

Neue Simulationstechniken – Potenziale für den virtuellen Produktentstehungsprozess

Dr. Gerald Seider, Dr. Fabiano Bet - InDesA GmbH

Abstract

During the last decade powerful simulation techniques for vehicle cooling and engine thermal management analysis have been developed. They have been verified and enhanced in the scope of special validation projects. Some of the simulation techniques could even prove their reliability in standard development processes such as for vehicle cooling systems design.

However, a truly persistent virtual development process from the early design stage to the late confirmation phase has not yet been established for vehicle thermal management systems. One of the reasons is the use of different simulation methodologies and software tools by the involved process partners. Interfaces to the domain of adjacent process partner are realized as the boundaries of one's own field of competence are reached. A subsequent coupling between software tools and methods is often not a consistent and efficient approach.

A new generation of software packages for the simulation of fluid flow and heat transfer analysis allows simulating very large and complex systems. Besides CAE software packages have developed beyond their original core field of competence to multi-physics codes interacting with neighboring areas of expertise, like structural mechanics or energy management. To exploit these options and to take advantage of the latest software capabilities the virtual development process must adapt and change much faster in future.

The following examples will demonstrate the state-of-the-art capabilities of current software packages, namely StarCCM+ and GT-SUITE for the design and validation of vehicle cooling systems, at first detached from a virtual development process. In a second step, necessary changes of the development process are discussed to make full use of the potential that current simulation techniques have with respect to time and cost efficiency.

Kurzfassung

In den letzten zehn Jahren wurden vielversprechende Simulationstechniken zur Kühlungs- und Warmlaufauslegung entwickelt, deren Leistungsfähigkeit an Versuchsträgern überprüft und zum Teil im Entwicklungsprozess bewiesen. Trotz dieser Erfolge haben sich bisher noch keine durchgehenden und geschlossenen Ansätze in der virtuellen Produktentwicklung zum Thema Wärmemanagement etablieren können. Zu unterschiedlich sind die von den beteiligten Fachstellen und

Zulieferern verfolgten methodischen Ansätze, zu unterschiedlich die verwendete Software und die angestrebte Modellierungstiefe. Schnittstellen zu anderen Fachbereichen werden häufig erst dann betrachtet, wenn das simulierte System an die Grenzen des eigenen Kompetenzraums stößt. Eine nachträgliche Kopplung der Simulationsmodelle ist dann meist eine wenig konsistente und effiziente Vorgehensweise.

Eine neue Generation von Softwaretools zur Simulation von Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgängen erlaubt nun einerseits die Simulation sehr großer und komplexer Systeme über die Fachbereichsgrenzen hinaus, andererseits entwickeln sich diese Programme immer stärker in den Multi-Physics Bereich hinein, wodurch die Interaktion zu benachbarten Prozessen, wie das Energiemanagement oder die Strukturmechanik, möglich wird. Sollen die Möglichkeiten der Simulationstechniken ausgeschöpft werden, so müssen ständig und zeitnah Anpassungen im virtuellen Produktentstehungsprozess vollzogen werden.

Der folgende Beitrag zeigt anhand von Beispielen die Möglichkeiten auf, die heutige Simulationstechniken und Software-Pakete, zunächst losgelöst vom Entwicklungsprozess, leisten können und wie der virtuelle Produktentstehungsprozess adaptiert werden muss, um die zur Verfügung stehenden Potenziale kosteneffizient und prozessorientiert umzusetzen.

1. Einleitung

Der Ruf nach effizienten Simulationsmethoden zur Reduzierung des Entwicklungsaufwands und Verkürzung der Entwicklungszeiten wird auch für den Funktionsumfang Motorkühlung/Wärmemanagement immer dringlicher. Der Entwicklungsingenieur, der meist die Einführung von Simulationstechniken und Software für ein Unternehmen verantwortet, muss sich dabei die grundsätzliche Frage stellen, ob er sich bei der Methodenauswahl nach dem aktuellen Produktentwicklungsprozess richtet und sicher stellt, dass die Methoden möglichst kurzfristig zum Einsatz kommen? Oder, ob er die aktuellen Möglichkeiten der Simulation nutzen und auf eine Anpassung des Produktentwicklungsprozesses hinwirken sollte?

Der zweite Weg ist der Längere und Beschwerlichere, bedeutet höhere Investitionskosten ist aber die nachhaltigere Option und führt mittel- und langfristig zur Zielerreichung bezüglich Effizienzsteigerung und Kostenreduktion. Dass der Weg begehbar und aussichtsreich ist, soll in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden.

2. Bedeutung des Wärmemanagements für die Automobilentwicklung

Die Entwicklung von Simulationstechniken muss sich nach dem tatsächlichen Bedarf in der Motor- und Automobilentwicklung richten. Zum einen stellt sich die Frage nach neuen Wärmemanagementfunktionen, die zukünftige Kraftfahrzeuge erfüllen sollen. Zum anderen muss der Einsatz von Simulationstechniken generell zu einer Beschleunigung und zur Kostenreduktion in der Produktentwicklung führen. Einen

Überblick über die aktuelle Implementierung des Fachgebietes Wärmemanagement in die Produktentwicklung soll deshalb im Folgenden gegeben werden.

Die Auslegung von Motorkühlsystemen zum Schutz und zur Kühlung des Motors gehört zu den klassischen Disziplinen, in denen die Simulation Fuß fassen und teilweise in den Produktentwicklungsprozess integriert werden konnte. Es beinhaltet die Dimensionierung von Wärmetauschern, Kühlmittelpumpen, Lüftern, Thermostaten sowie die Verschaltung und Verschlauchung der Komponenten. Allerdings haben sich die Kühlsysteme in den letzten Jahren zu deutlich komplexeren Gebilden entwickelt, was durch die Integration von Turboladern mit Ladeluftkühlung, Abgasrückführung mit AGR-Kühlung, Getriebe mit ATF-Kühlung, elektrische Komponenten mit Leistungselektronikkühlung auf zum Teil verschiedenen Temperaturniveaus, notwendig wurde. Neben der Kühlungsfunktion müssen diese Systeme meist noch verbrauchsoptimierten Warmlaufkonzepten genügen. Die klassische Kühlungsauslegung kommt dabei schnell an ihre Grenzen – nicht nur wegen der gestiegenen geometrischen Komplexität des Systems sondern auch wegen der Vielzahl benötigter, Betriebspunktabhängiger Funktionen von verschiedensten Fachstellen. Ein zusätzliches Problem der geometrischen Komplexität kann sich bei der Befüllung von Kühlmittelkreisläufen am Band oder in der Werkstatt ergeben, wenn das System nicht vollständig befüllt, bzw. entlüftet werden kann.

Der Trend zu kompakteren Motorbauweisen mit immer höherem Leistungsgewicht führt desweiteren zu steigenden thermischen Lasten der Grundmotorstruktur aber auch der Abgaskrümmer, Turbolader und Katalysatoren. Wassergekühlte Konzepte für Krümmer und Turbolader sind die Folge, die bei Volllast erhebliche Wärmemengen in das Kühlmittel einbringen und damit eine Rückwirkung auf die Dimensionierung des Kühlsystems haben. Das innermotorische Kühlkonzept hat direkte Auswirkungen auf die Bauteiltemperaturen, auf Zylinderverzug, Thermospannungen und Lebensdauer und beeinflusst somit die Werkstoffauswahl, den Ölverbrauch und Verschleiß. Auch hier gilt, dass neben der Kühlfunktion das schnelle Aufheizen im Warmlauf zur Reduzierung der Reibverluste des Grundmotors unterstützt werden muss. Dies führt zur möglichen Integration von Split-Cooling Konzepten, elektrischen oder schaltbaren mechanische Wasserpumpen und von kennfeldgesteuerten Thermostaten und Ventile.

Viele der genannten Konzepte zur Warmlaufunterstützung sind bereits in verschiedenen Konfigurationen in der Serie umgesetzt. Zudem reicht die Abwärme des Motors während des Warmlaufs häufig nicht einmal mehr für die benötigte Heizleistung des Fahrgastraums, so dass sich die Frage stellt, ob das Warmlaufwärmemanagement überhaupt noch ein nennenswertes Verbrauchspotenzial für die Zukunft birgt. Dieses Potenzial schrumpft umso mehr, je reibleistungsoptimierter die Motoren durch verbesserte Ölpumpen-, Lager- oder Ventiltriebskonzepte, oder durch weiterentwickelte Motoröle dargestellt werden können. Auf der anderen Seite ist die Kenntnis der Öl- und Bauteiltemperaturen an den Reibpaarungen des Motors notwendig, um eine detaillierte und differenzierte Kraftstoffverbrauchsrechnung für verschiedenste Warmlaufzyklen durchführen zu können. Das Wärmemanagement gewinnt somit für die Kraftstoffverbrauchsrechnung im Warmlauf stark an Bedeutung. Werden dabei zunehmend Sekundärverbraucher, wie Generator, Unterdruck- oder Kraftstoffpumpe

berücksichtigt, so entwickelt sich das Wärmemanagement weiter in Richtung Energiemanagement.

Zum Thema Wärmemanagement gehört schließlich der Umfang Bauteilschutz und thermische Betriebssicherheit im Motorraum und am Fahrzeugunterboden. Zum einen führt die Abluft der Kühlmittel-, Öl- oder Ladeluftkühler zu einem hohen Temperaturniveau im Motorraum, wo bereits für Aggregate wie z.B. für den Generator Kühlungsprobleme entstehen können. Im Wesentlichen sorgt aber die Abgasanlage über Konvektion und Strahlung zu einer hohen thermische Last für die umliegenden Bauteile. Betroffen sind insbesondere Kunststoffbauteile, Schallisolierungen, abgasnahe Sonden, Motorlager etc.. Zu kritischen Temperaturen führen nicht unbedingt Betriebspunkte bei maximaler Leistung, da hier die Kühlung über Konvektion bei hohen Geschwindigkeiten für Abhilfe sorgt, sondern Betriebspunkte bei hoher Last und niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, wo die konvektive Kühlung im Wesentlichen über den Lüfter geleistet werden muss. Zu besonders kritischen Zuständen kann es nach forcierter Fahrt kommen, wenn das Fahrzeug heiß abgestellt wird und die Abgasanlage die gespeicherte Wärme an die Umgebung abstrahlt. Für diese Fälle ist eine frühe Absicherung der Temperaturverhältnisse im Motorraum notwendig. Abhilfe kann im Allgemeinen über Hitzeschutz- und Luftleitbleche erzielt werden, wobei bei Hitzeschutzblechen zu beachten ist, dass die emittierte Strahlung, z.B. eines Krümmers, reflektiert wird und das Bauteil seine Wärme nicht mehr abführen kann und dabei selbst geschädigt wird.

Zusammenfassend ist in Zukunft ein hoher Bedarf an Simulationsmethoden für die die Auslegung der Motor- und Fahrzeugkühlung, des Warmlaufs und für die thermische Absicherung des Motorraums mit Aggregaten und Sonden zu erwarten. Darüber hinaus wird das Thermomanagement für elektrische und elektronische Komponenten weiter an Bedeutung gewinnen.

3. Übersicht und Trends der Simulationsmethoden

In den letzten Jahren haben sich kommerzielle Softwarepakete gegenüber der Inhouse-Software bei den Automobilherstellern und Zulieferern immer deutlicher durchgesetzt, da sich viele Unternehmen auf ihre Kerneigenleistung besinnen. Zum Teil wird an der hauseigenen Software noch festgehalten, da sie schützenswertes Know-How enthält oder sehr stark an die Bedürfnisse des Unternehmens angepasst ist, auf die sich kommerzielle Softwarehäuser möglicherweise nicht einstellen können. Auf dem Gebiet der Strömungs- und Wärmeübertragungssimulation bezieht sich das schützenswerte Know-How allerdings häufig auf die Implementierung empirischer Ansätze, die auf Erfahrungswerten basieren und über langjährige Versuchsreihen abgesichert wurden. Bei den eigentlichen Strömungslösern mit verschiedenen Schließungsansätzen beispielsweise für die Turbulenz, beim Pre- und Postprocessing und bei der Implementierung der Codes auf verschiedenen Rechnerarchitekturen sind jedoch die kommerziellen Tools in der Regel den Inhouse-Tools deutlich überlegen.

Auch auf dem kommerziellen Softwaremarkt ist der Trend zur Konsolidierung durch Unternehmenszusammenschlüsse erkennbar. Zudem entwickelt sich die ursprünglich auf die Strömungssimulation spezialisierte Software zu größeren

Paketen in den Multi-Physics Bereich hinein. So können thermische Lasten mit strukturmechanischen Auswirkungen auf Bauteilverzug und Spannungen oder dynamische Antworten von Druckpulsationen über Mehrkörper-System-Modelle auf die Bauteile erfasst werden. Wurden vor wenigen Jahren noch Kopplungen zwischen verschiedenen Softwareprodukten favorisiert, so geht heute die Tendenz zu den integrierten Softwareprodukten mit Lösungsverfahren, die auf die Eigenheiten der gekoppelten Systeme abgestimmt sind.

Dies führt zu praktisch „barrierefreien“ Simulationsmodellen mit einem deutlichen Effizienzgewinn bei der Modellerstellung, bei der Berechnung und der Auswertung. Der Anwender muss sich nur noch mit einer Benutzeroberfläche auseinandersetzen und hat auch nur noch einen Ansprechpartner bei seinem Softwarepartner. Andererseits stellt sich aber die Frage nach der Auswahl des geeigneten Tools über mehrere Fachbereiche hinweg. Nicht jedes Kompetenzfeld ist in den verschiedenen Softwarepaketen gleichermaßen fundiert abgebildet, sodass der eine oder andere Fachbereich nicht den Weg des gemeinsamen Software-Pakets mitgehen kann. In diesem Fall ist abzuwägen, welches Interessen für ein Unternehmen höher zu bewerten ist, nämlich einen Gesamtprozess darzustellen und zu optimieren oder die Entwicklungstiefe im Detail zu suchen. Beides zu erreichen, ist nur durch eine Software-Kopplung mit allen ihren Nachteilen möglich, oder durch die Ableitung eines zweiten Modelles für den Gesamtprozess aus dem spezialisierten Modell der Fachabteilung. Dass der zweite Weg durchaus sinnvoll sein kann, wird später anhand der Ölkreislaufsimulation erläutert.

Generell zeigt sich aber der Trend, dass Basismodelle von mehreren Fachbereichen gemeinsam genutzt werden können, wenn die Einigung auf ein Softwarepaket möglich war. So lässt sich ein Fahrzeugmodell, das für die Berechnung der Motorraumdurchströmung und des Motorraumthermomanagement geeignet ist, ebenso für Aerodynamiksimulationen oder für die Simulation der Wasserdurchfahrt, bzw. Watfähigkeit mit nur moderaten Modellanpassungen verwenden. In Summe verlangt die Modellerstellung eines derart flexiblen Modells zwar ein höheres, fachübergreifendes Anwender-Know-How, die Effizienzvorteile für den Gesamtaufwand sind jedoch erheblich.

Im Folgenden werden zwei Beispiele vorgestellt, die das Potenzial von integrierten Softwarepaketen und einer fachbereichsübergreifenden Modellerstellung veranschaulichen sollen. Das erste Beispiel beschreibt ein Modell zur Simulation des Motorwarmlaufs und basiert auf der Theorie eindimensionalen Strömungstransports und Wärmeübertragung. Das zweite Beispiel aus dem Bereich der dreidimensionalen Simulationsansätze behandelt die thermische Betriebssicherheit der Komponenten im Fahrzeugmotorraum. Für die 1D Simulation wurde die Software GT-SUITE von Gamma Technologies eingesetzt, für die 3D Simulation StarCCM+ von CD adapco.

4. Motorwarmlaufsimulation

Um den Kraftstoffverbrauch für verschiedenste Warmlaufzyklen zu bestimmen, werden in der Regel Fahrleistungsrechnungen durchgeführt, die über ein Verbrauchskennfeld des betriebswarmen Motors den Verbrauch für den entsprechenden Fahrzyklus ermitteln. Der erhöhte Verbrauch des noch kalten Motors wird empirisch berücksichtigt und beruht auf Erfahrungswerten die aus Warmlauf-Verbrauchsmessungen gewonnen wurden. Eine Aufteilung der erhöhten Reibleistung des kalten Motors auf die einzelnen Reibgruppen ist dabei nicht möglich. Diese Vorgehensweise eignet sich daher nicht, um Wärmemanagementkonzepte, wie die stehende Wasserpumpe oder Split-Cooling hinsichtlich ihrer Verbrauchsvorteile zu bewerten.

Für die Analyse und Bewertung von Wärmemanagementkonzepten muss einerseits die Reibleistung der einzelnen Reibgruppen temperaturabhängig erfasst werden. Andererseits muss die Erwärmung der Motorstruktur, des Motoröls und des Kühlmittels abgebildet werden. Bild 1 gibt eine Übersicht über Möglichkeiten für den Aufbau eines Warmlaufsimulationsmodells.

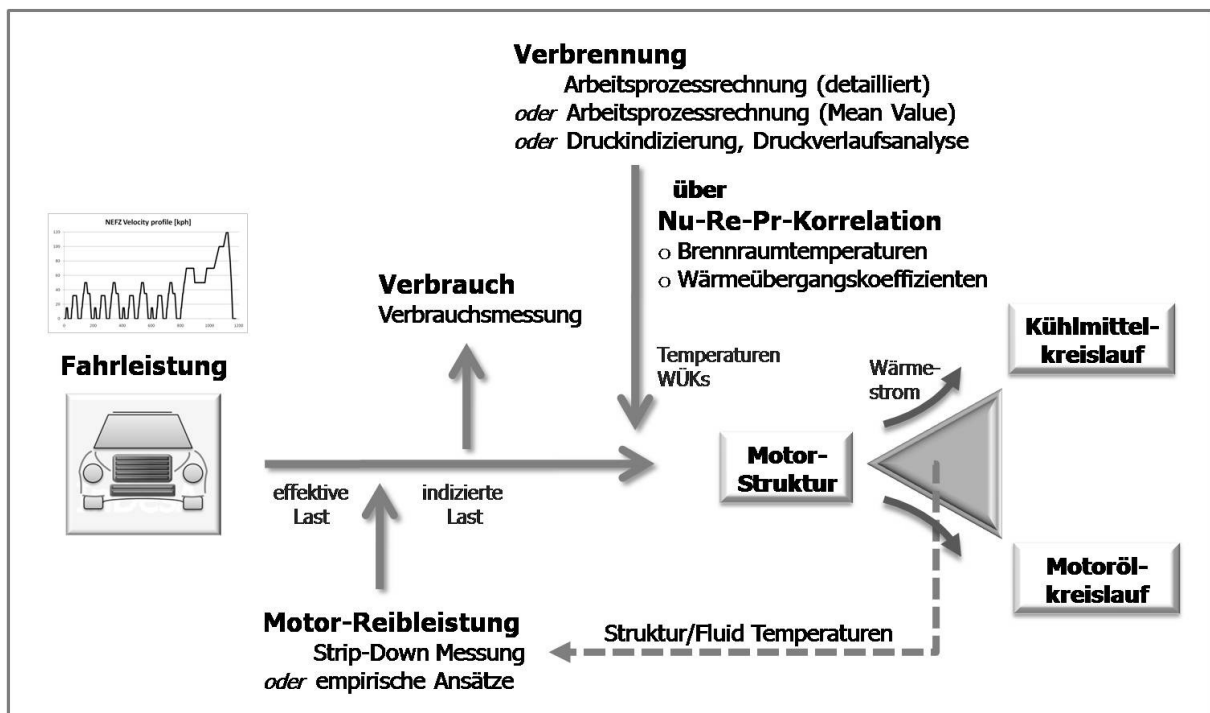


Bild 1: Übersicht zum Aufbau eines Warmlauf-Simulationsmodells

Ausgehend von einem Fahrleistungsmodul werden für eine Fahrzeugkonfiguration und ein Fahrprofil die Motorabtriebsdrehzahl und das Drehmoment ermittelt. Zusammen mit der Reibleistung, die entweder über empirische Ansätze oder auf der Basis von Strip-Down Messungen ermittelt wird [1], kann die indizierte Last bestimmt werden. In Abhängigkeit der indizierten Last werden die Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten auf den Brennraumwänden ermittelt. Über ein Strukturmodell wird die Wärme über die Brennraumwände in das Kühlmittel und in das Motoröl geleitet. Dabei findet insbesondere im Zylinderkopf ein Wärmeaustausch

zwischen Kühlmittel und Motoröl über die Struktur statt. Deshalb müssen beide Fluidkreisläufe in der Simulation hinreichend genau erfasst werden.

Für die Ermittlung der Brennraumtemperaturen, bzw. Wärmeströme können drei verschiedene Verfahren verwendet werden. Besteht die Möglichkeit, auf eine Arbeitsprozessrechnung für den Motor zurückzugreifen, so bieten sich Formeln für den Wärmeübergang auf der Basis der Untersuchungen von z.B. Woschni, Hohenberg, Bargende an, die in unterschiedlichen Derivaten in den Arbeitsprozessrechnungsprogrammen implementiert sind, siehe [2]. Die Prozessrechnung kann dabei über einen Mean-Value-Ansatz direkt mit dem Warmlaufmodell gekoppelt werden. Alternativ können betriebspunktabhängige Kennfelder für die Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten erzeugt werden, die anschließend in der Warmlaufsimulation verwendet werden. Steht ein Versuchsmotor zur Druckindizierung zur Verfügung, können über eine Druckverlaufsanalyse der Brennverlauf und dann, wie in der Arbeitsprozessrechnung, die gemittelten Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden. Als dritte Möglichkeit bietet sich die Wärmebilanzmessung mit konditionierter Medienversorgung an [3]. Dabei wird direkt auf die Wärmeströme über die Brennraumwände geschlossen, was u.a. den Nachteil hat, dass die Wärmeströme unmittelbar an das Durchströmkonzept des Versuchsmotors gekoppelt sind. Eine Variation der Durchströmung wie z.B. beim Split-Cooling ist dann auf dem Simulationsweg nicht mehr möglich.

Solange die Interaktion zwischen der Verbrennung und dem Kühlsystem nicht zu hoch ist, lassen sich Druckindizierung, Arbeitsprozessrechnung und Wärmebilanzierung als mögliche Komponenten für die Warmlaufsimulation verwenden. Steigt aber die Interaktion zwischen Verbrennung und Kühlsystem durch die direkte Kopplung z.B. über Ladeluft- oder AGR-Kühlung, so empfiehlt sich nur die direkte Kopplung zur Arbeitsprozessrechnung. Bei Kraftstoffverbrauchszyklen mit mäßiger Fahrdynamik - wie beim NEDC - kann meist noch auf die direkte Kopplung verzichtet werden. Bei hochdynamischen Fahrprofilen, wie der Volllastbeschleunigung, wird die direkte Kopplung allerdings notwendig. In der hier vorgestellten Simulation wurde die Arbeitsprozessrechnung mit GT-POWER bevorzugt, da sie die größtmögliche Flexibilität liefert und über die Warmlaufberechnung hinaus für beliebige dynamische Fahrprofile das größte Potenzial bietet.

Der Kraftstoffverbrauch wird schließlich auf der Basis stationärer Verbrauchskennfelder bestimmt, die für den betriebswarmen Motor vermessen wurden. Durch die Verwendung der indizierten Last als Parameter, geht der sich im Warmlauf verändernde Reibleistungsanteil in die Verbrauchsrechnung ein.

4.1 Simulationsmodule

Für die Warmlaufsimulation wird das Modell in sechs Module gegliedert. Bild 2 zeigt den modularen Aufbau des Simulationsmodells unter Verwendung der GT-SUITE Software.

Die Verlustleistung der Öl- und Kühlmittelpumpe kann über Messungen am Aggregateprüfstand bestimmt werden. In der vorgestellten Simulation wird die hydraulische Leistung beider Pumpen über die hydraulische Verlustleistung der Kreisläufe und den Pumpenwirkungsgrad berechnet.

Durch Addition von Abtriebs- und Motorreibmoment ergibt sich das indizierte Moment, das über die Druckindizierung des Motors verifiziert werden kann. Die indizierte Last dient im **Verbrennungsmodul** als Grundlage für die Berechnung des Wärmeeintrags durch Verbrennung. Über die Last- und Drehzahlinformation können mit Hilfe betriebspunktabhängiger Kennfelder die Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Brennraumzonen ermittelt werden, die zuvor über ein für die Teillast kalibriertes GT-POWER Modell berechnet wurden. Alternativ wurde der Ansatz über die direkte Kopplung mit dem GT-POWER MeanValue Model dargestellt. Das MeanValue Modell wird von dem detaillierten GT-POWER Modell direkt abgeleitet und vereinfacht, so dass, statt der für die Prozessrechnung üblichen zeitlichen Auflösung im Grad-Kurbelwinkel-Bereich, ein deutlich größerer und zur Warmlaufsimulation kompatibler Zeitschritt verwendet werden kann. Der Informationsverlust, der durch die Vereinfachung des Modells entsteht, wird über ein neuronales Netz kompensiert, das bezüglich der Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten zuvor trainiert werden muss. Während für den kennfeldbasierten Ansatz eine Echtzeitberechnung möglich ist, liegt die Rechenzeit für die gekoppelte Simulation um eine Größenordnung darüber.

Die berechneten Brennraumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten werden im **Strukturmodul** zonenweise auf den Liner, das Brennraumdach, den Kolben und die Ein- und Auslasskanäle eines generischen FE-Modells übertragen. Die äußere Motorstruktur ist ansonsten durch reduzierte Punktmassen abgebildet, die untereinander durch Wärmeleitungsbeziehungen verbunden sind. Über das parameterisierbare FE-Modell können die wesentlichen charakteristischen Abmessungen der brennraumnahen Struktur erfasst und die Kontaktflächen zu Kühlmittel, Motoröl und der übrigen Struktur definiert werden. Generell lässt sich das Strukturmodell durch weitere FE-Modelle ergänzen. Das ist dann sinnvoll, wenn die Punktmassen eine nicht zufriedenstellende Auflösung der Struktur ermöglichen. In diesem Fall wurden ebenfalls die Lagerbrücken über FE-Modelle aufgelöst, um die Kalibrierung der Hauptlagerreibung in Abhängigkeit der gemessenen Lagerstuhltemperaturen zu ermöglichen. Die Verbindung des Strukturmodells zum Kühlmittel- und Motorölkreislauf wird über die entsprechenden Austauschflächen und über die in den jeweiligen Fluidkreisläufen berechneten Wärmeübergangskoeffizienten realisiert.

Das **Kühlmittelmodul** bildet den gesamten Kühlmittelkreislauf mit allen Wärmetauschern und Thermostaten, Ventilen und der Wasserpumpe ab. Der Motorwassermantel sollte gerade für die Untersuchungen verschiedener Durchströmkonzepte detailliert aufgelöst werden. Dies ist nur durch eine begleitende dreidimensionale CFD-Rechnung möglich, da ansonsten die Modellierung durch 1D-Elemente zu unsicher wird. Die CFD Rechnung ermöglicht die segmentweise Berechnung der Druckverluste und der gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten, die auf das 1D-Modell übertragen werden. Der zusätzliche Aufwand für die 3D

Simulation ist begrenzt, da die CFD Modelle in der Regel für die Motorstrukturanalyse generiert werden müssen. Der Kühlmittelkreislauf wird thermisch mit dem Ölkreislauf und der Kühlluft über Wärmetauscher gekoppelt. Die Wärmeübertragungskennfelder basieren auf Messdaten, die in Nu-Re-Korrelationen für die innere und äußere Seite umgewandelt werden. Das Aufnahmemoment der Wasserpumpe wird über die hydraulische Leistung und den Wirkungsgrad bestimmt und als Reibmoment an das Strukturmodul übermittelt.

Für den Ölkreislauf kann auf die hydraulisch detaillierte Darstellung, wie sie für die Auslegung der Ölversorgung benötigt wird, verzichtet werden. Dafür muss im **Ölversorgungsmodule** zusätzlich der drucklose Rücklauf mit den benetzten Strukturflächen erfasst werden. Es ist ausreichend, den Ölkreislauf für den Wärmetransport zu optimieren, d.h. einzelne Verbraucher können durchaus zu Gruppen mit einem Versorgungskanal und einem Wärmeübertragungselement zusammengefasst werden. So können beispielsweise die Hauptlager, Pleuellager oder Ölspritzdüsen zu jeweils einem Verbraucher gruppiert werden. Die Volumenströme der Verbraucher können als Funktion des anliegenden Drucks und der Öltemperatur aus detaillierten hydraulischen Simulationen oder aus Messungen gewonnen werden. In diesem Fall muss allerdings auf die hydraulisch korrekte Implementierung der Ölpumpe gegebenenfalls mit Absteuerventil, Ölfiltermodul und Wärmetauscher geachtet werden. Es spricht auch nichts gegen eine detaillierte hydraulische Abbildung des gesamten Ölkreislaufs, sofern das Modell in derselben Software-Suite bereits vorhanden ist.

Wärmeübertragungselemente im Ölkreislauf sorgen für die Erwärmung des Öls infolge der im Reibleistungsmodul errechneten Verlustleistung für die einzelnen Reibgruppen. Für den Wärmeübergang vom Öl an die Motorstrukturwand des Kurbelgehäuses wird zonenweise eine Re-Nu-Korrelation verwendet, die über die Motordrehzahl gebildet wird. Entsprechend dem Vorgehen bei der Wasserpumpe, wird die Verlustleistung der Ölpumpe über den Wirkungsgrad bestimmt und an das Strukturmodell weitergeleitet.

Die Bestimmung des eigentlichen Kraftstoffverbrauchs basiert auf einem gemessenen Verbrauchskennfeld für den warmen Motor, das über Drehzahl und indizierter Last erfasst werden muss.

4.2 Kopplung der Simulationsmodule

Der modulare Aufbau des Simulationsmodells ermöglicht die Zusammenarbeit verschiedener Fachgruppen oder Abteilungen in einem Unternehmen. So kann das Verbrennungsmodul von der Fachgruppe für Verbrennung und Ladungswechsel bereit gestellt werden. Entsprechendes gilt für das Modell des Öl- oder des Kühlmittelkreislaufs. Die Modelle müssen jedoch an einer zentralen Stelle hinsichtlich Konsistenz und Funktion geprüft und zusammengebaut werden. Auch muss das zentrale Organ zuvor die Anforderungen an die Module und ihre Schnittstellen formuliert haben.

Es ist davon auszugehen, dass die Module eine unterschiedliche Entwicklungstiefe und Reife in den verschiedenen Fachabteilungen erreichen. Von daher müssen die

Schnittstellen, über die die Module später kommunizieren sollen, definiert werden. In dem Programm-Paket der GT-SUITE bietet es sich an, gemeinsame Objekte zu verwenden, die die Kommunikation zwischen den Modulen selbständig übernehmen. So kann für einen Wärmetauscher, der den Motoröl- mit dem Kühlmittelkreislauf thermisch verbindet, eine Master/Slave-Konfiguration verwendet werden, in dem dasselbe Wärmetauscherobjekt in beiden Kreisläufen vorhanden ist und selbständig kommuniziert. Es ist ausreichend, das Master-Objekt zu bedaten und als Slave-Objekt in den verbundenen Kreislauf zu kopieren. Ähnlich funktioniert der Datentransfer für das brennraumnahe FE-Modell, in dem Brennraumtemperaturen und Wärmeübertragungskoeffizienten zonenweise vom Verbrennungsmodul auf das Strukturmodul übertragen werden. Es ist letztlich nur dafür zu sorgen, dass die Module, die untereinander kommunizieren, identische Objekte verwenden. Die objektorientierten Kopplung ist übersichtlich und schließt Anwenderfehler bei der eigentlichen Kopplung der Module aus (Bild 3).

Über die Verbindungen zwischen den Modulen lassen sich auf einfache Weise die Wärmeströme für ein Modul bilanzieren. Bild 4 a/b zeigt exemplarisch für den Kühlmittelkreislauf die motorinternen Wärmeübergänge von der Struktur in das Kühlmittel und die über die Wärmetauscher ausgetauschte Wärme in Abhängigkeit der Medientemperaturen. Die Modellierung erlaubt ebenfalls die Differenzierung der Wärmeströme für das Kurbelgehäuse und den Zylinderkopf. In diesem Fall ist der Wärmeaustausch zwischen Kühlmittel und Motoröl über den Zylinderkopf in der Gegenüberstellung zum Motorölkühler deutlich erkennbar (Bild 4b).

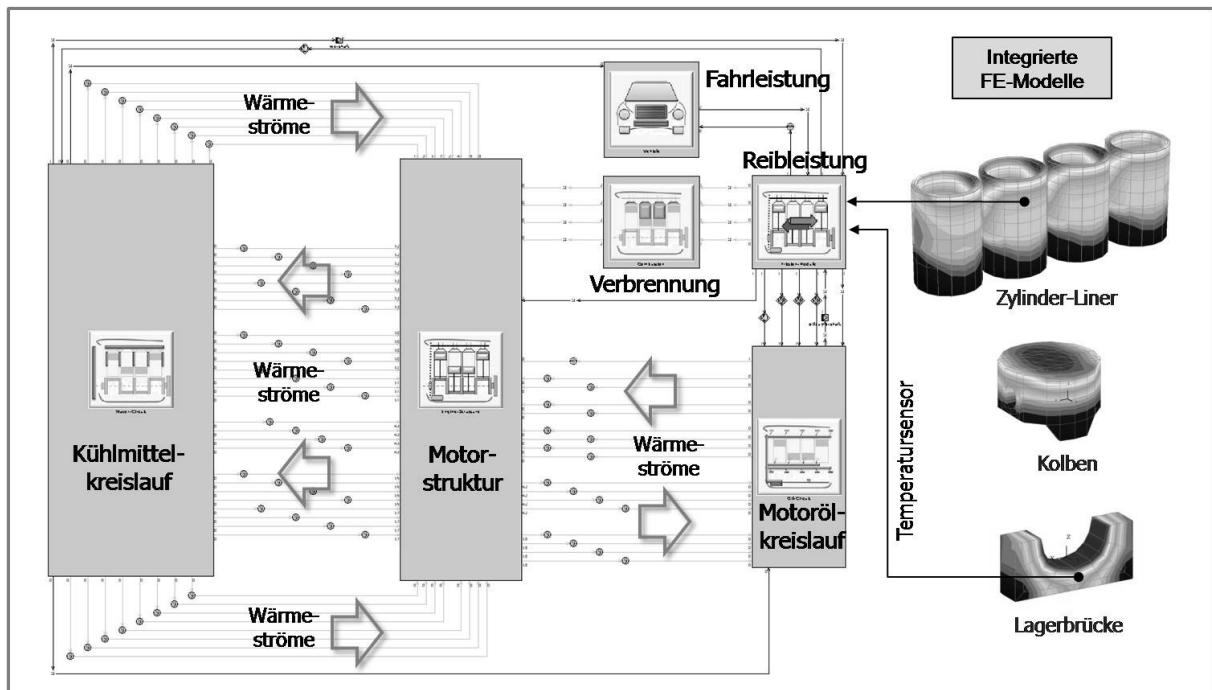


Bild 3: GT-SUITE Wärmelaufmodell mit integrierten FE-Modellen

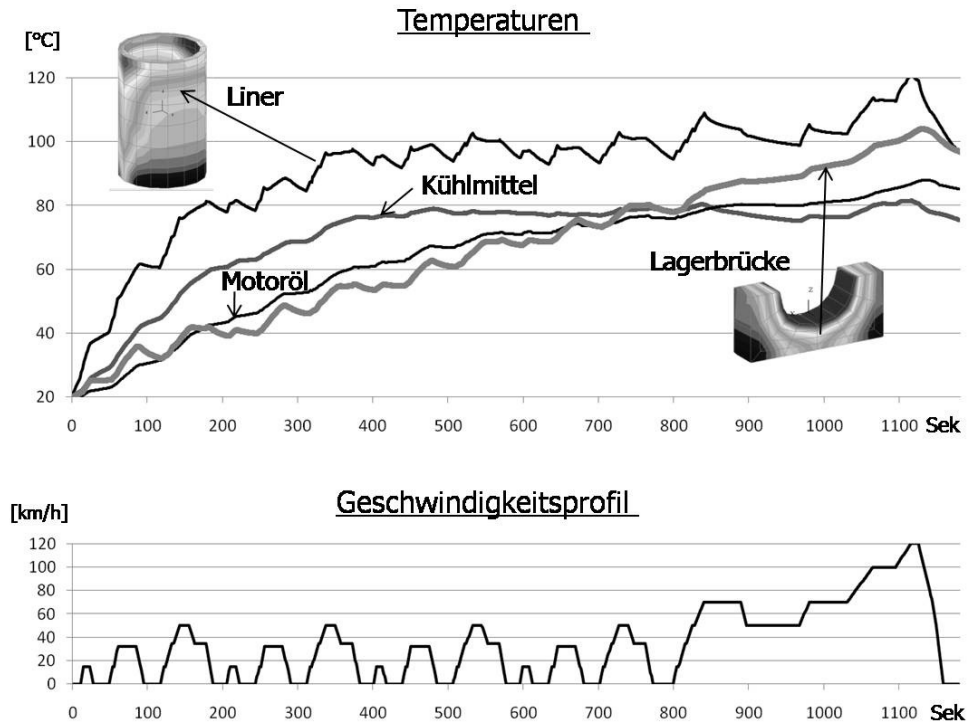


Bild 4a: Medientemperaturen im NEFZ

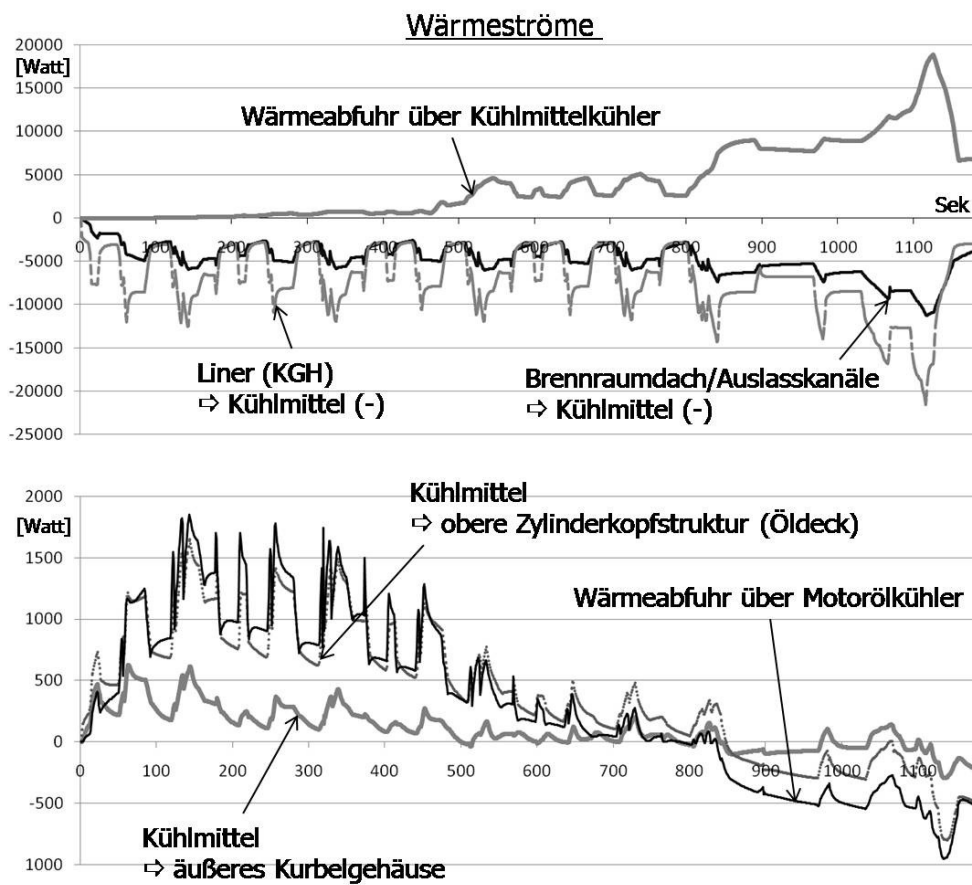


Bild 4b: Wärmeströme in der Motorstruktur und über Wärmetauscher

4.3 Ergebnisqualität

Da die Simulation auf einer Reihe von vermessenen Kennfeldern beruht, hängt die Qualität der Simulationsergebnisse zunächst stark von der Genauigkeit der verfügbaren Versuchsdaten ab. Zu den wichtigsten Eingangsdaten gehören die Reibleistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen. Für die Abstimmung des Verbrennungsmodells werden weiterhin die Druckindiziermessungen benötigt, für die Wärmetauscher- und Pumpenmodelle die Vermessung der Wärmeübertragungs- bzw. der Förderkennfelder. Es ist offensichtlich, dass der Berechnungsingenieur bereits vor den Messungen seine Anforderungen an den Versuchsaufbau und die Messgenauigkeit formulieren muss und damit für die Qualität seiner Ergebnisse verantwortlich zeichnet.

Der eigentliche Nutzen der 1D-Simulation besteht aber darin, sehr differenzierte Analysen für verschiedene Motor- und Fahrzeugkonfigurationen mit unterschiedlich kombinierten Wärmemanagement- oder Reibleistungsmaßnahmen zu untersuchen. Die 1D Simulation gibt Aufschluss über die Wirkmechanismen im Einzelnen und über das Verbrauchspotenzial der gesamten Konfiguration.

5. Simulation zur thermischen Betriebssicherheit

Das Thermomanagement des Motorraums wird im Wesentlichen durch die Wärmequellen, Motor, Turbolader, Abgasanlage und durch die wärmeabführenden Wärmetauscher beschrieben. Die Kopplung zwischen den Wärmequellen und Wärmesenken übernehmen die Medienkreisläufe, wie Kühlmittel und Motoröl, sowie die Kühlluft durch den Motorraum. Da die einzelnen Komponenten fluiddynamisch und thermisch gekoppelt sind, wurde der Versuch unternommen, mit StarCCM+ die Standard-Berechnungsapplikationen – wie im Folgenden beschrieben – in einem CFD Modell zusammenzuführen.

5.1 Thermoanalyse des Grundmotors und der Abgasanlage

Die Thermoanalyse für den Grundmotor zählt zu den Standardanwendungen in der Motorenentwicklung und dient in erster Linie der Absicherung der Motorkühlung. Sie setzt sich aus der Strömungsberechnung für den Wassermantel und der Bauteiltemperaturberechnung für das Kurbelgehäuse und den Zylinderkopf mit Abgaskrümmern zusammen. Mit Hilfe der weiterführenden Strukturanalyse werden Aussagen zu Bauteilverzug, zu Thermospannungen und Lebensdauer des Motors abgeleitet. Aus Sicht des Wärmemanagements ist es vorteilhaft die Strömungs- und Bauteiltemperaturberechnung mit Hilfe des Conjugate Heat Transfer (CHT) Ansatzes in einem Simulationsmodell durchzuführen und anschließend das resultierende Temperaturfeld auf das FE-Netz für die Strukturanalyse zu übertragen.

Der Vorteil der gekoppelten CFD/CHT Analyse besteht zum einen darin, dass die Wärmeströme für den gesamten Motor in einem Modell bilanziert und überprüft werden können. Zum anderen können durch das Einbinden der Motormasse thermisch transiente Vorgänge ohne großen iterativen Aufwand zwischen CFD und FEM Analyse simuliert werden, wie z.B. Thermoschock-Testzyklen.

Die Randbedingungen auf der Brennraumseite werden ähnlich wie in der 1D Simulation aus der thermodynamischen Prozessrechnung abgeleitet oder alternativ aus 3D CFD Verbrennungsberechnungen gewonnen. Auf der Kühlmittelseite ist lediglich die Vorgabe des Massenstroms, der Eintrittstemperatur und des Druckes notwendig. Diese Randbedingungen leiten sich direkt aus der 1D-Systemsimulation ab. Auf der ölbenetzten Strukturseite werden Öltemperatur und Wärmeübergangskoeffizienten festgelegt. Bei dem gekoppelten Ansatz sollte das Fluid- und das Strukturnetz direkt über gemeinsame Knoten konnektiert sein und auf der Kühlmittelseite wandnahe Prismenschichten aufweisen, um den Grenzschichtannahmen bei der Turbulenzmodellierung gerecht zu werden. Dieser Ansatz erlaubt auch eine einfache Implementierung von Siedemodellen, da die Rückkopplung zwischen Wand- und Fluidtemperaturen direkt erfolgen kann.

Das Vorgehen bei der Abgasanlage ist ähnlich wie beim Grundmotor. Da die Strukturtemperaturen des Krümmers oder Turboladers deutlich höher als beim Grundmotor liegen, ist zusätzlich der Wärmetransport über Strahlung zu berücksichtigen. Wärmeschutzbleche in der näheren Umgebung der Abgasanlage sind dabei zu beachten, da diese reflektierend wirken.

5.2 Durchströmung der Fluidkreisläufe

5.2.1 Kühlmittelkreislauf

Unsicherheiten, die bei der 1D Simulation für den Kühlmittelkreislauf noch aufgrund der experimentellen Eingangsdaten bestehen, können durch die 3D Simulation weitgehend ausgeräumt werden. So wird das Förderkennfeld für die Wasserpumpe durch ein detailliertes 3D Modell mit exakter Laufradgeometrie ersetzt. Damit muss nur noch die Drehzahl in der 3D CFD Simulation definiert werden. Der berechnete Fördervolumenstrom der Pumpe kann sich dann aufgrund der Einbausituation durchaus von den Prüfstandsdaten unterscheiden. Auch können Phänomene wie Kavitation im Laufrad sicher vorhergesagt werden. Die Erkenntnisse aus der 3D Simulation sollten zur Nachschärfung der 1D Systemsimulation verwendet werden.

Die Kühlmittelkreislaufsimulation kommt weitgehend ohne experimentelle Daten aus. Thermostate und Ventile werden mit den entsprechenden Ventilstellungen geometrisch exakt dargestellt. Der Motorwassermantel kann direkt aus der Thermoanalyse für den Grundmotor übernommen werden. Lediglich für die Modellierung der Wärmetauscherrohre, sind Druckverlustmessungen notwendig, um die entsprechenden Porositäten zu bedaten. Ähnliches gilt für die involvierten Plattenwärmetauscher.

Die Berechnungen werden isotherm bei Betriebstemperatur durchgeführt und dienen im Wesentlichen zur Absicherung der Kühlmittelvolumenströme über den Motor und über alle Wärmeübertrager für beliebige Betriebspunkte mit entsprechenden Thermostat- und Ventilstellungen. Sollen die Modelle noch zur Befüllsimulation verwendet werden, so ist eine weitere Geometriedetaillierung notwendig, z.B. im Ausgleichsbehälter. Die Vielzahl der involvierten Teile erfordert eine saubere Datenorganisation und eine weitgehend automatisierte Bedatung der Rand-

bedingungen. Die entsprechenden Verwaltungstools werden in der StarCCM+ Umgebung zum großen Teil bereitgestellt.

5.2.2 Ölkreislauf

Mit ähnlicher Zielsetzung wie für den Kühlmittelkreislauf wird der druckbeaufschlagte Teil des Ölkreislaufs dreidimensional berechnet. Unzulänglichkeiten der 1D Modellierung sollen durch die geometrisch genaue Modellierung beseitigt und die Ölvolumenströme durch die Wärmetauscher berechnet werden. Dabei sind Bypass-Strömungen und Ventilstellungen zu berücksichtigen. Die Volumenströme an den Ölverbrauchern, wie Hauptlager oder Kolbenspritzdüsen werden aus der hydraulischen 1D Simulation vorgegeben. Aufgrund der starken Viskositätsabhängigkeit des Öls sind in der Regel verschiedene Öltemperaturen zu berücksichtigen.

5.3 Simulation der Motorraumdurchströmung

Die Simulation zur Durchströmung des Motorraums wurde ursprünglich zur Absicherung der Kühlluftvolumenströme durch das Kühlmodul im Fahrzeugvorderwagen entwickelt. Durch ständig gestiegene Prozessorleistungen und durch den Einsatz von parallelen Rechnerarchitekturen konnten die Modelle in ihrer Auflösung deutlich verbessert und erweitert werden. So stellt beispielsweise der Einbau eines detaillierten Generatormodells in den Motorraum heute kein Problem mehr dar. Durchströmungsmodelle eignen sich deshalb auch für die thermische Absicherung des Motorraums mit seinen Bauteilen.

Die Simulation der Motorraumdurchströmung mit Wärmetransport erfordert eine Vielzahl von Randbedingungen. Insbesondere müssen Oberflächentemperaturen auf den verschiedensten Bauteilen im Motorraum definiert sein. Alternativ können auch Wärmeströme an den Oberflächen vorgegeben werden.

Mit Hilfe dieser Modelle können vielfältige Fragen zum Motorraumthermo- management beantwortet werden. Es ist offensichtlich, dass der Aufwand bei der Modellgenerierung umso lohnender ist, je mehr Anwendungen mit demselben Modell realisiert werden können. So kann beispielsweise die Erwärmung der Motorfrischluft in der Sauganlage bis hin zum Sammler berechnet und damit die Kühlung von Steuergeräten, die in das Ansaugmodul integriert sind, bewertet werden.

Die heute zur Verfügung stehende Rechenleistung erlaubt es aber, noch einen deutlichen Schritt weiter zu gehen. Ein Motorraumdurchströmungsmodell eignet sich bei entsprechender Vernetzung der Außenhaut ebenso für Aerodynamik-untersuchungen, insbesondere dann, wenn es zu einer Interaktion von Motorraum- durchströmung, Unterbodenströmung und Außenströmung des Fahrzeugs kommt, z.B. Verschmutzung. Selbst für die Simulation der Wadfähigkeit bei einer Wasserdurchfahrt kann ein Motorraumdurchströmungsmodell schnell adaptiert und verwendet werden.

Weniger geeignet sind derartige Modelle für die Simulation thermisch, transienter Vorgänge, z.B. für die Simulation der thermischen Verhältnisse im Motorraum eines heiß abgestellten Fahrzeugs. Für diese Fragestellungen muss die thermische Trägheit zumindest von Motormasse und Abgasanlage berücksichtigt werden. Während in der Abkühlphase der Abgaskrümmer seine Wärme an die Umgebung abstrahlt, nehmen andere Bauteile die Strahlungswärme auf und erwärmen sich, gegebenenfalls über ihre zulässige Bauteiltemperatur. Erschwerend kommt hinzu, dass die kritische Phase eines Abkühlvorgangs bei einem zuvor forciert gefahrenen Fahrzeug durchaus 20 Minuten betragen kann. Dies stellt bei der Simulation hohe Anforderungen an Rechenleistung und Rechenzeit.

Da die hier verwendete Software StarCCM+ einerseits deutliche Stärken bei der Modellverwaltung und Modellorganisation aufweist und andererseits über ein neues, sehr leistungsstarkes, implizites Lösungsverfahren verfügt, wurde der Versuch unternommen, die beschriebenen Teilmodelle zusammenzufügen und den Abkühlvorgang eines heiß abgestellten Fahrzeugs zu simulieren.

5.4 Simulation des Abkühlverhaltens im Motorraum

Bei dieser Simulation handelt es sich um eine Machbarkeitsstudie. Die zuvor beschriebenen Teilmodelle wurden, losgelöst von einem Produktentwicklungsprozess und wie vorhanden, zusammengefügt (Bild 5). Dabei mussten geometrische Anpassungen an den Teilmodellen vorgenommen werden, um die Passgenauigkeit

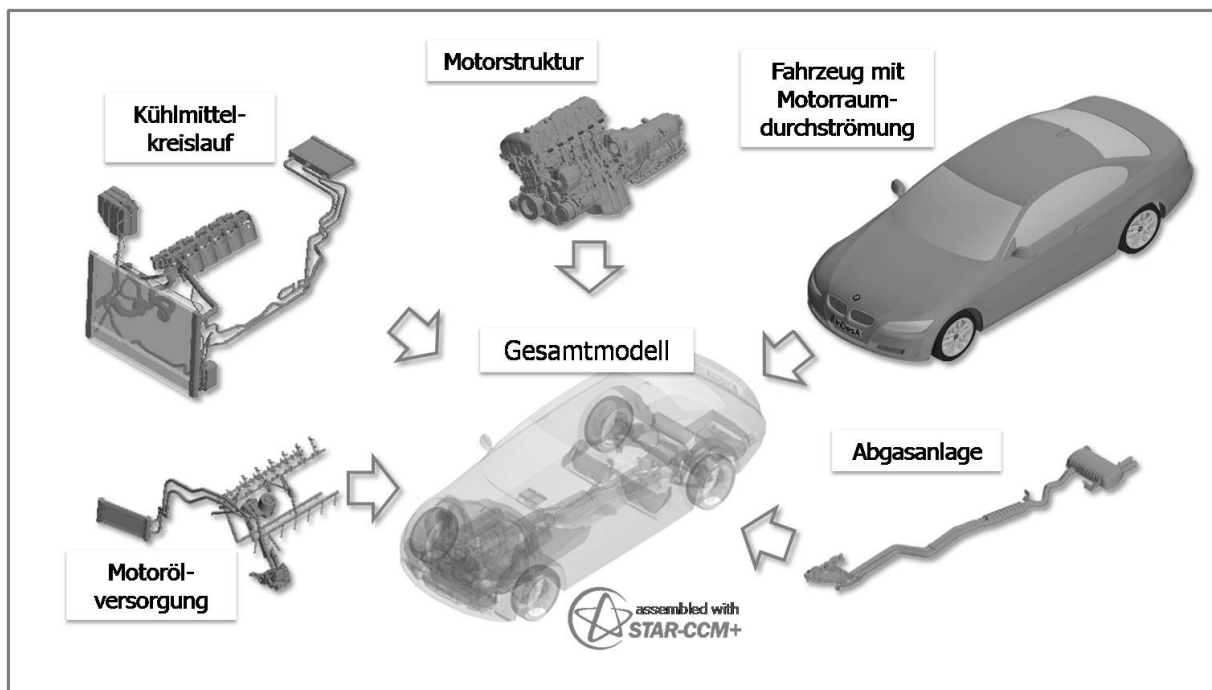


Bild 5: Aufbau des gekoppelten Gesamtmodells in StarCCM+

der Modelle untereinander zu gewährleisten und damit die Voraussetzung für eine konsistente Volumenvernetzung zu schaffen. Alle Teilmodelle wurden über gemeinsame Knoten des Volumennetzes direkt konnektiert und Prismenschichten an allen benetzten Oberflächen fluidseitig eingeführt. Das gesamte Netz konnte mit knapp 50 Millionen Polyeder-Zellen realisiert werden.

Ausgehend von den brennraumseitigen Randbedingungen, d.h. Gastemperatur und Wärmeübergangskoeffizienten, ergeben sich die Wärmeströme, die über die Motorstruktur an das Kühlmittel und das Motoröl weitergeleitet werden. Das Thermoanalysemodell des Grundmotors ist über den Wassermantel direkt an das Modell des Kühlmittelkreislaufs angebunden. Somit wird die Wärme weiter zum Kühler transportiert, wo auf der Basis von Nu-Re-Korrelationen der Wärmeübergang an die Kühlluft im Motorraum erfolgt. Nach Verlassen des Kühlmoduls streicht die erwärmte Kühlluft anschließend über den Motor und die Abgasanlage und nimmt erneut Wärme über die Struktur auf. An alle Teile des Motorraums, die kälter als die Kühlluft sind, wird Wärme abgegeben.

Der so berechnete stationäre Zustand bei maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit bildet den Ausgangszustand für die transiente Simulation der Abkühlung. Bei der Simulation wurde auf das zeitgenaue Herunterbremsen des Fahrzeugs im Motorleerlauf verzichtet und stattdessen die Randbedingungen innerhalb weniger Zeitschritte auf den Zustand des stehenden Fahrzeugs verändert. Diese Vorgehensweise ist nicht unbedingt zu empfehlen, da sich die Luft im virtuellen Windkanal infolge ihrer Trägheit nicht so schnell beruhigt und zu Wirbelbildung mit entsprechendem konvektiven Wärmeübergang neigt.

Für eine Abkühlperiode von knapp 600 Sekunden konnte die Simulation auf dem hauseigenen Intel Xeon Quad-Core Rechencluster mit InfiniBand Switch auf 48 Knoten realisiert werden. Die Rechenzeit betrug 75 Stunden. Bild 6 zeigt Schwarz-Weiß-Impressionen dieser Rechnung. Für eine detailliertere Auswertung mit entsprechenden Farbdarstellungen sei auf [4] verwiesen.

Mit dieser Studie konnte nachgewiesen werden, dass derart komplexe Modelle mit StarCCM+ bei vertretbarem Aufwand handhabbar und berechenbar sind. Die Studie verdeutlichte aber auch, dass gerade für transiente Vorgänge mit unterschiedlichen Motor- und Fahrzeugbetriebspunkten die Bedatung der Randbedingung zur Herausforderung wird. Dies gilt insbesondere für die Randbedingungen auf der Verbrennungs- und Abgasseite. Es ist auch hervorzuheben, dass es sich bei dieser Studie um ein Serienfahrzeug handelt mit zumindest seriennahen Bauständen der einzelnen Komponenten. In einem funktionierenden Serienentwicklungsprozess besteht die Herausforderung darin, ähnlich einem *Digital Mock-Up* Prozess, alle Modelle für eine definierte virtuelle Baugruppe zeitgleich und passgenau zur Verfügung zu stellen.

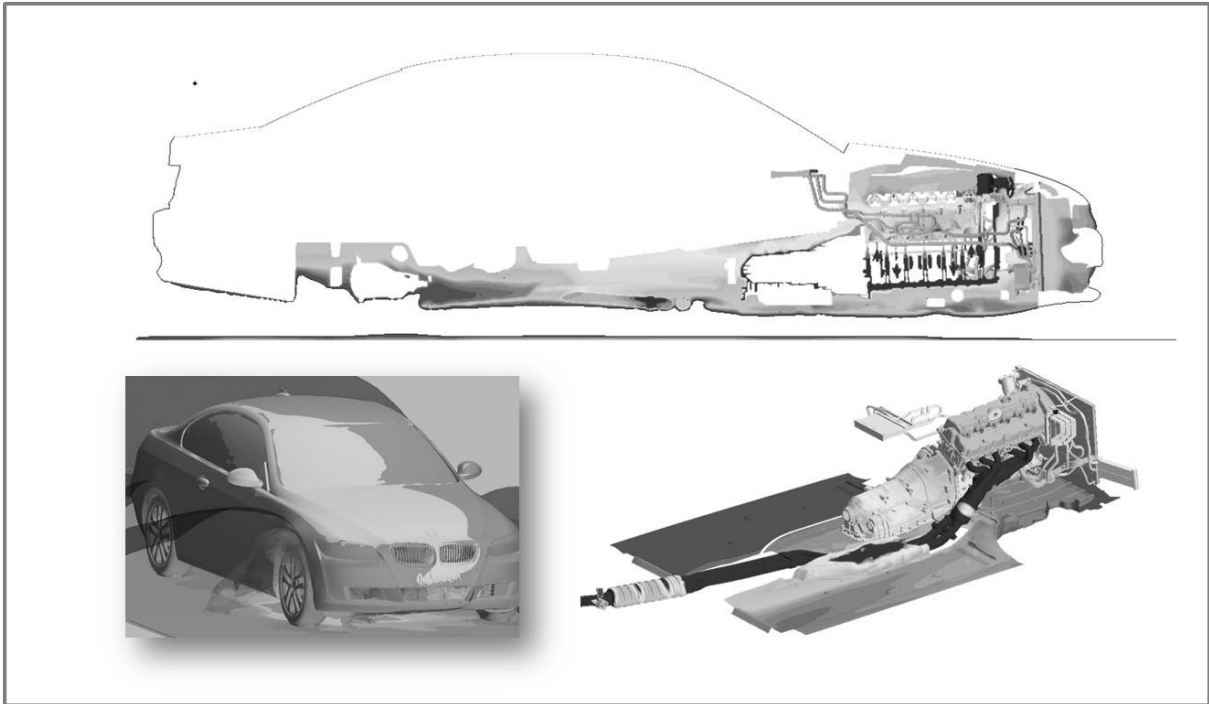


Bild 6: Berechnung der Abkühlung eines heiß abgestellten Fahrzeugs

6. Der integrierte Simulationsansatz

Die vorgestellten Beispiele haben gezeigt, dass die 1D und 3D Simulationsmodelle streng modular aufgebaut werden können und untereinander in ständiger Interaktion stehen müssen. Erkenntnisse aus der 3D Simulation führen zur Nachschärfung der 1D Modellierung während die 1D Simulation, die Randbedingungen für die 3D Simulation bereit stellt. Es ist deshalb wichtig für einen funktionierenden virtuellen Entwicklungsprozess, 1D und 3D Methoden parallel und zeitlich aufeinander abgestimmt einzusetzen. Dabei entwickelt sich die 1D Systemsimulation immer mehr zum *Backbone* für die 3D Simulation bei komplexen Anwendungen.

Die 1D Simulation ist wiederum auf eine Reihe von Komponentenversuche angewiesen. Diese Daten gehen direkt in die Modellbildung und in die Kalibrierung der Module ein. Sie bestimmen somit auch wesentlich die Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Es ist deshalb notwendig, die Komponentenversuche im Vorfeld auf den Berechnungsprozess abzustimmen und während des Entwicklungszeitraums kontinuierlich zu überprüfen und zu aktualisieren. Erst bei einer entsprechenden Reife der Prototypen in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase ist es sinnvoll, das Gesamtsystem über Prototypenversuche abzugleichen. Bild 7 veranschaulicht die Wechselwirkung und Abhängigkeiten in einem integrierten Simulationsansatz.

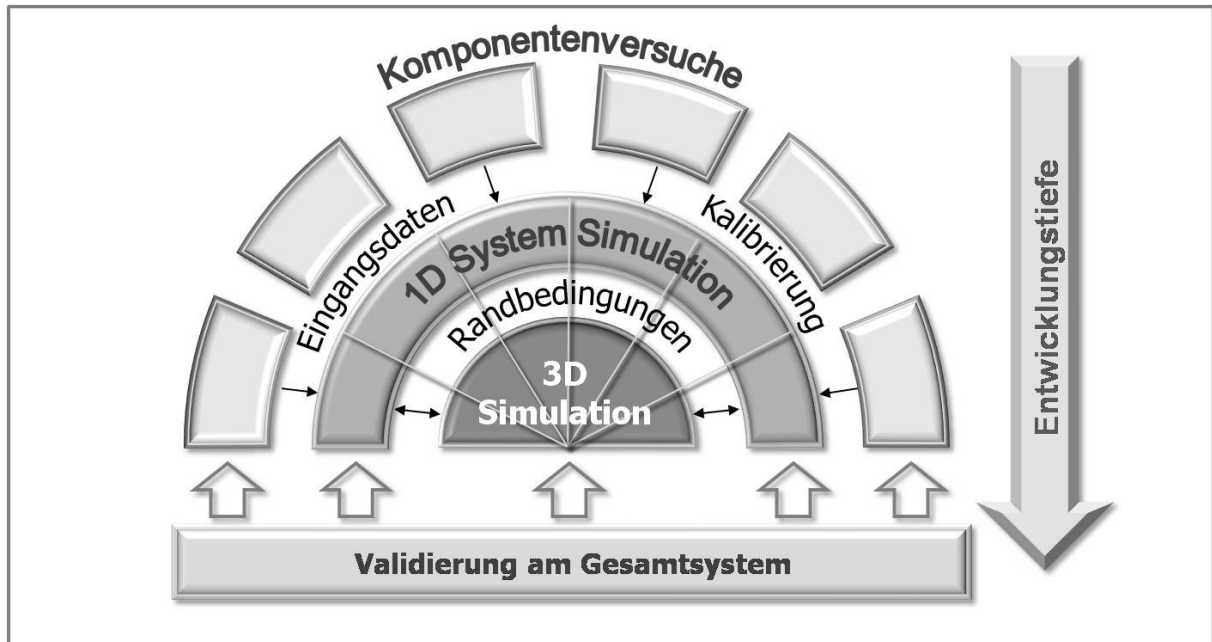


Bild 7: Wechselwirkung und Abhängigkeiten im integrierten Simulationsansatz

7. Potenziale im virtuellen Produktenstehungsprozess

Die Umsetzung des integrierten, modularen Simulationsansatzes im virtuellen Produktenstehungsprozess ist die Voraussetzung für die Ausschöpfung der Potenziale zur Reduzierung der Entwicklungszeit, des Ressourceneinsatzes und der Kosten. Nur mit einem über Fachabteilungen und Zulieferer hinweg abgestimmten Prozess können komplexe Simulationsmodelle kosteneffizient aufgebaut, gepflegt und verbessert werden.

Der modulare Aufbau der Simulationsmodelle mit den dazugehörigen Komponentenversuchen ermöglicht bereits in der Konzeptphase den effizienten Aufbau verschiedener Motor/Fahrzeugkonfigurationen und deren Analyse bei gleichen Randbedingungen. So können beispielsweise unterschiedliche Kühlkonzepte hinsichtlich ihrer Kühlfunktion für beliebige Betriebspunkte und Fahrzyklen vergleichend bewertet werden. Gleiches gilt für Untersuchungen von Wärmemanagementmaßnahmen am Motor und im Kühlsystem zur Verbrauchsreduzierung. Verschiedene Kombinationen von Maßnahmen können deutlich schneller für unterschiedliche Betriebsstrategien bewertet und entschieden werden.

In der Serienentwicklung sollten die Modelle sukzessive nachgeschärft und zunehmend durch die aufwändigere 3D Modellierung ergänzt werden. Dabei müssen auch die Komponentenversuche von Baugruppe zu Baugruppe aktualisiert werden. Die fortlaufende Aktualisierung und Kalibrierung der Modelle führt zu einer im Entwicklungsprozess steigenden Ergebnisqualität. Insbesondere die geometrische Detaillierung im DMU Prozess trägt zu einer verbesserten Modellbildung im Laufe der Entwicklung bei, da viele Wärmemanagementfunktionen eine starke geometrische Abhängigkeit aufweisen.

Simulationstechniken dürfen in der Serienentwicklung nicht nur zur Auslegung der Systeme und Funktionen verwendet werden sondern müssen auch zur Absicherung der virtuellen Baugruppen eingesetzt werden. Neben der zielsichereren Auslegung ergeben sich bei der virtuellen Absicherung so die größten Einsparpotenziale gegenüber den konventionellen hardwareorientierten Prozessen. Die Einsparpotenziale sind umso größer, je später die Absicherung über Erprobungen an Gesamtfahrzeug-Prototypen einsetzt. Prinzipbedingt eilt die geometrische Reife in der virtuellen Welt dem Hardware-Prozess voraus. Solange der geometrische Unterschied zwischen der simulierten, virtuellen Baugruppe und der als Hardware aufgebauten Baugruppe augenscheinlich ist, sollte von einer Absicherung über Prototypen z.B. für die Kühlfunktion abgesehen werden. Darüber hinaus muss für die Absicherung aller Wärmemanagementfunktionen der Applikationsstand des Motors bezüglich Motorschutzfunktionen und Emissionierung fortgeschritten sein. Letztlich aber entscheidet das Projektmanagement über den zeitlichen Einsatz der Absicherungsmethodik und damit über das tatsächliche Einsparpotenzial, das mit Hilfe der Simulationsmethoden erwirtschaftet werden kann.

Die virtuelle Produktentwicklung sollte bis zum Serienstand mit aktualisierten Simulationsmodellen begleitet werden. Zum Einen können diese Modelle bei der Lösung eventuell auftretender Serienprobleme von Nutzen sein. Zum Anderen eignen sich die Simulationsmodelle zur Validierung und Nachschärfung am Serienstand. Auslegungen für später anlaufende Fahrzeugderivate oder für das Nachfolgemodell können dann umso effizienter erfolgen.

8. Zusammenfassung

Simulationsmethoden zur Auslegung und Absicherung von Kühlsystemen mit komplexen Thermomanagementfunktionen haben bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Leistungsstarke Softwarepakete ermöglichen es den Entwicklungsingenieuren schon heute einen signifikanten Entwicklungsbeitrag mit Hilfe von CAE Methoden zu leisten.

Neben der physikalischen Modellbildung und der numerischen Umsetzung, wird jedoch der Prozess von der Datenbereitstellung bis zur Auswertung und Analyse immer bedeutender. Insbesondere stellt die Organisation komplexer, über die Kompetenzräume der Fachbereiche hinausgehender Simulationsmodelle eine Herausforderung für die Implementierung der Methoden in den virtuellen Produktentstehungsprozess dar. Wie anhand zweier Beispiele gezeigt, können auch komplexe, bereichsübergreifende Simulationsmodelle streng modular aufgebaut werden und so die Zusammenarbeit zwischen den Prozesspartnern, den Fachbereichen und Zulieferern, vereinfachen. Der Schnittstellenaufwand zwischen den Modulen sollte durch die Verwendung von nur einem Softwarepaket gering gehalten werden. Auf Softwarekopplungen sollte, wenn möglich, verzichtet werden. Schließlich muss für einen funktionierenden Entwicklungsprozess, ähnlich wie im DMU-Prozess, dafür Sorge getragen werden, dass die Bereitstellung der benötigten Komponentenversuche und der Simulationsteilmodelle pünktlich, vollständig und passgenau zu festgelegten Synchronisationspunkten erfolgt. Erst dann wird sich das Potenzial der fachbereichsübergreifenden Simulation für einen effizienteren Entwicklungsprozess erschließen.

Literatur

- [1] G. Fischer, H.-M.Burghardt, G. Hohenberg: Reibmitteldruck – Ottomotor, Ermittlung einer Formel zur Vorausberechnung des Reibmitteldrucks von Ottomotoren, FVV Abschlussbericht, Heft 685, Frankfurt a.M., 1999.
- [2] C. Schwarz, G.P.Merker: Grundlagen der Verbrennungsmotoren, Kap. 7, Arbeitsprozessrechnung, Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2009.
- [3] C. Poruba, G. Seider, M. Kröner: Energiebilanzierung im Entwicklungsprozess von Motoren, HDT Tagung: Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs V, Expert Verlag, 2006.
- [4] F. Bet, G. Seider: Vehicle Thermal Reliability with Star CCM+, Proceedings of the STAR European Conference, London 2010.