beinhaltet ein in Echtzeit rechnendes Gesamtfahrzeugmodell, das mittels Kopplung an den genannten Prüfstand die Simulation nicht vorhandener Kreislaufteile ermöglicht. Damit können Steuererätefunktionen entwickelt und vorappliziert werden. In Abbildung 1.2 ist der Aufbau der Arbeit schematisch dargestellt.

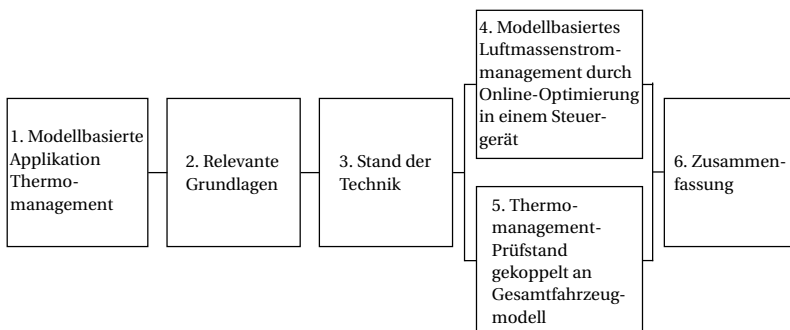


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit



## 2 Relevante Grundlagen

Mit Hilfe der modellbasierten Applikation soll es möglich werden, auftretende Wechselwirkungen zwischen thermischen Systemen eines Kraftfahrzeuges zu quantifizieren, um damit den Gesamtenergieumsatz durch eine optimierte Applikation mit in der Fahrzeugentwicklung realisierbarem Arbeitsaufwand zu minimieren.

Der erste Teil der Grundlagen beschreibt die energieoptimierte Regelung der luftseitigen Durchströmung des Vorderwagens. Dafür werden die relevanten Systeme und Wechselwirkungen einer veränderten Motorraumdurchströmung erläutert. Eingegangen wird dabei auf die aerodynamischen Einflüsse, die über veränderte Durchströmung des Vorderwagens mit den darin befindlichen Kreisläufen zur Klimatisierung des Innenraums und zur Kühlung des Motors und dessen Ansaugluftpfad interagieren.

Im späteren Verlauf der Arbeit wird ein Regelungsmodell aufgestellt, das physikalische Informationen des Kältemittelkreislaufes zur Klimatisierung des Innenraums benötigt. Die dafür erforderlichen Grundlagen werden im zweiten Teil dieses Kapitels erläutert. Anschließend wird auf die Methode „Design of Experiments“ eingegangen. Inhalt des Teils sind insbesondere die in dieser Arbeit eingesetzten Methoden der mathematischen Modellbildung.

### 2.1 Kühlluftdurchströmung

Die Kühlluftöffnungen eines Fahrzeuges werden so ausgelegt, dass sich in den Auslegungsbetriebspunkten ein zur Einhaltung aller Grenzwerte ausreichender Luftmassenstrom auf alle Bauteile und durch alle Wärmeübertrager einstellt. In Kapitel 3.4 wird neben der Darstellung der Randbetriebspunkte auf die Häufigkeitsverteilung von Umgebungstemperatur und Fahrzeuggeschwindigkeit eingegangen. Daraus lässt sich ableiten, dass durch die Auslegung des Gesamtsystems auf Extrempunkte viele Bauteile für einen energieeffizienten Kundenfahrbetrieb überdimensioniert sind und daraus ein Mehrverbrauch resultieren kann. Dieser ergibt sich beispielsweise aus erhöhten aerodynamischen Durchströmungsverlusten durch den Motorraum, einem höheren Gewicht durch größere Wärmeübertrager und aus einer Wirkungsgradoptimierung eines Lüftermoduls auf seinen Maximalbetriebspunkt.

Die Durchströmung des Vorderwagens erhöht den Luftwiderstand des Fahrzeuges. Folglich ergibt sich durch deren entsprechende Verringerung in vielen Betriebspunkten ein Kraftstoffeinsparpotential. Neben der verbesserten Aerodynamik ergeben sich jedoch durch die Reduzierung des Luftmassenstroms über Kältemittelkondensator, Hauptwasserkühler und Ladeluft- oder Niedertemperaturkühler in höherlastigen Betriebspunkten und bei höheren Umgebungstemperaturen energetische Nachteile. Außerdem werden

die konvektiven Wärmeübergänge im Motorraum reduziert. Dies hat eine schnellere Aufheizung der Aggregate wie auch erhöhte Bauteiltemperaturen zur Folge.

Durch eine veränderbare Verschließung der Lufteintrittsflächen ist eine bedarfsgerechte Regelung möglich, um in allen Betriebspunkten im Kundenfahrbetrieb das maximale Potential auszuschöpfen und folglich den Gesamtenergieumsatz zu minimieren. In diesem Kapitel sollen die für eine Regelung dieses steuerbaren Lufteintrittes erforderlichen Grundlagen dargestellt werden.

## 2.1.1 Aerodynamische Wechselwirkungen

### Beschreibung des aerodynamischen Fahrwiderstandes

Die Längsbewegung eines Fahrzeuges wird durch die vier äußeren Kräfte Rollwiderstands-, Luftwiderstands-, Hangabtriebs- und Beschleunigungskraft beeinflusst. Die beiden letzteren können im Fahrbetrieb reversibel von kinetischer in potentielle Energie und umgekehrt umgewandelt werden. Sowohl Roll- als auch Luftwiderstandskraft werden durch Impuls- und Reibungsverluste, wie durch Druckdifferenzen am Fahrzeug, dem sog. Druckwiderstand dissipativ umgewandelt. Folglich hilft deren Reduzierung, den Fahrwiderstand zu senken und somit den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Im Folgenden beschränken sich die Ausführungen auf die aerodynamischen Verluste.

Im subsonischen Geschwindigkeitsbereich kann der aerodynamische Anteil des Fahrwiderstandes über diesen Zusammenhang vereinfacht beschrieben werden:

$$F_{LW} = c_w A \frac{\rho L}{2} v_{Fz} g^2 \quad (2.1)$$

Neben dem  $c_w$ - und  $c_a$ -Wert beschreibt auch die Reynolds-Zahl, die direkt proportional zur Geschwindigkeit ansteigt, die physikalischen Vorgänge der Fahrzeugumströmung. Das Theorem von Buckingham [44] sagt aus, dass sich zwar die Anzahl der Abhängigkeiten durch die Beschreibung von Kennzahlen reduzieren lässt. Die Beschreibung des Luftwiderstandes über  $c_w$  bedeutet aber nicht per se, dass dieser unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit ist. Zur Herleitung wird eine dünne ebene Platte mit laminarer Grenzschicht betrachtet.

### Grenzschichtgleichungen

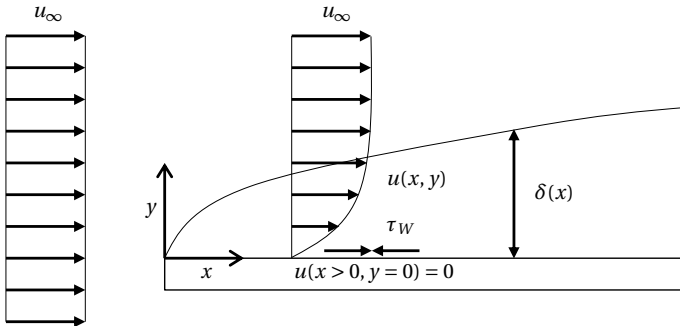
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

mit den Randbedingungen:

- Haftbedingungen an der Wand:  $u(x, y = 0) = 0, v(x, y = 0) = 0$
- Außenrand:  $u(x, y \rightarrow \infty) = u_\infty$
- Einströmrand:  $u(x = x_0, y) = u_0(y)$



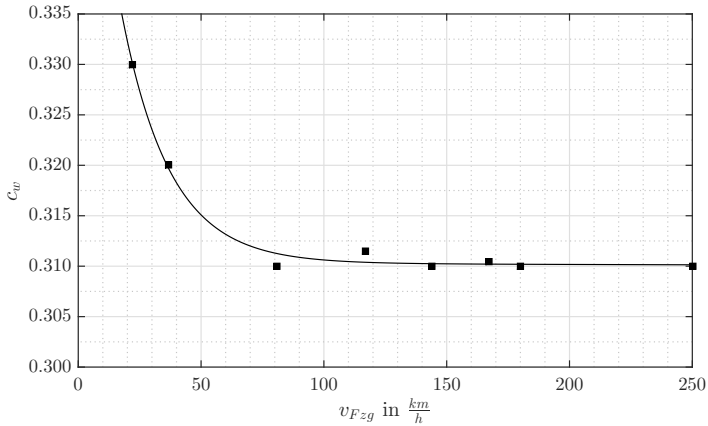
**Abbildung 2.1:** Laminare Grenzschicht an einer längs angeströmten dünnen ebenen Platte nach [51]

Mit Hilfe der Kontinuitäts- und Impulsgleichung, den sog. Grenzschichtgleichungen 2.2–2.4 und den aufgeführten Randbedingungen hat Blasius in [10] mit Hilfe eines numerischen Lösungsverfahrens folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$c_w = \frac{1,328}{\sqrt{Re_x}} \sim \frac{1}{\sqrt{u}} \quad (2.5)$$

In Abbildung 2.2 ist ein von Schütz in [44] experimentell ermittelter Verlauf des Luftwiderstandsbeiwertes über der Geschwindigkeit aufgetragen. Der in Gleichung 2.5 dargestellte Verlauf des Luftwiderstandsbeiwertes proportional zur reziproken Wurzel der Strömungsgeschwindigkeit wirkt sich lediglich bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten aus. Dort ist die Grenzschicht an der Fahrzeugoberfläche noch nicht vollständig turbulent ausgeprägt, was zu veränderten Ablösungen der Strömung, zu veränderten Druck- und Schubspannungen und folglich zu einem höheren Beiwert führt. Da jedoch die zur Überwindung des Luftwiderstandes aufzubringende Leistung mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit steigt, schlägt sich ein bei langsamer Fahrweise abweichender  $c_w$ -Wert nur minimal in der Fahrleistung nieder. Bei 60–80  $\frac{km}{h}$  ergibt sich durch die Annahme eines geschwindigkeitsunabhängigen  $c_w$ -Wertes ein maximaler absoluter Fehler von etwa 30 W (1–2 %). Bis zur Höchstgeschwindigkeit eines Kraftfahrzeuges besitzt diese Näherung Gültigkeit, da das Medium Luft in diesem Bereich als inkompressibel angenommen werden kann. Folglich besitzt die in Gleichung 2.1 eingeführte Abhängigkeit in den in dieser Arbeit betrachteten Systemen eine ausreichende Genauigkeit. [44]





**Abbildung 2.2:** Exemplarischer Verlauf des Luftwiderstandsbeiwertes über Geschwindigkeit [44]

### Beschreibung der einzelnen Anteile des Luftwiderstandes

Der gesamte aerodynamische Fahrwiderstand besitzt unterschiedliche Ursachen. Deren Analyse ist erforderlich, um zu verstehen, welche Effekte zu dessen Reduzierung führen. Die einzelnen Einflüsse Grundform, induzierter Widerstand, Rauigkeit, Kühlluftwiderstand und Interferenzverluste sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

**Grundform und induzierter Widerstand** Die Grundform eines Fahrzeuges besteht aus der Außenhaut mit glattem Unterboden ohne Räder, Kühlluftöffnungen und weitere Spalten. Die Umströmung ist in weiten Bereichen durch anliegende Strömung geprägt. Im Heckbereich und im Bereich der A-Säulen treten minimale Ablösephänomene auf. Dieser Körper ähnelt sehr stark der Form eines Flugkörpers. Im Extremfall wurden an einem solchen Objekt bereits Werte von  $c_w = 0,13$  gemessen, was eine äußerst strömungsgünstige Form belegt. Aufgrund der Formgebung eines realen Straßenfahrzeuges treten auf der Fahrzeugoberseite höhere Strömungsgeschwindigkeiten als auf der Unterseite auf. Diese Druckunterschiede werden durch ausgleichende Strömungen am Fahrzeugheck kompensiert, wodurch Wirbel erzeugt werden. Diese zusätzliche Widerstandskraft wird als induzierter Widerstand bezeichnet.

**Rauigkeit der Anbauteile** Die Rauigkeit sammelt alle Änderungen der Oberfläche gegenüber dem Grundkörper. Außenspiegel, Karoseriespalte, Türgriffe oder die Räder sind Beispiele dafür. Dieser Anteil beträgt für ein Außenspiegelpaar ca. 4 % des Gesamtluftwiderstandes und kann bei sehr großen, ungünstig angebauten Körpern wie einer Skibox auf bis zu 40 % ansteigen.

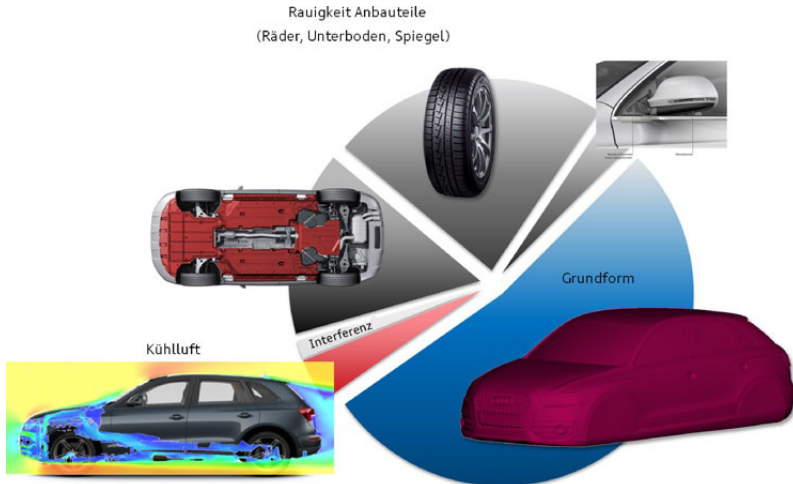


Abbildung 2.3: Zusammensetzung des Luftwiderstandes [44]

**Kühlluftwiderstand** Dies ist der für die vorliegende Arbeit wesentliche Anteil der aerodynamischen Verluste. Daher wird darauf im Folgenden detaillierter eingegangen. Ausgehend von den Lufteintritten wird ein Fahrzeug von vielen „Stromröhren“ durchzogen, die sowohl Wärmeübertrager mit Kühlluft als auch Fahrgastraum und Motor mit Frischluft versorgen. Diese Stromröhren stellen aus Sicht der Aerodynamik Verluste dar, die sich in einer erhöhten Luftwiderstandskraft niederschlagen. Diese Verluste sind anhand der im Motorraum abnehmenden Strömungsenergie in Abbildung 2.4 zu sehen.



Abbildung 2.4: Strömungsenergie der Kühlluft [44]

Der Beiwert des Kühlluftwiderstandes  $\Delta c_{w,K}$  wird definiert als

$$\Delta c_{w,K} = c_{w,durchstr\ddot{o}mt} - c_{w,Mock-up} \quad (2.6)$$

Die Referenz „Mock-up“ stellt den Wert bei Verschließung aller Lufteintritte dar. Bei Kraftfahrzeugen liegt  $\Delta c_{w,K}$  im Bereich zwischen  $0 \leq \Delta c_{w,K} \leq 0,040$ , was einem Anteil von bis zu 10 % des Gesamtluftwiderstandsbeiwertes entspricht.

Der Kühlluftwiderstand hat folgende Ursachen:

- Einströmverluste am Kühlergrill und dessen Umfeld
- Druckverluste bei der Kühler- und Motorraumdurchströmung
- Stoß- und Impulsverluste am Strömungsaustritt
- Wechselwirkungen mit der Fahrzeugumströmung

Da sich die Größe des effektiven Kühlluftesintritts in der Regel an dem Kühlluftbedarf der leistungsstärkeren Motoren des entsprechenden Modells orientiert, ergibt sich für leistungsschwächere ein Einsparpotential. Eine einfache Möglichkeit, dieses auszu-schöpfen, bieten feste Versperrungen ausgewählter Teile der Eintrittsflächen, die jedoch in bestimmten Betriebspunkten zu einer erhöhten Leistung der beeinflussten Systeme führen können. Gegebenenfalls müssen zur Erreichung der Zielwerte der Aerodynamik sogar leistungsfähigere Wärmeübertrager, Pumpen oder Lüfter eingesetzt werden. Ein „Steuerbarer Kühlluftesintritt“ (SKE) stellt eine elegante Lösung dar, um im Kundenfahr-betrieb immer nur die minimal erforderliche Lufteintrittsfläche zu öffnen. [44]

Analog zu  $\Delta c_{w,K}$  kann für eine entsprechende Verschließung durch einen steuerbaren Kühlluftesintritt die Verbesserung des Luftwiderstandsbeiwertes  $\Delta c_{w,SKE}$  experimentell im Windkanal bestimmt werden. In dem Versuchsfahrzeug war ein stufenlos steuer-barer Kühlluftesintritt verbaut. In Abhängigkeit der prozentualen Öffnung  $\gamma_{SKE}$  sind in Abbildung 2.5 die relativen Beiwerte aufgetragen.

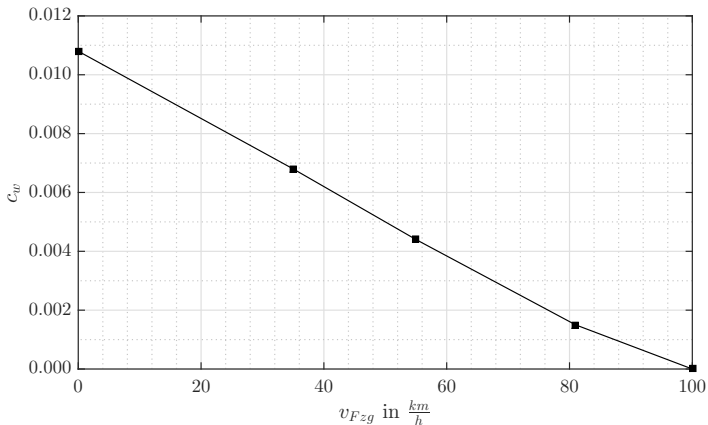


Abbildung 2.5: Luftwiderstandsbeiwert über Öffnungsanteil