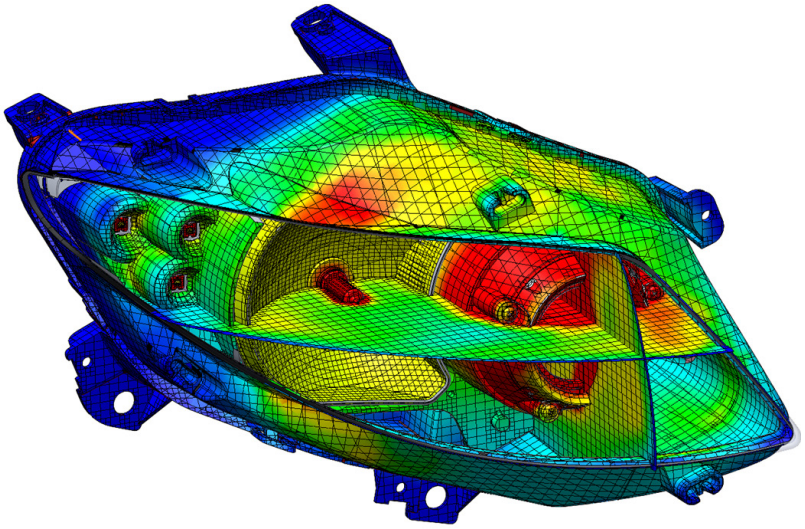
SMARTCELLS™ – FÜR SCHNELLE UND GENAUE CFD-SIMULATIONEN

WHITEPAPER

Mentor®
A Siemens Business

MECHANICAL ANALYSIS

www.mentor.com



Dieses Whitepaper präsentiert das SmartCells™-Konzept in Softwaretools für die numerische Strömungssimulation (CFD). Diese Meshing-Technologie wurde in FloEFD™ umgesetzt – der designorientierten, universellen CFD-Software von Mentor Graphics, die in allen gängigen CAD-Produkten integrierbar ist (1). Das vorliegende Dokument erklärt, was SmartCells™ sind, wie sie sich von anderen Vernetzungskonzepten unterscheiden, und welche Vorteile sie dem Anwender bringen:

- SmartCells™ sind kartesische Netze, die in der Regel zehnmal kleiner sind als konventionelle CFD-Netze, und trotzdem dieselbe Auflösung im Strömungsfeld und eine sehr hohe Simulationsgenauigkeit gewährleisten.
- Sie basieren auf numerischen Konzepten und Berechnungsmodellen, die in FloEFD™ integriert sind und den Zeitaufwand der konventionellen CFD-Vernetzung von Geometrien durchschnittlich auf ein Zehntel verringern. Somit wird ein weithin bekannter Engpass in der Produktivität von CFD-Simulationen drastisch reduziert.
- SmartCells™ ermöglichen eine automatisierte Netzerzeugung, die auf künstlicher Intelligenz beruht – das Ergebnis unzähliger, in vielen Jahrzehnten durchgeführter industrieller CFD-Simulationen anhand von Daten aus Berechnungsmodellen.
- SmartCells™ gewährleisten bei allen Fluidströmungsprozessen eine hohe Genauigkeit in der Simulation von Turbulenzen im Grenzschichtbereich und bewältigen auch komplexe Geometrien, die in einer vernetzten Zelle viele Kontrollvolumina enthalten können.
- Aufgrund der in FloEFD™ integrierten Aufbereitung und der optimierten Benutzeroberfläche werden die Workflows von Entwicklungsingenieuren und CFD-Analysten um das Zwei- bis Zehnfache verkürzt.

EINFÜHRUNG

Tools für die numerische Strömungssimulation werden von der CAE-Softwareindustrie seit über 40 Jahren angeboten und sind inzwischen längst etabliert. Derzeit erzielt der kommerzielle Sektor weltweit jährlich mehr als eine Milliarde USD Umsatz (2). Der Großteil aller heute durchgeführten CFD-Simulationen (über 90 %) basiert auf der Finite-Volumen-Methode (FV) mittels Reynolds-gemittelter Navier-Stokes-Gleichungen (RANS), da dieses Verfahren robust und rechnerisch effizient ist (2). CFD beruht auf anerkannten numerischen Methoden zur Lösung allgemeiner Navier-Stokes-Gleichungen, die Fluidströmungen sowie Wärme- und Stoffübertragungsprozesse beschreiben (3). Die technologische Umsetzung konventioneller CFD-Verfahren ist jedoch durchweg eine Kombination aus numerischen, technischen und analytischen Verfahren, die mittlerweile 30-40 Jahre alt sind (4). Tatsächlich basiert der überwiegende Großteil der heutzutage durchgeführten CFD-Simulationen auf Abwandlungen des bewährten k-ε-Turbulenzmodells, das seit über 40 Jahren als „Allzweckwaffe" eingesetzt wird (5).

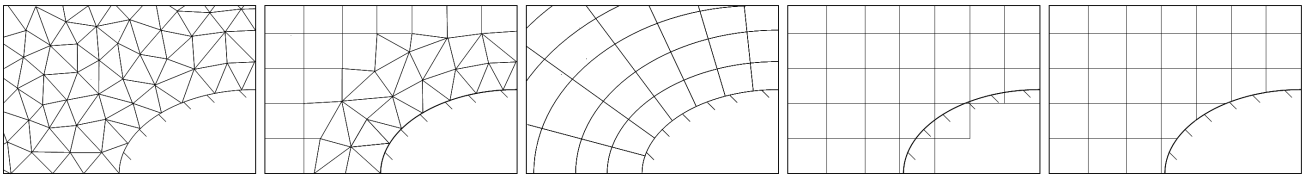
Nutzer von herkömmlichen CFD-Simulationstools stehen heute erstmalig vor Herausforderungen, da sie auch die hochgradig komplexe Aufbereitung (Geometrie- und Gittererzeugung) beherrschen müssen. Aufgrund ihrer inhärenten Mathematik verlangen die dafür verwendeten Codes vom Nutzer zumeist ein umfassendes Verständnis der grundlegenden physikalischen Prozesse und numerischen Algorithmen. Und die Qualität der CFD-Prognose hängt immer von der Aufbereitung ab. Durch die Anwendung neuer, modernerer Analysemethoden bei numerischen Aufgaben zur Auflösung von Phänomenen, die die Fluidströmung, Wärme- und Stoffübertragung beschreiben, können die an den Nutzer gestellten Anforderungen hinsichtlich einer hochpräzisen wandnahen Vernetzung und des damit einhergehenden Zeitaufwands deutlich reduziert werden. Die SmartCells™-Technologie erzeugt ein gröberes Netz zur Erfassung von physikalischen Phänomenen, die aufgelöst werden sollen (z. B. turbulente Wirbel, enge Kanäle usw.). Möglich wird dies durch die Implementierung fortschrittlicher Konzepte zur Verarbeitung von Konstruktionsdaten (1). Folglich werden bei einer CFD-Simulation mit SmartCells™ weniger Zellen erzeugt als bei konventionellen Verfahren, die eine hohe Auflösung der Grenzschichten erfordern. Stattdessen wird die Vernetzung vollständig automatisiert, und der Ingenieur oder CFD-Analyst kann seine Aufgabe wesentlich schneller und ohne umfassende numerische Kompetenzen abschließen.

Die SmartCells™-Technologie hat sich in den letzten 20 Jahren bei zahlreichen Vergleichstests und industriellen Anwendungen bewährt und wird standardmäßig von Herstellern und Tier-1-Zulieferern in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt und in anderen Sektoren eingesetzt. Die Vorteile der Synergien zwischen numerischen und technischen Verfahren werden klar ersichtlich, wenn sie konventionellen CFD-Ansätzen gegenübergestellt werden. Angesichts der immer kürzeren Designzyklen und im Kontext des omnipräsenten Produktlebenszyklusmanagement, das Ingenieure in Form von PLM-Tools zur Verbesserung ihrer Entwürfe nutzen, müssen die Ergebnisse von CFD-Simulationen immer schneller und ohne Einbußen an Genauigkeit verfügbar sein (6).

Das im vorliegenden Whitepaper beschriebene Konzept gibt Experten und Gelegenheitsnutzern die Möglichkeit, CFD im Designprozess einzusetzen. Die zentrale Aufgabe der Netzerzeugung wird automatisiert, und die Genauigkeit der Endergebnisse bleibt trotz der gröberen Netze gewahrt. Die SmartCells™-Technologie wird in diesem Paper anhand der Simulation der aerodynamischen Eigenschaften des generischen aerodynamischen Studienmodells (ASMO) eines Fahrzeugs veranschaulicht (7). SmartCells™ eignen sich besonders für Ingenieure, die sich in ihrem Beruf nur gelegentlich mit CFD-Simulationen beschäftigen, da die Technologie keine umfassenden numerischen Kompetenzen voraussetzt. Sie ist erstaunlich robust und kann sowohl von CFD-Analysten als auch von Konstrukteuren eingesetzt werden, da die CFD-Simulation vorgelagert stattfindet (8), um die Produktivität im Workflow zu maximieren und den Zeitaufwand zu minimieren.

NUMERISCHE GRUNDLAGEN FÜR SMARTCELLS

Wer SmartCells™ verstehen will, muss sich zunächst mit anderen Vernetzungsmethoden vertraut machen, die bei konventionellen CFD-Simulationscodes für Finite-Volumen-Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählen in der Regel unstrukturierte Dreiecke, strukturierte Dreiecke, strukturierte Kurvennetze, kartesische Netze nach der Immersed-Boundary-Methode und auch SmartCells™ (vgl. Tabelle 1) (6). Tabelle 1 zeigt die mathematische Formulierung der Simulationsgenauigkeit $||LTE||_{L1}$, die mit verschiedenen Vernetzungskonzepten erreichbar ist (je niedriger der LTE-Wert, umso genauer die CFD-Prognose). Aus der Tabelle geht klar hervor, dass mit unstrukturierten und strukturierten Dreiecksnetzen und mit strukturierten Kurvennetzen im Vergleich zu kartesischen Cut-Cell-Gittern und SmartCells™ nur dann eine vergleichbare Genauigkeit erreichbar ist, wenn die Simulation durch konventionelle CFD-Codes mit einer deutlich höheren Anzahl von Zellen durchgeführt wird. Das ist natürlich mit einem größeren Bedarf an Speicher- und Rechenkapazität verbunden.



Netz	Unstrukturierte Dreiecke		Strukturierte Dreiecke		Strukturierte Kurven		Kartesisch [Aftosmis]		FloEFD SmartCells	
	Zellen	$\|\|LTE\|\|_{L^1}$	Zellen	$\|\|LTE\|\|_{L^1}$	Zellen	$\|\|LTE\|\|_{L^1}$	Zellen	$\|\|LTE\|\|_{L^1}$	Zellen	$\|\|LTE\|\|_{L^1}$
Ergebnisse	128	0,52552	144	0,37926	144	0,30998	138	0,03065	140	0,03014
	505	0,22529	525	0,07571	525	0,09223	507	0,00930	516	0,00916
	1918	0,11936	2001	0,01565	2001	0,02422	1928	0,00246	1944	0,00235
	7490	0,05940	7809	0,00347	7809	0,00629	7549	0,00059	7526	0,00058

Tabelle 1: Vergleich von CFD-Netzen anhand der je nach Zellenanzahl erreichbaren numerischen Genauigkeit

Tabelle 1 zeigt eindeutig, dass FloEFD™ auch mit einer geringeren Anzahl von kartesischen Zellen genaue Ergebnisse liefert, besonders im Vergleich zu konventionellen CFD-Codes, für die zur Erreichung derselben Genauigkeit in der Regel mehrere Millionen Zellen benötigt werden. Das liegt einerseits an den in der SmartCells™-Technologie integrierten numerischen Methoden, und andererseits daran, dass kartesische Zellen nicht von Verzerrungen betroffen sind, die bei Tetraedernetzen sowie hybriden und polygonalen Netzen auftreten, die überwiegend in Verbindung mit konventionellen CFD-Ansätzen Verwendung finden.

Der landläufigen Meinung zufolge werden für brauchbare und ausreichend genaue CFD-Simulationen sehr viele Gitterzellen benötigt, besonders wenn im Bereich der wichtigen Wandgrenzschichten immer feinere Details aufgelöst werden sollen. Bei komplexen Geometrien, die beispielsweise enge Kanäle enthalten, kann dadurch die Anzahl der Berechnungszellen auf Hunderte Millionen ansteigen. Dermaßen große Modelle erfordern naturgemäß sehr viel Speicher, Rechenleistung und eine entsprechend aufwendige Nachbearbeitung. Und das bei jeder konventionellen CFD-Simulation, die genaue Ergebnisse liefern soll. Dieses aus den 1980-er Jahren stammende Konzept ist jedoch hinsichtlich CPU-Bedarf untragbar, da es die Rechenkapazitäten eines Unternehmens restlos verschlingt. Man kann sogar sagen, dass dieser Engpass in den letzten 25 Jahren die größte Hürde für eine Demokratisierung der CFD-Simulation gewesen ist (1). In diesem Paper stellen wir die Behauptung auf, dass für industrielle RANS-CFD-Simulationen ein alternativer Ansatz verfügbar ist, der intelligenter, computertechnisch effizienter, genauso wirksam und gut validiert ist. Dieses Konzept kommt mit einem Bruchteil von Berechnungszellen aus und verbraucht daher bei derselben Genauigkeit wie herkömmliche CFD-Verfahren deutlich weniger Rechenressourcen. Zudem kann es in CAD- und PLM-Workflows integriert werden, was aus objektiver Sicht der optimale Platz für CFD-Simulationen ist, da der Nutzer mit der ihm vertrauten CAD- bzw. PLM-Oberfläche produktiver arbeiten kann.

In der Praxis werden heutzutage bei konstruktionstechnischen Simulationen branchenübergreifend PLM-Konzepte eingesetzt. Produktlebenszyklusmanagement gewährleistet die durchgängige Nutzung und Pflege von 3D-Fertigungsdaten über den gesamten Lebenszyklus und über alle Konstruktionsänderungen hinweg. Die Grundlage des PLM-Konzepts ist die Verfügbarkeit von komplexen 3D-Produktmodelldaten in einem CAD-System für die Mechanikkonstruktion als zentrale Systemkomponente. Somit sind derzeit 3D-Produktmodelldaten der Ausgangspunkt für jeden virtuellen Prototyp und für alle physikalisch-technischen Simulationen. Die konstruktionsbegleitende numerische Strömungssimulation ist in diesem Kontext eine äußerst attraktive Option, da dadurch nicht nur der Designprozess beschleunigt wird, sondern auch deutlich vorhersehbarere und zuverlässigere Ergebnisse erzielt werden. Angesichts der steigenden Designkomplexität und der zunehmenden Abhängigkeit von externen Entwicklungspartnern wird diese Option nur noch attraktiver.

Wir dürfen nicht vergessen, dass alle gängigen CAD-Systeme bereits seit 20-30 Jahren existieren und seither als Entwicklungstools optimiert werden. Die Notwendigkeit der Einbindung von CAE (und hier insbesondere CFD) hat man erst später erkannt. In den 1980-er und 1990-er Jahren war es daher nur logisch, dass CFD-Tools einen eigenen Entwicklungspfad eingeschlagen hatten. Wenn man jedoch CFD in der Konstruktionstechnik einsetzt und dabei PLM-Konzepte zufriedenstellend umsetzen will, ist eine vollständige Integration von CFD im CAD-Prozess unabdingbar (9). Das größte Problem in diesem Zusammenhang sind die hohen Ressourcenanforderungen der CFD-Berechnung von 3D-CAD-Geometrien, die in der Praxis zumeist hochgradig komplex sind. Solche CFD-Analysen zur Lösung von Navier-Stokes-Gleichungen erfordern eine hohe Gitterauflösung der Strömungen im Bereich der Festkörper-Fluid-Grenzen. Dieses Problem manifestiert sich zunächst während der Gittererzeugung und wird in der Folge in die numerische Lösungsphase übertragen. Darüber hinaus können konventionelle Simulationen zumeist nur von hochqualifizierten Spezialisten durchgeführt werden, da Entwicklungsingenieure in der Regel nicht über das erforderliche Know-how verfügen. Um diesem Problem zu begegnen, wurde in den 1990-er Jahren das Konzept „Engineering Fluid Dynamics“ (EFD) (1) entwickelt. EFD ist ressourcenschonend, auf Entwicklungsingenieure zugeschnitten und mittlerweile Bestandteil des Produkts FloEFD™ von Mentor Graphics. Dieser in FloEFD™ integrierte CFD-Ansatz basiert auf zwei wesentlichen Prinzipien:

- direkte Nutzung nativer Geometriedaten aus CAD-Tools,
- Kombination aus 3D-CFD-Modellierung und einfacheren Verfahren, falls die Gitterauflösung für vollständige 3D-Simulationen nicht ausreicht.

DAS SMARTCELL-VERFAHREN

FloEFD™ ermöglicht dank der Synergie aus CAD und numerischen 3D-Modellen eine Reduzierung der Ressourcenanforderungen bei der Gittererzeugung und der numerischen Lösung auf ein Zehntel dessen, was bei konventionellen CFD-Verfahren benötigt wird. Der Nutzer kann schneller und einfacher CFD-Ergebnisse erzielen und komplexe CAD-Modelle als Quelle für Geometriedaten verwenden. Die Erzeugung von Oberflächen- und Volumennetzen mit herkömmlichen CFD-Tools basiert zudem meistens auf körperangepassten Algorithmen. Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung eines Netzes, das nach dem Prinzip eines eingetauchten Festkörpers erzeugt wurde (6). Bei diesem Konzept beginnt die Netzerzeugung unabhängig von der eigentlichen Geometrie, und die Zellen können die Grenzen zwischen Festkörpern und Fluiden beliebig oft kreuzen (siehe Abb. 1 der Geometrie einer Flügel-Rumpf-Verbindung).

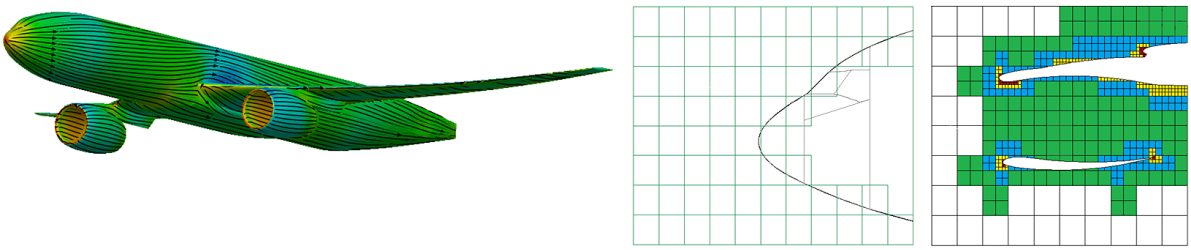


Abbildung 1: Kartesisches Gitter nach dem Prinzip eingetauchter Festkörper ohne Gitterverfeinerung (links) und mit Gitterverfeinerung (rechts)

Ein solches Gitter, das nach der Immersed-Boundary-Methode erzeugt wurde, kann als Quadernetz definiert werden, dessen rechtwinklige Zellen sowohl aneinander als auch am Berechnungsraum angrenzen und entlang der kartesischen Koordinaten ausgerichtet sind. Quader, die von der Oberfläche durchschnitten werden, können gemäß den für die Oberfläche definierten Randbedingungen gesondert behandelt werden (die Methode wird in diesem Paper beschrieben). Jeder Quader kann in acht kleinere Quader geteilt werden (Abb. 1), um eine höhere Auflösung der Geometrie zu erreichen oder singuläre Fluidströmungen zu berücksichtigen. Das nach dem Prinzip eingetauchter Festkörper erzeugte Gitter ist auch für Tetraeder und andere geometrische Körper einsetzbar. Bezüglich der Praxistauglichkeit der numerischen Annäherung sind jedoch kartesische Gitter zu bevorzugen, da sie für CFD-Anwendungen grundsätzlich die maximale Genauigkeit gewährleisten.

Die Abbildung von Geometrien durch kartesische Gitter bedeutet immer, dass sich die Zellen entweder im Festkörper, im Fluid oder im Schnittbereich der „Immersed Boundary" befinden. Im einfachsten Fall besteht eine kartesische Zelle innerhalb der Festkörper-Fluid-Grenze aus zwei Kontrollvolumina (KV): einem Fluid-KV und einem Festkörper-KV. Die Anzahl der Kontrollvolumina innerhalb einer Zelle kann beliebig hoch sein: drei im Fall einer dünnen Wand (Fluid-Festkörper-Fluid) oder mehr, wenn die dünne Wand aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften besteht (Abb. 2). Diese grundlegende Philosophie der Existenz mehrerer Kontrollvolumina innerhalb einer Netzzelle ist namensgebend für die Bezeichnung SmartCells™. Eine SmartCell kann in der Regel um die 20 KV enthalten.

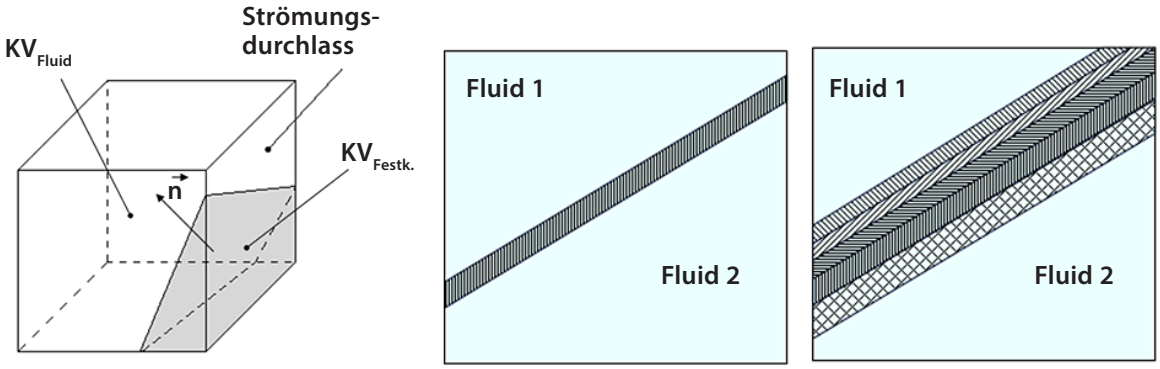


Abbildung 2: Die einfachste Form einer SmartCell mit zwei Kontrollvolumina (KV) (links), mit drei Kontrollvolumina (Fluid-Festkörper-Fluid) im Fall einer Wand (Mitte) und mit sieben Kontrollvolumina im Fall einer Wand, die aus fünf Schichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften besteht (rechts)

Neben der Auflösung von zwei oder mehreren KV innerhalb einer SmartCell wurden im Laufe der Jahre einzigartige Verfahren entwickelt (z. B. Behandlung von Grenzschichten, dünnen Wänden und engen Kanälen), die auf diese Kontrollvolumina angewendet werden können, um die Scherspannung oder den Wärmestrom korrekt zu berechnen, wenn die Gitterauflösung zu niedrig ist, um solche Phänomene durch direkte numerische Modellierung abzubilden. Diese Verfahren werden nachstehend beschrieben. Das Konzept der Auflösung an der Festkörper-Fluid-Grenze nennen wir das SmartCells™-Verfahren. Unser einzigartiger Ansatz basiert auf einer Kombination von Kontrollvolumina für Fluide und Festkörper innerhalb einer SmartCell. Um auf diese Weise präzise, industrietaugliche Ergebnisse zu erzielen, werden neben der vollständigen numerischen 3D-Modellierung deformierbarer Medien in der Festkörper- und der Fluidzone weitere ingenieurtechnische Verfahren angewendet. Für jedes Kontrollvolumen werden alle erforderlichen Geometrieparameter aus dem nativen CAD-Modell extrahiert und berechnet. So können alle Aspekte der Geometrie spezifiziert und die PLM-Daten für die parametrische CFD-Simulation einfach aus einem MCAD-Programm übernommen werden.

Das FloEFD™ SmartCells™-Verfahren kombiniert CAD und CFD auf eine Weise, die auch bei einem verhältnismäßig groben Netz eine ausreichende Auflösung der Geometriemerkmale gewährleistet. Mehrschichtige Kontrollvolumina werden nicht nur für die Modellierung von Fluidströmungen immer wichtiger, sondern auch für Wärmeübertragungsphänomene wie Übergangswiderstände und Berechnungen der Jouleschen Wärme in einem Festkörper (eine vollständig gekoppelte, multiphysikalische Anwendung). Die Kontrollvolumina für Festkörper und Fluide können einander innerhalb einer SmartCell mehrmals abwechseln (siehe z. B. Abb. 3).

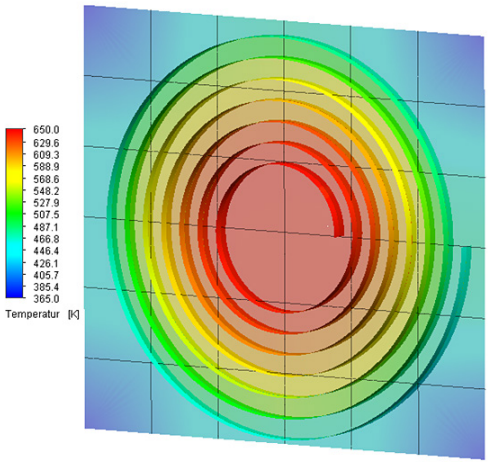


Abbildung 3: Mehrere Kontrollvolumina (Festkörper-Fluid-Festkörper-Fluid …) in einer Anordnung von SmartCells™ zur Simulation einer Heizspirale

SYNERGISTISCHE VERFAHREN DER 3D-MODELLIERUNG MIT SMARTCELLS

Innerhalb der Fluidbereiche einer SmartCell können Strömungsphänomene durch ein System von 3D-Differentialgleichungen beschrieben werden, die die Massenerhaltung des Fluidmediums sowie dessen Impuls, Energie und Turbulenzeigenschaften charakterisieren. Das auf der SmartCells™-Technologie basierende Produkt FloEFD™ kann sogar laminare und turbulente Strömungen (11) im selben Berechnungsraum berücksichtigen. Laminare Strömungen haben eine niedrige Reynoldszahl. Wenn die Reynoldszahl in einem Berechnungsraum einen bestimmten Wert überschreitet, geht die laminare in eine turbulente Strömung über. Zur Simulation turbulenter Strömungen werden in FloEFD™ Favre-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen eingesetzt. Dabei werden die Auswirkungen der Turbulenz auf die Strömungsparameter zeitlich gemittelt, wohingegen weitreichende, zeitabhängige Phänomene direkt berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Vorgehensweise werden die Gleichungen um zusätzliche Parameter erweitert, die als Reynoldsspannungen bekannt sind. Dafür sind weitere Daten erforderlich. Zur Schließung dieses Gleichungssystems werden in FloEFD™ Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie und ihre Dissipationsrate verwendet, und zwar anhand des modifizierten k-ε-Turbulenzmodells mit Dämpfungsfunktionen nach Lam und Bremhorst (12).

Innerhalb der Festkörperbereiche einer SmartCell berechnet FloEFD™ zwei Arten von physikalischen Phänomenen: Wärmeleitung und Gleichstrom, woraus in der Energiegleichung die entsprechende Joulesche Wärme resultiert. Jedes dieser Phänomene wird durch eine 3D-Differentialgleichung mit partiellen Differenzen beschrieben. Wenn ein Festkörper aus mehreren Feststoffen besteht, die in einer Zelle aneinandergrenzen, können die Wärmeübergangswiderstände zwischen den Feststoffen bei der Berechnung der Wärmeleitung berücksichtigt werden. So können für die Kontaktflächen konstante Temperaturstufen ermittelt werden. Der Energieaustausch zwischen Fluid- und Feststoffmedien wird über den Wärmestrom berechnet, der entlang der Normale zur Festkörper-Fluid-Grenze fließt. Dabei werden die Temperatur der Festkörperoberfläche, die Eigenschaften der Fluidgrenzschicht und ggf. auch der Strahlungswärmeaustausch berücksichtigt. Zur Abbildung des Strahlungswärmeaustausches bietet FloEFD™ mehrere Modelle: Von Raytracing, auch bekannt als DTRM (Discrete Transfer Radiation Model) über Discrete Ordinates (DO)-Strahlungsmodelle bis hin zu Monte-Carlo-Modellen, bei denen auch die spektralen Eigenschaften einbezogen werden können. Diese Strahlungsberechnungen bewirken, dass in SmartCells™ mit eingetauchten Festkörper-Fluid-Grenzen bzw. in Feststoffzellen mit semitransparenten Festkörpern entsprechende Wärmeströme berücksichtigt werden können.

Das größte Problem bei groben CFD-Gittern, die nach dem Prinzip eingetauchter Festkörper erzeugt wurden, ist derzeit die Auflösung der Grenzschichten. In den meisten Fällen sind solche Gitter zu grob, um Navier-Stokes-Gleichungen entsprechend genau lösen zu können – besonders in Grenzschichten mit hohen Temperaturgradienten. Daher wird für die Berechnung des Schubspannungswiderstands und des Wärmestroms an der Wand das Prandtl-Prinzip für Grenzschichten angewendet (13). Dieser Ansatz ist vergleichbar mit der aus konventionellen CFD-Codes bekannten Wandfunktion. Für die Wandbehandlung mit FloEFD™ SmartCells™ wird jedoch eine neue, proprietäre Zweistufen-Wandfunktion (2SWF) eingesetzt. Diese Funktion ermöglicht die Kopplung der Grenzschichtberechnung an die Darstellung der Kernströmungen und einen automatisierten Hybridansatz:

1. Die Behandlung einer dünneren Grenzschicht, wenn die Anzahl der Zellen in der gesamten Grenzschicht für eine direkte oder vereinfachte Bestimmung des Strömungs- und Wärmeprofils nicht ausreicht (Abb. 4);
2. Die Behandlung einer dickeren Grenzschicht, wenn die Anzahl der Zellen in der gesamten Grenzschicht die für eine ausreichend genaue Darstellung der Grenzschicht erforderliche Anzahl übertrifft (Abb. 4);
3. Bei mittleren Zuständen wendet der FloEFD™-Code automatisch eine Mischung aus beiden Ansätzen an, wobei ein reibungsloser Übergang zwischen den beiden Modellen erfolgt (Abb. 4).

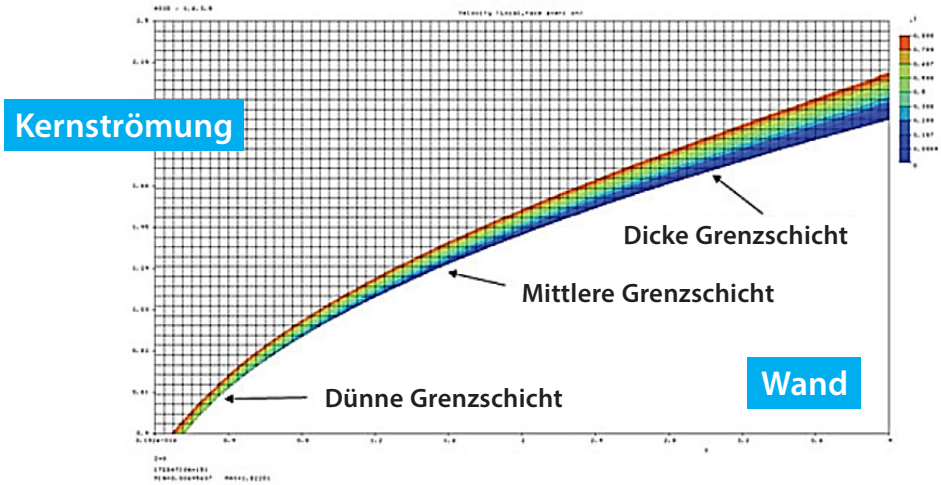


Abbildung 4: Dünne, mittlere und dicke Grenzschicht

Prinzipiell kann diese Art der Turbulenzmodellierung auf dynamische sowie auf Temperatur- und Konzentrationsgrenzschichten angewendet werden. Für die Behandlung von dünnen Grenzschichten werden in FloEFD™ Prandtl-Gleichungen für Strömungslinien an den Wänden angewendet (12). Diese Gleichungen werden mittels eines integralen Grenzschichtverfahrens gelöst (12). Bei turbulenten Strömungen erfolgt die Bestimmung der turbulenten Viskosität anhand der Van-Driest-Hypothese zur Kombination von Längen in turbulenten Grenzschichten (13). Der Einfluss der Wandrauheit (äquivalente Sandkornrauheit), der Kompressibilität und der Turbulenz der externen Strömung an der Grenzschicht wird durch halbempirische Koeffizienten modelliert, mit denen die Scherspannung der Wand und der Wärmestrom vom Fluid zur Wand korrigiert werden. Über die Berechnung der dünnen Grenzschichten werden die Gesamtdicke der Grenzschicht, die Scherspannung der Wand und der Wärmestrom vom Fluid zur Wand berechnet und als Randbedingungen für die Navier-Stokes-Gleichungen eingesetzt. Wenn die Anzahl der Zellen in der gesamten Grenzschicht ausreichend hoch ist, werden die bekannten Wandfunktionen in modifizierter Form angewendet. Anstelle des klassischen Ansatzes mit logarithmischem Geschwindigkeitsprofil wird in FloEFD™ das vollständige Profil nach Van Driest verwendet (13). Alle anderen Annahmen sind mit den klassischen Wandfunktionen in konventionellen CFD-Programmen vergleichbar.

Die Darstellung von dünnen Grenzschichten ist ein zentrales Element des FloEFD™ SmartCells™-Verfahrens. Ein ähnlicher Ansatz wird bei der Modellierung von Strömungsphänomenen in engen flächigen Vertiefungen oder engen zylindrischen Kanälen verfolgt. Der Einsatz dieser Technologie in Verbindung mit der Vereinigung von CAD und CFD bringt zusätzliche Vorteile für die Auflösung von Strömungen in dedizierten Elementen komplexer Modelle, wenn die Anzahl der Netzzellen für eine vollständige 3D-Modellierung nicht ausreicht. Über den direkten Zugriff auf native CAD-Daten kann die FloEFD™-Plattform erkennen, dass eine Geometrie Strömungsdurchlässe in Form von Röhrchen oder engen Kanälen bilden kann, da diese Informationen im CAD-System vorhanden sind. In diesen Fällen wird die sonst übliche Modellierung solcher Durchlässe mittels 3D-Navier-Stokes-Gleichungen ohne wesentliche Beeinträchtigung der Genauigkeit durch analytische oder empirische Daten ersetzt. Neben dem Auflösen von Strömungsphänomenen durch die effiziente Vereinfachung von technischen Konzepten konnte der SmartCells™-Ansatz erfolgreich auf Wärmeübertragungsphänomene in dünnen festen Wänden und sogar mehrschichtigen Strukturen innerhalb einer Zelle angewendet werden. Mithilfe weiterer technischer Verfahren können SmartCell-Modelle mit groben Gittern auch für andere Komponenten wie Leiterplatten, Modelle zweier Widerstände, Heatpipes usw. eingesetzt werden. Die in FloEFD™ realisierten Technologien wurden von Ivanov et al umfassend validiert und verifiziert (10).

INDUSTRIELLE VALIDIERUNG DER FLOEFD-SMARTCELL-TECHNOLOGIE

A) DESIGN EINES RIPPENKÜHLKÖRPERS

Rippenkühlkörper werden heute in unzähligen elektronischen Geräten verbaut. Für genaue Simulationsergebnisse mit konventionellen CFD-Tools bedarf es einer ausreichenden Anzahl von Netzzellen in jedem Kanal des Kühlkörpers. Der Einsatz von FloEFD™ SmartCells™ an einem rechtwinkligen Gitter in Verbindung mit den integrierten numerischen und ingenieurtechnischen Methoden und der Vereinigung von CAD und CFD sorgt dafür, dass selbst mit einem relativ groben Gitter ausreichend genaue CFD-Ergebnisse erzielt werden. Im nachstehenden Beispiel (Abb. 5) wird die zuvor beschriebene Technologie für enge Kanäle angewendet, und zwar mit nur einer oder zwei Zellen pro Kanal. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der FloEFD™-Berechnungen an einem groben Netz (insgesamt 3.900 Zellen) mit experimentellen Daten (14) anhand eines verhältnismäßig feinen Netzes (insgesamt 180.000 Zellen). In diesem Beispiel werden in FloEFD™ Grenzschichtverfahren und Berechnungsmodelle für dünne Wände und enge Kanäle gemeinsam mit numerischen 3D-Methoden für Navier-Stokes-Gleichungen in Fluidzonen und Wärmeübertragungsgleichungen in Festkörperbereichen eingesetzt. Der Ausschnitt des groben Berechnungsgitters (Abb. 5 rechts oben) entspricht dem Gitter mit insgesamt 3.900 Zellen.

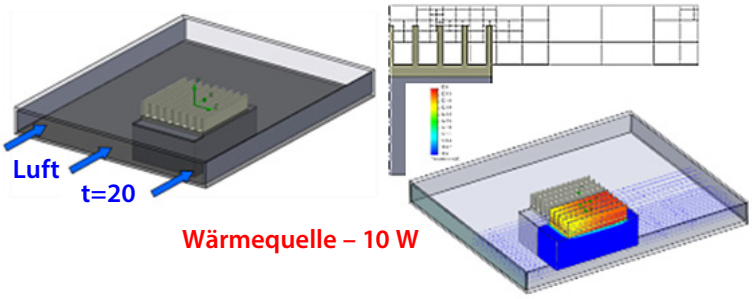


Abbildung 5: FloEFD™-Simulation enger Kanäle in eines Rippenkühlkörpers

Ström.-Geschw.	0,9 m/s		1,3 m/s	
$R_{t\,exp}$ K/W	3,72		3,20	
Zellenanz.	3.900	180.000	3.900	180.000
$R_{t\,calc}$ K/W	3,714	3,77	3,213	3,22
δ, %	0,2	1,3	0,4	0,6

Tabelle 2: Vergleich von experimentellen Messwerten mit der FloEFD™-Simulation eines Rippenkühlkörpers mit grobem und feinem Netz

Das Beispiel zeigt eindeutig, dass FloEFD™ aufgrund der im SmartCells™-Konzept integrierten Technologien mit Tausenden, Zehntausenden oder wenigen Millionen kartesischer Zellen genaue Ergebnisse liefert, besonders im Vergleich zu konventionellen CFD-Codes, für die in der Regel zur Erreichung derselben Genauigkeit viele Millionen Zellen benötigt werden.

B) AERODYNAMIKVERGLEICH MIT ASMO-FAHRZEUG

Nachstehend wird die mit FloEFD™ durchgeführte Simulationsprognose für die Karosserie des aerodynamischen Studienmodells (ASMO) mit experimentellen Daten verglichen (7). Dieses Windkanalmodell wurde vor vielen Jahren von Daimler Benz geschaffen, um Fahrzeugkonfigurationen mit sehr niedrigem Strömungswiderstand zu untersuchen und verschiedene CFD-Tools testen zu können. Das 3D-ASMO-Modell ist in Abb. 6 dargestellt.

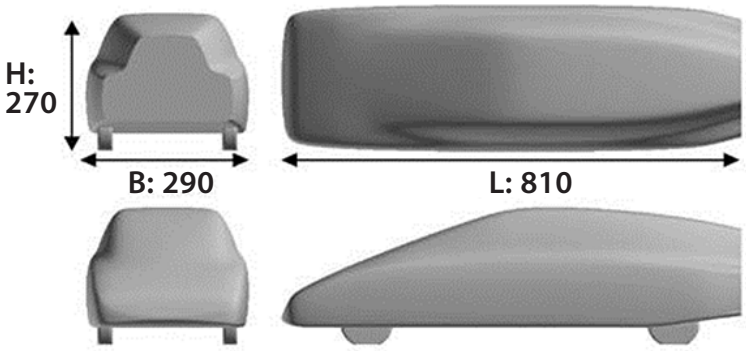


Abbildung 6: Geometrie des ASMO-Modells (Abmessungen in mm)

Die CFD-Berechnungen mit FloEFD™ wurden unter der Annahme einer Luftströmung von 50 m/s durchgeführt. Während der Simulation wurde eine weitere automatisierte FloEFD™-Technologie für die adaptive Gitterverfeinerung zur Behandlung von singulären Strömungen eingesetzt (Abb. 7). Das ursprüngliche Gitter für die Berechnung mit SmartCells™ bestand aus 200.000 kartesischen Zellen, und das endgültige Netz nach der adaptiven Gitterverfeinerung von Regionen mit großen Strömungsgradienten enthielt ca. 2 Millionen Zellen.

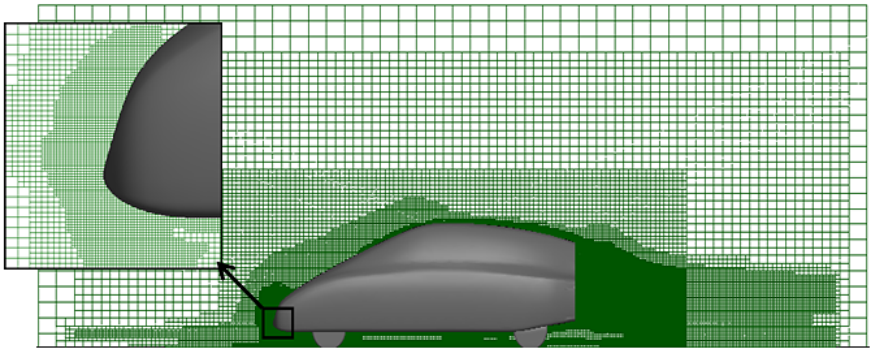


Abbildung 7: Endgültiges FloEFD™ SmartCells™-Gitter des ASMO-Vergleichsmodells

Daraus wird ersichtlich, dass die Synergie aus numerischen 3D-Methoden und der Auflösungsmethode für Grenzschichten in SmartCells™ auch ohne die hohe Auflösung der Grenzschicht durch viele Zellen im Berechnungsgitter eine hohe Genauigkeit gewährleistet (Abb. 7). Darüber hinaus wird sehr viel Rechenkapazität eingespart, die bei konventionellen CFD-Methoden eingesetzt werden müsste. Die Verteilungen der Druckkoeffizienten auf der Oberfläche des ASMO-Modells sind gemeinsam mit den experimentellen Daten in Abb. 8 dargestellt (7). Der mit FloEFD™ berechnete Strömungswiderstand betrug 0,158, der von Volvo ermittelte experimentelle Wert betrug ebenfalls 0,158 und der Daimler Benz-Wert lag bei 0,153. Das verdeutlicht die gute Übereinstimmung zwischen den Prognosen und den Windkanaldaten.

Die hier beschriebene, in FloEFD™ verfügbare SmartCells™-Technologie wird in der Automobilindustrie für zahlreiche Aufgaben wie die Auslegung von LED-Beleuchtungen (6 und 15), die Modellierung von Verbrennungsmotoren (11) und vieles mehr eingesetzt. Mit diesen Technologien können auch wesentlich komplexere physikalische Vorgänge wie z. B. Kavitation modelliert werden (16).

2013 wurde das mit FloEFD™ realisierte SmartCells™-Verfahren von der japanischen Society of Automotive Engineers (JSAE) einem Blindvergleich bei der Simulation von Kfz-Aerodynamik unterzogen (17). Dabei überzeugte FloEFD™ durch seine Robustheit und die genaue Turbulenzmodellierung: Mit deutlich weniger Zellen konnten vergleichbare bzw. bessere Ergebnisse erzielt werden als mit konventionellen CFD-Verfahren.

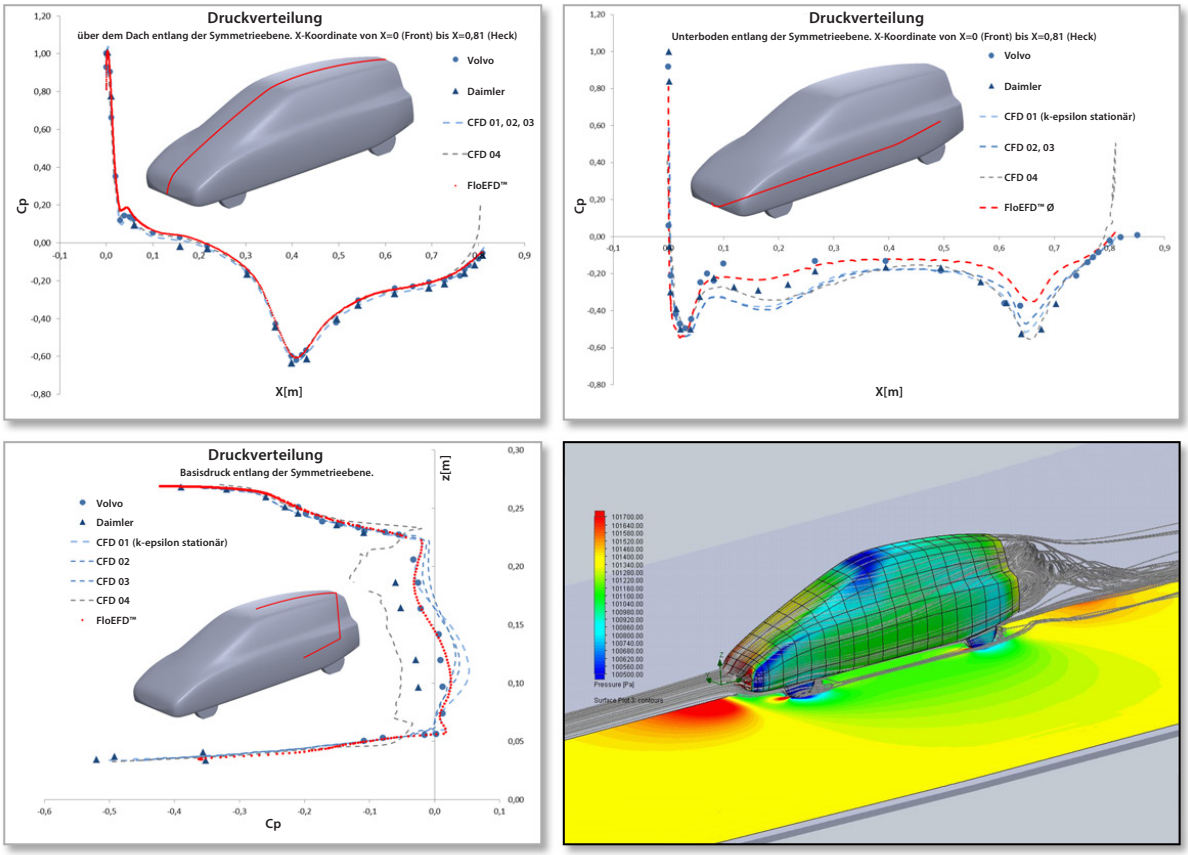


Abbildung 8: Vergleich der mit FloEFD™ berechneten Druckkoeffizienten mit experimentellen Daten, Darstellung des gesamten Strömungsfelds

FAZIT

Der größte Engpass in der Produktivität von industriellen CFD-Tools sind Probleme bei der schnellen und effizienten Verarbeitung von komplexen CAD-Geometrien durch die Erzeugung von geeigneten Netzen innerhalb realistischer Zeitvorgaben. In CAD-Systemen integrierte CFD-Tools wie FloEFD™ sind nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn entsprechende Berechnungsmodelle entwickelt werden, die schnelle, zuverlässige und genaue Ergebnisse gewährleisten. Möglich wird dies durch die synergetische Verbindung von numerischen und ingenieurtechnischen Methoden zur Lösung von Aufgaben in den Bereichen Fluiddynamik und Wärmeübertragung mittels adaptiver rechtwinkliger Gitter. Die Umsetzung dieses Konzepts heißt SmartCells™. Das auf dieser Technologie basierende Softwareprodukt FloEFD™ vereint Präzision und Effizienz in einem praxisorientierten Tool für CFD-Spezialisten und Entwicklungsingenieure und kann in vielen Branchen für verschiedenste Aufgaben eingesetzt werden. SmartCells™ können komplexe Geometrien in Sekunden oder Minuten vernetzen, wohingegen dieser Prozess mit herkömmlichen CFD-Methoden oft Stunden, Tage oder sogar Wochen dauern kann. Das Konzept ermöglicht eine vorgelagerte Simulation und ist in verschiedenen Phasen des Designzyklus anwendbar. Das beschleunigt die Produktentwicklung und schafft einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil. Zudem wird die ewige Schwachstelle der CFD-Simulation beseitigt – die hohen fachlichen und zeitlichen Anforderungen der Netzerzeugung. Dadurch entstehen wünschenswerte Voraussetzungen für eine echte Demokratisierung der CFD-Nutzung.

VERWEISE

1. A. A. Sobachkin, G. E. Dumnov: „Numerische Grundlagen der konstruktionsbegleitenden CFD-Simulation“, Protokoll des NAFEMS-Weltkongresses in Salzburg, Juni 2013
2. R. K. Hanna, J. Parry: „Zurück in die Zukunft: Trends in der kommerziellen CFD-Simulation“, NAFEMS-Weltkongress in Boston, Juni 2011
3. H. F. Boysan, D. Choudhury, M. S. Engelman: „Kommerzielle CFD-Simulation im Dienst der Industrie: Die ersten 25 Jahre“ in „Anmerkungen zur numerischen Strömungsmechanik und multidisziplinärem Design“, Ausgabe 100, 2009, Seiten 451-461
4. D. B. Spalding: „Geschichte, Gegenwart und Zukunft der CFD-Simulation“, Vorlesung beim 16. Seminar an der Leontiev-Schule in Sankt Petersburg, Russland, 21.-25. Mai 2007 http://www.cham.co.uk/Docs/CFDeng3.ppt
5. B. E. Launder, D. B. Spalding: „Die numerische Berechnung von turbulenten Strömungen“, Computermethoden in der angewandten Mechanik und Konstruktion, 3 (2): 269–289, März 1974. doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2
6. Boris Marovic: „Die neue Rolle der CFD-Simulation angesichts immer kürzerer Entwicklungszyklen und die Problematik komplexer Geometrien in der Beleuchtungsbranche“, ISAL 2013, Darmstadt, September 2013
7. G. Dumnov, A. Kharitonovich, B. Marovic, A. Sobachkin: „Schnellere Simulationen durch Synergien zwischen numerischen und ingenieurtechnischen Methoden für Spezialisten und Entwicklungsingenieure“, FISITA Automotive Congress, September 2016, Busan, Südkorea
8. M. Sabeur: „Vorgelagerte CFD-Simulation in der Kfz-Entwicklung“, NAFEMS-Europakonferenz, Dezember 2015, München
9. I. Weinhold, J. Parry: „Die dritte Welle der CFD-Simulation“, NAFEMS-Weltkongress in Salzburg, Juni 2013
10. A. V. Ivanov, T. V. Trebunskikh, V. V. Platonovich: „Validierungsmethoden für moderne konstruktionsbegleitende CFD-Codes: Vom allgemeinen Test zum Industrie-Benchmark“, Protokoll des NAFEMS-Weltkongresses 2013 in Salzburg, 9.-12. Juni 2013
11. Sudhindra Uppuluri, Joe Proulx, Boris Marovic, Ajay Naiknaware: „Charakterisierung thermischer Wechselwirkungen zwischen Kühlmittel, Öl und Umgebung eines Verbrennungsmotors“, SAE-Weltkongress 2013 (Detroit, USA), April 2013
12. C. K. G. Lam, K. A. Bremhorst: „Modifiziertes Modell für Prognosen von Turbulenzen in Wandnähe“, ASME Journal of Fluid Engineering, 1981, 103: 456-460

13. E. R. Van Driest: „Turbulente Strömungen in Wandnähe“, Journal of the Aeronautical Science, 1956, 23(10): 1007

14. H. Jonsson, B. Palm, 1998: „Thermisches und hydraulisches Verhalten von Platten- und Rippenkühlkörpern bei variabler Nebenströmung“, 1998, Protokoll der Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM '98), IEEE, Seiten 96-103, ISBN 0.7803-4475-8.

15. J. C. Watson, G. Dumnov, A. Ivanov, A. Muslaev, M. Popov: „Bewertung von CFD-Technologien zur Wasserfilm- und Strahlungsmodellierung für Fahrzeugbeleuchtungen“, Protokoll des NAFEMS-Weltkongresses 2015 und der 2. Internationalen SPDM-Konfrerenz, San Diego, USA, 21.-24. Juni 2015

16. Gennady Dumnov, Alexander Muslaev, Viatcheslav Streltsov, Boris Marovic: „Kavitationssimulation für Kfz-Anwendungen mit Solvern für isothermes Verhalten“, SAE-Weltkongress 2013 (Detroit, USA), April 2013

17. Nakashima Takuji, Sasuga Nobuhiro, Ito Yuichi, Ikeda Masami, Ueda Iichiro, Kato Yoshihiro, Kitayama Masashi, Kito Kozo, Koori Itsuhei, Koyama Ryutaro, Shimada Yoshihiro, Hanaoka Yuji, Higaki Tatsuhiko, Fukuda Kota, Yamamura Jun, Li Ye: „Benchmark für CFD-Aerodynamik an einem vereinfachten Fahrzeugmodell“, Japan, JSAE, Paper-Nr.: 20134343, 2013: 8-28

Für aktuelle Produktinformationen rufen Sie uns an oder besuchen Sie: **www.mentor.com**

©2017 Mentor Graphics Corporation, all rights reserved. Der Inhalt dieses Dokuments ist Eigentum der Mentor Graphics Corporation. Der rechtmäßige Empfänger ist berechtigt, das vorliegende Dokument für interne Zwecke auszugsweise oder vollständig zu vervielfältigen, sofern dieser Hinweis auf allen Kopien verbleibt. Durch die Übernahme dieses Dokuments verpflichtet sich der Empfänger, die darin enthaltenen Informationen auf eine wirtschaftlich angemessene Weise vor unbefugter Nutzung durch Dritte zu schützen. Alle in diesem Dokument genannten Markennamen sind das Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.

Unternehmenssitz
Mentor Graphics Corporation
8005 SW Boeckman Road
Wilsonville, OR 97070 USA
Tel.:+1.503.685.7000
Fax: +1.503.685.1204

Silicon Valley
Mentor Graphics Corporation
46871 Bayside Parkway
Fremont, CA 94538 USA
Tel.:+1.510.354.7400
Fax: +1.510.354.7467

Europa
Mentor Graphics Deutschland GmbH
Arnulfstraße 201
80634 München
Deutschland
Tel.:+49.89.57096.0
Fax:+49.89.57096.400

Pazifischer Raum
Mentor Graphics (Taiwan)
11F, No.120, Section 2,
Gongdao 5th Road
HsinChu City 300,
Taiwan, ROC
Tel.:+886.3.513.1000
Fax:+886.3.573.4734

Japan
Mentor Graphics Japan Co. Ltd.
Gotenyama Trust Tower 7-35, Kita
Shinagawa 4-chome Shinagawa-ku
Tokyo Japan 140-0001
Tel.:+81.3.5488.3030
Fax:+81.3.5488.3021

Vertrieb und Produktinformation: sales_info@mentor.com

Mentor®
A Siemens Busines

MGC 07-17 TECH14770-DE