

AUTOREN



Wibke Leudesdorff, M.Sc.
ist wissenschaftliche
Mitarbeiterin am Institut
für Energie und
Kraftwerkstechnik
der Technischen Uni-
versität Darmstadt.



Dr.-Ing. Thorsten Unger
ist Fachreferent CFD
Strömungssimulation der
Porsche AG in Stuttgart.



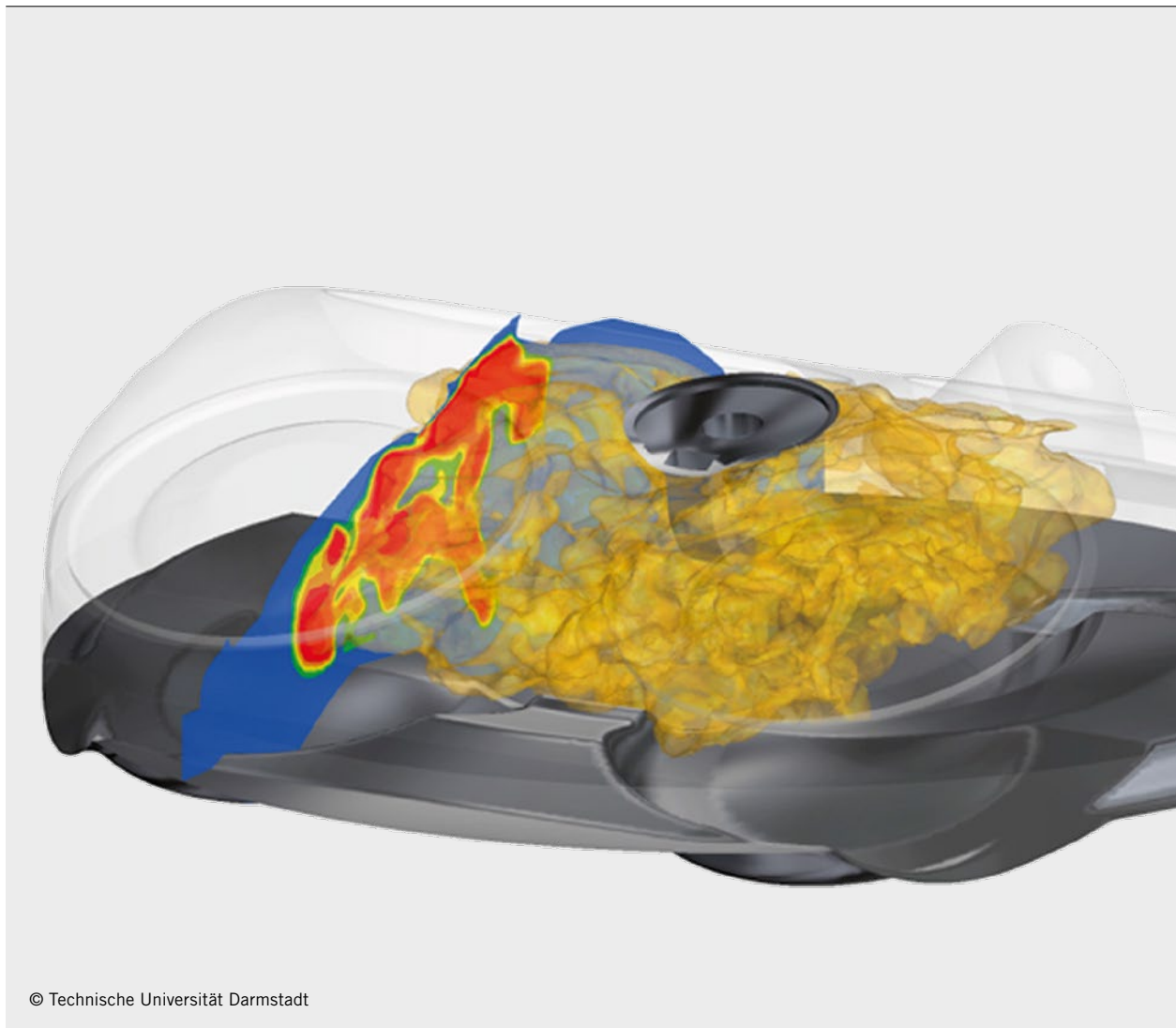
**Prof. Dr.-Ing.
Johannes Janicka**
ist Fachgebietsleiter
des Instituts Energie und
Kraftwerkstechnik
der Technischen Uni-
versität Darmstadt.



**Prof. Dr.-Ing.
Christian Hasse**
ist Fachgebietsleiter
des Instituts Simulation
reaktiver Thermo-Fluid
Systeme der Technischen
Universität Darmstadt.

Skalenauflösende Simulationen für die Brennverfahrensentwicklung

Im akademischen Umfeld ist die Large-Eddy-Simulation ein etablierter Forschungsansatz. In der Industrie werden dagegen hauptsächlich Simulationen durchgeführt, die auf den Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen basieren. Da viele motorspezifische Phänomene wie Zyklenschwankungen, Klopfen oder Fehlzündung stochastischer Natur sind und mit diesem Ansatz nur qualitativ beschrieben werden können, besteht ein zunehmendes Interesse in der Industrie, skalenauflösende Techniken wie die Large-Eddy-Simulation zu etablieren. Im Rahmen des FVV-Forschungsprojekts 1215 wurden daher an der Technischen Universität Darmstadt der aktuelle Nutzungsgrad der Large-Eddy-Simulation in der akademischen und der industriellen Umgebung bewertet.



© Technische Universität Darmstadt

1	MOTIVATION
2	ERGEBNISSE UND DISKUSSION
3	GEMEINSAME STRATEGIE FÜR SKALENAUFLÖSENDE MOTORSIMULATIONEN
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Skalenauflösende Simulationen (Scale-Resolving Simulations, SRS) stellen einen etablierten Forschungsansatz an Universitäten zur Untersuchung von nicht-reaktiven und reaktiven Strömungen dar. In vielen Bereichen sind sie zum De-facto-Standard geworden und ersetzen Reynolds-Averaged-Navier-Stokes(RANS)-Simulationen fast vollständig. Dadurch wurden bedeutende wissenschaftliche Fortschritte erzielt. Diese können zu einem Großteil auf die verbesserte Auflösung der Strömung und insbesondere der Mischung sowie deren instationären Wechselwirkung mit den lokalen Flammenstrukturen zurückgeführt werden. In Kombination mit (zeitlich und/oder räumlich) hochaufgelösten experimentellen Daten hat sich das wissenschaftliche Verständnis der Turbulenz-Chemie-Wechselwirkungen signifikant verbessert und entsprechende Modelle wurden entwickelt. Diese wurden erfolgreich in Large-Eddy-Simulationen (LES) stationärer Verbrennungsprozesse eingesetzt. Beispielsweise ist die Nutzung von LES für die Verbrennung in Gasturbinenkammern nicht nur an der Universität, sondern auch in der Industrie fest etabliert.

Insbesondere im akademischen Umfeld besteht ein erhöhtes Interesse an LES für Verbrennungsmotoren. Ein Überblick über die jüngsten Entwicklungen findet sich in [1, 2], wobei sich [2] speziell auf die Brennverfahrensentwicklung konzentriert. Die Hauptmotivation für die Verwendung der LES anstelle von RANS-Simulationen ist die Möglichkeit der Untersuchung von Zyklenschwankungen, Klopfen oder Fehlzündungen. Diese hochauflösen-

den Simulationen erlauben es, Fluktuationen für einen spezifischen Betriebspunkt innerhalb der Ursache-Wirkungs-Kette zu analysieren. Hierdurch ist es möglich, zu quantifizieren, wie verschiedene Phänomene miteinander interagieren und wie dies zu zyklischen Fluktuationen führt. Diesbezüglich wurden Ergebnisse für nicht-reaktive [3] und reaktive Fälle [4, 5] veröffentlicht.

Ganz grundsätzlich ist ein eindeutiger und stetig zunehmender Trend zu höheren Auflösungen erkennbar, sodass der Modellierungsaufwand für Strömung und Mischung reduziert werden oder die Prozesse in den Bereichen in Wandnähe genauer beschrieben werden können. Dies erfordert jedoch erhebliche Rechenkapazitäten, weshalb Simulationen üblicherweise auf Hochleistungs-Clustern oder Supercomputern durchgeführt werden. Insbesondere in Europa wird der Zugang zu diesen Einrichtungen für die akademische Forschung durch eine Reihe von nationalen und internationalen Programmen gewährleistet.

Im Gegensatz dazu ist die RANS-Simulation das Standardwerkzeug für die Konzeption und Entwicklung industrieller Verbrennungsprozesse. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Untersuchung mehrerer Betriebsbedingungen oder Geometrievariationen anstelle der detaillierten Analyse eines einzelnen Betriebspunkts. Daher können RANS-Ansätze nur qualitative Ergebnisse für hochaktuelle Fragestellungen wie zu hochstochastischen Verbrennungszyklen (Klopfen, Fehlzündung, Super-Knock) oder Konzepten zur Magerverbrennung liefern, die an der Magerbrenngrenze arbeiten.

Kooperationen bezüglich SRS zwischen der Industrie und Universitäten, bei denen zum Beispiel die Wechselwirkungen von Strömung und Spray beschrieben werden [6, 7], bestätigen das hohe Potenzial für ein verbessertes Verständnis mit klaren Vorteilen für die industrielle Entwicklung. Hier sind hybride instationäre RANS (URANS)/LES oder Very-Large-Eddy-Simulationen (VLES) aufgrund ihrer reduzierten Rechenanforderungen besonders attraktiv. Es ist jedoch nicht klar, ob diese Ansätze für solche komplexen Phänomene geeignet sind. Trotz gemeinsamer Interessen erscheint

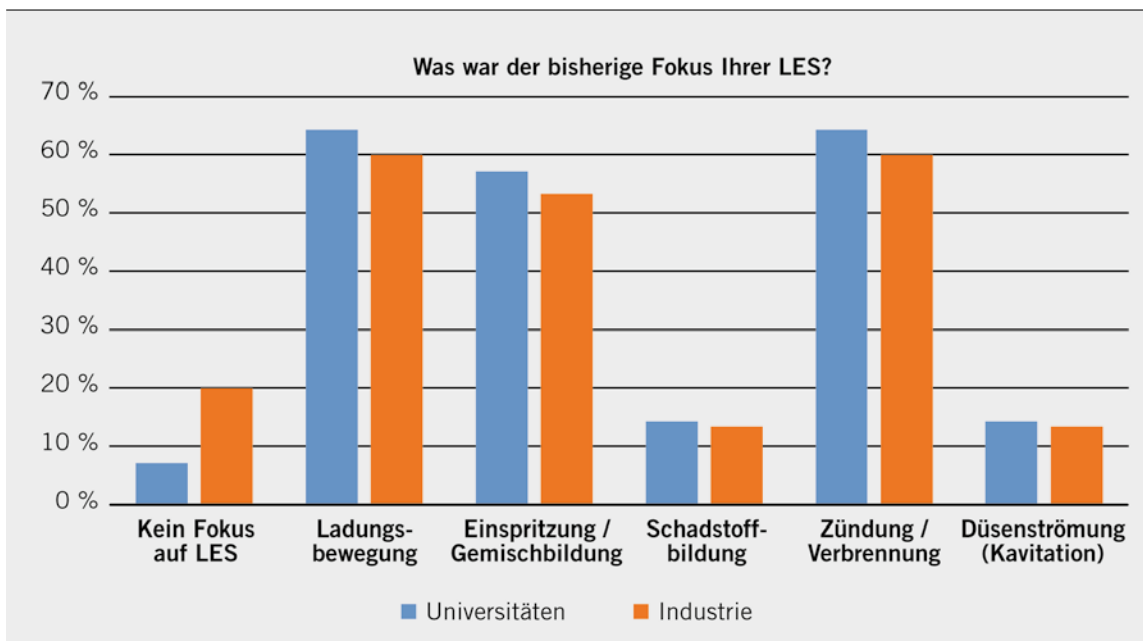


BILD 1 Fokus der LES (© Technische Universität Darmstadt)

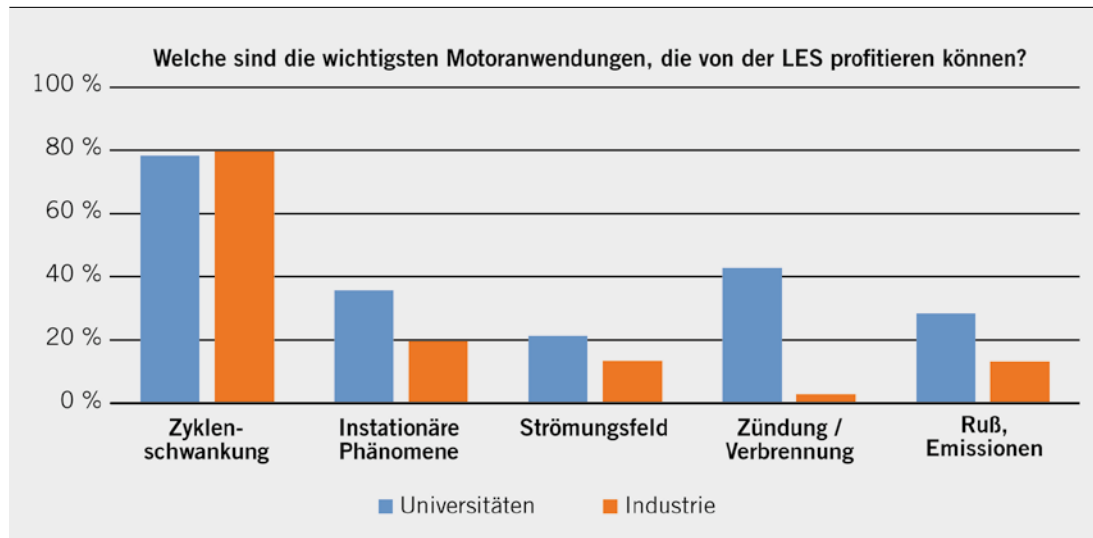


BILD 2 Vorteile der LES im Vergleich zu RANS-Simulationen (© Technische Universität Darmstadt)

es momentan als sehr wahrscheinlich, dass die Unterschiede in der Herangehensweise bei universitärer und angewandter Forschung in Zukunft weiter anwachsen werden. Daher besteht dringender Bedarf an verbesserter und intensivierter Zusammenarbeit. Ein Aspekt ist der fehlende Wissenstransfer von hochauflösenden Simulationen hin zur Modellentwicklung für hybride Verfahren oder VLES. Das übergeordnete Ziel des FVV-Projekts 1215 war daher, eine Strategie für die 3-D-CFD-Modellentwicklung und den Transfer der LES in die industrielle Nutzung vorzuschlagen.

2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Als Ausgangspunkt und erster Teil der Studie wurden eine detaillierte Bewertung und Analyse des derzeitigen Verständnisses der wichtigsten motorrelevanten Einzelprozesse benötigt. Basierend auf Diskussionsergebnissen mit der FVV-Arbeitsgruppe wurden neun Themen identifiziert, die für die SRS von Motorprozessen am relevantesten sind: vorgemischte Flammen, nicht-vorgemischte Flammen/Selbstentzündung, Mehrphasenströmung, Schadstoffe

inklusive Ruß, wandnahe Strömung, Funkenzündung, Klopfen, Vergleichsexperimente zur Modellvalidierung und Qualitätskriterien/Qualitätsbewertung für verbrennungsmotorische Simulationen. Die ausführlichen thematischen Zusammenfassungen finden sich in [8]. Der zweite Teil der Studie, der nachfolgend diskutiert wird, war eine Umfrage zur Bewertung des aktuellen Nutzungsgrads der LES im akademischen und industriellen Umfeld, um zukünftig notwendige Entwicklungen und kritische Fragestellungen zu identifizieren.

2.1 FRAGENKATALOG: EINLEITUNG UND ORGANISATION

Das Hauptziel des FVV-Projekts bestand darin, eine Strategie für 3-D-CFD-Simulationen in Verbrennungsmotoren mit skalenauflösenden Simulationsmethoden zu entwickeln. Diese sollte einen Zeitraum von zehn Jahren umfassen und die Grundlage für die Forschungs- und Entwicklungsstrategie der FVV in diesem Bereich bilden. Neben der profunden Erfahrung der Autoren in diesem Bereich sollte die Forschungs- und Entwicklungsstrategie eine breite Palette von Meinungen relevanter industrieller und akademischer Institutionen widerspiegeln und einbeziehen. Eine allgemein anerkannte Methode, eine zu starke Gewichtung von Einzelmeinungen zu verhindern und die Einbindung von Interessengruppen sicherzustellen, ist ein sorgfältig konzipierter Fragenkatalog.

Nach intensiven Diskussionen und mehreren Iterationen innerhalb der FVV-Arbeitsgruppe und mit ausgewählten Mitgliedern der wissenschaftlichen Gemeinschaft wurde ein Fragenkatalog mit 29 identischen Fragen für die akademische und industrielle Gemeinschaft entwickelt. Weitere 8 Fragen befassen sich mit den spezifischen Bedingungen der industriellen Anwendung skalenauflösender Simulationen. 14 der akademischen Partner (teilweise nur eine Antwort für mehrere, eng kooperierende Institutionen) und 15 der Industriepartner haben sich beteiligt. Der gesamte Fragenkatalog ist im vollständigen Bericht zu diesem Forschungsprojekt [8] aufgeführt.

Der Fragenkatalog wurde in vier Hauptabschnitte untergliedert. Der erste Teil beschäftigte sich mit dem aktuellen Einsatz von skalenauflösenden Simulationen und den vorhandenen Erfahrungen.

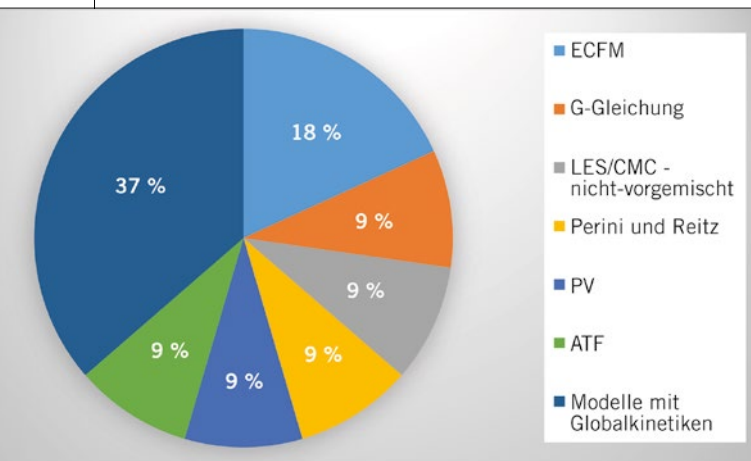


BILD 3 Verwendete Verbrennungsmodelle (© Technische Universität Darmstadt)

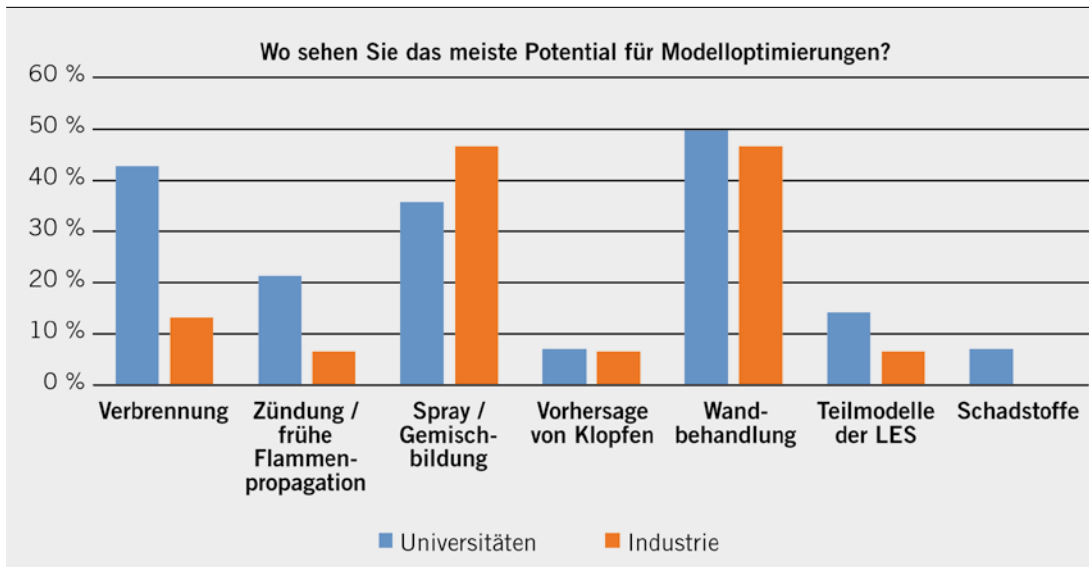


BILD 4 Themen, bei denen signifikante Modellverbesserungen erforderlich sind (© Technische Universität Darmstadt)

Die behandelten Themen waren allgemeine Aspekte wie der Fokus der LES, Pre- und Postprocessing von Daten, Löser und angewandte Modelle für beispielsweise Feinstrukturgrößen, Zweiphasenströmungen, Verbrennung, Zündung und numerische Aspekte. Der zweite Teil befasste sich mit relevanten Beispielen, bei denen RANS-Modelle versagen beziehungsweise nur unzureichende Ergebnisse liefern und skalenauflösende Simulationen Vorteile aufweisen. Der dritte Teil behandelte zukünftige Themen, weswegen die industriellen und akademischen Teilnehmer gebeten wurden, ihre Einschätzungen zur notwendigen Modellweiterentwicklungen sowie zu möglichen Defiziten bei Validierungsdaten und numerischen Methoden zu äußern. Die Identifikation der dringlichsten zu verbessernden Elemente des gesamten Simulationssystems war dabei ein zentrales Thema. Im letzten Teil des Fragenkatalogs wurden die notwendigen nächsten Schritte zur Etablierung der LES für die Brennverfahrensentwicklung adressiert. Diese Fragen wurden nur den industriellen Partnern gestellt und konzentrierten sich insbesondere auf die Verfügbarkeit von Software und Computerressourcen, ihre eigenen Erfahrungen und robuste Arbeitsabläufe.

2.2 FRAGENKATALOG: AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Umfrage sind im Folgenden zusammengefasst, wobei Fragen und Antworten LES als Synonym für skalenauflösende Simulation verwenden.

LES ist relevant für eine breite Palette von Fragestellungen in Verbrennungsmotoren. Bisher eingesetzt wurde sie vorwiegend zur Vorhersage der Ladungsbewegung, Injektion und Gemischbildung sowie Zündung und Verbrennung. Im Gegensatz dazu wurde LES nur vereinzelt verwendet, um die Schadstoffbildung und die Düsenströmung vorherzusagen. Interessanterweise ist das Anwendungsspektrum im akademischen und industriellen Umfeld nahezu identisch, **BILD 1**. Darüber hinaus sehen beiden Seiten klare Vorteile der LES im Vergleich zu RANS-Simulationen bei der Simulation von Zyklenschwankungen, instationären Phänomenen und ganz allgemein der Strömungsfeldvorhersage. Zusätzlich sehen akademische Institutionen Vorteile der LES hinsichtlich der Simulation von Zündung, Verbrennung und der Vorhersage von Emissionen, **BILD 2**. Ganz grundsätzlich zeigt sich, dass klassische Modellierungsansätze dominieren, zum Beispiel die Feinstrukturmodellierung mit dem Smagorinsky-Modell, die Zweiphasen-Modellierung mit klassischen Euler-, Lagrange- oder Euler-Euler-Modellen und die Verbrennungsmodellierung mit Globalkinetiken. Als Beispiel sind die verwendeten Verbrennungsmodelle in **BILD 3** gezeigt. Ein weiteres wichtiges Ergebnis, bei dem Einigkeit herrscht, ist die Notwendigkeit, Modelle zur Beschreibung der wandnahen Prozesse und für Spray- und Gemischbildung zu verbessern, **BILD 4**. Darüber hinaus werden von den akademischen Teilnehmern Verbesserungen bei der Modellierung von Verbrennung, Zündung und

Umschaltventilatoren zur automatischen Kühlerreinigung | www.cleanfix.org **CLEANFIX**

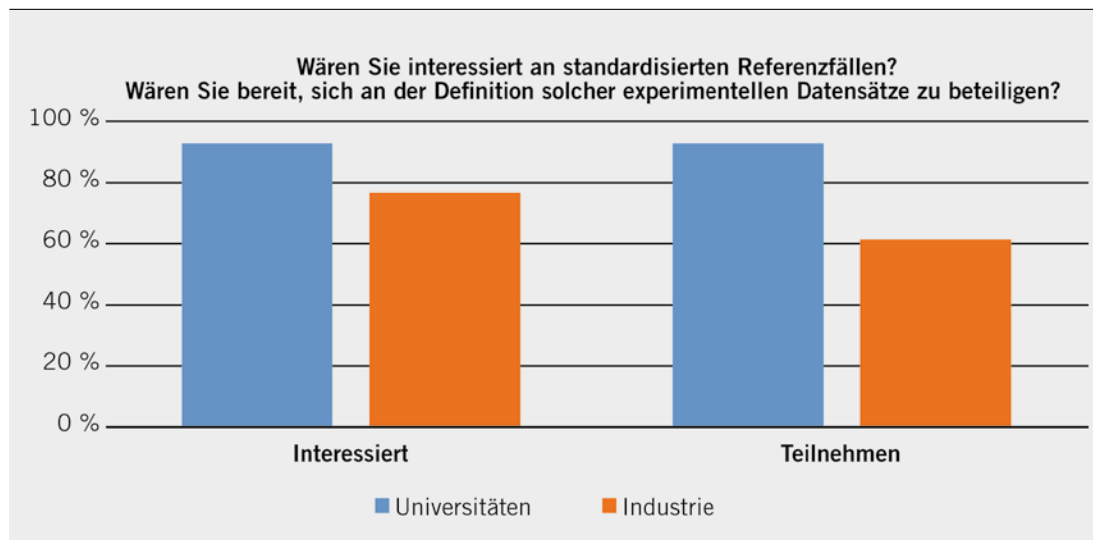


BILD 5 Relevanz der Vergleichsexperimente (© Technische Universität Darmstadt)

der Schadstoffmodellierung als wichtig herausgestellt. Diese Aspekte sind trotz der hohen Relevanz derzeit noch nicht im Fokus für die industrielle LES-Anwendung, **BILD 2**. Zusätzlich zur Modellverbesserung wurde übereinstimmend der hohe Bedarf an zuverlässigen Validierungsdaten unter genau definierten Bedingungen herausgestellt. Dementsprechend ist von allen Seiten das Interesse an diesen Daten hoch, was sich auch in der Bereitschaft widerspiegelt, die Versuchsanordnungen und -bedingungen aktiv zu definieren, **BILD 5**. Als letztes Ergebnis der Umfrage wurden Herausforderungen in Bezug auf die industrielle Nutzung der LES identifiziert. Während Computerressourcen und Software aktuell vorhanden sind, haben die industriellen Partner notwendige Schritte zur weiteren Etablierung der LES herausgestellt, dazu gehören Reduktion von Bearbeitungszeiten, verbesserte Robustheit der Methode, verbesserte Arbeitsabläufe und geeignete Post-processing-Werkzeuge. Als Beispiel hierfür zeigt **BILD 6** die feh-

lende Verfügbarkeit eines robusten Arbeitsablaufs, der von 70 % der industriellen Nutzer aufgezeigt wurde.

3 GEMEINSAME STRATEGIE FÜR SKALENAUFFLÖSENDE MOTORSIMULATIONEN

Ausgehend von den Antworten auf den Fragenkatalog und einer Literaturanalyse lassen sich drei wesentliche Herausforderungen identifizieren: Mangel an Validierungsdaten, Übertragung komplexer Modelle in den Kontext von Verbrennungsmotoren und Teilmodellentwicklung für Phänomene mit hoher technologischer Relevanz. Darauf aufbauend werden Schritte zur Etablierung der LES in der industriellen Gemeinschaft skizziert.

3.1 MANGEL AN VALIDIERUNGSDATEN

Ein wesentliches Ergebnis der Studie ist der klar identifizierte Mangel an experimentellen Validierungsdaten von optisch zugänglichen Motoren für unterschiedliche Betriebsbedingungen. Dieses Defizit wurde sowohl vom akademischen als auch dem industriellen Umfeld herausgestellt. Insbesondere werden Daten für Momente erster und zweiter Ordnung (Mittelwert, Varianz) für Geschwindigkeit, wichtige skalare Größen wie Konzentration und Temperatur, lokale Zustände des Sprays, Wärmeübertragung unter motorrelevanten Bedingungen, Flammgeschwindigkeit und Ladungsbewegung benötigt. Globale Größen wie der Druck sind wichtig, aber bei weitem nicht ausreichend. Basierend auf der Erfahrung der Autoren müssen Validierungsdaten Bedingungen wie Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und offenen Zugang erfüllen. Das heißt, die Messmethoden müssen auf dem neuesten Stand der Wissenschaft sein, sorgfältig von erfahrenen Forschern auf diesem Gebiet entwickelt und eingesetzt werden, so fehlerfrei wie möglich sein und verlässliche Angaben zu Präzision und Genauigkeit enthalten. Darüber hinaus müssen die Daten einen ausreichend großen Parameterraum abdecken. Schließlich müssen die Daten den akademischen und industriellen Partnern zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren werden Referenzsimulationsdaten zu diesen Validierungsexperimenten benötigt, die als eine Art digitaler Zwilling dienen. Diese Simulationen sind als Referenz für alle zukünftigen Projekte zur Modellentwicklung unverzichtbar. Diese

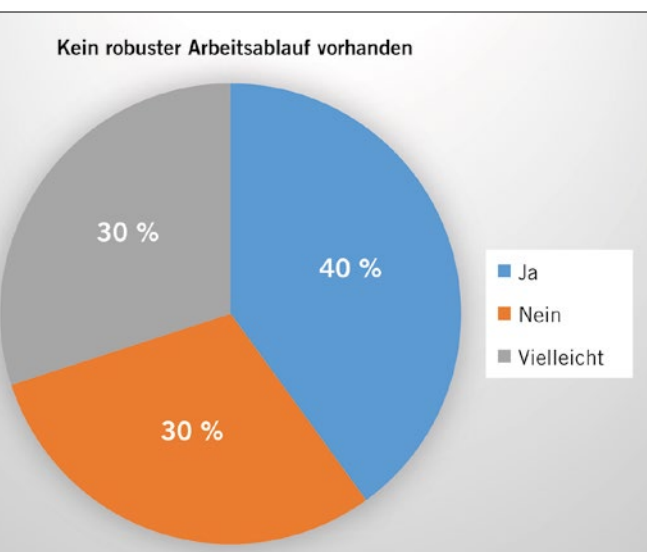


BILD 6 Defizit in industriellen Anwendungen (© Technische Universität Darmstadt)

Daten sollten die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den Anfangs- und Randbedingungen und der Gitterauflösung zeigen. Die beiden Datensätze – die experimentellen Daten und die Referenzsimulation – müssen als Benchmarks für bestehende Modelle verwendet werden und dienen insbesondere dazu, Defizite zu identifizieren und Aufgaben für die zukünftige Modellentwicklung zu definieren.

3.2 ÜBERTRAGUNG KOMPLEXER MODELLE IN DEN MOTORISCHEN KONTEXT

Wie beispielsweise in **BILD 3** dargestellt, werden relativ einfache Modelle in der motorischen LES verwendet. Es ist jedoch unbestreitbar, dass zumeist komplexere Modelle zur Vorhersage der in Abschnitt 2 diskutierten Phänomene zwingend benötigt werden. Beispielsweise erfordern Vorhersagen von Schadstoffen oder Ruß eine genaue Modellierung von Radikalen oder Zwischenprodukten. Daher ist es beispielsweise nicht möglich, hierfür globale kinetische Modelle zu verwenden.

In der Wissenschaft wurden signifikante Fortschritte in den vergangenen Jahren bei der Entwicklung von verbesserten Modellen gemacht. Diese haben ihre ausgezeichneten Eigenschaften in vergleichsweise einfachen Umgebungen wie Laborflammen oder auch Technologien wie Gasturbinen gezeigt. Beispiele sind sorgfältig reduzierte Modelle der Flamelet- oder REDIM-Familie, die auf einer begrenzten Anzahl von Kontrollvariablen basieren. Es ist eine Herausforderung für die zukünftige Forschung und Entwicklung, entsprechend Modelle zu modifizieren und in den verbrennungsmotorischen Kontext zu übertragen. Auch gerade für diesen Aspekt werden zuverlässige Validierungsdaten in Kombination mit Referenzsimulationen unzweifelhaft benötigt.

3.3 TEILMODELLENTWICKLUNG FÜR PHÄNOMENE MIT HOHER TECHNOLOGISCHER RELEVANZ

Motiviert durch technologische Entwicklungen wie Downsizing, steigende Energiedichte oder strenge Umweltgesetze zeigt die Umfrage, dass Modellentwicklungen in vielen Bereichen zwingend erforderlich sind. Die wichtigsten Bereiche zukünftiger Aktivitäten sind:

- die Modellierung in Wandnähe in Bezug auf Strömungs- und Skalarfelder
- Schadstoffbildung und Wärmeübertragung
- Spraymodellierung und Gemischbildung in der Brennkammer, Spray-Wand-Wechselwirkung
- Vorhersage der frühen Flammenkernbildung (wichtig für Stabilitätsphänomene)
- Vorhersage von Klopf- und Detonationsprozessen
- Vorhersage der Schadstoffbildung, insbesondere Ruß, NO_x, CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe.

4 ZUSAMMENFASSUNG UNS AUSBLICK

Im Beitrag wurden die Ergebnisse einer Umfrage zusammengefasst und analysiert, die von einer gemeinsamen Forschungsgruppe zweier Fachgebiete der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen eines FVV-Forschungsprojekts durchgeführt wurde. Das Hauptziel dieser Umfrage bestand darin, den derzeitigen Nutzungsgrad der LES im akademischen und industriellen Umfeld zu bewerten und zukünftige Schritte sowie kritische Fragestellungen zu identifizieren. Darauf aufbauend wurde eine Strategie für 3-D-CFD-Simulationen in Verbrennungsmotoren mit skalenauflösenden Simulationsmethoden dargelegt. Der Mangel an experi-

mentellen und numerischen Validierungsdaten wurde hierbei als der entscheidende Aspekt identifiziert. Darüber hinaus haben Kooperationen zwischen Industrie und akademischen Institutionen ein hohes Potenzial, um die industrielle Brennverfahrensentwicklung nachhaltig zu verbessern.

Die Umfrage zeigt deutlich, dass in Zukunft eine Reihe von Maßnahmen erforderlich sind, um LES als industrielles Entwicklungswerkzeug zu etablieren. Die wichtigsten Aspekte sind die zu verbessernde Robustheit der Methoden, zu lange Bearbeitungszeiten der Simulation, zu optimierende Arbeitsabläufe und fehlende Erfahrung im Umgang mit diesen neuartigen Methoden. Die Autoren sind überzeugt, dass diese Defizite durch zukünftige Kooperationsprojekte mit einem Software-Hersteller einerseits und erfahrenen akademischen Forschungseinrichtungen andererseits effizient und zeitnah behoben werden können.

LITERATURHINWEISE

- [1] Rutland, C. J.: Large-eddy simulations for internal combustion engines – a review. In: International Journal of Engine Research 12 (2011), Nr. 5, S. 421–451
- [2] Hasse, C.: Scale-resolving simulations in engine combustion process design based on a systematic approach for model development. In: International Journal of Engine Research 17 (2016), Nr. 1, S. 44–62
- [3] Buhl, S.; Hain, D.; Hartmann, F.; Hasse, C.: A comparative study of intake and exhaust port modeling strategies for scale-resolving engine simulations. In: International Journal of Engine Research 19 (2018), Nr. 3, S. 282–292
- [4] He, C.; et al.: Evaluation of the flame propagation within an SI engine using flame imaging and LES. In: Combustion Theory and Modelling 21 (2017), Nr. 6, S. 1080–1113
- [5] Nguyen, T.; Kempf, A. M.: Investigation of numerical effects on the flow and combustion in LES of ICE. In: Oil & Gas Science and Technology 72 (2017), Nr. 25, S. 1–25
- [6] Krüger, C.; Schorr, J.; Nicollet, F.; Bode, J.; Dreizler, A.; Böhm, B.: Cause-and-effect chain from flow and spray to heat release during lean gasoline combustion operation using conditional statistics. In: International Journal of Engine Research 18 (2017), Nr. 1–2, S. 143–154
- [7] Nicollet, F.; et al.: A PIV-guided large-eddy simulation of in-cylinder flows. In: Oil & Gas Science and Technology 72 (2017), Nr. 28, S. 1–13
- [8] Hasse, C.; Janicka J.: Large Eddy Simulation in der Brennverfahrensentwicklung. FVV final report, project number 1215 (2017)

DANKE

Dieser Artikel ist das Ergebnis einer abgeschlossenen Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. gestellt und an den Fachgebieten Energie- und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka und Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse bearbeitet wurde. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch die FVV unter der Projektnummer 1215. Ein weiterer Dank geht an Dr.-Ing. Thorsten Unger von der Porsche AG für die Leitung der begleitenden FVV-Arbeitsgruppe.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com