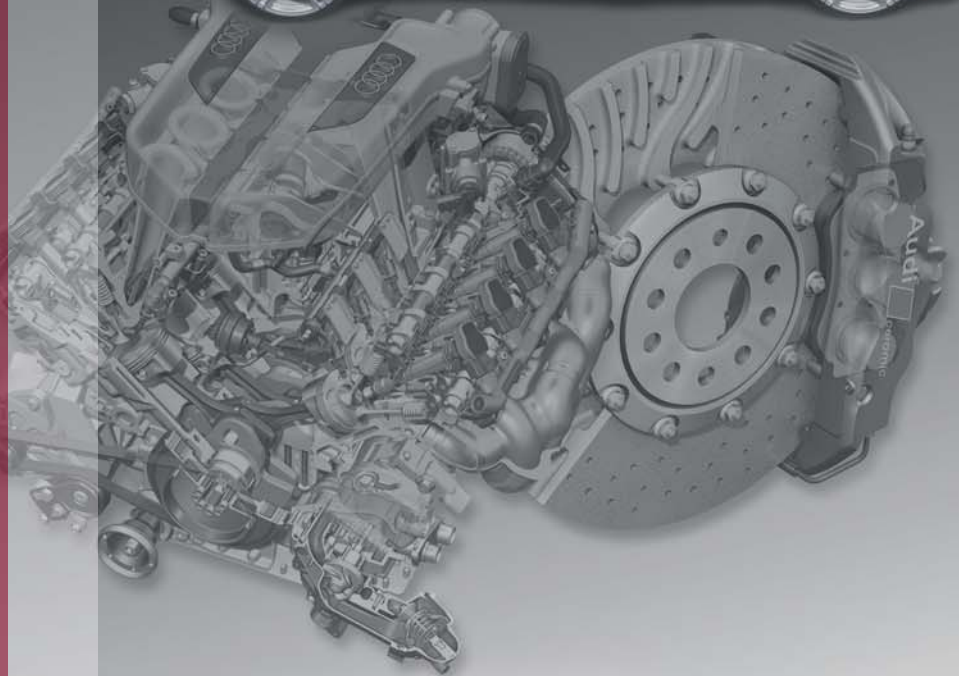
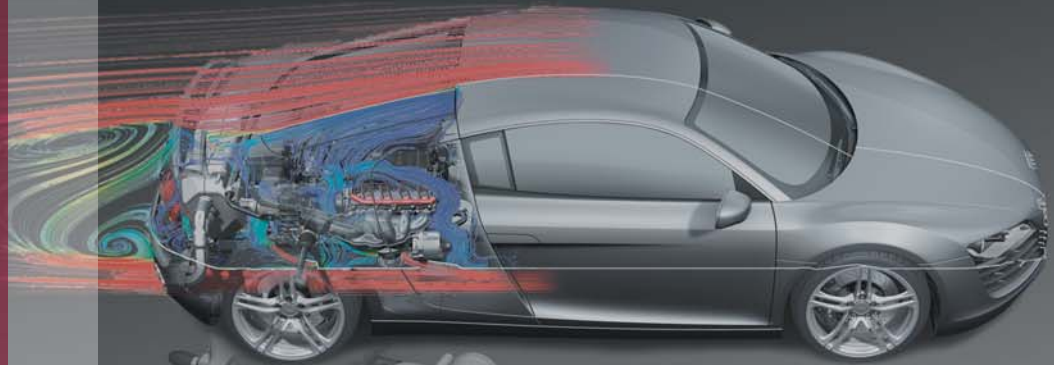


ATZ

AUTOMOBILTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

Sonderdruck/Offprint
aus/from ATZ
Automobiltechnische Zeitschrift
109 (2007) Heft/Vol. 2

02



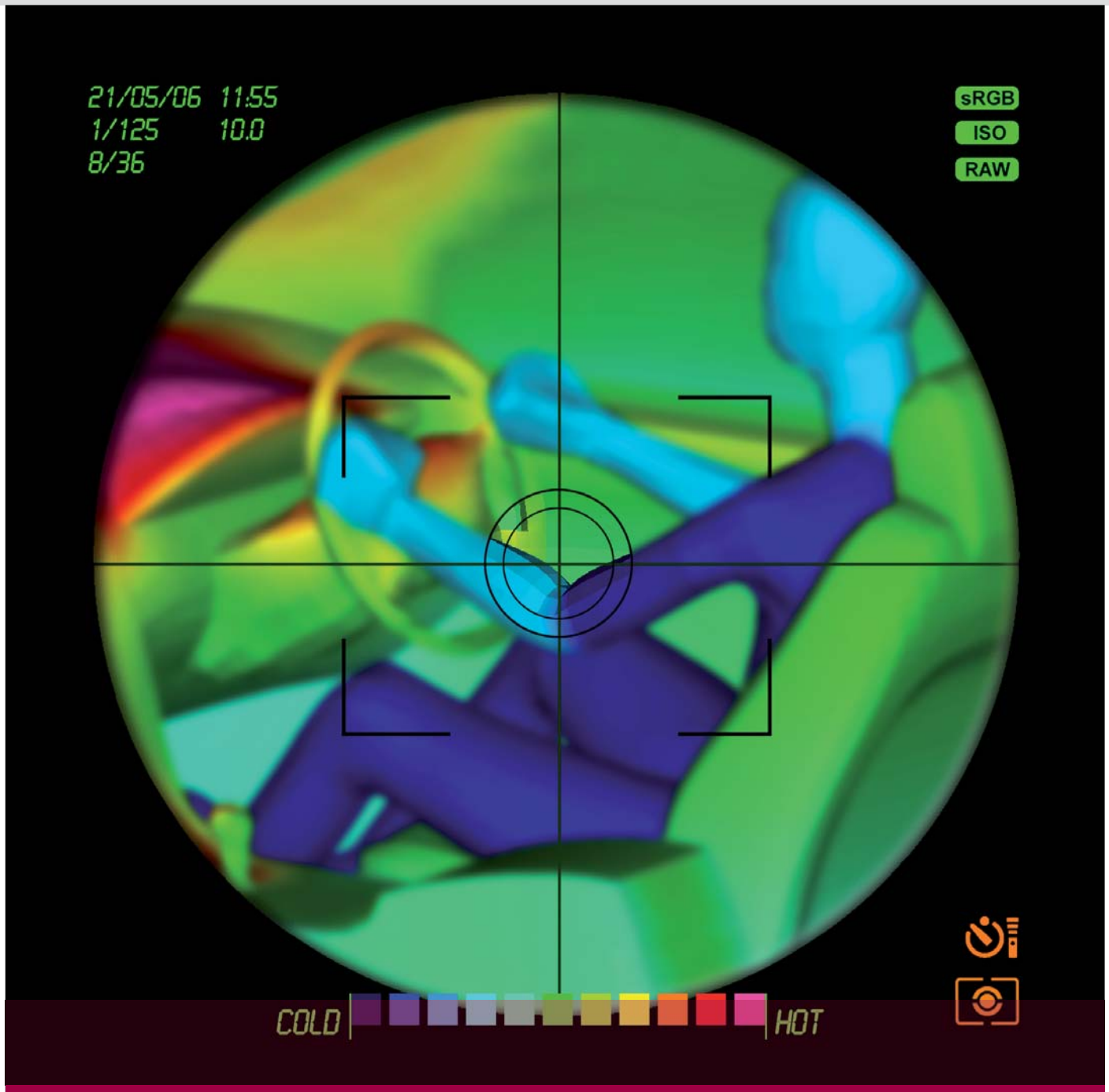
DEVELOPMENT

**State-of-the-Art Thermal
Management Demonstrated
on Cabin Air Conditioning**

ENTWICKLUNG

Modernes Thermomanagement am Beispiel der Innenraumklimatisierung





Modernes Thermomanagement am Beispiel der Innenraumklimatisierung

Durch die Entwicklung des neuen thermischen Berechnungstools „THESEUS-FE“, verbunden mit Methoden der Co-Simulation, ist es der P+Z Engineering GmbH gelungen, den hochkomplexen Gesamtprozess der Fahrzeugklimatisierung in einer noch nie da gewesenen Detailtreue virtuell abzubilden. Die Leistungsfähigkeit dieser neuen Technologie wird in diesem Bericht näher beleuchtet und an einem realen Beispiel aus der Kfz-Klimatisierung veranschaulicht.

1 Einleitung

Aufgrund der zu untersuchenden Lastfall- und Modellvarianten ist die virtuelle Produktentwicklung geradezu ein Muss bei den aus betriebswirtschaftlicher Sicht geforderten Zeit- und Qualitätsrahmen im heutigen Automobilbau. Eine rein experimentelle Erfassung des Ist-Zustands kann allen Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung nicht mehr gerecht werden.

Die anfänglich aus der Strukturmechanik stammenden numerischen Simulationsstandards haben sich in der Vergangenheit von der einfachen Festigkeitsanalyse über die nicht-lineare Crashberechnung bis hin zur thermodynamischen Strömungssimulation entwickelt und sind derzeit Stand der Technik. So gibt es heute praktisch für jedes Spezialgebiet effektive Lösungsverfahren und ausgereifte Softwareprogramme. Die rapide gestiegene, aber trotzdem bezahlbare Leistungsfähigkeit der aktuellen Rechnergenerationen hat diesen Trend in den letzten Jahren nochmals gefördert. Einer physikalisch-technischen Abbildung einzelner Komponenten und Teilsysteme steht nichts mehr im Wege. Jedoch bleiben die Herausforderung in der Vernetzung dieser Systeme untereinander sowie die noch stärkere Optimierung der Simulationsprozesse weiter bestehen. Erst eine schnelle, interdisziplinäre Gesamtbetrachtung aller am realen Fahrzeug einfließenden Effekte und Systeme ermöglicht die Gesamtbewertung und Ableitung der nötigen Zukunftsstrategien zur weiteren Verbrauchs- und Emissionsminimierung.

Es gab bisher zwei prinzipielle Vorgehensweisen, wenn man Lösungsansätze aus übergreifenden Themenbereichen in der Simulation suchte [1, 2]. Methode A war

die Kopplung der diversen Tools über direkte Schnittstellen. Methode B war die Generierung eines Programms, das in einem integrierten Tool alle Simulationsanforderungen vereint. Methode A mag bei der Kopplung von zwei Programmen miteinander noch recht effizient sein, spätestens bei der Kopplung von drei oder noch mehr Programmen erweist sie sich jedoch als extrem unübersichtlich und aufwändig, da die Anzahl der bidirektionalen Schnittstellen $2^{(n-1)}$ mit der Anzahl n der zu koppelnden Programme ansteigt. Auch die oft gepriesene Benutzerfreundlichkeit der Methode B, bei der alles unter einer Oberfläche vereint ist, lässt sich schnell ins Gegenteil verkehren. Hier wird mit zunehmendem Funktionsumfang mehr Verwirrung als Nutzen beim Endanwender durch unzählige Eingabemasken, Symbolleisten, Zusatzmodule, Haupt- und Untermenüs erzeugt. Für die meisten Standardlastfälle werden ohnehin nur zirka 10 bis 20 % des Leistungsumfangs eines solchen Tools abgerufen, der Rest der Funktionalität wirkt sich eher negativ auf die Performance aus. Zudem verursachen diese hochintegrativen Systeme nicht nur auf der Anwenderseite sondern auch beim Hersteller einen immensen Entwicklungs- und Supportaufwand.

Als Ingenieurdienstleister, der vermehrt kundenspezifische Speziallösungen fernab jeglicher Standards anbietet, ist die P+Z Engineering GmbH mit dieser Problematik seit vielen Jahren konfrontiert und im Sinne der Kunden und aus eigenen Wertschöpfungsgründen heraus bemüht, diesen Konflikt bestmöglich zu lösen. Dabei dienen die neuesten Möglichkeiten der prozessoptimierten Programmierung graphischer Benutzeroberflächen und der problemspezifischen Softwareentwicklung und vor allem das

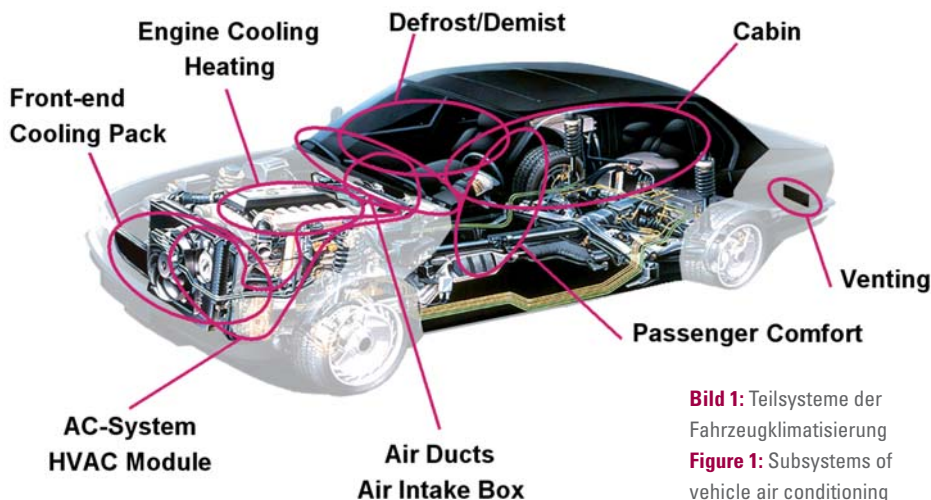


Bild 1: Teilsysteme der Fahrzeugklimatisierung
Figure 1: Subsystems of vehicle air conditioning

Die Autoren



Dr.-Ing. Thomas Schneider ist Abteilungsleiter Berechnung bei der P+Z Engineering GmbH, München.



Dipl.-Ing. (FH) Michael Ellinger ist Teamleiter der Gruppe Klimatisierung/Strömung bei der P+Z Engineering GmbH, München.



Dr.-Ing. Stefan Paulke ist technischer Produktleiter der Software THESEUS-FE bei der P+Z Engineering GmbH, München.



Dipl.-Ing. (FH) Stefan Wagner ist projektverantwortlicher Senior Engineer im Bereich Thermodynamik mit dem Schwerpunkt 1D-Simulation bei der P+Z Engineering GmbH, München.



Dr.-Ing. Henry Pastohr ist CFD-Berechnungsingenieur und Betreuer der Star-CD-Schnittstelle bei der P+Z Engineering GmbH, München.

neue Hilfsmittel der so genannten „Co-Simulation“ [1, 3] dazu, diesem Dilemma zu entkommen. Am Beispiel der thermischen Komfortsimulation wird das Verfahren sowie der neue thermische Solver THESEUS-FE im Weiteren näher erläutert.

2 Kurzübersicht thermische Komfortsimulation

Kaum eine andere Aufgabe als die Simulation des thermischen Insassenkomforts könnte die fachübergreifende Kopplung und Komplexität des Themas besser veranschaulichen. Denn hierbei treffen die unterschiedlichsten medizinischen und inge-

nieurtechnischen Disziplinen aufeinander. Diese sind Kältemittel-, Solar-, Regelungs- und Elektrotechnik, Thermodynamik, Wärmeübertragung, Strömungsmechanik und schließlich auch noch Anatomie oder thermische Physiologie. Übersetzt in die Fahrzeugtechnik bedeutet das in letzter Konsequenz eine Abbildung der Klimaanlage, des Motorkühlkreislaufs, des HVAC-Moduls, der Be- und Entlüftungskanäle, der Fahrzeugkabine inklusive Umgebung und des Insassen, **Bild 1**. Nun ist die thermische Behaglichkeit aber nur ein kleiner Teilaspekt des Gesamtwärmemanagements im Fahrzeug, so dass eine Erweiterung der Problemstellung und Fachgebiete jederzeit mühelos vorstellbar ist.

Mit der Anzahl der Teilsysteme wächst auch die Anzahl der Expertentools und der Lösungsverfahren. Es leuchtet ein, dass man eine komplette Klimaanlage oder ein ganzes Motorkühlsystem mit integrierter Fahrzeugheizung kaum mit einem dreidimensionalen Finite-Differenzen-, Finite-Element- oder Finite-Volumen-Programm simulieren kann, sondern in diesem Bereich auf 1D-Lösungsmethoden zurückgreift. Andererseits liegt es in der Natur der Sache, dass man zum Beispiel die stark lokalen Turbulenzen der Kabinenströmung oder die Abschattungseffekte bei der Sonneneinstrahlung nur dreidimensional erfassen kann.

Prinzipiell geht es bei der Bestimmung der thermischen Behaglichkeit aber immer darum, die auftretenden Feuchte- und Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, Strahlung, Konvektion) so real wie möglich zu berücksichtigen. Das heißt, letztlich geht es um die Bilanzierung der Wärme- und Enthalpieströme im Gesamtsystem, vollkommen unabhängig davon, mit welchem numerischen Lösungsansatz diese bestimmt werden.

Die Geschichte der Berechnungsmodelle für thermische „Dummys“ begann bereits während der 60er-Jahre in der Gebäudeklimatisierung mit den Arbeiten von Gagge, Hardy, Nevins, Rohles, Stolwijk und vor allem Fanger [4]. Diese Arbeiten mündeten schließlich in der europäischen ISO-Norm 7730 und dem bekannten PMV-Index. Später wurden sie dann von Hsu [5] auf die inhomogene Situation in Kraftfahrzeugen übertragen und angepasst. In den letzten vierzig Jahren sind dann aus den anfänglich simplen Zwei-Knoten-Modellen (Haut + Kern) ausgeklügelte Menschmodelle geworden, die einen kompletten Blutkreislauf, einzelne Körperteile mit Schichten für Knochen, Muskeln, Fett und Haut sowie ein dem zentralen Nervensystem nachempfundenes Regelsystem (mit Schwitzen, Atmung, Kältezittern, usw.) enthalten. Die neuesten Vertreter dieser Gattung von thermo-physiologischen Modellen sind in den Veröffentlichungen von Tanabe [6] und Fiala [7, 8] dokumentiert und zeichnen sich durch eine Berücksichtigung der lokalen Behaglichkeit in einem dynamischen Komfortindex aus. **Bild 2** zeigt eine Skizze der einzelnen Wirkmechanismen eines thermo-physiologischen Menschmodells.

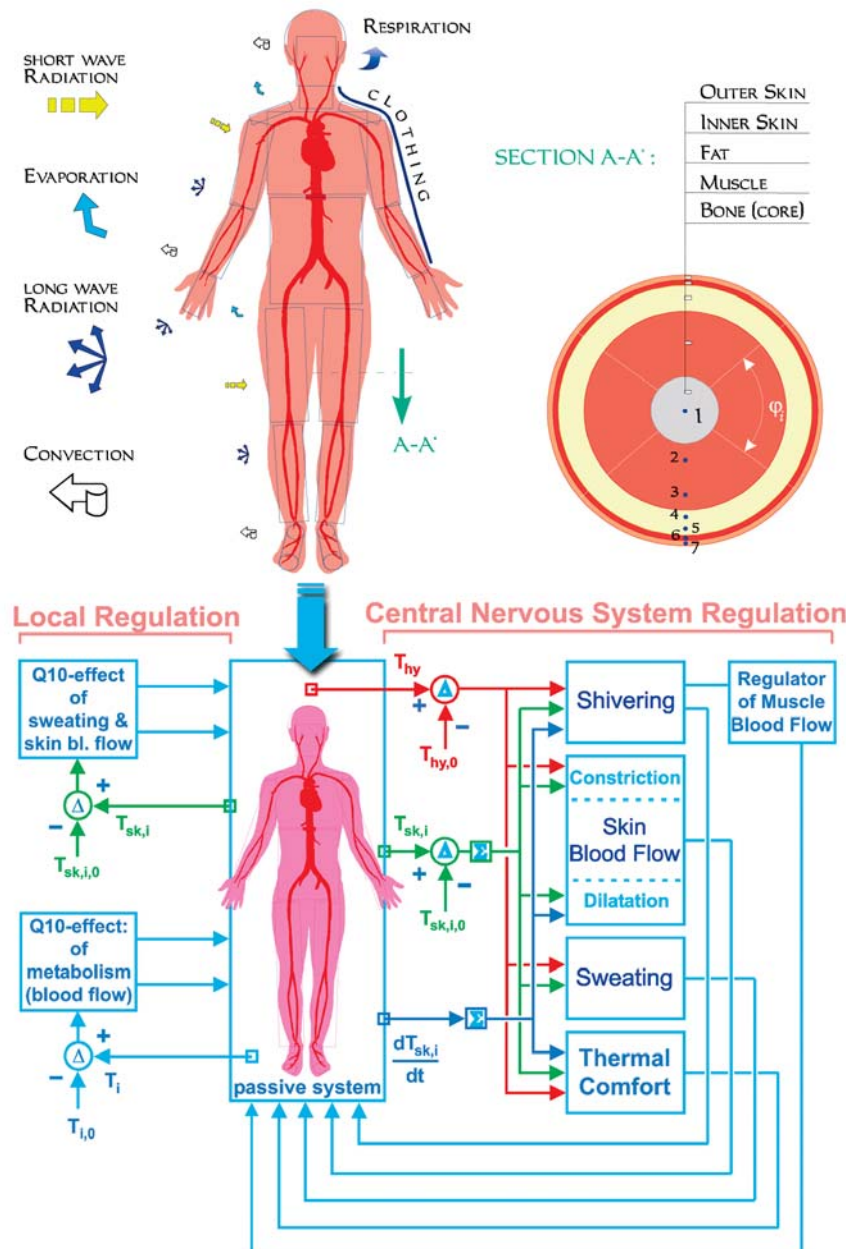


Bild 2: Schematisches Flussdiagramm eines thermo-physiologischen Insassenmodells [9]
Figure 2: Schematic flowchart of a human thermal sensation model [9]

3 Das neue Programmsystem THESEUS-FE

Genau genommen ist THESEUS-FE nicht völlig neu, da die theoretischen Grundla-

gen [10] und die bereits über 15-jährige Projekterfahrungen in der konzeptionellen Klimatisierungsanalyse aus der Vorgänger-Software INKA/TILL [2] übernommen wurden. Damit sind aber auch schon alle Gemeinsamkeiten der beiden Programme genannt, denn THESEUS-FE wurde in mehrjähriger Arbeit von Grund auf neu programmiert und mit einer graphischen Benutzeroberfläche (GUI) versehen, die den aktuellsten Konzepten der Benutzerführung Rechnung trägt und dabei trotzdem plattformunabhängig geblieben ist.

So wurde bewusst auf eine Überladung mit unnötigen Funktionen und überzähligen Eingabemasken verzichtet und stattdessen verstärkt auf dynamische Kontextmenüs, graphische Selektionsmöglichkeiten und eine Datenbaumstruktur zurückgegriffen, wie man sie von handelsüblichen Dateimanagern gewohnt ist. Dies trägt nicht nur zu einem übersichtlichen und aufgeräumten Gesamteindruck der Programmoberfläche bei, sondern hilft nachweislich auch, die zu untersuchende Problemstellung sehr schnell und intuitiv in wenigen Minuten zu definieren. Damit ist im Vergleich zum Vorgängertool eine Beschleunigung des Preprocessings um einen Faktor bis zu 10 erreicht worden. Um eine weitere Automatisierung des Preprocessings zu ermöglichen, wurde eine Pythonkonsole in der GUI integriert, so dass diese skriptfähig ist und vordefinierte Arbeitsschritte über Makros abarbeiten kann. Auch besitzt die Oberfläche ein einfaches Postprocessing, das für die schnelle Plausibilitätsprüfung ausreicht und die im HDF-Format gespeicherten 3D-Ergebnisse sogar simultan auf beiden Seiten eines Shell-Elements darstellen kann.

Das Herzstück ist der neue implizite Finite-Element-Wärmeleitolver mit adaptivem Zeitschrittverfahren und Prediktor-Korrektor-Technik, der im Gegensatz zu seinem Finite-Differenzen-Vorgänger nicht nur transiente Lastfälle löst, sondern auch einen eigenen effizienten Solver für stationäre Lastfälle hat. Dass neben den bewährten Funktionalitäten wie den empirischen Konvektionsgesetzen, Mehrzonenbelüftung, Feuchtenberechnung, mehrschichtige Materialien und diversen Komfortindizes eine Vielzahl wichtiger Erweiterungen im Vergleich zu INKA/TILL gleich hinzukamen, versteht sich von selbst. Nennenswert sind hierbei die dynamische Speicherzuweisung für unbegrenzte Modellgrößen, die dreidimensionale Wärmeleitung, das Konturintegrationsverfahren zur Bestimmung der Einstrahlzahlen, die Greybody-Strahlung mit Mehrfachreflexion, die Strahlungsräume

und der genetische Patching-Algorithmus zur Beschleunigung und Speicheroptimierung bei der Körperstrahlungsberechnung, die verbesserten Möglichkeiten zur transienten oder kundenspezifischen Randbedingungsdefinition, das neue Insassenmodell nach Fiala und die Einführung von Solid-Elementen.

Zusammen mit der großen Material- und Bekleidungsdatenbank bietet THESEUS-FE somit alle nötigen Hilfsmittel, um eigenständig, schnell und zuverlässig Klimatisierungs- und Komfortanalysen von der Konzeptphase bis hin zur Validierung des Freilandversuchs durchführen zu können. Durch die neuen Features ist der Einsatzbereich aber nicht auf dieses Aufgabengebiet beschränkt. Vielmehr erhält man ei-

nen allgemeinen thermischen Solver, der beispielsweise auch problemlos im Underhood-Thermal-Management oder bei der Auslegung von Abgasanlagen eingesetzt werden kann. Selbst Anwendungen außerhalb der Fahrzeugindustrie etwa im Flugzeugbau oder in bei der Gebäudeklimatisierung sind keine Grenzen gesetzt.

4 Das Prinzip der Co-Simulation

Selbstverständlich besitzt THESEUS-FE direkte Schnittstellen zu diversen Solvern (wie zum Beispiel Flowmaster2, Star-CD, Abaqus) und nahezu allen kommerziellen Postprozessoren (wie zum Beispiel Fieldview, Tecplot, EnSight, HyperWorks, Ani-

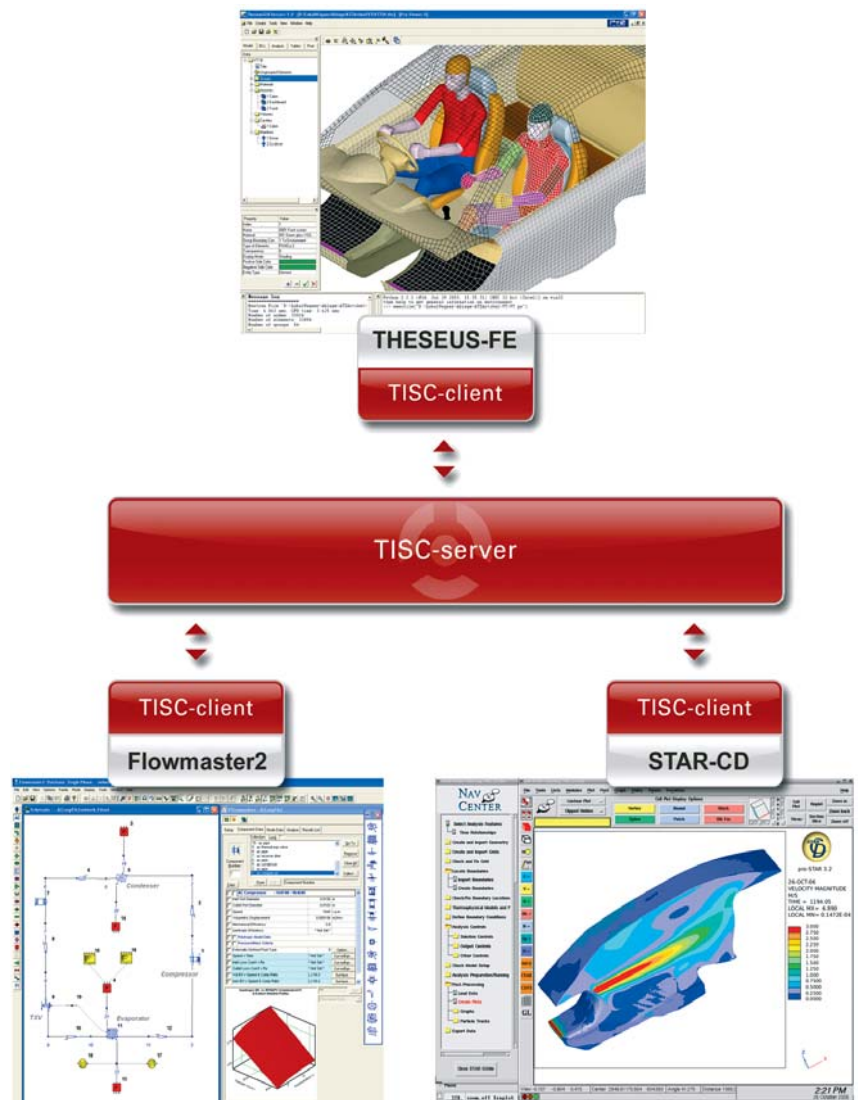


Bild 3: Kopplungsübersicht zur Co-Simulation in der Fahrzeugklimatisierung
Figure 3: Link example for the co-simulation in vehicle air conditioning

Table: Liste der Kopplungsparameter

Table: List of coupling parameters

		Berechnungsprogramm		
		Flowmaster2	THESEUS-FE	STAR-CD
Kopplungsparameter	SENDEN	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lufttemperatur am Verdampferaustritt ■ absolute Luftfeuchte am Verdampferaustritt 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Belüftungstemperaturen am Eintritt in die Fahrzeugkabine ■ Belüftungsfeuchten am Eintritt in die Fahrzeugkabine ■ Volumenströme der Belüftungsrichtungen ■ Wandtemperaturen aller Elemente (inkl. Haut und Bekleidungs-temperaturen der Insassen) ■ Atmungs- und Verdampfungsfeuchten der Insassen ■ Aktueller Zeitpunkt ■ Zeitschrittweite 	<ul style="list-style-type: none"> ■ gemappte Lufttemperaturen der wandnahen Zellen ■ gemappte Wärmeübergangskoeffizienten der wandnahen Zellen ■ gemittelte Lufttemperatur der Outletregionen ■ gemittelte absolute Luftfeuchte der Outletregionen
	EMPfangEN	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lufttemperatur am Verdampferaustritt ■ absolute Luftfeuchte am Verdampferaustritt ■ Volumenstrom der Luft über den Verdampfer 	<ul style="list-style-type: none"> ■ gemappte Lufttemperaturen der wandnahen Zellen ■ gemappte Wärmeübergangskoeffizienten der wandnahen Zellen ■ Lufttemperatur am Verdampferaustritt ■ absolute Luftfeuchte am Verdampferaustritt 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Belüftungstemperaturen am Eintritt in die Fahrzeugkabine ■ Belüftungsfeuchten am Eintritt in die Fahrzeugkabine ■ Volumenströme der Belüftungsrichtungen ■ Wandtemperaturen aller Elemente (inkl. Haut und Bekleidungs-temperaturen der Insassen) ■ Atmungs- und Verdampfungsfeuchten der Insassen ■ Aktueller Zeitpunkt ■ Zeitschrittweite

mator3, Metapost, ...). Doch aus eingangs erwähnten Gründen bietet die Co-Simulation gegenüber diesen Standardschnittstellen mehr Komfort und Vorteile, die im Folgenden erklärt werden.

Die Co-Simulation ist durch die Kopplung einzelner Programme über eine so genannte „Middleware“ gekennzeichnet. Diese Middleware beinhaltet zum einen die Schnittstellen zu den einzelnen Berechnungsprogrammen und fungiert zum anderen als Datenserver, der auch die Synchronisation des Datenaustauschs verwaltet. Oft wird die Middleware auch kurz als Server bezeichnet, die einzelnen an ihn angehängten Tools als Clients. Im Gegensatz zu den oben erwähnten paarweise ausgebildeten, direkten Schnittstellen wird nur ein Interface für den Datenaustausch zwischen dem Client und dem Server benötigt. Ist dieses Interface erstellt, kann das Clientprogramm über den Server mit allen anderen Clients kommunizieren, die an den Server „angeschlossen“ sind. Am einfachsten stellt man sich den Server als großen Datenspeicher oder Datensafe vor, zu dem die Clients Zugang haben und Daten abholen oder hinterlegen können, **Bild 3**.

Da alle Clients Zugriff auf die Daten haben, kann man so sehr schnell mehrere Programme miteinander verbinden und bei Bedarf alle gleichzeitig mit den entsprechenden Daten versorgen. Außerdem sind

die Kopplungsgrößen auf diese Weise individuell und problemabhängig für jeden Client einzeln definierbar. Als Datentypen können in der Regel Matrizen, Vektoren, skalare Daten und Texte versendet werden.

Im Engineeringsektor sind zurzeit mehrere kommerzielle Middleware-Programme verfügbar (zum Beispiel TISC, Exite, MpCCI,...), bei denen die Client-Server-Verbindungen zum Teil mit unterschiedlichen Programmieretechniken (Corba, COM, MPI und/oder Sockets) ausgeführt sind. All diese Interfacetechniken haben jedoch die Plattformunabhängigkeit gemeinsam und sind somit auch in heterogenen Netzwerken einsetzbar. Das heißt, ein Client kann in einer Windows-Umgebung und ein anderer auf Unix laufen oder an einem ganz anderen Ort über das Internet erreichbar sein; und dennoch ist der Datenaustausch über den Server stets möglich.

Die Co-Simulation bietet aber noch weitere Vorteile. Unter Verwendung von standardisierten Kopplungsgrößen können die Clients schnell gegeneinander ausgewechselt werden. Dadurch kann man einerseits stets das für das Subsystem am besten geeignete Programm verwenden und andererseits auch Kopplungsmodelle leichter zwischen Anwendern austauschen, die mit unterschiedlichen Tools arbeiten. Mitunter macht es bei der Programmentwicklung sogar Sinn, einzelne Module zu Testzwecken zunächst über eine Middleware

zu koppeln, bevor man sie anschließend fest im Code verankert. Diese Entkopplung der Clients voneinander bietet weiterhin den Vorteil, dass alle an der Co-Simulation beteiligten Programme parallel zueinander ablaufen, im Gegensatz zu der sequenziellen Abarbeitung vieler konventioneller Schnittstellen; dies drückt sich wiederum oft in einer deutlichen Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeiten aus. Zudem bedeutet Entkopplung auch immer eine Isolation der einzelnen Lösungsverfahren und Zeitschrittweiten der jeweiligen Programme. Dies wirkt sich meist in einer höheren Stabilität der Berechnung aus, oder ermöglicht manchmal sogar erst Kopplungen zwischen Tools, die vom numerischen Lösungsalgorithmus so unterschiedlich sind, dass sie in einer Anwendung nicht vereinbar wären.

5 Beispiel Fahrzeugklimatisierung

Im Folgenden konkreten Beispiel einer Pkw-Klimatisierungs- und Komfortanalyse werden die Programme THESEUS-FE [11], Flowmaster2 [12] und Star-CD [13] in einer Co-Simulation über die Middleware TISC [14] miteinander verknüpft, Bild 3. In dem Dreierverbund simuliert THESEUS-FE alle Größen, die im Zusammenhang mit der Fahrzeugkabine und den Insassen stehen, das AC-Modul von Flowmaster2 übernimmt die Berechnung des Teilsystems R134a-Kältekreislauf und Star-CD die Strömungs-berechnung im Fahrzeug. Die Co-Simulation vereint die unterschiedlichsten Lösungsmethoden. Die Klimaanlage wird durch ein Thermo-Fluid-Netzwerk beschrieben, üblicherweise als 1D-Simulation bezeichnet. Die 3D-Abbildung der Fahrzeugkabine beruht auf finiten Schalenelementen und die Luft im Innenraum auf finiten Volumen. THESEUS-FE und Flowmaster2 laufen unter dem Betriebssystem Windows, das CFD-Programm Star-CD mit zwei Prozessoren auf einem Linux-Cluster. Da TISC auch Interfaces zu den Programmen Fluent, Dymola/Modelica, Kuli, TRNSYS, Matlab/Simulink und LabView bietet, sind durchaus auch andere Softwarekombinationen zur Problemlösung vorstellbar.

Für das Anschauungsbeispiel wurde mit freundlicher Genehmigung der Air International Limited auf ein älteres, freigegebenes Projekt zurückgegriffen [2]. Als Fahrzeugmodell dient ein australischer Holden Commodore VT. Für die Randbedingungen des Versuchslastfalls wurde der beim Hersteller übliche Testzyklus mit einer Gesamtdauer von vier Stunden vorgegeben. Dieser teilt

sich in eine einstündige passive Aufheizphase und eine dreistündige aktive Abkühlphase mit wechselnden Geschwindigkeits- und Belüftungsmodi auf. Bei der passiven Aufheizung parkt das Fahrzeug in der Klimakammer ohne Insassen bei einer Umgebungstemperatur von 38 °C und einer 40-prozentigen relativen Luftfeuchte und wird mit 1000 W/m³ Strahlungsleistung direkt von oben beschienen. Um das thermische Komfortmodell zu veranschaulichen, wurde das Fahrzeug während der Abkühlphasen im Gegensatz zum originalen Testzyklus mit zwei Insassen modelliert.

Wegen der „zusteigenden“ Passagiere im Cool-Down ergeben sich somit unterschiedliche 3D-Modelle für die Aufheizungs- und Abkühlphasen. Die Anzahl der Schalenelemente im THESEUS-FE Modell beträgt in diesem Beispiel ohne Insassen zirka 24.500 und mit beiden Insassen knapp 34.000. Star-CD benötigt bei der passiven Aufheizung wegen der vorherrschenden freien Konvektionsströmung und den daraus resultierenden Y+-Werten zirka 500.000 Volumenzellen. Für die Abkühlung mit Insassen und erzwungener Konvektion wurde dagegen ein Netz mit etwa 3 Millionen Volumenzellen erzeugt.

Durch die unterschiedlichen Netztopologien ist es nötig, für beide Netzkombinationen einmalig vor der Berechnung das umhüllende Schalennetz der Star-CD-Volumenzellen auf das gröbere Schalennetz von THESEUS-FE zu „mappen“. Dadurch wird ein Bezug der Netze zueinander durch entsprechende Zuweisungslisten hergestellt. Diese kommen bei der Ergebnisübertragung von einem Netz auf das andere zur Anwendung. Das Mapping wird bei P+Z Engineering durch ein intern geschriebenes Makro in Star-CD ausgeführt.

Die Ergebnisse beziehungsweise Kopplungsgrößen, die sich aufgrund der Aufgabenstellung ergeben und von den Programmen während der Co-Simulation über den Server ausgetauscht werden, sind in der **Tabelle** zusammengefasst.

Aus der Vielzahl der zeitabhängigen Ergebnisse wie lokale Temperatur- und Feuchteverteilung, Wärmestrombilanzen und Enthalpieströme, Leistungsdaten und Kennziffern der Klimaanlage, Haut- und Bekleidungstemperaturen, Komfortindizes, Strömungsverteilung, Sonnenlasten, transmittierte Energien etc., können hier nur einige wenige exemplarisch zur Visualisierung herausgegriffen werden. **Bild 4** zeigt vier dreidimensionale Ergebnisplots, welche die komplexen Vorgänge in der Fahrzeugkabine während der Aufheizungs- und Abkühlphase verdeutlichen.

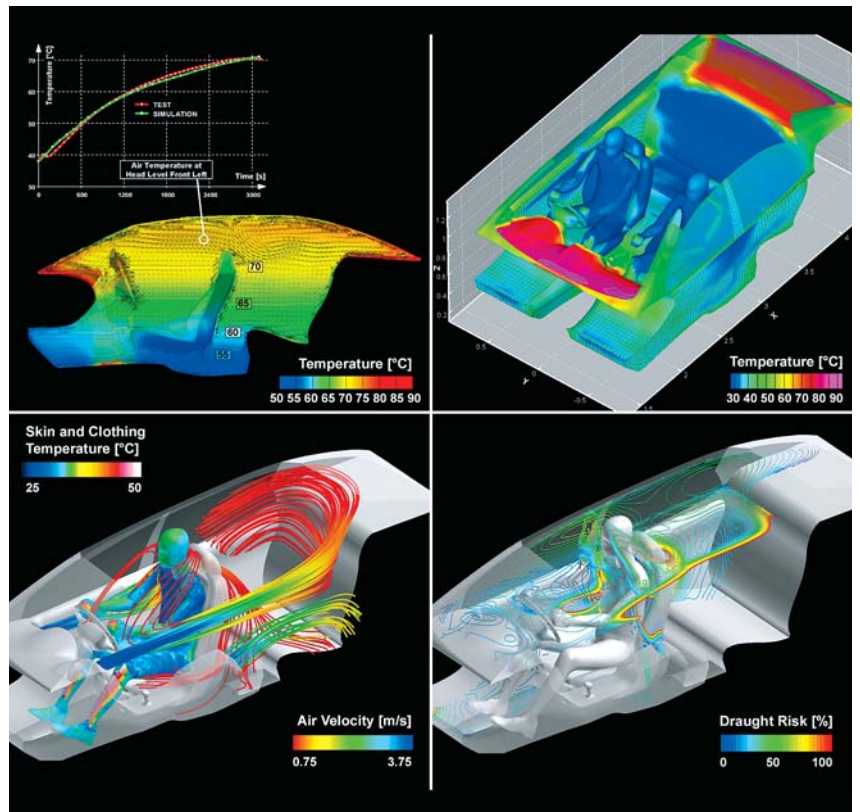


Bild 4: Beispielergebnisse in der Fahrzeugklimatisierung: oben links: Temperaturschichtung und freie Konvektionsströmung am Ende der passiven Aufheizung; oben rechts: Oberflächen-temperaturen in der Kabine 10 min nach Start der aktiven Kühlung; unten links: Haut- und Bekleidungstemperaturen am Fahrer sowie Luftgeschwindigkeiten und Luftpfade der Umluftbelüftung 20 min nach Start des Cool-Downs; unten rechts: Zugrisiko nach ISO 7730 in der Region des Fahrers

Figure 4: Exemplary results in vehicle air conditioning: top left: Temperature stratification and free convection stream a the end of passive heating ; top right : surface temperatures in the cabin 10 min after start of active cooling; bottom left: skin and clothing temperatures of driver and air speeds and paths of recirculation air 20 min after start of cooling-down; bottom right: risk of draught according to ISO 7730 in the driver's region

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem bedienungsfreundlichen Berechnungsprogramm THESEUS-FE ist ein neues Softwareprodukt entstanden, das thermische Analysen aller Art mit modernsten Methoden ermöglicht. Aufgrund der kurzen Antwortzeiten entfaltet es seine volle Leistungsfähigkeit vor allem bei kostengünstigen Parameterstudien und Variantenuntersuchungen in der Konzeptphase. Wie im vorliegenden Bericht gezeigt, können aber auch hochkomplexe Sachverhalte wie die Fahrzeugklimatisierung mit diesem Ingenieurtool entweder alleine oder im Verbund mit anderen Programmen simuliert werden.

Wird eine gekoppelte numerische Analyse durchgeführt, erweist sich die Methode der Co-Simulation als Mittel der Wahl. Sie bietet im Gegensatz zu konventionellen Schnittstellen viele Vorteile, die sich in der

virtuellen Produktentwicklung schnell bezahlt machen.

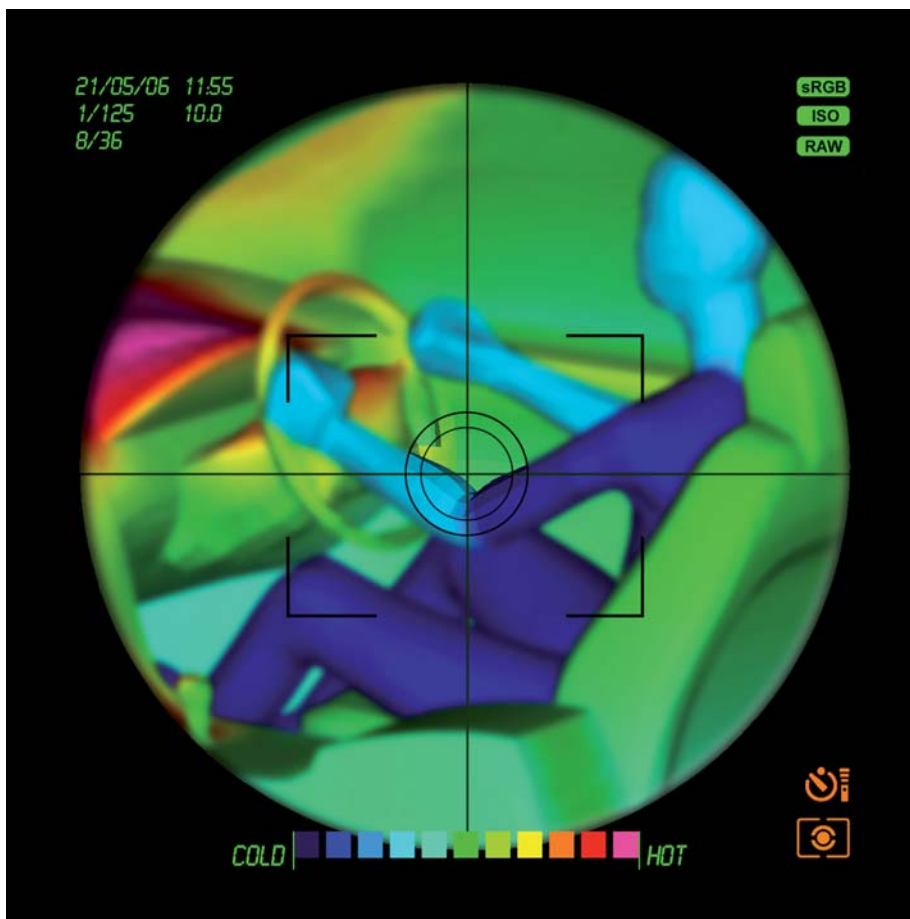
Zukünftig sollen die Optimierungspotenziale in der Fahrzeugklimatisierung mit Hilfe der Co-Simulation durch eine Einbeziehung weiterer Subsysteme wie der Klimaregelung erschlossen werden. Eine wesentliche Rolle wird hierfür eine noch stärkere Automatisierung zur Prozessverkürzung bei der Modellerstellung spielen. Aber auch die Übertragung und Ausweitung der Methode auf andere Bereiche des Thermomanagements in Richtung Gesamtfahrzeugbetrachtung wird ein Hauptanliegen sein.

Abschließend möchten sich die Autoren bei der TLK-Thermo GmbH für die erfolgreiche Kooperation bei Erstellung des TISC-Interfaces und die kostenfreie Nutzung von TISC für das in Kapitel 5 gezeigte Simulationsbeispiel bedanken.

Literaturhinweise

- [1] Kossel, R.; Tegethoff, W.; Bodmann, M.; Lemke N.: Simulation of complex systems using Modelica and tool coupling. 5th International Modelica Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 485-490, Wien, 2006
- [2] Schröder, K.; Ellinger, M.; Wagner, S.: Simulation von Klimaanlage und Fahrgastzelle. In: ATZ 104 (2002), Nr. 2, S. 132-141
- [3] Puntigam, G.; Balic, J.; Almbauer, R.; Hager J.: Transient co-simulation of comprehensive vehicle models by time dependent coupling. In: SAE 2006-01-1604
- [4] Fanger, P.O.: Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- [5] Hsu, S.: A thermoregulatory model for heat acclimation and some of its applications. Manhattan, Kansas State University, Dissertation, 1977
- [6] Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M.: Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation and radiation models and computational fluid dynamics. In: Energy and Buildings 34 (2002), pp. 637-646, Elsevier Science B.V
- [7] Dusan, F., Lomas, K. J., Stohrer, M.: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions – the passive system. In: American Physiological Society (1999), 8750-7587, pp. 1957-1972
- [8] Dusan, F., Lomas, K. J., Stohrer, M.: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions – the active system. In: International Journal Biometeorology (2001), 45, pp. 143-159
- [9] Dusan, F., Bunzl, A., Lomas, K. J., Cropper, P. C., Schlenz, D.: A new simulation system for predicting human thermal and perceptual responses in vehicles. Pkw-Klimatisierung III. Expert Verlag, Renningen 2004
- [10] P+Z Engineering GmbH: THESEUS-FE Manuals Version 1.0, München, 2006
- [11] www.theseus-fe.com
- [12] www.flowmaster.com
- [13] www.cd-adapco.com
- [14] www.tlk-thermo.de

State-of-the-Art Thermal Management Demonstrated on Cabin Air Conditioning



P+Z Engineering GmbH has succeeded in creating a virtual version of the highly complicated vehicle air conditioning process for the first time, in hitherto unseen detail, thanks to the development of "THESEUS-FE", a new thermal calculation tool, combined with co-simulation methods. This report highlights the power of this advanced technology, based on an example.

Authors:

Thomas Schneider, Michael Ellinger, Stefan Paulke, Stefan Wagner and Henry Pastohr

1 Introduction

Virtual product development is nothing new. Given the financial pressures in today's automotive industry to achieve tough time and quality targets, virtual techniques have become essential in order to examine the many load case scenarios and large number of model variants. Pure-

ly experimenting on the basis of the current status can no longer hope to satisfy all the demands of automotive development.

Numerical simulation standards, which have their origins in structural mechanics, have evolved over time from simple strength analysis to non-linear crash calculation and thermodynamic flow simu-

lation. These standards represent the current state of the art – we now have effective methods for identifying solutions and mature computer programs covering practically every specialist area. This trend has received additional impetus in recent years from the new levels of – affordable – performance offered by each new generation of computers. Accordingly, there are no longer any obstacles to prevent modelling of individual components and subsystems. However, the challenge of connecting these systems and optimising the simulation process remains. A holistic assessment and identification of strategies to further reduce fuel consumption and emissions is impossible without a fast, interdisciplinary overview of all the effects and systems involved in a real vehicle.

As has already been stated in [1, 2], there have hitherto been two main approaches to simulation solutions that need to span several areas. Method A consisted of linking different tools via direct interfaces. Method B involved creating a program that combined all the simulation requirements in a single integrated tool. Method A can be quite efficient when linking two programs, but proves extremely complicated when three or more programs are involved because the number of bi-directional interfaces increases by $2^{(n)}$ as the number n of programs to be linked rises. And the user friendliness often claimed for method B, with its single interface, is not always achieved. As the number of functions increases, the end user is likely to be overwhelmed by a host of dialogue boxes, toolbars, additional modules and main and sub-menus. As an additional problem, only about 10 to 20 % of the scope of such a tool is used for most standard load cases, with the remaining functionality tending to act as a drag on performance. Such highly integrated systems make huge development and support demands not only on the user, but also on the manufacturer.

As an engineering services provider that increasingly offers customised solutions which break new ground, P+Z Engineering GmbH has faced this problem for many years and naturally wants to identify the best possible solution both for the customer and in terms of boosting the company's added value. "Co-simulation" [1, 3] is a new approach to help resolve this dilemma, used in conjunction with the latest process-optimised programming of graphical user interfaces and problem-specific software development. The method

and the new thermal solver THESEUS-FE are presented in more detail below, using thermal comfort simulation as an example.

2 Overview of Thermal Comfort Simulation

Few tasks are better suited to illustrating the interdisciplinary issues and general subject complexity than simulation of the thermal comfort of vehicle occupants. A wide variety of medical and engineering disciplines are involved, namely refrigerant, solar and control technology, electrical engineering, thermodynamics, heat transfer, fluid mechanics, anatomy and thermal sensation. In terms of automotive engineering, this ultimately means modelling the air conditioning system, the engine cooling system, the HVAC module, ventilation ducts, passenger compartment and surroundings, as well as the occupants, **Figure 1**. At the same time, thermal comfort is just one small aspect of overall vehicle heat management, so the problem and specialist disciplines involved could easily be extended.

As the number of subsystems rises, so, of course, does the number of expert tools and methods. It will be apparent that a 3D finite difference, finite element, or finite volume program can hardly be expected to simulate a complete air conditioning system or entire engine cooling system with integrated vehicle heating. Rather, 1D-solution methods must be deployed. On the other hand, the nature of the phenomena means that aspects such as pronounced local turbulence in the passenger compartment and shading effects in sunshine can only be captured three-dimensionally.

Achieving thermal comfort is basically always about making the most realistic possible allowance for moisture and heat transfer mechanisms (conduction, radiation and convection), i.e. balancing the heat and enthalpy flows in the entire system, independently of the numerical method used to determine them.

The use of calculation models for thermal dummies began as long ago as the 1960s, with the work of Gagege, Hardy, Nevins, Rohles, Stolwijk and particularly Fanger [4] on the air conditioning of buildings. This work ultimately led to the adoption of European standard ISO 7730 and to the PMV index. The findings were later applied by Hsu [5] to the inhomogeneous situation in motor vehicles. During the

last forty years, the initial, simple two-node (skin and core) models have evolved into sophisticated human models containing a complete circulatory system, individual parts of the body with layers for bones, muscle, fat and skin and a control system based on the central nervous system (with sweating, breathing, shivering, etc.). The most recent versions of this type of thermo-physiological model are presented in publications by Tanabe [6] and Fiala [7, 8], and are characterised by taking account of local thermal sensation using a dynamic comfort index. **Figure 2** shows the individual regulatory mechanisms of a thermo-physiological model of the human body.

3 The New THESEUS-FE Program System

Despite the heading, THESEUS-FE is not actually that new because its theoretical principles [10] and over fifteen years' project experience in conceptual analysis of air conditioning are derived from the existing INKA/TILL software [2]. However, that is all that the two programs have in common: THESEUS-FE was programmed from scratch over the course of several years and given a graphical user interface (GUI) which benefits from the latest insights into user guidance while remaining platform-independent.

A conscious decision was taken to avoid having a mass of unnecessary functions and dialogue screens, with extensive use being made of context-sensitive menus, graphical selection options and a data tree structure instead. These features mimic the mainstream file management programs with which users are already familiar. Accordingly, the user interface makes a very clean, uncluttered overall impression and demonstrably helps to allow fast, intuitive definition of the problem to be examined in a matter of just minutes. The pre-processing speed of the tool is up to ten times faster than that of its predecessor. To enable further automation of pre-processing, a Python console has been integrated into the GUI, making it script-capable and able to run predefined macros. The interface also provides simple post-processing, which is sufficient for rapid plausibility testing and can even display the 3D results saved in HDF format simultaneously on both sides of a shell element.

At its heart is the new implicit finite-element heat conduction solver with an adaptive time marching predictor-corrector technology that, unlike its finite-differ-

ence predecessor, not only solves transient load cases but also includes an efficient solver for steady-state load cases. A number of other important upgrades over INKA/TILL have also been implemented, alongside proven functions such as empirical laws of convection, multi-zone ventilation, moisture calculation, multiple-layer materials and various comfort indexes. Particularly noteworthy are the dynamic memory allocation for unlimited model sizes, three-dimensional heat conduction, the contour integration method for determining view factors, grey-body radiation with multiple reflection, radiation cavities and the genetic patching algorithm for acceleration and memory optimisation for body radiation calculation, the improved options for defining transient or customer-specific constraints, the new Fiala occupant model and the introduction of solid elements.

With its large material and clothing database, THESEUS-FE thus provides all the necessary resources to conduct air conditioning and comfort analysis from the concept phase to validation of outdoor trials independently, quickly and reliably. Thanks to the new features, other applications are also possible. The program system can thus be used as a general thermal solver for under-hood thermal management or when designing exhaust systems, for example. Even applications outside the automotive industry are possible, e.g. in the aerospace industry or the air conditioning of buildings.

4 The Co-Simulation Principle

THESEUS-FE has direct interfaces for various solvers (e.g. Flowmaster2, Star-CD and Abaqus) and almost all commercial post-processors (e.g. FIELDVIEW, Tecplot, EnSight, HyperWorks, Animator3, METApst, etc.).

But for the reasons already mentioned, co-simulation offers greater convenience and various advantages over such standard interfaces, as will be explained below.

Co-simulation is characterised by the linking of individual programs by means of “middleware”. This middleware contains interfaces to the individual calculation programs and also acts as a data server, managing synchronisation of data exchange. Middleware is often simply described as the server, and the individual tools connected to it as clients. Unlike the direct pairs of interfaces referred to above, only one interface is required here to ex-

change data between the client and the server. Once this interface has been created, the client program can communicate via the server with all the other clients “connected” to the server. Put simply, the server can be likened to a large data memory or data safe to which clients have access and where they can collect or deposit data. **Figure 3** shows a graphic representation of this arrangement.

As all the clients can access the data, multiple programs can be connected with each other very quickly and all supplied with the relevant data at the same time, if required. In this scenario, the nature of the link can be defined individually for each client, depending on the specific problem. The data types which can typically be transferred are matrices, vectors, scalar data and text.

Several commercial middleware programs are currently available in the engineering sector (e.g. TISC, Exite, MpCCI, etc), with the client-server connections being implemented using a range of different programming techniques (Corba, COM, MPI and/or sockets). All these interface techniques have one thing in common, though: they are platform-independent and can therefore be used in heterogeneous networks, i.e. one client can run under Windows and another on Unix, or be accessible at a different location over the Internet. Data exchange via the server remains possible despite these differences.

However, co-simulation offers even greater benefits. Clients can be substituted quickly if standardised link specifications are used. This interchangeability means that the most suitable program for the subsystem can always be used and also makes it easier to swap coupling models between users working with different tools. In some cases, it can also make sense to link individual modules by middleware for test purposes before coding them properly. The use of separate clients also has the advantage that all the programs involved in co-simulation run in parallel, instead of the consecutive processing of many conventional interfaces, which often allows a significant increase in calculation speeds. Decoupling also entails isolation of the individual solution method and maximum stable time steps of the respective programs. This usually results in more stable calculation and sometimes facilitates links between tools which differ so greatly with regard to their numerical solution algorithm that they cannot be combined in a single application.

5 Vehicle Air Conditioning as an Example

In the following specific example of a car air conditioning and comfort analysis, the programs THESEUS-FE [11], Flowmaster2 [12] and STAR-CD [13] are linked with each other in co-simulation via TISC [14] middleware, Figure 3. In this triple configuration, THESEUS-FE simulates all the values associated with the passenger compartment and its occupants. The Flowmaster2 AC module calculates the R134a cooling circuit subsystem, while Star-CD calculates the airflows in the car. Co-simulation brings together widely different solution methods here. The air-conditioning system is described as a thermo-fluid network, usually referred to as 1D simulation. The 3D representation of the passenger compartment is based on finite shell elements and the air in the passenger compartment on finite volumes. THESEUS-FE and Flowmaster2 run under Windows and the CFD program Star-CD uses two processors of a Linux cluster. Since TISC also provides interfaces to Fluent, Dymola/Modelica, Kuli, TRNSYS, Matlab/Simulink and LabView, other problem-solving software combinations are also possible.

A former, non-restricted project has been used for this example by kind permission of Air International Limited [2]. The car is an Australian Holden Commodore VT. The manufacturer’s usual test cycle with a total duration of four hours was specified for the test load case. It comprised a one-hour passive heating phase and a three-hour active cooling phase, with varying speed and ventilation modes. In the passive heating phase, the empty vehicle was parked in a climatic chamber at an ambient temperature of 38°C and relative humidity of 40 %, and directly irradiated with 1000 W/m² from above. In a departure from the original test cycle, the vehicle was modelled with two occupants during the cooling phase to illustrate the thermal passenger model.

Different 3D models are produced in the heating and cooling phases due to the introduction of the occupants in the latter phase. The number of shell elements in the THESEUS-FE model is around 24,500 in this example excluding the occupants, and about 34,000 with both occupants. Star-CD requires approximately 500,000 cells for the passive heating phase, due to the free convection flow and the resultant Y+ values. In contrast, a mesh of about three million cells was gen-

erated for the cooling phase with occupants and forced convection.

The different mesh topologies mean that it is initially necessary for both mesh combinations to map the enveloping shell mesh of Star-CD cells onto the coarser THESEUS-FE shell elements. This establishes a relationship between the networks by way of corresponding assignment lists. The lists can then be used for transferring results from one mesh to the other. At P+Z Engineering, mapping is carried out by an internal macro in Star-CD, written in-house.

The results, or link data, obtained from the process and exchanged via the server during co-simulation are summarised in the **Table** for clarity.

Only a few of the time-dependent results can be selected for visualisation here, e.g. local temperature and humidity distribution, heat flow balances and enthalpy flows, power data and figures for the air conditioning system, skin and clothing temperatures, comfort indices, flow distribution, sun loads, transmitted energies, etc. **Figure 4** shows four three-dimensional result plots which illustrate the complex processes in the passenger compartment during the heating and cooling periods.

6 Conclusion and Outlook

The intuitive THESEUS-FE calculation program is a new software product which lev-

erages advanced methods to enable a wide range of thermal analyses. Its short response times make it a particularly efficient tool for cost-effective parameter studies and assessing different variants in the design phase. As this report shows, highly complex situations such as vehicle air conditioning can also be simulated using this engineering tool, either alone or in conjunction with other programs.

Where linked numerical analysis is required, co-simulation will be the method of choice. It offers many advantages over conventional interfaces, yielding real benefits in virtual product development projects.

In future, the potential for optimising automotive air conditioning with the aid of co-simulation will be exploited by integrating further subsystems, such as climate control. More automation to shorten processes when creating models will play a major role here. Another focus will be on extending the method to other fields of thermal management as a move towards a whole-vehicle approach.

In closing, the authors wish to thank TLK-Thermo GmbH for their help with producing the TISC interface and for free use of TISC to create the specimen simulation shown in section 5.

References

- [1] Kossel, R.; Tegethoff, W.; Bodmann, M.; Lemke N.: Simulation of complex systems using Modelica and

tool coupling. 5th International Modelica Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 485-490, Wien, 2006

- [2] Schröder, K.; Ellinger, M.; Wagner, S.: Simulation von Klimaanlage und Fahrgastzelle. In: ATZ 104 (2002), Nr. 2, S. 132-141
- [3] Puntigam, G.; Balic, J.; Almbauer, R.; Hager J.: Transient co-simulation of comprehensive vehicle models by time dependent coupling. In: SAE 2006-01-1604
- [4] Fanger, P.O.: Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- [5] Hsu, S.: A thermoregulatory model for heat acclimation and some of its applications. Manhattan, Kansas State University, Dissertation, 1977
- [6] Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M.: Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation and radiation models and computational fluid dynamics. In: Energy and Buildings 34 (2002), pp. 637-646, Elsevier Science B.V
- [7] Dusan, F., Lomas, K. J., Stohrer, M.: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions – the passive system. In: American Physiological Society (1999), 8750-7587, pp. 1957-1972
- [8] Dusan, F., Lomas, K. J., Stohrer, M.: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions – the active system. In: International Journal of Biometeorology (2001), 45, pp. 143-159
- [9] Dusan, F., Bunzl, A., Lomas, K. J., Cropper, P. C., Schlenz, D.: A new simulation system for predicting human thermal and perceptual responses in vehicles. Pkw-Klimatisierung III. Expert Verlag, Renningen 2004
- [10] P+Z Engineering GmbH: THESEUS-FE Manuals Version 1.0, München, 2006
- [11] www.theseus-fe.com
- [12] www.flowmaster.com
- [13] www.cd-adapco.com
- [14] www.tlk-thermo.de



P+Z Engineering GmbH

Anton-Ditt-Bogen 3
D - 80939 München
Tel: +49 (0)89 / 318 57 - 0
Fax: +49 (0)89 / 318 57 - 111
E-mail: info@puz.de
www.puz.de