



Simulation der thermischen Verhältnisse in Motorräumen mit CFD

In den Motorräumen moderner Personenwagen geht es immer enger zu. Zusätzliche Komponenten, wie beispielsweise Ladeluftkühler, Katalysator oder Klimaanlage, lassen das Temperaturniveau signifikant ansteigen, so dass es in extremen Betriebssituationen zu temperaturinduzierten Schädigungen kommen kann. Um schon in frühen Entwicklungsphasen Aussagen treffen zu können über thermische Belastungen im Motorraum von Subaru-Fahrzeugen, setzt Fuji Heavy Industries verstärkt Simulationswerkzeuge wie das CFD-Programm Ansys Fluent ein.

1 Einleitung

Der Klimawandel ist in der Öffentlichkeit zu einem zentralen Thema geworden. Auch wenn der Individualverkehr nicht den größten Anteil zu Luftverschmutzung und Umweltbelastung beiträgt, sind die Automobilhersteller in der Pflicht, ihren Beitrag zu leisten, um die Eingriffe in die Umwelt zu mindern. In modernen Fahrzeugen steckt deshalb neben den bislang üblichen Bauteilen, Komponenten und Aggregaten eine Reihe von Lösungen, um durch Steigerung der Kraftstoffeffizienz, Geräuschminderung und Reduzierung der Abgasemissionen die Schadstoff-, CO₂- und Lärmemissionen zu reduzieren.

Viele dieser Maßnahmen beeinflussen speziell die thermischen Verhältnisse im Motorraum negativ. So wird zur Geräuschdämmung der Unterboden abgedeckt, um die mechanischen Elemente besser zu kapseln. Die zur Senkung der Abgasemissionen eingesetzten Katalysatoren tragen ihren Anteil bei, indem sie die Temperatur der Abgasanlage erhöhen. Und auch neue Antriebskonzepte zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz, wie zum Beispiel Hybridantriebe, kommen nicht ohne mehrere neue Wärmequellen wie die Batterie aus. Es müssen also nicht nur weitere Bauteile vom Package her untergebracht werden, durch all diese Dinge wird die thermische Umgebung im Motorraum auch zusätzlich belastet.

2 Beeinflussung der Entwicklung durch Vorhersage des thermischen Verhaltens

Um diese Problemstellung zu lösen, muss die thermische Umgebung nicht nur einige teilweise widersprüchliche Anforderungen erfüllen, ebenso muss natürlich die Hitzebeständigkeit der dort untergebrachten Teile und Komponenten gewährleistet sein, um deren Funktion auch in Extremsituationen sicher zu stellen. Iterationsversuche und nachträgliche Konstruktionsänderungen sind aufwändig und teuer. Aus Kosten- und auch aus Zeitgründen werden deshalb heutige Entwicklungsprojekte unter der Prämisse „das Richtige zum richtigen Zeitpunkt tun“ angegangen. Iterations-schleifen und aufwändige konstruktive

Änderungen sollen möglichst minimiert werden, ebenso wie Zahl und Umfang physikalischer Tests. Eine solche Vorgehensweise kann jedoch nur realisiert werden, wenn eine Vorhersagemethode verfügbar ist, mit der unabhängig von physikalischen Tests bereits in einer frühen Entwicklungsphase die thermischen Verhältnisse im Motorraum zuverlässig abgeschätzt werden können.

Zahlreiche Automobilhersteller haben diese Notwendigkeit erkannt und arbeiten an entsprechenden Lösungen. Der Kern solcher Vorhersagelösungen sind in der Regel CFD-Simulationsprogramme, mit denen sich auf der Basis von CAD-Daten und entsprechenden Randbedingungen strömungsmechanische und thermische Untersuchungen durchführen lassen, schon bevor erste Prototypen zur Verfügung stehen. Im Folgenden sollen durch den Vergleich mit physikalischen Tests Möglichkeiten, Effektivität und Grenzen der von Fuji Heavy Industries (Subaru) jüngst entwickelten Lösung aufgezeigt werden [1].

3 Physikalischer Thermoschaden-Versuche

Um den Wärmehaushalt und mögliche Schädigungen von Komponenten und Aggregaten auch unter extremen Bedingungen experimentell untersuchen zu können, werden von den Automobilherstellern so genannte Thermoschaden-Versuche, Heat Damage Tests, durchgeführt. In einem abgeschlossenen Testraum ist es dabei möglich, über Steuergeräte für Temperatur und Feuchtigkeit sowie einen Sonnensimulator unterschiedlichste thermische Bedingungen zu schaffen.

Die Versuche werden üblicherweise unter hochsommerlichen Temperaturbedingungen durchgeführt, bei denen erfahrungsgemäß die Wärmebelastung im Motorraum am höchsten ist. Die Klimaanlage arbeitet dabei mit maximaler Kühlleistung und eingeschaltetem Frischluftventilator. Bei den Tests konzentriert man sich auf die zwei Fahrzyklen Hochgeschwindigkeit und Bergfahrt, bei denen der Verbrennungsmotor besonders stark belastet wird. Zusätzlich wird auch das Verhalten im Leerlauf untersucht, wo nicht genügend Kühlluft zugeführt wird.

Tabelle 1: Versuchsbedingungen beim Thermo-schadenversuch

Merkmal	Wert	Einheit
Temperatur Außenluft	35	°C
Luftfeuchtigkeit	70	%
Sonneneinstrahlung	814	W/m ²
Fahrzeuggeschwindigkeit (Motordrehzahl zwischen 3000 und 3200/min)	33,33	m/s
Modus der Klimaanlage	volle Kühlleistung, Frischluftgebläse ein	-

Für die hier dargestellten Untersuchungen wurden die thermischen Bedingungen im Motorraum im Hochgeschwindigkeitsbereich analysiert, der auch den Modus für die Ermittlung der Leistungsdaten des Fahrzeugs darstellt. In **Tabelle 1** sind die Versuchsbedingungen aufgeführt. Durchgeführt wurden die Versuche an und mit dem Prototyp eines Subaru Impreza WRX Sti; **Tabelle 2** zeigt die Spezifikationen. Da es sich bei dem Testfahrzeug um einen Prototypen handelt, unterscheiden sich einige Teile im Motorraum von denen des Serienmodells.

4 Numerische Simulation

Wie schon angeführt, bieten numerische Simulationsprogramme die besten Voraussetzungen, den gestiegenen prozesstechnischen Anforderungen in der Automobilentwicklung gerecht zu werden. Durch die Möglichkeit, am Computer solche Simulationen schon in einer sehr frühen Entwicklungsphase ohne größeren materiellen Aufwand durchzuführen, können unterschiedliche Designvarianten evaluiert und miteinander verglichen werden (simulationsgetriebene Produktentwicklung). Darüber hinaus kann anhand von Simulationen ein wesentlich tieferes Verständnis der Vorgänge und Zusammenhänge erreicht werden, als es mit konventionellen Methoden möglich wäre.

4.1 Numerische Berechnungsmethode

Für die fluid-thermischen Berechnungen wurde das CFD-Programm (Computational Fluid Dynamics) Ansys Fluent 6.2 der Ansys Inc. eingesetzt. Dieses Programm

zeichnet sich unter anderem aus durch die große Bandbreite verfügbarer physikalischer Berechnungsmodelle, seine Systemoffenheit und eine hohe Flexibilität bei der Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen.

Für den hier beschriebenen Thermo-schaden-Versuch wurde der stationäre Systemzustand unter Verwendung des mathematisch lösbaren $k\epsilon$ -Turbulenzmodells und des Strahlungsmodus der diskreten Ordinaten-Methode abgebildet und berechnet. Die (parallelen) Berechnungen selbst wurden durchgeführt auf einem Xeon-Personalcomputer mit 3,4 GHz und vier Prozessoren bei insgesamt 8 GB Speicher. Die Rechen-

zeit für jeden Simulationsfall betrug jeweils zirka 36 h.

4.2 Berechnungsmodell

Die Grundvoraussetzung für jede realitätsnahe Simulation ist ein möglichst genaues geometrisches Berechnungsmodell und die physikalisch sinnvolle und gültige Formulierung der Randbedingungen, **Tabelle 3**. Im hier beschriebenen Anwendungsfall bestehen Versuchsraum und Fahrzeug aus zirka 230 Kontrollflächen, denen 14 unterschiedliche physikalische Materialeigenschaften und zehn „Radiation Rates“ (Strahlungsverhältnisse) zugeordnet wurden. Die Netzgröße liegt im Bereich zwischen 5 und 30 mm, insgesamt besteht das Berechnungsmodell aus zirka 5,9 Millionen Zellen.

Für Kühler, Kondensator und Ladeluftkühler, an denen entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft Wärme freigesetzt wird, wurden thermische Randbedingungen in Form von Wärmequellen definiert. Anderen Bereichen wurde ein thermischer Widerstand zugeordnet, der den jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend auf der Basis der inneren Komponentenstrukturen ermittelt wurde.

Tabelle 2: Spezifikationen des Testfahrzeugs Subaru Impreza WRX Sti

Merkmal	Beschreibung
Ottomotor	Boxer, 2 Liter Hubraum, zwei oben liegende Nockenwellen, Turbopufferung
Antrieb	permanenter Allradantrieb
Kraftübertragung	manuell geschaltetes Sechsganggetriebe
Abmessungen Fahrzeug (Länge / Breite / Höhe) in mm	4465 / 1740 / 1425

Tabelle 3: Randbedingungen der CFD-Simulation

Merkmal	Bauteil	Vorgabewert
Wärmequellen	Abgasanlage	Temperatur
	Kühler	-
	Kondensator	Strömungswiderstand und Wärmestrahlung gemäß Strömungsgeschwindigkeit
	Ladeluftkühler	-
Einlass	Sonnensimulator	Temperatur
		34,7 m/s bei 35 °C
Auslass	0 Pa, freier Austritt	

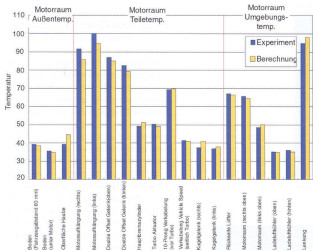


Bild 1: Vergleich der Temperaturen (Experiment/Berechnung) verschiedener Komponenten bei ausgeschalteter Klimaanlage

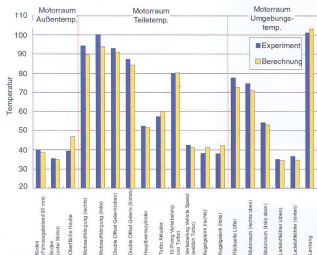


Bild 2: Vergleich der Temperaturen (Experiment/Berechnung) verschiedener Komponenten bei eingeschalteter Klimaanlage

5 Untersuchung der Vorhersagbarkeit des thermischen Verhaltens

Um eine Aussage über die Qualität der Simulationsergebnisse treffen zu können, wurde der ausgewählte Hochgeschwindigkeits-Fahrzyklus sowohl mit ein- als auch mit ausgeschalteter Klimaanlage berechnet und mit entsprechenden Messdaten verglichen, **Bild 1** und **Bild 2**.

5.1 Ergebnisse im Vergleich

Die Gegenüberstellung der experimentellen und berechneten Ergebnisse für die Temperaturen der getesteten Komponenten und Bereiche zu die berechneten Ergebnisse mit den experimentellen Werten sowohl bei ein- als auch bei ausgeschalteter Klimaanlage generell gut übereinstimmen. In beiden Fällen betrug der Temperaturfehler weniger als 10°C .

Genauere Betrachtungen offenbaren jedoch, dass sowohl bei ein- als auch ausgeschalteter Klimaanlage im Bereich der Motoraufhängungen größere Abweichungen auftraten. Gleiches gilt bei eingeschalteter Klimaanlage für die Rückseite des Lüfters und für die rechte Seite der Motorraumumgebung. Um hier die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern, war es notwendig, die getroffenen Annahmen für die Wärmequellen weiter zu präzisieren.

5.2 Überprüfung der thermischen Umgebung bei eingeschalteter Klimaanlage

Anhand der Berechnungsergebnisse wurden diejenigen Teile grafisch andersfarbig dargestellt, die bei eingeschalteter Klimaanlage eine höhere Temperatur erreichen als bei ausgeschalteter Klimaanlage, um so die Ursachen für dieses Verhalten zu ermitteln.

Bild 3 zeigt den Luftstrom am Eintritt in den Motorraum sowie die Temperatur

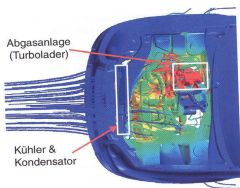


Bild 3: Darstellung der Durchströmung und Temperaturverteilung im Motorraum

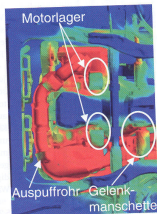
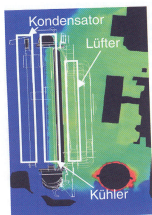


Bild 4: Temperaturverteilung im Motorraum bei ausgeschalteter Klimaanlage

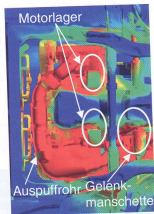
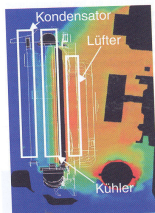


Bild 5: Temperaturverteilung im Motorraum bei eingeschalteter Klimaanlage

verteilung im Motorraum. Es zeigt sich, dass die Temperatur des durch den Kühlergrill eintretenden Luftstroms ansteigt, wenn er den Kondensator und Kühler durchströmt und dabei Wärme von diesen Komponenten aufnimmt. Der so erhitze Luftstrom tritt in den Motorraum ein und heizt die angeströmten Teile auf. Zusätzlich erreicht der Turbolader als Teil des Abgassystems sehr hohe Temperaturen, und seine Temperaturstrahlung verursacht ebenfalls einen Temperaturanstieg der umgebenden Teile.

Im Weiteren wurde für beide Fälle (Klimaanlage aus/ein) auch die Temperaturverteilung in der Umgebung der hinter dem Lüfter positionierten Motorlagerung und des Manschette des Antriebsgelenks untersucht, **Bild 4** und **Bild 5**. Wie vermutet steigen hier die Temperaturen bei eingeschalteter Klimaanlage an.

Wie auch in Bild 3 ist ersichtlich, steigt die Lufttemperatur beim Austritt aus Kondensator und Kühler an. Speziell bei eingeschalteter Klimaanlage erhöht sich durch die höhere Wärmestrahlung dieser Bauteile das Temperaturniveau im Motorraum insgesamt stark. Es ist gut vorstellbar, dass dies auch zum Temperaturanstieg an der Rückseite des Lüfters beiträgt.

Zusätzlich belegen die Zahlen, dass die Temperatur um die Abgasanlage in hohem Maße abhängt von den hohen Temperaturen der Abgaskomponenten. Bei eingeschalteter Klimaanlage steigt die Motordrehzahl an, was wiederum höhere Oberflächentemperaturen des Abgassystems mit sich bringt und in Folge zur Erwärmung der benachbarten Bauteile führt. Es ist denkbar, dass die Aufheizung sowohl der Motorlagerung als auch der Manschette des Antriebsgelenks, die beide nahe an der Auspuffanlage platziert sind, mit darauf zurückzuführen sind.

Wie die zuvor erläuterten Ergebnisse belegen, kann mit der hier beschriebenen Methode erfolgreich der Thermoerschaden-Versuch für den Hochgeschwindigkeitsbereich simuliert werden. Darüber hinaus erlaubt es die ermittelte Temperaturverteilung, diejenigen Bauteile zu identifizieren, deren Temperatur ansteigt. Im Umkehrschluss können diese Erkenntnisse dazu genutzt werden, präventiv konstruktive Maßnahmen zu ergreifen, um Temperaturschäden zu vermeiden.

6 Zusammenfassung

Vorgestellt wurde eine Vorhersagemethode für die thermischen Verhältnisse im Motorraum. Die Ergebnisse von Fuji Heavy Industries (Subaru) haben gezeigt, dass die in physikalischen Thermoschaden-Versuchen ermittelten Temperaturverteilungen mit dem CFD-Programm Ansys Fluent im Allgemeinen sowohl qualitativ als auch quantitativ in guter Näherung nachgebildet werden können.

Die entwickelte Methode bietet daher einen viel versprechenden Ansatz, das Layout des Motorraums bereits in einer frühen Entwicklungsphase unter fluidthermischen Gesichtspunkten zu optimieren. Um die Effektivität des CFD-Programms als Vorhersagemethode in diesem Bereich voll nutzen zu können, ist es allerdings notwendig, Modellgenerierung und Formulierung der Randbedingungen einfacher zu gestalten, ohne dadurch die Berechnungsgenauigkeit zu beeinträchtigen.