

COMSOL NEWS

DAS MULTIPHYSIK-SIMULATIONSMAGAZIN



**Multiphysik bietet
wirtschaftliche &
technische Lösungen**

Verbesserung der Wasserqualität bei Tauw

SEITE 6

Multiphysik bietet wirtschaftliche & technische Lösungen

Von der ersten Idee bis zum fertigen Produkt ist die Suche nach innovativen, kostengünstigen und umweltfreundlichen Designs eine intensive, aber äußerst lohnende Herausforderung für Manager und Ingenieure gleichermaßen.

In dieser Ausgabe der COMSOL News erzählen wir die Geschichten von Simulationsspezialisten, die gemeinsam mit ihren Kollegen und Kunden an Lösungen arbeiten, die sowohl wirtschaftliche als auch technische Ziele erfüllen, wie z.B. die Beseitigung von Produktionsengpässen bei gleichzeitiger Gewährleistung der Wirksamkeit und Sicherheit von Arzneimitteln. Gute Entwürfe entstehen aus einer realitätsnahen Darstellung der Naturgesetze der zu simulierenden physikalischen Systeme. Mit der Multiphysik sind Simulationsspezialisten in der Lage, alle relevanten physikalischen Effekte einzubeziehen und zu koppeln. Sie erstellen präzise digitale Prototypen, um die Grenzen der Technologie auszuloten und zu erweitern und gleichzeitig den Bedarf an physischen Prototypen zu reduzieren. Diese Spezialisten erstellen Simulations-Apps, Benutzeroberflächen, die ihre multiphysikalischen Modelle vereinfachen und Kollegen und Kunden weltweit in die Lage versetzen, neue Ideen in der virtuellen Welt mittels numerischer Simulation zu testen.

Hier finden Sie konkrete Beispiele dafür, wie die Multiphysik-Simulation bessere Business- und Engineering-Lösungen ermöglicht, wie z.B. bahnbrechende Fortschritte in der Computertechnik, die Verbesserung der Wasserqualität, die Entwicklung berührungsloser Magnetkupplungen und die Minimierung von Korrosion in Multimaterial-Baugruppen durch einen kooperativen Ansatz.

Viel Spaß beim Lesen und bei der Multiphysik-Modellierung!



Valerio Marra
Marketing Director
COMSOL, Inc.

INTERACT WITH THE COMSOL COMMUNITY

BLOG comsol.de/blogs

FORUM comsol.de/forum

LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc

Facebook® facebook.com/multiphysics

Twitter® twitter.com/@COMSOL_Inc

Google+™ plus.google.com/+comsol

Wir freuen uns über Ihre Kommentare zu COMSOL News; kontaktieren Sie uns über info@comsol.de.



© 2018 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server und LiveLink sind entweder eingetragene Warenzeichen oder Marken der COMSOL AB. Alle anderen Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber, und COMSOL AB und ihre Tochtergesellschaften und Produkte sind nicht mit diesen Markeninhabern verbunden und werden nicht von ihnen gefördert oder unterstützt. Eine Liste dieser Markeninhaber finden Sie unter www.comsol.com/trademarks.

LinkedIn ist eine Marke der LinkedIn Corporation und ihrer Tochtergesellschaften in den USA und/oder anderen Ländern. Facebook ist eine eingetragene Marke von Facebook, Inc. TWITTER, TWEET, RETWEET und das Twitter-Logo sind Marken von Twitter, Inc. oder seinen Tochtergesellschaften. Google+ ist eine Marke von Google LLC.

INHALT

FOTOLITHOGRAPHIE-SYSTEME

- 4 | ASML erlangt Durchbrüche beim Computerbau mit Multiphysik-Modellierung

ABWASSERBEHANDLUNG

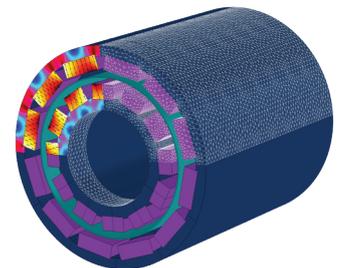
- 6 | Mehrphasen-Strömungssimulation prägt Kläranlagen-Design

BIOPHARMAZEUTISCHE PROZESSE

- 9 | Multiphysikmodellierung in der Biopharmaindustrie

KORROSION IN MULTIMATERIAL-BAUGRUPPEN

- 12 | Leichtbau mit Aluminium: Korrosions-Apps geben das Design vor



MAGNETKUPPLUNGEN

- 16 | Magnetgetriebe erhöhen Lebensdauer von Offshore-Windparks

CORIOLIS-DURCHFLUSSMESSER

- 19 | Alles im Fluss - Optimierung von Fluidsensoren



TITELBILD

Blick auf die Windungen des Flusses Dommel, der durch das Dorf Son en Breugel, 9,7 km nördlich der Stadt Eindhoven, Niederlande, fließt. Bildquelle: Waterschap de Dommel (Wasserverband Dommel).

HIGHLIGHTS

THERMO-ELASTOHYDRODYNAMISCHE SCHMIERUNG

22 | Simulations-Apps bringen Tribologie-Forschung voran

SINTERUNGSPROZESSE

26 | Effizienzverbesserung beim Sintern von Eisenerz

AKUSTISCHE METAOBERFLÄCHEN

28 | Der Klang von Perfektion dank der Modellierung akustischer Metaoberflächen

AUTOMOTIVE PRODUKTDESIGN

31 | Optimierung von PKW-Designs mit Simulations-Apps

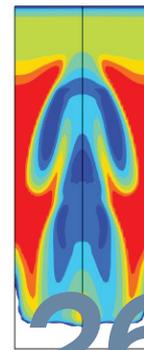
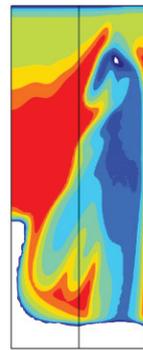
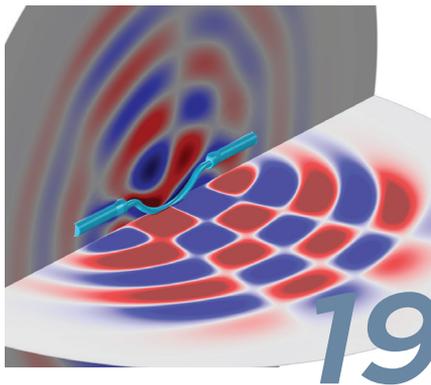


BLITZSCHUTZSYSTEME

34 | Multiphysik schützt Windkraftanlagen wenn der Blitz einschlägt

GASTBEITRAG

38 | MINT-Ausbildung: Simulations-Apps bereiten Schüler auf das Leben jenseits des Klassenzimmers vor



26

Galvanic Corrosion Behavior of a Complex Multi-Materials Assembly **NRC-CMRC** Corrosion Applications

Step 1. Components
Identify components in the corresponding tab: Select among: AA7075, AA6022, AA5083, AA6061, AA7072, AA5056, AA6111, SS304, SS201, Zn/Pb, steel, CFRP, Sn, Ti64, Almac, Zn, Mg

Step 2. Electrolyte thickness
Thickness: 2.5 mm

Step 3. Electrolyte movement
Adjust the convection level: Quiescent to Maximum

Step 4. Temperature
Temperature influences electrolyte conductivity & efficiency of cathode in reducing oxygen. Expected maximum service temperature is: Temperature (C): 20

Step 5. Compute results

Step 6. Export global galvanic current
Export global galvanic current is for components in: 1, 17. Plot results using: A, B

Manual Potential Range: Minimum: -0.835 Maximum: -0.546 Update Potential Distribution

Electrolyte Potential (V)

12

ASML erlangt Durchbrüche beim Computerbau mit Multiphysik-Modellierung

ASML zeigt, wie wichtig die Multiphysik-Simulation für die Computerchip-Industrie wird. Die gewonnenen Erkenntnisse dürften für alle Hersteller wichtig sein.

von **VALERIO MARRA**

Es wirkt schon fast poetisch, dass komplexe Simulationen auf leistungsfähigen Computern notwendig sind, um die Rechner der nächsten Generation zu entwickeln. Dies ist bei ASML der Fall, dem weltweit führenden Anbieter von Fotolithographie-Systemen. ASML stellt Computerchips her, indem es Mikrochip-Baupläne optisch einer lichtempfindlichen Fotolackschicht auf einem Siliziumwafer aussetzt.

Zu den Kunden von ASML zählen viele der führenden Anbieter von Computerchips. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen sie ihren Kunden helfen, mit dem Moore'schen Gesetz Schritt zu halten. Was sie feststellen, ist, dass die neueste Generation von Maschinen, die darauf abzielt, diesen Fortschritt aufrechtzuerhalten, ein Verständnis der Physik erfordert, in der viele Effekte, wie z.B. Fluidströmung und Festkörpermechanik, inhärent gekoppelt sind.

Die Multiphysik-Simulation ist ein nicht mehr wegzudenkendes Werkzeug für viele Branchen, die sich auf den Bau von Geräten mit Mikrometer- und Nanometergenauigkeit konzentrieren.

⇒ CHANCEN UND HERAUSFORDERUNGEN DURCH EXTREMES UV-LICHT

Die Herstellung von Chips mit höherer Leistung bedeutet, dass mehr Transistoren auf eine bestimmte Fläche gepackt werden müssen. Die physikalischen Abmessungen werden kleiner (Abbildung 1), was eine Herausforderung für den Herstellungsprozess darstellt und empfindlich auf kleinste Umweltveränderungen reagiert. Die Genauigkeit hat sich gegenüber früheren Systemgenerationen deutlich verbessert. Die neuesten Fotolithographiegeräte (Abbildung 2) nutzen extremes ultraviolettes (EUV) Licht, das eine Wellenlänge von 13,5 nm hat, zum Ätzen von Strukturen. „Es besteht ein direkter linearer Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des verwendeten Lichts und der Größe der Komponenten - den kritischen Abmessungen -, die auf den Mikrochip projiziert werden“, erklärt Fred Huizinga, Gruppenleiter für mechanische Analysen. „Wir sprechen von Strukturen im Nanometerbereich mit außergewöhnlich kleinen Toleranzen.“

Der Fotolithographie-Ätzprozess erfordert ein sauberes Vakuum und den Einsatz von Präzisions-Luftlagern, die anstelle von Öl oder Rollen eine dünne Schicht Druckgas zwischen den Lastflächen verwenden. Diese Luftlager sind empfindlich gegenüber Mikrobewegungen und sehr kleine Druckschwankungen haben großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ätzung. „In solchen Systemen können physikalische Tests viel zu lange dauern. Tatsächlich sind einige dieser Phänomene so klein, dass es

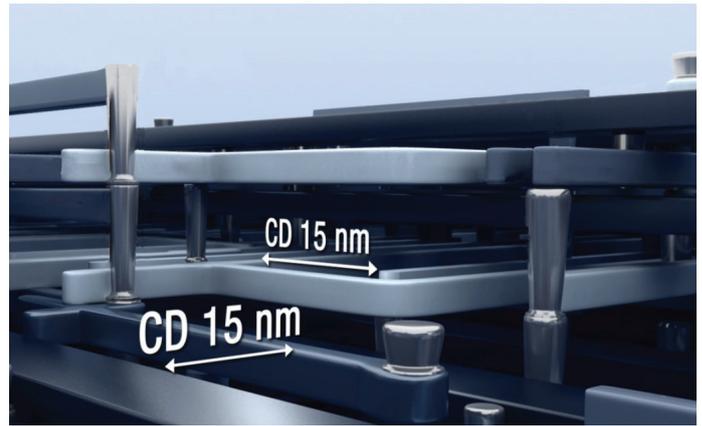


ABBILDUNG 1. Die kritischen Abmessungen innerhalb eines Smartphone-Prozessors werden in Nanometern gemessen. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist 5.300-mal größer als die kritischen Dimensionen dieser Chips.

schwierig ist, sie zu testen oder zu messen, weil die Verformungen manchmal in einer Größenordnung liegen, die niedriger ist als die Messgenauigkeit.“ In diesem Fall ist die einzige verfügbare technische Erkenntnis die numerische Simulation.

⇒ EINE KOMPLETTE TOOLBOX FÜR DIE LUFTLAGERAUSLEGUNG

Huizinga kam zu ASML, nachdem er 25 Jahre lang Ingenieur Tätigkeiten in der Automobilindustrie geleitet hatte. „Um unsere Maschinen zu entwerfen und zu analysieren, benötigen wir Zugang zu so vielen verschiedenen physikalischen Zusammenhängen, dass wir zahlreiche Simulationswerkzeuge einsetzen müssen. Es gibt viele solcher Werkzeuge, solange man sich auf das beschränkt, was man als „Single Physics „ bezeichnen könnte, z.B. die Analyse eines Problems, das rein thermisch oder rein mechanisch ist“. Für ihn ist die COMSOL®-Software ein besonders nützliches Werkzeug in der multiphysikalischen Modellierung, denn „Nanometerphänomene und komplexe Systeme erfordern einen multiphysikalischen Ansatz, eine komplette Simulationstoolbox“.

Ein gutes Beispiel für die obligatorische Multiphysik-Simulation ist die Entwicklung eines Luftlagermodells (Abbildung 3). Diese sind wichtig für ASML, da es eine Menge physikalischer Bewegungen in Fotolithographiemaschinen gibt. Luftlager bieten zudem eine höhere Steifigkeit und thermische Isolation und geben keine Partikel durch Reibung ab.



ABBILDUNG 2. Das serienreife EUV-System ASML® TWINSCAN® NXE:3350B produziert 125 Computerwafer pro Stunde bei 13,5 nm Wellenlänge. Es muss ein perfektes Vakuum halten, während Wafer mit hohen Geschwindigkeiten und Lasten bewegt werden, wobei Verzerrungen von weniger als 1 nm eingehalten werden müssen.

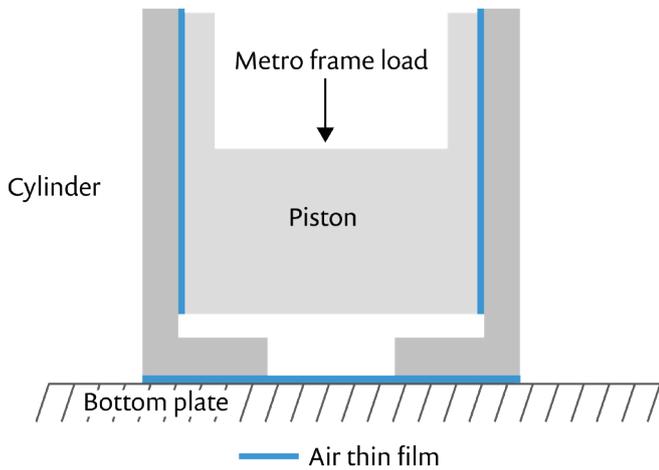


ABBILDUNG 3. Schematische Darstellung eines Luftlagers, das in den Fotolithographiesystemen von ASML verwendet wird.

Diese Präzision stellt jedoch neue Herausforderungen dar. Die Druckverteilung des Luftfilms verformt die Struktur lokal und beeinflusst die Breite des Luftspaltes zwischen den Lagerflächen. Da die Spaltbreite den Luftstrom zwischen den Flächen verändert, beeinflusst sie wiederum die Druckverteilung und wiederum die Verformung (Abbildung 4). Das Problem erfordert ein vollständig gekoppeltes Fluid-Struktur-Wechselwirkungsmodell (FSI), das sie in COMSOL implementiert haben. Das Ergebnis ist eine

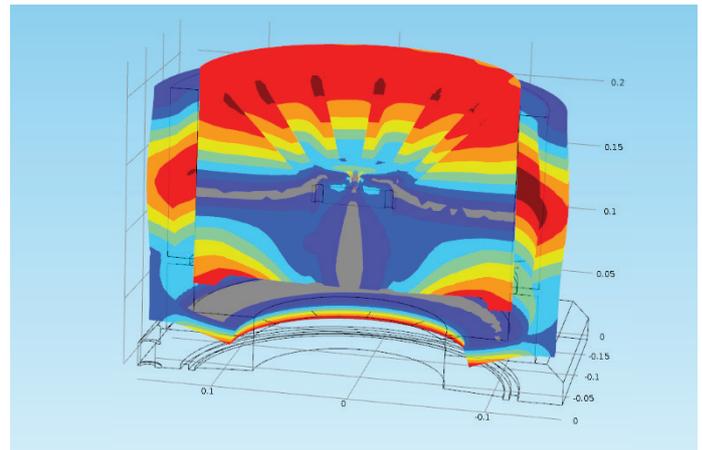


ABBILDUNG 4. Radiale Verformung von Zylinder und Kolben in einem Luftlager.

Huizinga für die Zukunft hinwies, ist die Simulation der Last auf Wafer, die zur Verarbeitung auf den Tisch gelegt werden. Die Folgeverformungen sind so klein (Nanometer!), dass der Wafer als elastischer Körper modelliert werden muss, der durch Schwerkraft, Reibung, thermische Erwärmung und Adhäsion beeinflusst wird, während er mit Hilfe eines Vakuum- oder elektrostatischen Feldes in Position gehalten wird - wiederum ein voll gekoppeltes multiphysikalisches Problem. Das Modell hilft Designern, ihr Design zu optimieren, ohne dass ein zeit- und kostenintensiver Prototyping-Prozess erforderlich ist.

⇨ **KOMPLEXITÄT DURCH SIMULATIONS-APPS ZUGÄNGLICH GEMACHT**

Genauso wichtig wie die Modellierung ist die Zugänglichkeit. Selbst für Ingenieure, die mit Multiphysik-Software vertraut sind, bedeutet Zugänglichkeit die Bereitstellung von Simulations-Apps, die dem Anwender viel Routine oder komplexe Arbeit abnehmen. Hier findet ASML das in COMSOL Multiphysics® verfügbare Application Builder-Tool nützlich, mit dem eine Luftlager-Berechnungs-App erstellt werden kann, mit der Kollegen im gesamten Team die Leistung verschiedener Lagerkonstruktionen virtuell testen können, ohne in das Originalmodell eingreifen zu müssen (Abbildung 5). „Es erspart den Aufwand für die Erstellung eines Netzes, die Einrichtung der Analyse und die Nachbearbeitung“, sagt Huizinga.

“Die COMSOL®-Software ist ein besonders nützliches Werkzeug in der multiphysikalischen Modellierung, denn Nanometerphänomene und komplexe Systeme erfordern einen multiphysikalischen Ansatz, eine komplette Simulationstoolbox.”

— FRED HUIZINGA, GROUP LEADER FOR MECHANICAL ANALYSIS, ASML

Simulation, die den Ingenieuren hilft, wichtige Designkriterien wie Translations- und Drehsteifigkeit, Spaltgröße unter Last und Luftverbrauch festzulegen. Ein weiteres wichtiges Beispiel, auf das

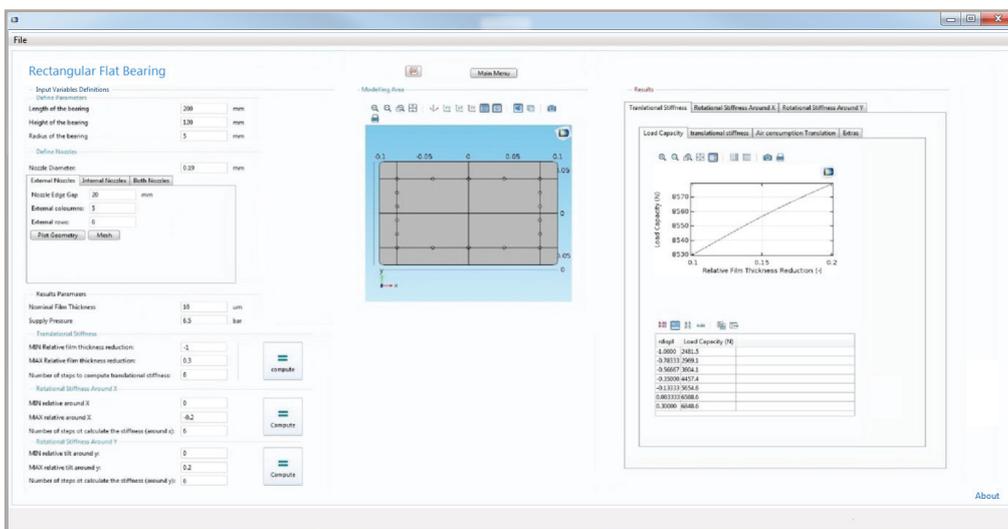


ABBILDUNG 5. ASML hat einen Luftlager-Analyserechner entwickelt, der es Ingenieuren ermöglicht, Bemaßungen und andere Variablen einzugeben und Ergebnisse zu erhalten, ohne sich um das Netz und andere Modellierungsfragen kümmern zu müssen.

Die Entwicklung von Multiphysik-Modellen, deren Validierung und Zugänglichkeit hat ASML von der COMSOL-Produktpalette überzeugt. Und wie ASML treibt die Suche nach Qualität, Leistung und Wirtschaftlichkeit ganze Industriezweige an, kleinere Produkte mit geringen Toleranzen und Baugruppen mit eng eingepassten Teilen in Mikrometergröße zu bauen. Während ASML und die Fotolithographie-Industrie zweifellos an der Front dieses Trends stehen, ist es auch eine Inspiration für andere. Multiphysikalische Modellierung ist oft die einzig ❖

MEHRPHASEN-STRÖMUNGSSIMULATION PRÄGT KLÄRANLAGEN-DESIGN

Ingenieure von Tauw und dem Wasserverband Dommel nutzen die CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics), um die Baukosten zu minimieren und gleichzeitig die Qualität der Kläranlage Eindhoven zu maximieren.

von SARAH FIELDS

Der unscheinbare Fluss Dommel durchfließt die Stadt Eindhoven in den Niederlanden, von der belgischen Grenze im Süden in die größere Maas im Norden. Entlang des Weges nimmt die Dommel Einleitungen von der Kläranlage Eindhoven (WWTP) sowie über 200 kombinierte Kanalüberläufe (CSOs) von 10 Kommunen auf, die sich auf ca. 170.000 Kubikmeter Wasser pro Tag belaufen.

Der Wasserverband Dommel hat die Aufgabe, die Gesundheit des Flusses zu überwachen und die bestmögliche Balance zwischen Mensch, Umwelt und der Wirtschaft zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, rief der Vorstand KALLISTO ins Leben. Dieses umfassende Forschungsprojekt zielt darauf ab, das kosteneffizienteste Maßnahmenpaket zur Minimierung von Sauerstoff-Einbrüchen und Ammoniak-Spitzen zu finden, welche durch die Kombination von biologisch behandelten Kläranlagenabwässern und CSOs entstehen. Das Erfüllen dieser Zielsetzungen ermöglicht es dem Verband, die Wasserrahmenrichtlinie zu befolgen und das Ökosystem des Dommel zu unterstützen.

„Die Grenzwerte für Phosphat, Stickstoff und Schwebstoffe im Fluss Dommel wurden und werden weiter gesenkt, um die Gesundheit des Flusses zu maximieren“, erklärt Tony Flameling, Senior Advisor für Abwassertechnologie beim Wasserverband Dommel. Als Teil dieser Bemühungen führte der Wasserverband ein Belüftungssystem ein, um den Sauerstoffgehalt des biologisch gereinigten Abwassers weiter zu erhöhen, bevor es mit dem Fluss zusammenläuft. „Der Zweck dieses Belüftungssystems war es, das Ökosystem der Dommel vor den schädlichen Auswirkungen der Hypoxie zu schützen“, erklärt Flameling.

In der Kläranlage werden vor der Belüftung Nährstoffe und Feststoffe durch Vorklärung, Aktivschlamm und Klärprozesse entfernt. Um den Energiebedarf zu minimieren, wird das Wasser in einer Höhe gehalten, die es in der gesamten Anlage in Bewegung hält (Abbildung 1).

Um zu verstehen, wie sich eine zusätzliche Belüftung auf den Durchfluss auswirken würde, beriet sich Flameling mit Ronnie Berg, einem auf Prozesstechnik und



ABBILDUNG 1. Luftaufnahme der Kläranlage Eindhoven.

Wassermanagement spezialisierten Berater von Tauw.

„Ist die Wasserhöhe in einem Abwasserkanal zu niedrig, ist die Sauerstoffübertragung ineffektiv. Ist die Wasserhöhe dagegen zu hoch, besteht die unangenehme Möglichkeit eines Überlaufs aus dem Belüftungskanal zurück in den Klärbehälter, wodurch der Auslauf verunreinigt wird“, erklärt Berg (Bild 2).

Ein weiteres mögliches Problem sind Wasserhöhen, die für die Wasseraufbereitung zu niedrig sind.

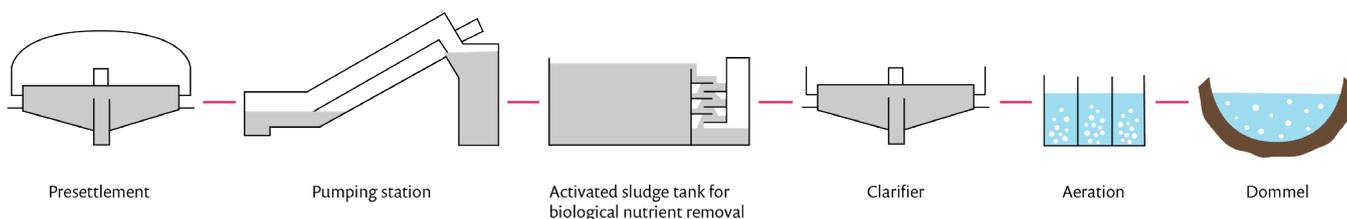


ABBILDUNG 2. Schematische Darstellung der Wasseraufbereitungsstufen der Kläranlage Eindhoven. Die Belüftung erfolgt nach der Klärung, unmittelbar vor der Wiedereinleitung des gereinigten Wassers in die Dommel.



ABBILDUNG 3. Blick auf den verstellbaren Damm am Ausgang des Belüftungskanals.

Durch die Kenntnis des Strömungsprofils im Abwasserkanal und des zugehörigen Abflusskanals konnte der Wasserverband ermitteln, wie das System am besten für eine maximale Belüftung optimiert werden kann.

⇒ **BLÄSCHEN: GUT FÜR FISCH, SCHLECHT FÜR DIE STRÖMUNG?**

Um den Einfluss von Belüftung und Dämmen (Abbildung 3) auf das Strömungsprofil und den Wasserstand vollständig zu verstehen, wandte sich Berg der mehrphasigen Strömungssimulation mit der Software COMSOL Multiphysics® zu.

Mit dem Wissen, dass ein vorhandener Kanal für die Belüftung nachgerüstet werden würde, erstellte Berg die Geometrie des Abwasserkanals (Abbildung 4), einschließlich der Wände, der vorhandenen Leitbleche und der geplanten Positionen der Belüftungselemente.

Um das System zu charakterisieren, spielte Berg mit der Anordnung der Belüftungseinheiten, den Höhen der verschiedenen Abschnitte des verstellbaren Damms und dem Wasserstand der Dommel. Auf diese Weise konnte er feststellen, ob es von Vorteil ist, die vorhandenen Leitbleche an Ort und Stelle zu halten und wie sich das Strömungsprofil je nach Belüftung, Jahreszeit und Wasserstand des Dommel verändern würde.

Berg erstellte das Strömungsmodell unter Berücksichtigung eines stark turbulenten Regimes und dispergierter Blasen. Mit Hilfe des in der Software verfügbaren Bubbly Flow, k-epsilon Interface, konnte Berg den Effekt der Belüftung auf das Strömungsprofil erfassen. Durch die Modellierung der blaseninduzierten Turbulenz und die Verfolgung der effektiven Gasdichte konnte er den zusätzlichen Widerstand, der durch die Blasen und die induzierte Spiralströmung im Kanal entsteht, analysieren.

In einer Reihe von CFD-Simulationen untersuchte Berg den Einfluss des Dommel-Wasserspiegels auf das Strömungsprofil. Er

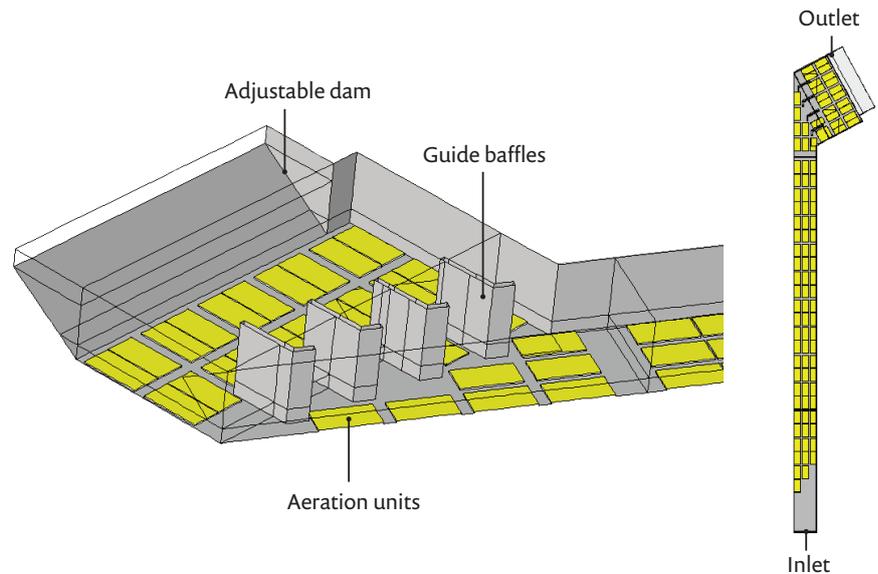


ABBILDUNG 4. Geometrie des Belüftungskanals. Die Belüftungseinheiten sind gelb dargestellt.

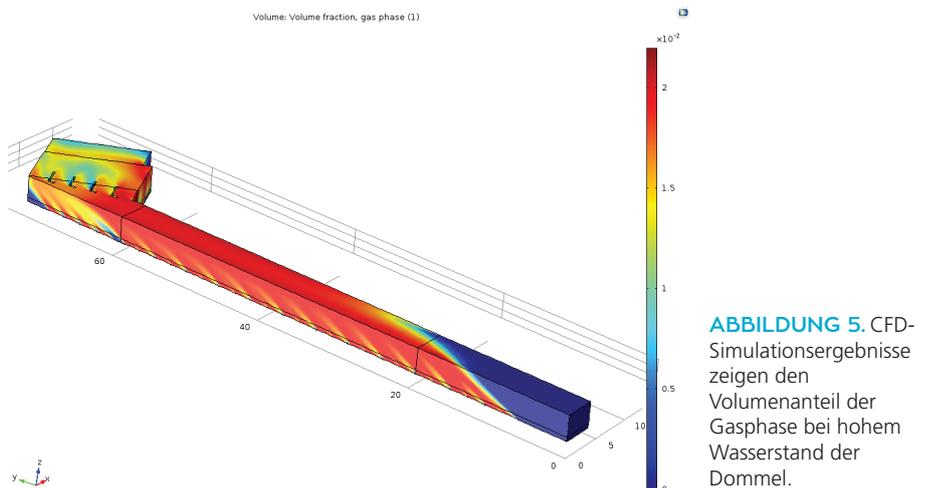


ABBILDUNG 5. CFD-Simulationsergebnisse zeigen den Volumenanteil der Gasphase bei hohem Wasserstand der Dommel.

war auch in der Lage, den Volumenanteil des Gases an jeder beliebigen Stelle des Kanals zu bestimmen, um die Wirksamkeit des Belüftungssystems zu verstehen (Abbildung 5).

Berg bewertete auch die Leistung der virtuellen Belüftungsanlage bei trockenem Wetter, wenn der Wasserstand der Dommel niedrig ist. Bei geringer Durchflussmenge sind alle Abschnitte der einstellbaren Staumauer in Position, was zu einem gewissen Rückfluss führt (Abbildung 6).

Bergs Analyse des Strömungsprofils mit unterschiedlichen Wasserständen, Stauhöhen und Belüftung führte schließlich zu mehreren

Erkenntnissen. Er hat herausgefunden, dass bei hohen Abflussmengen die Belüftung wenig Einfluss auf das Strömungsprofil hat. Bei trockener Witterung beeinflusst die Belüftung das Strömungsprofil.

Der durch die Belüftung erzeugte Widerstand ist relativ gering, was zu einem geringen Risiko führt, dass Wasser in den Klärbehälter zurückfließt und den Ablauf

„Die Simulation ermöglicht uns eine kontrollierte Anpassung der Parameter und gibt uns die Flexibilität, das beste Design vor der Bauausführung zu finden. Dadurch wird die Qualität des Wassers, das die Kläranlage Eindhoven verlässt, auf kosteneffiziente Weise verbessert.“

– RONNIE BERG, CONSULTANT, TAUW

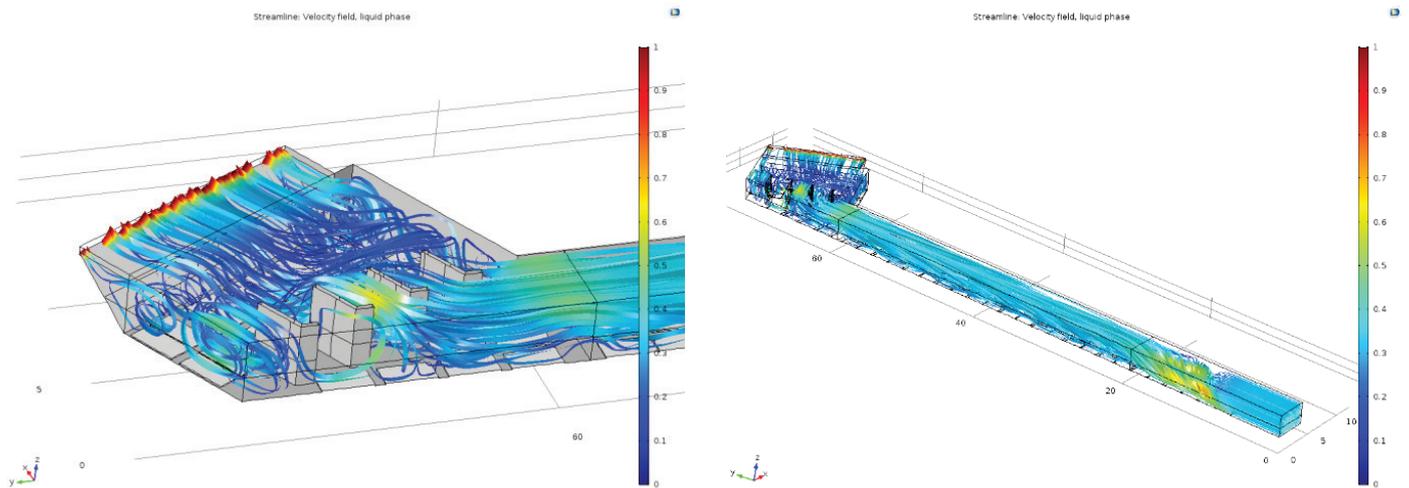


ABBILDUNG 6. CFD-Simulationsergebnisse zeigen das Geschwindigkeitsfeld des behandelten Wassers durch das Belüftungssystem bei trockenem Wetter.



ABBILDUNG 7. Der Belüftungskanal der Kläranlage Eindhoven ist in Betrieb, da er die Sauerstoffqualität des Abwassers vor dem Wiedereintritt in die Dommel verbessert. Links: Blick auf den verstellbaren Damm am Ausgang des Belüftungskanals. Rechts: Ansicht des Belüftungskanals vom Einlass aus.

verunreinigt.

Berg untersuchte auch die Wirkung der Aktivierung von zwei der drei Abschnitte des verstellbaren Damms. Bei Verwendung von nur zwei Abschnitten war der Durchfluss im Außenbogen deutlich höher. Dies führte zu stagnierendem Wasser in der Nähe der Innenkurve und einem weniger effizienten Belüftungsprozess. Insgesamt wurde bei der Aktivierung aller drei Abschnitte das beste Strömungsprofil erzielt.

⇒ **SIMULATION DIENT DEM ENTWURFSPROZESS**

Aufgrund seiner umfassenden CFD-Analyse gab Berg dem Dommel Wasserverband Empfehlungen und riet, die Leitbleche nicht zu entfernen. Er empfahl auch, die vorgeschalteten Belüftungselemente in

einer linearen Anordnung zu platzieren, um die Baukosten zu minimieren und gleichzeitig die Anforderungen an die Wasserqualität zu erfüllen.

„Die Simulation ermöglicht uns eine kontrollierte Anpassung der Parameter und gibt uns die Flexibilität, das beste Design vor der Bauausführung zu finden“, sagt Berg. „Dadurch wird die Qualität des Wassers, das die Kläranlage Eindhoven verlässt, auf kosteneffiziente Weise verbessert. Das funktionierende Belüftungssystem ist in Abbildung 7 dargestellt. „Die beabsichtigte Wirkung des Belüftungssystems wird nun zum Nutzen des Ökosystems des Flusses beobachtet“, sagt Flaming. Die effizient konzipierte Belüftungsanlage wird das Ökosystem und die Menschen, die auf den Fluss Dommel angewiesen sind, auf Jahre hinaus unterstützen. ❖



Ronnie Berg von Tauw



Tony Flaming vom Wasserverband Eindhoven

MULTIPHYSIKMODELLIERUNG IN DER BIOPHARMAINDUSTRIE

Bei Amgen wird ein vielfältiges Portfolio an multiphysikalischen Simulations-Apps eingesetzt, um Prozesse zu rationalisieren, Arbeitsabläufe zu verbessern und die Sicherheit und Wirksamkeit von Arzneimitteln zu gewährleisten.

von **ZACK CONRAD**

Um die unterschiedlichen Modalitäten, Funktionen und Kommerzialisierungsstadien von Arzneimitteln bewältigen zu können, müssen die verschiedenen Modellierungs- und Simulationswerkzeuge in der biopharmazeutischen Industrie eine große Bandbreite mit ausreichender Tiefe bieten.

Amgen, ein führendes multinationales biopharmazeutisches Unternehmen, nutzt die Multiphysik-Simulation als Werkzeug in seinem Arsenal, um die Wirksamkeit und Sicherheit von Medikamenten zu gewährleisten. Ihre verschiedenen Produkte haben bei Millionen von Menschen auf der ganzen Welt schwere Krankheiten behandelt. Aber hinter jedem Produkt steckt eine Vielzahl von Prozessen, und Amgen setzt ein vielfältiges Portfolio von Prozessmodellen ein, um den Workflow zu verbessern. In einer Branche, in der die Prozessmodellierung wichtiger ist als die Produktmodellierung, ist ein solches Portfolio von entscheidender Bedeutung. Pablo Rolandi, Leiter der Prozessentwicklung bei Amgen, hat den Einsatz der COMSOL Multiphysics® Software als Plattform-Modellierungstool für seine Mitarbeiter betreut. „COMSOL ist eine ausgereifte Plattform mit modernen Designprinzipien“, erklärt Rolandi. „Mit einer schlanken und einfach zu bedienenden Oberfläche und GUI und sowohl Single- als auch Multiphysik-Fähigkeiten können wir eine große Vielfalt an Tools entwickeln.“ Da verschiedene Probleme in der Entwicklungsphase auftreten, wenden sich Rolandi und sein Team der Multiphysik als Lösung zu.

In vielen Fällen werden diese Lösungen auch von der Entwicklung von Simulations-Apps begleitet, die direkt aus dem Modell über den Application Builder erstellt werden können. Durch den Umgang mit einer spezialisierten Benutzeroberfläche kann der Endanwender von den Erkenntnissen der Simulationsergebnisse profitieren, auch wenn er kein Experte in der Modellierung ist. In den letzten anderthalb Jahren haben sie App-Pakete entwickelt, die rationalisiert, kommunizierbar und einfach zu implementieren sind, um Unternehmensfunktionen in der Prozessentwicklung, im Betrieb und in der Forschung und Entwicklung zu unterstützen.

⇒ BESEITIGUNG VON PRODUKTIONSENGPÄSSEN

Die Optimierung eines Trocknungsprozesses dient als erstes

Beispiel, bei dem Rolandis Team eine maßgeschneiderte App zur Lösung eines Problems im Produktionsworkflow entwickelt hat. Im Mittelpunkt dieses Falles stand die Verlagerung des Herstellungsprozesses einer niedermolekularen Arzneimittelsubstanz von einer Contract Manufacturing Organization (CMO) in das Werk von Amgen in Singapur. Mittendrin wurden die Trocknungsvorgänge, die von einem Rührfiltertrockner (RFT) in einem ähnlichen Prozess wie in Abbildung 1 durchgeführt wurden, als mögliche Engpässe in der Produktionsanlage identifiziert. Natürlich kann ein Engpass ein erhebliches Risiko für die Befriedigung der Produktnachfrage darstellen, weshalb Rolandi und sein Team sich daran machten, die Trocknungsprozesse zu modellieren und den Prozess zu rationalisieren. Da die CMO für die ersten drei Prozessschritte einen

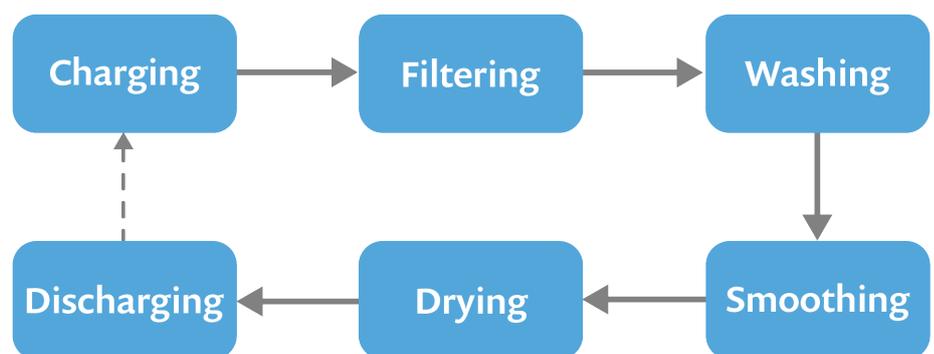


ABBILDUNG 1. Grundlegende Schritte in einem typischen Batch-Filtrations- und Trocknungsprozess zur Isolierung oder physikalischen Trennung einer chemischen Substanz.

anderen Trocknertyp verwendete, wie in Abbildung 1 dargestellt, fehlten ihnen ausreichende Charakterisierungsdaten aus diesen Isolationen, um sie genau zu modellieren und die Auswirkungen wechselnder Betriebsbedingungen zu identifizieren.

Zu den bekannten Eigenschaften des Systems gehörten Materialeigenschaften, geometrische Eigenschaften des Equipments und Betriebsbedingungen, einschließlich Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Druck und ob Rühren beteiligt ist. Rolandi musste jedoch noch zwei kritische Faktoren bestimmen: die Verdampfungsrates und die Diffusionskoeffizienten der neuen RFT. Dazu wurde eine umfangreiche Datenerfassung durchgeführt und mittels Multiphysik-Simulation die regressiven Parameter zur Charakterisierung des Modells manuell abgeschätzt. Danach wurde eine Simulations-App erstellt, die die Trocknungszeiten berechnet und den Prozessingenieuren in der entscheidenden Phase zur Verfügung gestellt. Dies trug wesentlich dazu bei, dass die Endanwender die Möglichkeit hatten, die Auswirkungen veränderter Betriebsbedingungen zu visualisieren, wie in Abbildung 2 dargestellt. Schließlich wurde festgestellt, dass die Kombination von Rühren mit einer Heizplatte die Trocknungszeit verkürzt und somit der Engpass gemildert und die Effizienz gesteigert werden konnte.

⇒ **EINHALTUNG ALLER STERILISATIONSTANDARDS**

In einer anderen Situation stieß eines der Produktionsteams von Amgen auf ein Problem mit der Sterilisation. Compounds von Herstellern werden in Primärbehältern transportiert. Dies sind oft Fläschchen, die nach einem bestimmten Standard sterilisiert werden müssen, um als neuwertige Behälter eingestuft zu werden, da Bakterien in Arzneimitteln ein enormes Gesundheitsrisiko darstellen können. Das Standard-Sterilisationsprotokoll, das die Diffusion von Ethylenoxid als Haupttransportmechanismus beinhaltet, erfüllte jedoch nicht die Anforderungen an einen neuartigen Behälter.

Natürlich musste der Sterilisationsprozess optimiert werden, aber anstatt unangemessene Experimente und kostspielige Iterationen von Trial-and-Error durchzuführen, machten sich Rolandi und sein Team an die Simulation, um die Diffusion des Ethylenoxids durch die Fläschchen zu modellieren.

Die App enthielt Optionen zur Auswahl der Permeations- und Kontaminationsgrenzen, der Eingangslöslichkeits- und Diffusionskonstanten und zur Erzeugung zeitabhängiger Konzentrationsprofile

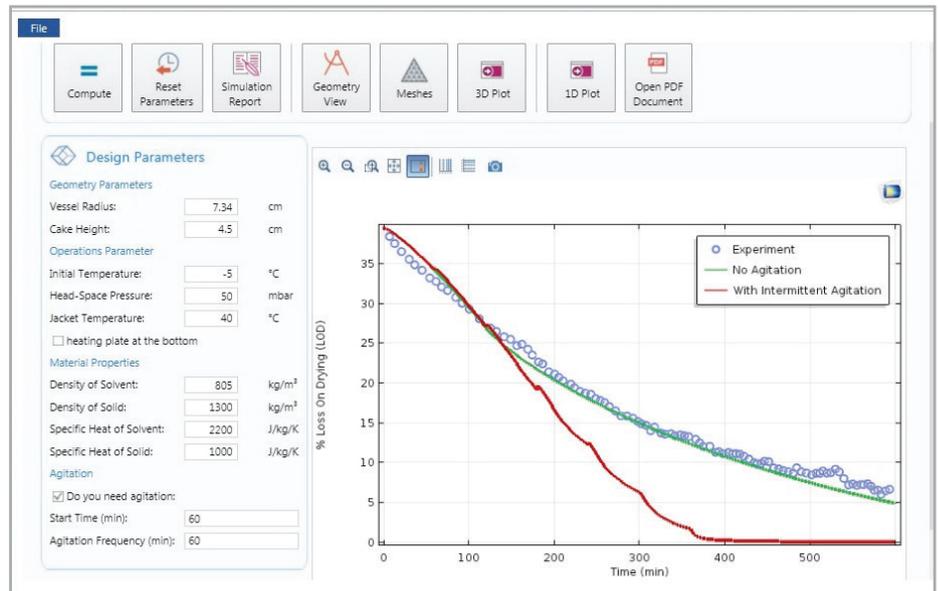


ABBILDUNG 2. Simulations-App, die Trockenzeiten für Modelle ohne Bewegung (grün) und mit intermittierender Bewegung (rot) berechnet und mit einem experimentellen Ergebnis vergleicht.

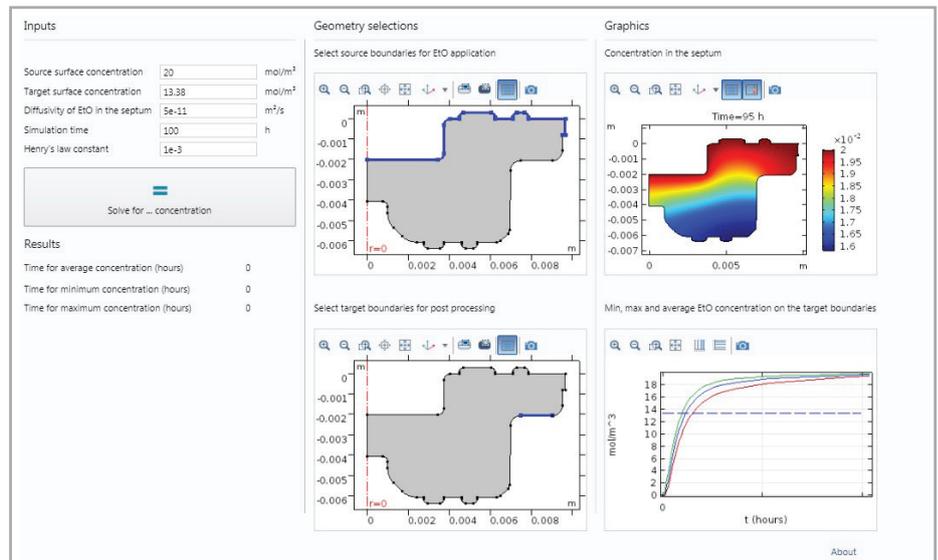


ABBILDUNG 3. Diese Sterilisations-Verfahrens-App berechnet die Konzentration von Ethylenoxid.

des Ethylenoxids (Abbildung 3). Die Verfahrenstechniker konnten dann mit Hilfe der Apps feststellen, ob die Konzentration hoch genug war, um eine ausreichende Sterilisation zu gewährleisten. Dadurch wurde das Experimentieren reduziert oder ganz vermieden und das Programm um einige Monate beschleunigt. „Letztendlich war es viel effizienter, einfach Simulations-Apps zu erstellen“, sagte Rolandi.

⇒ **JENSEITS DER SIMULATION**

„Ich bin sehr daran interessiert, über die Simulation hinaus über die Entwicklung und Integration sehr fortschrittlicher Anwendungen und Techniken nachzudenken“, sagt Rolandi. „Ich denke, das ist eine strategische Herausforderung und wir fangen gerade erst an.“ Eines seiner

Ziele ist es, Unsicherheiten in ihre Modelle zu integrieren. In der Praxis sind die Parameter selten exakt und die Betriebsbedingungen variabel. Die Integration dieser Variationen in ihre Simulationen kann zu prädiktiveren Ergebnissen führen, die im Kontext besser verstanden werden können.

Rolandi und sein Team arbeiten zum Beispiel an einem Autoinjektor, einem Gerät, das einem Patienten Medikamente injiziert, ohne dass ein Arzt sie verabreichen muss. Ein kritischer Aspekt der Injektionen ist der Zeitpunkt der Verabreichung, der sehr genau kontrolliert werden muss, damit das verabreichte Medikament seine Wirkung entfalten kann. Das Problem ist, dass die Abgabedauer von einer Reihe von Faktoren abhängt, die alle unterschiedliche Unsicherheiten aufweisen, darunter die

Behältergeometrie, die Viskosität und das Volumen des Medikaments, die Federkonstanten des Injektors und die Reibungskonstanten des Kolbens.

Wenn die Unbestimmtheit dieser Faktoren nicht berücksichtigt wird, hat eine simulierte Abgabezeit eine unbekannte Varianz und gibt somit keine Auskunft über ihr Potenzial, genau gesteuert zu werden. In der Prozessmodellierung ist es von unschätzbarem Wert, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der erwarteten Ergebnisse zu erstellen, um das Verhalten des Systems besser zu verstehen.

Um besser zu verstehen, wie sich die Unsicherheit dieser Parameter fortsetzt, nutzten Rolandi und sein Team die Multiphysik-Simulation, um eine globale Sensitivitätsanalyse des Systems durchzuführen und den Effekt der Faktorvariabilität streng zu quantifizieren. Die Analyse ermittelt für jeden Parameter einen Sensitivitätsindex, der eine teilweise Zuschreibung der Varianz als Reaktion auf diesen Parameter darstellt. Sie fanden heraus, dass die Viskosität des Produktes, die Federkonstanten und die Nadelgeometrie 90% der Varianz in der Einspritzzeit ausmachten, wodurch sie ihr Modell stark vereinfachen konnten. Da nur wenige Parameter signifikante Auswirkungen auf die Injektionszeit haben, ist es für sie viel einfacher, Unsicherheit und Risiko durch robuste Spezifikationen an die Komponentenlieferanten zu managen.

Ähnlich wie bei den anderen Lösungen wurde das Einspritzzeitmodell in eine benutzerfreundliche und einfach zu bedienende Simulations-App gepackt. Die in Abbildung 4 gezeigte App bietet benutzerdefinierte Eingaben, führt eine Unsicherheits- und Empfindlichkeitsanalyse durch, schreibt einen automatisierten Bericht und zeigt die Modelldokumentation an. Die App hat zu Kosteneinsparungen und Geschwindigkeitssteigerungen geführt und ein effektiveres Management der Unsicherheit während des gesamten Prozesses ermöglicht.

⇒ **APP-BEREITSTELLUNG**

Amgen nutzt auch eine lokale Installation des Produktes COMSOL Server™, um die Zugänglichkeit für seine Mitarbeiter zu erhöhen. „Wir haben eine Reihe von Anwendungen, die wir unbedingt jedem bei

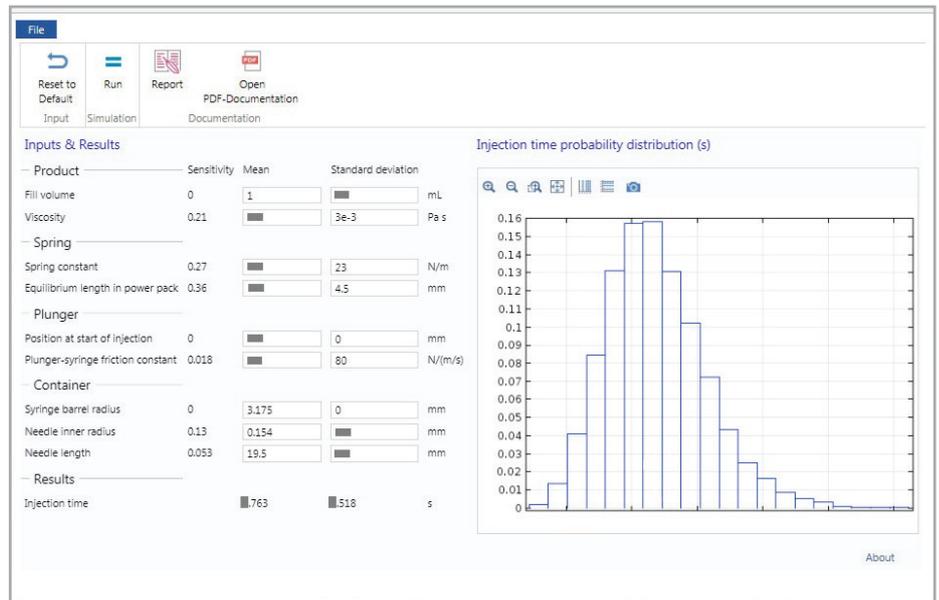


ABBILDUNG 4. Autoinjektormodell-App, die eine Injektionszeit-Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt. Unternehmensinterne Daten wurden unkenntlich gemacht.

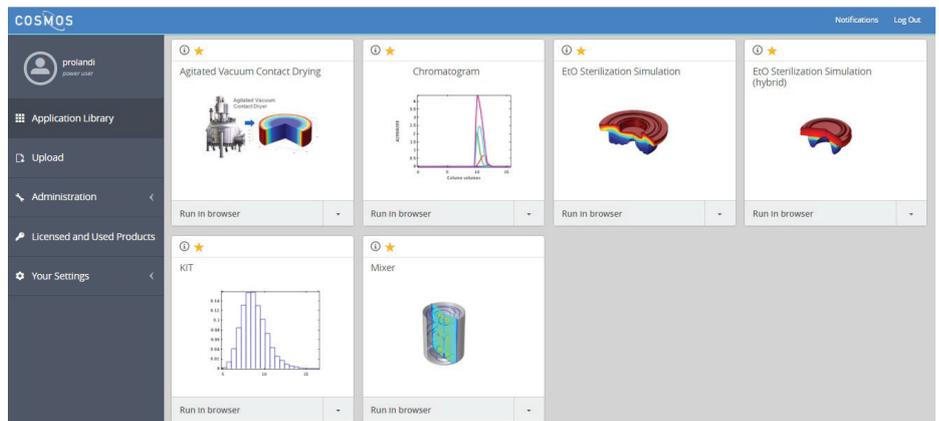


ABBILDUNG 5. Amgen hat seine COMSOL Server Bibliothek unter dem Namen COSMOS mit einem eigenen Branding versehen.

Amgen zur Verfügung stellen wollen“, sagt Rolandi. „Im Moment gibt es etwa ein Dutzend Apps, welche heute in der gesamten Organisation in einer Weise genutzt werden, auf die ich sehr stolz bin, und COMSOL hat uns dies ermöglicht.“ Mit COMSOL Server ist die App-Bereitstellung trivial und die Lifecycle-Verwaltung kann effektiver gestaltet werden. Die Benutzer können sich einfach über einen Webbrowser einloggen, um auf die vom Rolandi-Team entwickelte Anwendungsbibliothek zuzugreifen. Sie haben auch vor, die Komplexität ihres Systems zu erhöhen, indem sie sich von der manuellen

Eingabe verabschieden und COMSOL-Modelle als „Berechnungskerne“ betrachten. Diese können mit Hilfe fortschrittlicher Algorithmen in einer Reihe von aussagekräftigen, modellbasierten Studien wiederverwendet werden, was einen wichtigen Schritt bei der Implementierung einer Modellierung auf Unternehmensebene darstellt, die einem großen Nutzerkreis und vielen Akteuren echten Geschäftswert bietet. ❖



Pablo Rolandi, Director of Process Development bei Amgen

„Im Moment gibt es etwa ein Dutzend Apps, welche heute in der gesamten Organisation in einer Weise genutzt werden, auf die ich sehr stolz bin, und COMSOL hat uns dies ermöglicht.“

— PABLO ROLANDI, DIRECTOR OF PROCESS DEVELOPMENT AT AMGEN

LEICHTBAU MIT ALUMINIUM: KORROSIONS-APPS GEBEN DAS DESIGN VOR

Wissenschaftler des National Research Council Canada (NRC) nutzen multiphysikalische Simulations-Apps, um das Risiko von galvanischer Korrosion in neuen Konstruktionen zu minimieren und den Einsatz von Aluminium im Fahrzeugleichtbau voranzutreiben.

von **SARAH FIELDS**

Autos haben in den letzten Jahren stark an Gewicht verloren, da Hersteller und Verbraucher immer mehr Wert auf Effizienz und Umweltschutz legen. Die Reduzierung des Fahrzeuggewichts um ein Zehntel kann die Kraftstoffeffizienz eines Fahrzeugs um bis zu 8 % steigern. Um dies zu erreichen, wissen die Hersteller, dass sie herkömmliche Materialien für Fahrzeugstrukturen und -karosserien, wie z.B. Baustahl, mit leichteren Materialien kombinieren müssen. Aluminium (Abb. 1) ist ein hervorragender Kandidat für solche Vorhaben, da es ein Drittel der Dichte von Stahl hat, witterungsbeständig und gut recycelbar ist und eine ausgezeichnete Verformbarkeit und Crashfähigkeit aufweist.

Die Entwicklung eines Fahrzeugs mit Stahl- und Aluminiumlegierungen bringt jedoch viele Herausforderungen mit sich. Dazu gehören die Entwicklung kostengünstiger Massenproduktionstechnologien, die Herstellung von Verbundwerkstoffen aus Aluminium für Teile, die ursprünglich für die Herstellung mit anderen Werkstoffen vorgesehen waren, und die Verringerung des Risikos der galvanischen Korrosion (Abbildung 2) aufgrund unterschiedlicher Metalle, die in Kontakt mit einem Elektrolyten stehen, wie z. B. Streusalze, die auf Straßen verwendet werden.

Danick Gallant, technischer Leiter



ABBILDUNG 1. Eine Aluminium-Druckgusslegierung (High-Pressure Die Casting, HPDC).

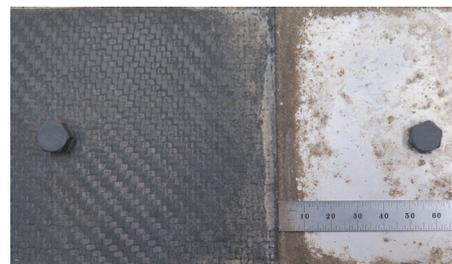


ABBILDUNG 2. Oben: Galvanische Korrosionsschäden an einer Multimaterial-Überlappung aus einem kohlefaserverstärkten Polymer (CFK) und einer Aluminiumlegierung der 6000er Reihe nach einem Jahr Einsatz im Fahrzeug. Unten: Typische Montage von Proben an einem Fahrzeug für die Expositionsprüfung im Betrieb.

der Korrosionsforschung des NRC Forschungszentrums Automotive and Surface Transportation, unterstützt Unternehmen bei der Entwicklung von korrosionsbeständigen Komponenten und Baugruppen. Für eine einzelne Verbindungsgeometrie steht die Industrie derzeit vor verschiedenen korrosionsbedingten Herausforderungen, von der Spalt- bis zur galvanischen



Von links nach rechts: Richard Menini, Mario Patry, Sandy Laplante, Amélie Ruest, Marc-Olivier Gagné, Axel Gambou-Bosca, Philippe Tremblay, Stéphan Simard, Danick Gallant und Alban Morel am National Research Council Canada, Aluminium Technology Center.

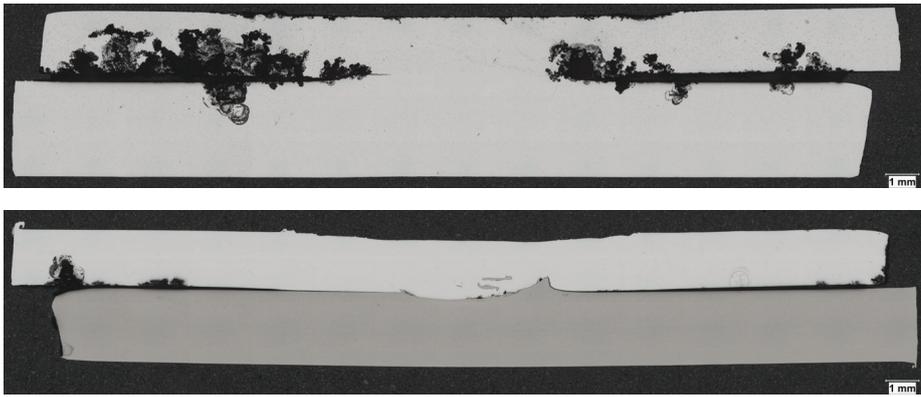


ABBILDUNG 3. Querschnittsansicht von Multimaterial-Reibrührschweißbaugruppen (FSW) nach 100.000 km Straßenbelastung zwischen Rad und Schmutzfänger. Oben: Dominanter Spaltmechanismus in einer AA7000er auf AA6000er Reihe FSW-Montage, unten: Dominante galvanische Korrosion in der AA5000er auf Edelstahl 300er Reihe FSW-Montage.

Korrosion (Abbildung 3). Das NRC, Teil der industriellen Aluminium-Forschungskollaboration ALTec (Abbildung 4), arbeitet an der Weiterentwicklung von Aluminium im Leichtbau und unterstützt die Transportindustrie dabei, diese Probleme zu verstehen, abzumildern und praktische Lösungen zu implementieren.

Trotz der unterschiedlichen Kernkompetenzen der ALTec-Mitgliedsunternehmen haben Korrosionsprojekte einen hohen Stellenwert bei den Mitgliedern. Die Fähigkeit, die Korrosion einer Baugruppe vorherzusagen, ist entscheidend, da die Hersteller von Aluminiumblechen sicherstellen müssen, dass ihre Produkte korrekt eingesetzt werden, um die gewünschten Anforderungen, wie z.B. Zuverlässigkeit, zu erfüllen. Auch die Automobilhersteller benötigen ihre Produkte, um eine gute Leistung zu erbringen und sich im Laufe der Zeit zu behaupten.

⇒ **VERMEIDUNG GALVANISCHER KORROSION**

Es gibt einige allgemeine Regeln, an die sich Autodesigner halten können, um die galvanische Korrosion zu mindern. Dazu gehören (1) das Vermeiden eines großen Kathoden-Anoden-Verhältnisses, (2) das Befolgen der galvanischen Kompatibilitätstabelle, (3) das Vermeiden eines direkten Kontakts zwischen verschiedenen Metallen und (4) das Lackieren beider Materialien, die in Kontakt gebracht werden sollen, oder nur der Kathode, aber niemals nur der Anode. In der Realität kann es jedoch praktisch unmöglich sein, jede dieser Regeln zu befolgen. Ein Beispiel ist die Schwierigkeit, Metall-Metall-Kontakte bei der Verwendung von mechanischen Verbindungselementen zu eliminieren, die im Zusammenhang mit der Montage unterschiedlicher Materialien immer wichtiger werden.

Physikalische Tests, wie z.B.

Straßenbelastungen, zyklische Korrosion und elektrochemische Tests, sind jedoch nach wie vor erforderlich, da sie das Verhalten komplexerer Systeme verdeutlichen können. Die Untersuchung der Belastung im Fahrzeug ist zeitaufwendig und teuer, die üblichen zyklischen Korrosionsverfahren überschätzen das Risiko der galvanischen Korrosion, und elektrochemische Tests sind schwierig zu interpretieren, wenn mehrere Materialien an komplexen Geometrien beteiligt sind.

Forscher haben herausgefunden, dass die



ABBILDUNG 4. Mitglieder (links) und Partner (rechts) der industriellen Aluminium-Forschungskollaboration ALTec (Stand: 19. März 2018).

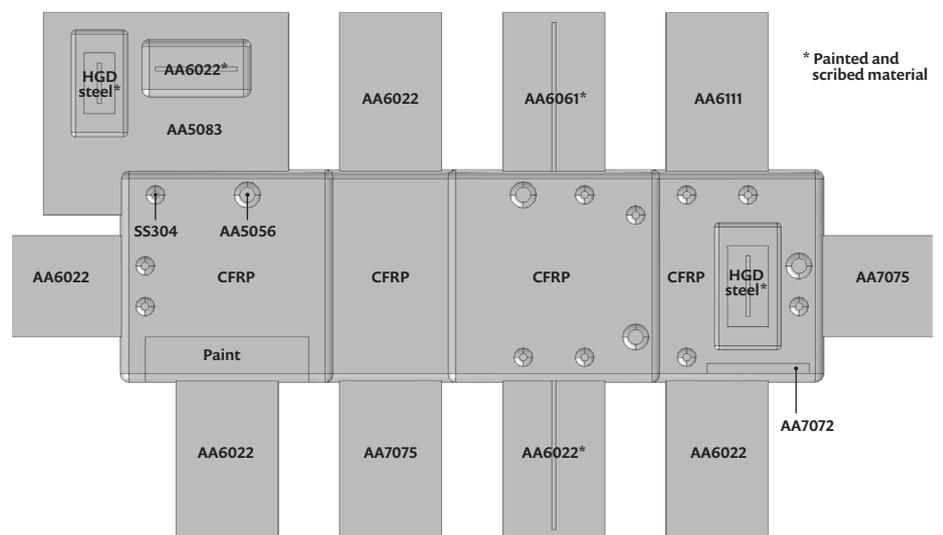


ABBILDUNG 5. Multimaterial-Baugruppe, die gebaut wurde, um die Relevanz der numerischen Simulation von Korrosion für die Früherkennung ungeeigneter Konstruktionen zu demonstrieren.

unter den Fahrzeugen, die Feuchtezeit, die Zusammensetzung, die Leitfähigkeit der auf den Fahrzeugoberflächen abgelagerten Streusalze, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die GPS-Position.

Zu Beginn der Initiative hat Gallant verschiedene Software-Tools zur Simulation von Korrosion in Betracht gezogen. Er fand heraus, dass die COMSOL®-Software es ihm ermöglichte, alle Eigenschaften des Modells zu spezifizieren und zu kontrollieren, anstatt als „Black Box“ mit kontrollierten Eingängen, aber unbekanntem, unveränderlichen internen Berechnungen zu arbeiten. „Die Möglichkeiten der Korrosionsmodellierung von COMSOL, kombiniert mit der Möglichkeit, Geometrien aus anderer Software zu importieren, sind leistungsstark, da wir verschiedene galvanische Kombinationen testen können. Diese Information sagt uns, welche Entwürfe eine geometrische Änderung benötigen, bevor wir mit dem Bau eines physischen Prototyps beginnen“, erklärt Gallant.

Als Fallstudie und Labordemonstration für potenzielle NRC-Kunden bauten Gallant und sein Team eine komplexe Baugruppe aus mehr als 10 verschiedenen Materialien

und Beschichtungen (Abbildung 5). Korrosionsschäden während eines aggressiven viertägigen Laborverfahrens korrelieren gut mit den Simulationsergebnissen und veranschaulichen die Fähigkeit der in der COMSOL Multiphysics-Software erstellten NRC-Korrosionsmodelle, das Korrosionsverhalten einer komplexen Multimaterialbaugruppe vorherzusagen.

Zeitabhängige Studien in der COMSOL Multiphysics Software wurden durchgeführt, um den Schichtdickenverlust einer Opferanode während der Labor-Korrosionsbelastung zu bestimmen (Abbildung 6). Die Versuchs- und Simulationsergebnisse stimmen überein. Wie aus experimentellen Daten und Simulationsergebnissen hervorgeht, wird die Auflösung des Aluminiumnietes auf seiner linken Seite gehemmt, da sich daneben eine größere und aktivere Aluminiumkomponente befindet (Abbildung 7). Auf der rechten Seite korrodiert der Niet durch das edle CFK-Material. Auch hier stellte das Team fest, dass die Simulation die experimentellen

“Die Möglichkeiten der Korrosionsmodellierung von COMSOL, kombiniert mit der Möglichkeit, Geometrien aus anderer Software zu importieren, sind leistungsstark, da wir verschiedene galvanische Kombinationen testen können. So erfahren wir, welche Entwürfe eine geometrische Änderung benötigen, bevor wir mit dem Bau eines physischen Prototyps beginnen..”

– DANICK GALLANT, TECHNICAL LEADER IM AUTOMOTIVE AND SURFACE TRANSPORTATION RESEARCH CENTER

Beobachtungen gut beschreibt.

⇒ APPS UNTERSTÜTZEN SPITZENDESIGN

Nach der Erstellung des numerischen Modells erstellt Gallant mit dem Application Builder in der Software COMSOL Multiphysics eine Simulations-App, die mit den Kollegen von NRC und ALTec-Mitgliedern geteilt werden kann. Mit einer lokalen Installation des COMSOL Server™-Produkts (Abbildung 8) kann er Apps schnell über eine Weboberfläche bereitstellen, Benutzer verwalten, individuelles Branding anwenden und bei Bedarf Updates austauschen. Seine Kollegen und Kunden können die Apps jederzeit über ihren Webbrowser und die bereitgestellten Login-Informationen aufrufen.

Ein Beispiel für eine Simulationsanwendung zur Berechnung der galvanischen Korrosion, die in einer komplexen Multimaterial-Baugruppe auftritt, ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Anwender der App kann die Komponenten der Baugruppe auswählen und die Elektrolytdicke, Konvektion und Temperatur festlegen. Beim Ausführen der App kann der Anwender das Elektrolytpotential, die Stromdichte und die Elektrodendickenänderung visualisieren. Kundenspezifische Ergebnisdateien können auch zur weiteren Datenanalyse mit MATLAB®- oder RStudio®-Skripten exportiert werden, die vom NRC geschrieben und an die Kundenspezififikationen angepasst werden.

Apps erleichtern auch die Kommunikation zwischen dem für die Leistung des gesamten Fahrzeugs verantwortlichen Ingenieur und dem Korrosionsingenieur. Zuvor mochten die Erstgenannten den Vorteil einer Geometrieänderung oder eines Materialtausches nicht immer anerkennen,

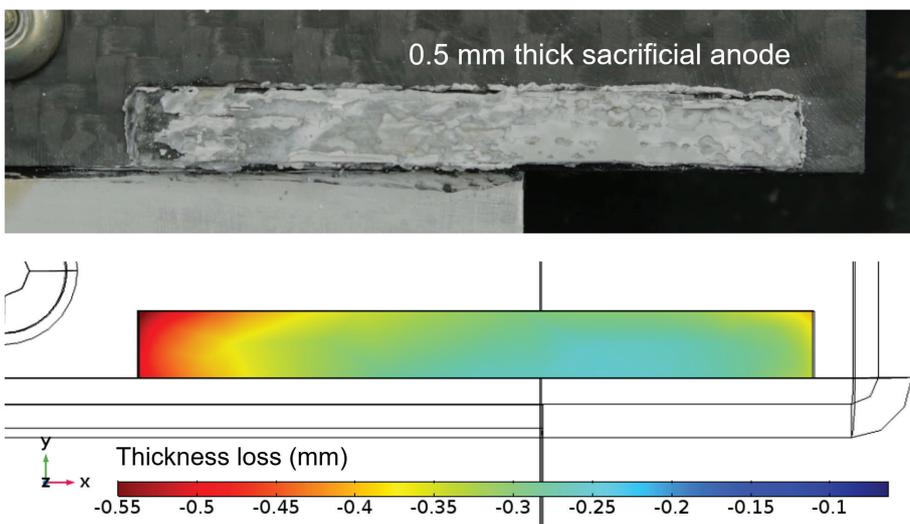


ABBILDUNG 6. Zeitabhängige Analyse (unten) zur Bestimmung des Dickenverlustes eines Opferbauteils während der gesamten Labor-Korrosionsbelastung (oben).

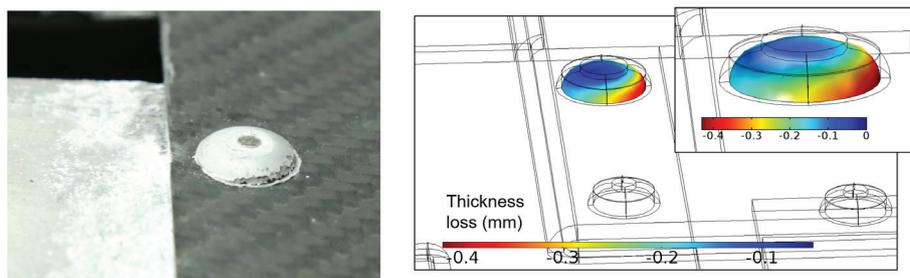


ABBILDUNG 7. Zeitabhängige Analyse (rechts) zur Bestimmung der Auflösung des Aluminiumnietes (links).

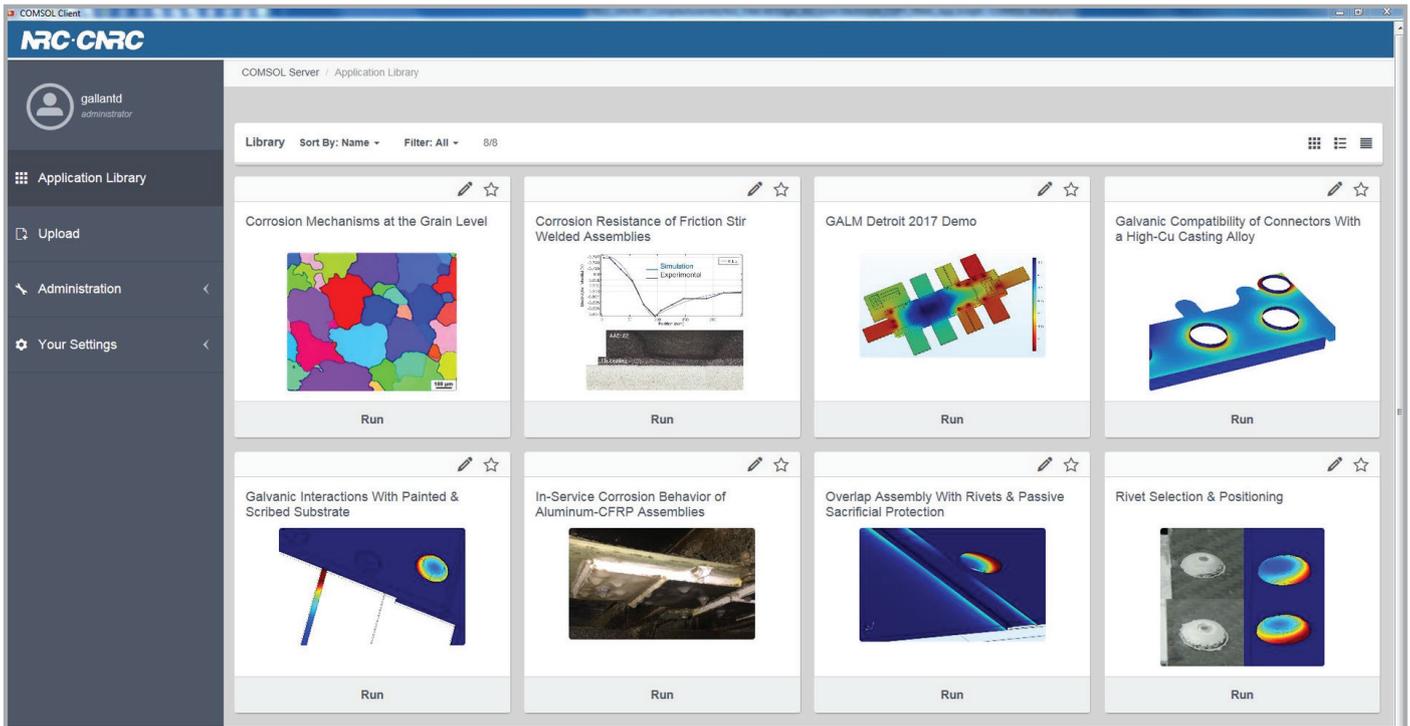


ABBILDUNG 8. Ansicht des von NRC gebrandeten COMSOL Server™ in einem Webbrowser.

falls damit vom Bewährten abgewichen wurde oder es dadurch teuer wurde. Aber mit der Einführung von Apps kann der Korrosionsingenieur dem Konstrukteur eine konkretere Begründung liefern und klar aufzeigen, wo und warum Korrosion auftreten wird.

„Unsere nächsten Schritte sind, den ALTec-Mitgliedern die Möglichkeit zu geben, den Montageort am Fahrzeug innerhalb der App auszuwählen, was ihnen eine bessere Darstellung des Elektrolyten im Modell ermöglicht und ihnen ein noch besseres Vorhersagewerkzeug bietet. Die Möglichkeiten, die COMSOL Server bietet, sind nahezu unbegrenzt und lassen sich durch die Flexibilität leicht an spezifische Kundenanforderungen anpassen“, erklärt Gallant.

⇒ **SIEG IM LEICHTBAU-RENNEN**

Mit Multiphysik-Simulationen und Apps ist es einfacher, die richtigen Materialien und Geometrien während des gesamten Designprozesses auszuwählen, was die Implementierung von Aluminium in neue Leichtbaukonstruktionen erheblich erleichtert. Das Team des National Research Council Canada und seine Industriepartner werden weiterhin den Weg für mehr Innovation in der Aluminiumherstellung ebnen und so die richtungweisende Einführung von Aluminium im Automobilleichtbau unterstützen. ❖

Email: Danick.Gallant@cnrc-nrc.gc.ca

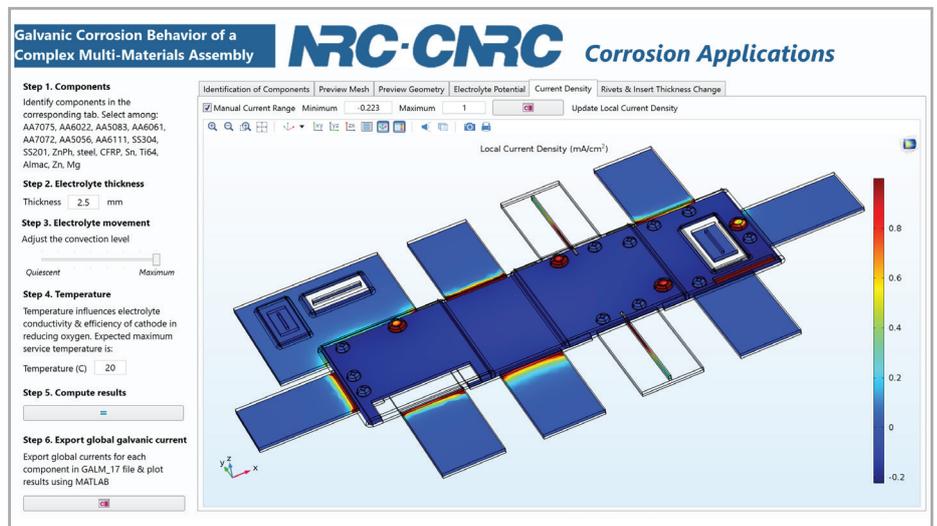
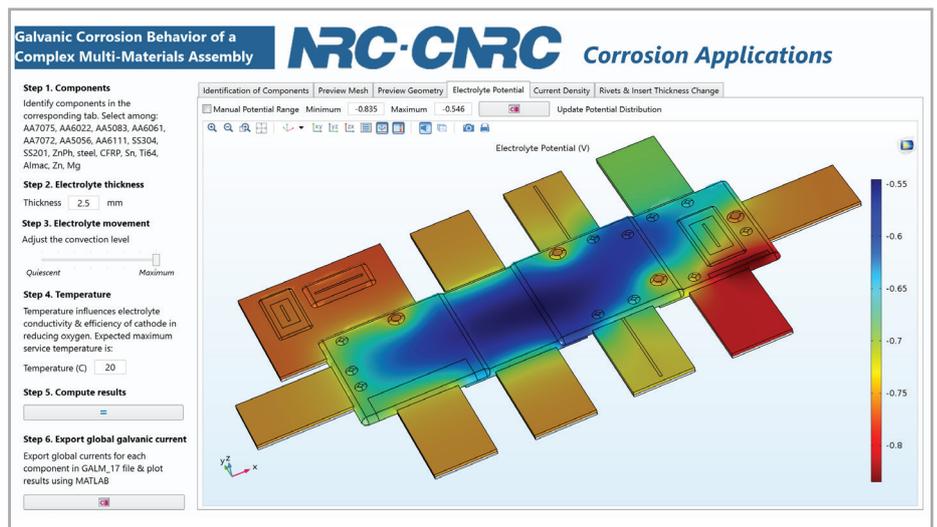


ABBILDUNG 9. Simulations-App zur Bestimmung des galvanischen Korrosionsverhaltens einer komplexen Multimaterial-Baugruppe. Oben: Visualisierung des Elektrolytpotentials über die gesamte Baugruppe. Unten: Visualisierung der Stromdichte in der gesamten Baugruppe.

Magnetgetriebe erhöhen die Lebensdauer von Offshore-Windparks

Bei Sintex wird Multiphysik-Simulation eingesetzt, um berührungslose Magnetkupplungen zu entwickeln und zu analysieren. Solche Systeme werden deutlich die Zuverlässigkeit, Medientrennung und das Auffinden wesentlicher Komponenten in Offshore-Windkraftanlagen und chemischen Pumpenanwendungen verbessern.

von **ZACK CONRAD**

Ob Fahrzeugmotor, Windkraftanlage oder so etwas Einfaches wie eine Armbanduhr, die Drehmomentwandlung und die Übertragung der Drehkraft sind für verschiedene technologische Anwendungen wichtig.

Traditionell wird die Übertragung durch eine Reihe von kollinearen mechanischen Getrieben oder Wellen erreicht, die das Drehmoment und damit die Leistung übertragen. Doch die mechanische Übertragung hat ihre Grenzen, nämlich die Anfälligkeit für Reibung, Verschleiß und Überlastung durch den ständigen Kontakt. Da sich der Anwendungsbereich der Technologie immer weiter in widrigere und anspruchsvollere Umgebungen ausdehnt, können diese Einschränkungen extrem nachteilig sein. An Orten mit eingeschränkter Zugänglichkeit und rauen Bedingungen ist der Austausch ausgefallener Getriebe eine anspruchsvolle und äußerst kostspielige Aufgabe.

⇒ REIBUNGSFREIE KRAFTÜBERTRAGUNG

Die Ingenieure von Sintex haben eine innovative Alternative entwickelt, die Robustheit und Zuverlässigkeit bietet: Magnetkupplungen. Das Wesentliche an diesen Kupplungen ist, dass die Kraftübertragung nicht über mechanische, sondern über magnetische Kräfte erfolgt, wodurch Kontakt und Verschleiß vermieden werden und die Lebensdauer des Getriebesystems drastisch verbessert wird. Die Kraftübertragung erfolgt über eine Drehmomentkupplung zwischen konzentrischen Permanentmagneten (Abbildung 1). Eine Stromquelle bewirkt, dass sich ein Antrieb dreht, während die Kopplung der Magnetfelder zwischen den Antrieben den zweiten mit der gleichen Geschwindigkeit dreht. Dieses System

ermöglicht die Übertragung der Drehkraft wie bei mechanischen Getrieben, jedoch ohne Reibung und Überlastungsgefahr. Wenn das vom Motor übertragene Drehmoment zu hoch ist, verhindert die Kupplung, dass zu große Mengen auf die Welle aufgebracht werden. Diese Begrenzung vermeidet, dass die Welle ein höheres Drehmoment als das, wofür sie ausgelegt ist, erfährt und sichert so den Betrieb unter den vorgesehenen Bedingungen.

Die berührungslosen Magnetkupplungen von Sintex sind ideal für ihre Kunden in Offshore-Windkraftanlagen und Industrien, die komplexe Pumpsysteme einsetzen. Offshore-Windparks werden zunehmend integraler Bestandteil ihrer Stromerzeugung, erfordern aber aufgrund der schwierigen Reparaturmöglichkeiten eine hohe Zuverlässigkeit der Komponenten. In einigen Turbinen übertragen Magnetkupplungen die Energie vom Motor auf Wasserpumpen, die die elektrischen Komponenten 24 Stunden am Tag kühlen. Da es sich bei diesen Offshore-Systemen um Ferninstallationen handelt, sind vorbeugende Wartungen oder Reparaturen aufwändig und teuer, so dass die Zuverlässigkeit von Magnetkupplungen von unschätzbarem Wert ist. Der Luftspalt zwischen den Antrieben ermöglicht zudem den Einbau eines Separators (Abbildung 2), der eine Medientrennung und geschlossene Systeme für den Einsatz in der Chemie- und Lebensmittelindustrie ermöglicht. Völlig leakagefreie Pumpsysteme sind ebenfalls für den Transport, das Mischen, Rühren und Mahlen von Chemikalien und toxischen Stoffen entscheidend.

⇒ BRANCHENÜBERGREIFENDE MAGNETKUPPLUNGEN

Die Magnetkupplungen von Sintex werden in einer Vielzahl von Anwendungen

eingesetzt und müssen auf Grund vorgegebener Randbedingungen, wie z.B. Gewichts- oder Materialanforderungen und geometrische Einschränkungen, individuell angepasst werden. Während des Konstruktionsprozesses müssen die Ingenieure in der Lage sein, Formen und Materialien von Magneten auszutauschen, um die Anforderungen ihrer Kunden zu erfüllen, ohne physische Prototypen bauen zu müssen, da das Herstellen von magnetischen Prototypen kostspielig und zeitaufwendig ist. Um Zeit zu sparen, nutzt Sintex die Multiphysik-Simulation, um Konfigurationen zu charakterisieren und virtuelle Prototypen von Designs zu erstellen. Flemming Buus Bendixen, ein Senior-Magnetspezialist bei Sintex, verwendet seit zwanzig Jahren die Finite-Elemente-Analyse, wobei COMSOL Multiphysics® sein Hauptwerkzeug des letzten Jahrzehnts ist.

„Einer der großen Vorteile von COMSOL aus meiner Sicht ist, dass man viele verschiedene Arten von Simulationen durchführen kann; man kann viele physikalische Aspekte einbeziehen und diese können miteinander interagieren“, sagt Bendixen. Sein Team verfügt über

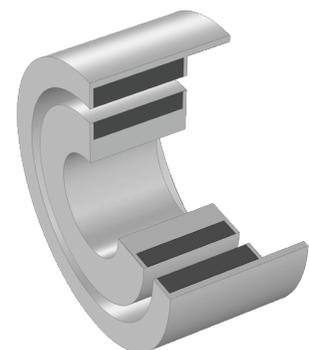


ABBILDUNG 1. Prinzipskizze einer Magnetkupplung.

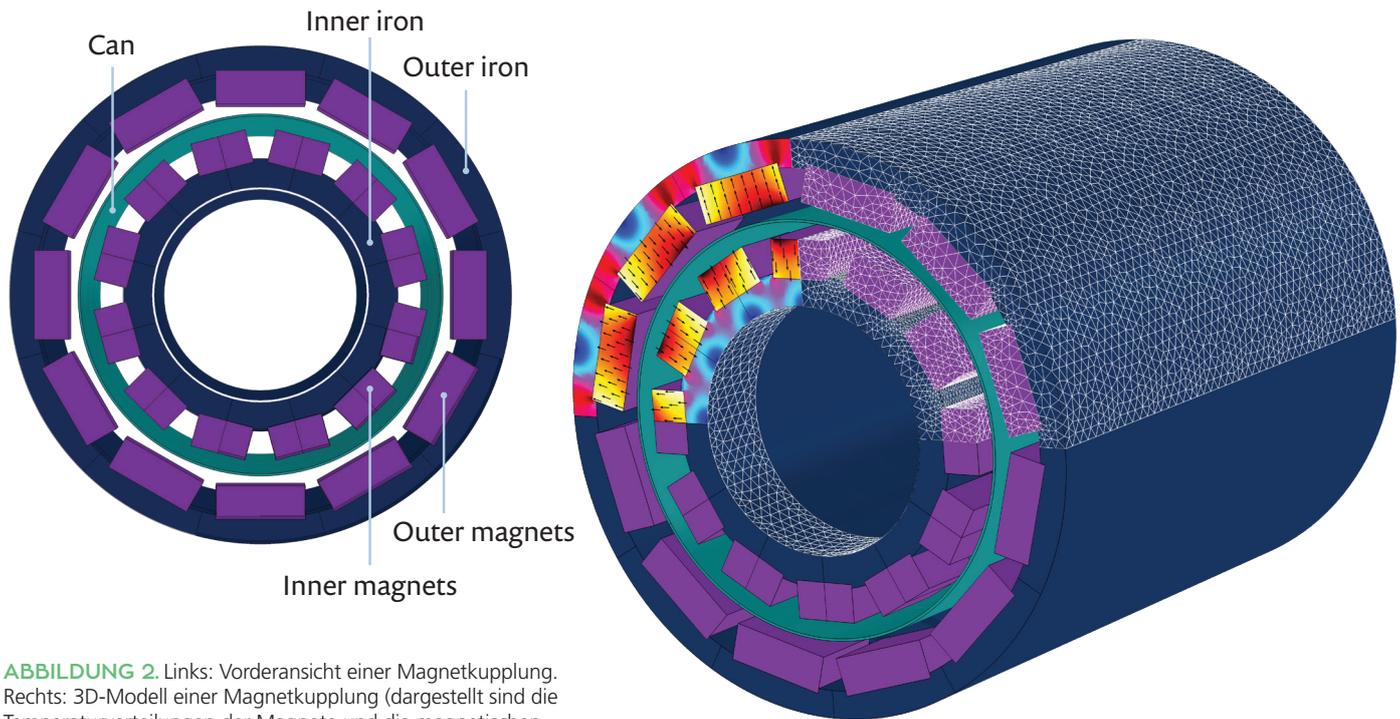


ABBILDUNG 2. Links: Vorderansicht einer Magnetkupplung. Rechts: 3D-Modell einer Magnetkupplung (dargestellt sind die Temperaturverteilungen der Magnete und die magnetischen Flussdichten durch das Eisen und das Netz).

eine Fülle von unglaublich detaillierten und komplexen Modellen und aufgrund der intensiven Verifikation und Validierung, die die Modelle durchlaufen, vertraut das Team nun voll auf sie. Das spart nicht nur Zeit, sondern senkt auch den Preis für den Kunden und ermöglicht eine stärkere Fokussierung auf die feineren Details.

⇒ RISIKOBESEITIGUNG DURCH NEUE DESIGNS

Mit Hilfe der Multiphysik-Simulation untersucht Bendixen die Wechselwirkungen zwischen den Antrieben einer Magnetkupplung und berechnet die Drehmomentübertragung vom Außenantrieb zum Innenantrieb. Da der Hauptzweck von Magnetkupplungen darin besteht, das maximale Drehmoment und die maximale Leistung entlang einer Achse zu übertragen, ist die Drehmomentübertragung die bestimmende Eigenschaft; daher wird sie auf verschiedene Arten berechnet, einschließlich Maxwells Spannungstensor, Nachbearbeitungsmethoden und der

Arkkio-Methode. Die Analyse wird durch Experimente verifiziert und hat Fehler von nur 1% geliefert, was der Genauigkeit des Modells entspricht. Während des Entwicklungsprozesses einer neuen Konstruktion kann das Modell verwendet werden, um das in einer bestimmten Konfiguration übertragene Drehmoment zu maximieren.

Da Dauermagnete und ihre Felder zahlreiche Nebeneffekte hervorrufen, unternimmt Bendixen erhebliche Anstrengungen, sie zu modellieren. In Metallen, wie z.B. dem Stahlblech in der Kupplung, werden durch die äußeren Magnetfelder Wirbelströme erzeugt, die zu elektrischen Verlusten führen. „Die sich verschiebenden Nord- und Südpole erzeugen Spannungen im Stahl; dieser leitet Strom, der die Energie aus dem System ableitet“, erklärt Bendixen. Diese Verluste können als Hüllenverluste (Can Losses) bezeichnet werden, die mit Nachbearbeitungswerkzeugen in der Software simuliert werden und so weit wie möglich reduziert werden müssen.

Vor kurzem hat das Team auch eine Maschine entwickelt, die experimentell die Hüllenverluste von Designs testet und die Genauigkeit ihres Modells auf wenige Prozent bestätigt.

„Wir widmen uns der Erfassung der wirklich nichtlinearen Natur des Magnetismus, und mit COMSOL können wir genau das tun, um eine optimale Magnetisierung des Arrays zu gewährleisten“, sagt Bendixen. Durch den Einsatz hochgradig nichtlinearer Hysteresekurven und die Nutzung eigener Materialtemperaturabhängigkeiten für die magnetische Belastung helfen die Simulationen (siehe oben) zu verhindern, dass die Dauermagnete ihre kritische Temperatur erreichen und irreversibel entmagnetisiert werden, was für die Zuverlässigkeit der Produkte von entscheidender Bedeutung ist. „Es ist sehr wichtig, die Temperatur zu kennen, der die Magnete standhalten, und ich kann das ganz genau berechnen“, fügt Bendixen hinzu. „Wenn die Magnete zu heiß werden, können sie teilweise entmagnetisiert werden.“

Bendixen nutzt die Flexibilität der Multiphysik-Simulation durch den Import der Sintex-Magnetmaterialbibliothek, die eine Vielzahl von individuellen magnetischen Konfigurationen ermöglicht.

⇒ SIMULATIONSKOMPETENZ AUF KNOPFDRECK

Nachdem Sintex mit der Komplexität ihrer Modelle vertraut war, bestand der

„Einer der großen Vorteile von COMSOL aus meiner Sicht ist, dass man viele verschiedene Arten von Simulationen durchführen kann; man kann viele physikalische Aspekte einbeziehen und diese können miteinander interagieren“

– FLEMMING BUUS BENDIXEN, SENIOR-MAGNETSPEZIALIST BEI SINTEX

nächste Schritt darin, ihre Verwendung zu erweitern und sie für Nicht-Simulationsexperten zugänglicher zu machen. Früher, als Vertriebsmitarbeiter und andere Kollegen, die sich nicht mit Simulationstechniken auskannten, Tests an Konstruktionen durchführen mussten, gingen sie zu Bendixen, um alle Berechnungen durchführen zu lassen.

Bendixen entwickelte Simulations-Apps auf Basis seiner Multiphysik-Modelle und erreichte somit eine bisher unerreichte Produktivität und Komfort beim Simulieren. Sintex verwendet derzeit zehn verschiedene Simulations-Apps mit bis zu zwanzig verschiedenen Benutzern. Die Apps werden direkt in COMSOL Multiphysics® über den Application Builder erstellt und können dann über einen Webbrowser über die Verbindung zu COMSOL Server™ aufgerufen werden. Die vereinfachte Benutzeroberfläche und die einfache Bereitstellung bieten allen Mitarbeitern eine einfache Handhabung. Ausgewählte Kunden erhalten sogar Zugriff auf diese Apps und deren Rechenleistung. „Ich habe die Apps entwickelt, weil einige meiner Kollegen nicht so gut mit Simulationssoftware umgehen können und gerne selbst einige Systemtests und Simulationen durchführen würden, und die Apps ermöglichen es ihnen, dies einfach zu tun“, sagt Bendixen.

Simulations-Apps erlauben es dem Anwender, Parameter zu variieren, ohne das zugrundeliegende Berechnungsmodell ändern zu müssen. „Vertriebsmitarbeiter können die Abmessungen ändern und Simulationen durchführen, während sie am Telefon mit Kunden sind, um die Übereinstimmung mit ihren Spezifikationen innerhalb von Minuten zu überprüfen“, sagt Bendixen. Aber trotz der Einfachheit der Schnittstelle gibt es immer noch eine große Flexibilität, um bei Designiterationen innovativ zu sein. Mit den Apps von Sintex kann der Anwender sowohl geometrische als auch magnetische Parameter einstellen. Das Modell berechnet dann die kritischen Temperaturen der Magnete, Remanenzverteilungen, Magnetfeldflussdichten, Drehmomente und Hüllenverluste. Abbildung 4 ist ein Beispiel für eine App, die die im Separator erzeugten Wirbelströme simuliert. Aus diesen Strömen kann dann die resultierende Verlustleistung berechnet werden. Jetzt können Personen in allen Phasen der Entwicklung zum Designprozess beitragen und helfen, die Zuverlässigkeit ihrer Produkte zu maximieren.

⇒ BLICK IN DIE ZUKUNFT

Sintex entwickelt auch ein neuartiges



ABBILDUNG 3. Standard-Magnetkupplungen.

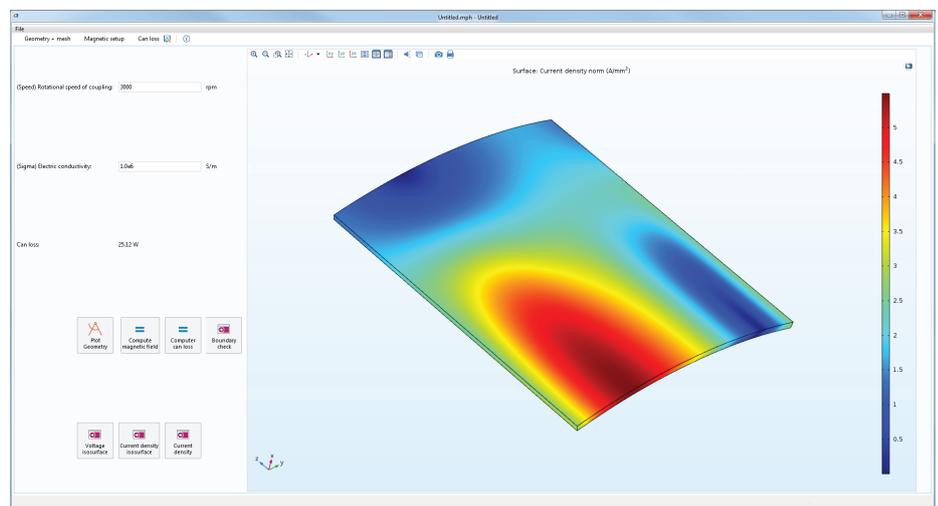
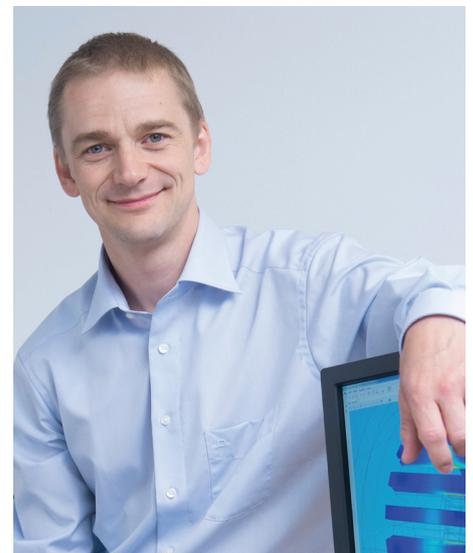


ABBILDUNG 4. Dieser Teil der Simulations-App modelliert die induzierte Wirbelstromdichte in der Hülle und berechnet den resultierenden Energieverlust.

magnetisches Reluktanzgetriebe, das den Anwendungsbereich von Zahnrädern im Allgemeinen erweitern wird. Neben der zuverlässigen, berührungslosen magnetischen Übertragung des Drehmoments können diese Getriebe die Drehzahl oder das Drehmoment zwischen den Antrieben verändern, wodurch sich mechanische Vorteile bei festen Übersetzungsverhältnissen ergeben. In einem einzigartigen Konstruktionsmerkmal enthalten diese Getriebe einen einzigen Permanentmagneten mit einer Magnetisierung parallel zu den Wellen, was die Montage erheblich vereinfacht und einen hohen Grad an Individualisierung ermöglicht. Und mit Simulations-Apps, die mehr Mitarbeiter in den Analyseprozess einbeziehen, kann Bendixen mehr Zeit damit verbringen, alle magnetischen Technologien von Sintex konsequent zu verbessern. ❖



Flemming Buus Bendixen, Senior-Magnetspezialist bei Sintex.

Alles im Fluss - Optimierung von Fluidsensoren

Produktentwickler bei Endress+Hauser verbessern die Empfindlichkeit von Durchflusssensoren zur Messung von Flüssigkeitsdichte, Viskosität, Massendurchfluss und Temperatur für Anwendungen in der Wasser-, Lebensmittel-, Pharma-, Öl- und Gasindustrie.

von **VALERIO MARRA**

Wenn Sie Ihr Auto starten, ein Glas Wasser aus dem Wasserhahn füllen oder Saft aus einem Getränke-Karton trinken, haben Sie es mit sorgfältig extrahierten, verarbeiteten und auf Qualität geprüften Flüssigkeiten zu tun. Die erstaunlichen Vorüberlegungen und Technologien, mit denen solche Flüssigkeiten für den Verbraucher nutzbar gemacht werden, sind oft wenig beachtet, erfordern aber eine präzise Messung und Überwachung.

Wie erkennen Sie bei der Verarbeitung von pharmazeutischen Produkten, ob eine Flüssigkeit die gewünschte hohe Qualität aufweist? Wenn Sie mit Rohöl arbeiten, woher wissen Sie, wie viel Sie fördern? Wenn Sie Wasser transportieren, woher kennen Sie die Durchflussmengen und die Volumenverteilung?

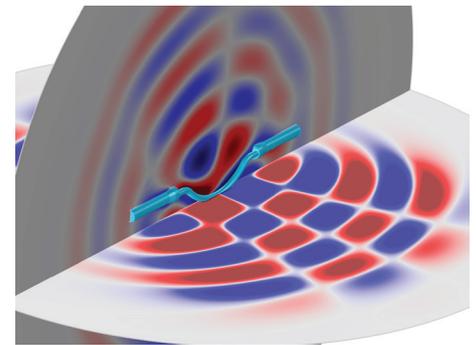
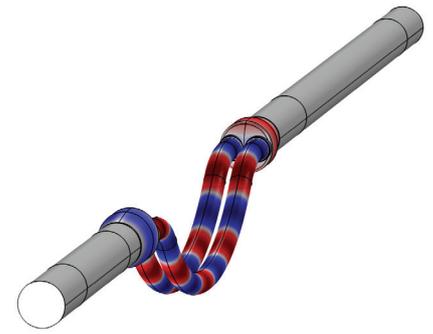
Fragen wie diese, die das Vertrauen in - und das Geschäftsergebnis von - Wasser-, Pharma-, Lebensmittel-, Öl- und Gasunternehmen beeinflussen, werden von den Herstellern von Durchflusssensoren, die in Rohrleitungen und anderen Komponenten sitzen, beantwortet. Bei Endress+Hauser arbeiten Ingenieure unermüdlich daran, präzise Sensoren

für eine Vielzahl von Substanzen zu entwickeln und zu warten. Je nach Einsatzbereich erfordern diese Sensoren unterschiedlichste Messmethoden.

⇒ CORIOLISKRÄFTE MESSEN

Um die Eigenschaften einer in einem Rohr fließenden Flüssigkeit zu bestimmen, messen Sensoren von Endress+Hauser die Auswirkungen der Corioliskraft in einem Gerät. Dieses wird in die aus einem oder mehreren oszillierenden Messrohren bestehende Rohrleitung eingesetzt.

Das Rohr wird erregt, bevor Flüssigkeit in das Gerät eintritt. Wenn eine ruhende Flüssigkeit das Gerät füllt, schwingt das Rohr gleichmäßig. Sobald die Flüssigkeit im Schwingrohr zu fließen beginnt, übt sie eine Kraft auf ihre Wände aus. Die Schwingung des Messrohres wird von den Flüssigkeitspartikeln als Rotation um eine Achse gesehen. Da sich Fluidteilchen in einem sich bewegenden Bezugsrahmen bewegen, erfahren sie eine Trägheitskraft, die senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung und zur Drehachse wirkt: die Corioliskraft. Da die Ein- und Ausläufe des Schwingrohres gegenläufige



Line Graph: Sound pressure level (dB)

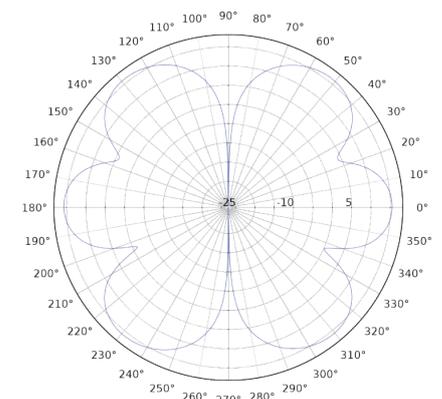


ABBILDUNG 2. Simulation des Schallfeldes in und um das Schwingrohr (oben und in der Mitte) und ein Schalldruckpegel-Diagramm in dB (unten).

Drehbewegungen ausführen, wirken die induzierten Kräfte asymmetrisch auf das Rohr ein und bewirken eine Phasenverschiebung oder Zeitverzögerung entlang des Rohres.

Die Verdrehungskomponente der Rohrbewegung verursacht verschiedene Abschnitte des Rohres mit einer Zeitverzögerung oder Phasenverschiebung zu schwingen. Diese Phasenverschiebung und die neue Schwingfrequenz des Rohres sind eine Funktion des Massenstroms in den Rohren bzw. der Dichte des Fluids. So können die Signale des Zählers interpretiert werden, um den Massen- oder Volumenstrom zu messen und sicherzustellen, dass die gewünschte Flüssigkeitsmenge transportiert wird.

Ebenso führt eine Erhöhung der Flüssigkeitsviskosität zu einer Erhöhung der Dämpfung der Schwingungen. Die Schwingfrequenz ist hauptsächlich ein



ABBILDUNG 1. Coriolis-Durchflussmesser von Endress+Hauser.

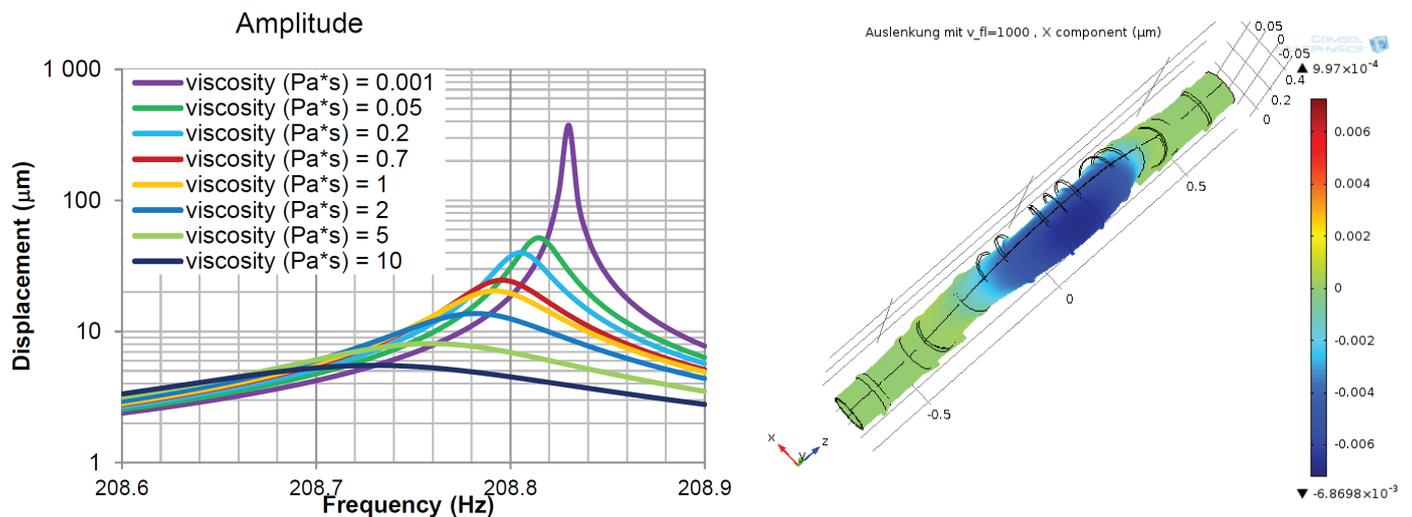


ABBILDUNG 3. Simulationsergebnisse, die die Änderung der Rohrschwingfrequenz für verschiedene Fluidviskositäten und die daraus resultierende mechanische Auslenkung zeigen. Rechts ist ein visuelles Beispiel für die Rohrverformung durch die oszillierende Bewegung zu sehen.

direktes Maß für die Flüssigkeitsdichte. So werden die Schwingungen zum Beispiel bei einer Substanz wie Öl (geringere Dichte und höhere Viskosität) schneller, aber stärker gedämpft, als bei einer Flüssigkeit wie Wasser (höhere Dichte und niedrigere Viskosität). Die Messung der Frequenz und der Dämpfung von Schwingungen ermöglicht die Bestimmung von Dichte und Viskosität und die Überwachung der Prozessqualität in Bezug auf den Flüssigkeitsstrom. Die gleichen physikalischen Effekte würden für ein Objekt gelten, das in einer sich bewegendem Flüssigkeit schwingt, z.B. einem Cantilever.

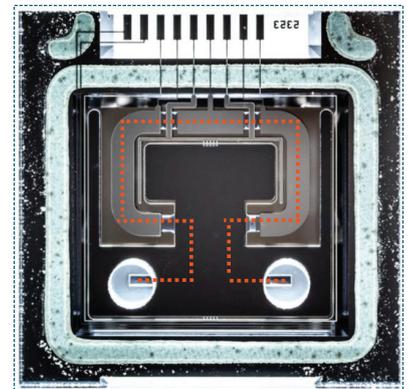
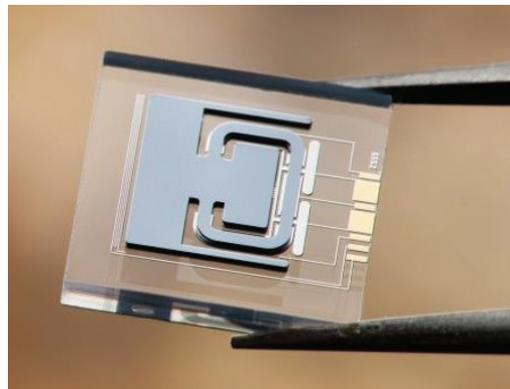


ABBILDUNG 4. MEMS-Coriolis-Chip für Dichte- und Viskositätsmessungen. Links: Kompletter Sensor, der von einer Zange gehalten wird. Rechts: Chip-Layout im Inneren des Gerätes

⇒ EIN VISKOAKUSTISCHES BEISPIEL

Vivek Kumar, ein erfahrener Experte für numerische Simulation bei Endress+Hauser Flowtec AG, der Niederlassung von Endress+Hauser, die derartige Durchflussmesser herstellt (Abbildung 1), arbeitet an der Leistungsverbesserung der Sensoren. Seine Modellierungsarbeit hat seinem Team

„Mit Hilfe der Simulation konnten wir verschiedene Fälle analysieren und letztendlich unser Gerätedesign optimieren, um unseren Kunden zu helfen, die Materialeigenschaften für die von ihnen verwendeten oder extrahierten Flüssigkeiten zu charakterisieren.“

geholfen, die akustischen, strukturellen und flüssigen Strömungseffekte in ihren Durchflussmessern auf einer tiefgründigen Ebene zu verstehen. Das Verständnis, wie die Fluid-Struktur-Wechselwirkung und die Vibroakustik die Leistung eines Sensors beeinflussen, ermöglichte es ihnen, verschiedene Designanpassungen vorzunehmen, um die Leistung und Qualität des Messgerätes zu verbessern.

Das Team begann seine numerische Analyse mit einem viskoakustischen Modell, um die komplexe viskose Dämpfung zu verstehen, die auftritt, wenn eine viskose Flüssigkeit durch das Schwingrohr fließt. Sie untersuchten das gekoppelte Verhalten von Strukturverformung und akustischer Wellenausbreitung und modellierten die Fluid-Struktur-Wechselwirkung im Frequenzbereich, um vorherzusagen, wie der Durchflussmesser auf verschiedene Flüssigkeiten reagieren würde. Abbildung 2 zeigt, wie sich die durch

turbulente Strömung erzeugte Schallwelle im umgebenden Messgerät ausbreitet.

„Mit COMSOL Multiphysics versuchen wir, den Einfluss von Strömungsgeräuschen auf die Umgebung und den Durchflussmesser abzuschätzen“, so das Team.

Sie analysierten die Auswirkungen der Flüssigkeitsviskosität auf die Schwingfrequenz des Rohres. Abbildung 3 zeigt Simulationsergebnisse, die sowohl die Frequenz als auch die Verformung des Rohres für Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Viskosität vorhersagen. Mit der Fähigkeit, die physikalischen Effekte, die eine Verschiebung der Frequenzangabe des Messgerätes verursachen, zu simulieren und besser zu verstehen, ist das Team in der Lage, diese Effekte zu nutzen. So kann die Leistung des Messgerätes verbessert werden, indem beispielsweise unerwünschte Effekte herausgefiltert werden. In diesem Fall wird die Variation der Rohrdämpfung genutzt, um die Viskositätseinflüsse auf den gemessenen Dichtefehler zu kompensieren.

„Wir wollten verstehen, wie sich

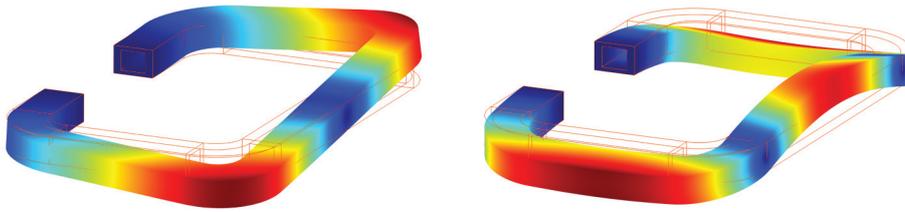


ABBILDUNG 5. Zwei Eigenmoden des oszillierenden Mikrokanals. Die Farbe kennzeichnet die relativen Auslenkungen verschiedener Bereiche des Kanals.

verschiedene Flüssigkeiten auf die Sensorleistung auswirken", kommentierten sie. „Mit Hilfe der Simulation konnten wir verschiedene Fälle analysieren und letztendlich unser Gerätedesign optimieren, um unseren Kunden zu helfen, die Materialeigenschaften für die von ihnen verwendeten oder extrahierten Flüssigkeiten zu charakterisieren“.

⇒ EIN MIKROSKOPISCHES BEISPIEL

Die TrueDyne Sensors AG, ein Tochterunternehmen der Endress+Hauser Flowtec AG, entwickelt MEMS-Bauelemente nach einem ähnlichen Konzept. Sie entwickeln und testen oszillierende Sensoren zur Messung der thermophysikalischen Fluideigenschaften für viele verschiedene Anwendungen. Das Team entwickelt Sensoren für spezifische Kundenlösungen. Daher ist es von größter Bedeutung, dass sie wissen, welche Art von Oszillatoren die beste Empfindlichkeit für einzigartige Fälle bieten würde.

Der MEMS-Coriolis-Chip (Abbildung 4) verwendet einen freistehenden vibrierenden Mikrokanal, der nach dem gleichen Prinzip wie der größere Coriolis-Durchflusssensor arbeitet. Wie bei den Coriolis-Simulationen muss eine Schwingungsanalyse am Mikrokanal durchgeführt werden, um grundlegende Eigenmoden und die Schwingungsraten der beiden Enden des Strömungskanals zu bestimmen (Abbildung 5). Dieser spezielle Sensor wird zur Bestimmung der Dichte und Viskosität von Flüssigkeiten wie Inertgasen, Flüssiggas (LPG), Kohlenwasserstoffkraftstoffen oder Kühlschmierstoffen eingesetzt. Aufgrund seiner Abmessungen ist der Sensor für die Messung sehr kleiner Flüssigkeitsmengen geeignet.

Eine besondere Herausforderung bei einem so kleinen Gerät ist der Temperaturanstieg, der bei einem elektrischen Ausfall durch eine hohe Spannung am Sensor zur Ansteuerung der Erregung auftreten kann. Angesichts dieses Sicherheitsrisikos führte das Team eine thermische Analyse durch (Abbildung 6), um festzustellen, wo die Wärme im Chip abgeführt wurde

und ob die Flüssigkeit zu heiß werden würde. Es wurde bestätigt, dass die Temperatur dank der den Strömungskanal umgebenden Vakuumkammer, die den Wärmeübergang zwischen den Elektroden und der Flüssigkeit minimierte, den Grenzwert nicht überschritt.

⇒ IM DIENSTE DES UNTERNEHMENS UND DES KUNDEN

Beide Teams kommentieren, dass die Flexibilität von COMSOL Multiphysics® in ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit sehr nützlich war, um Durchflussmessgeräte für eine Vielzahl von Anforderungen mühelos auf Spitzenleistung einzustellen. Die Multiphysik-Analyse liefert ihnen Einblicke, die den Gesamtaufwand für Tests und Prototypen reduzieren und es

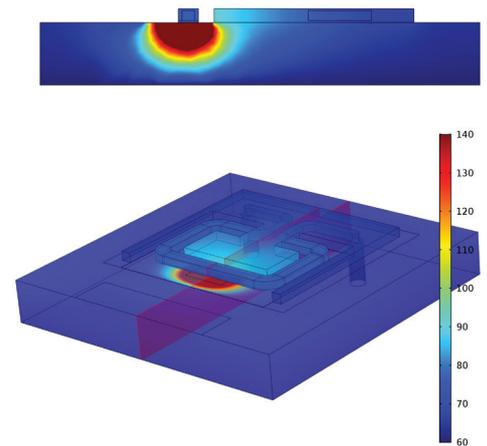
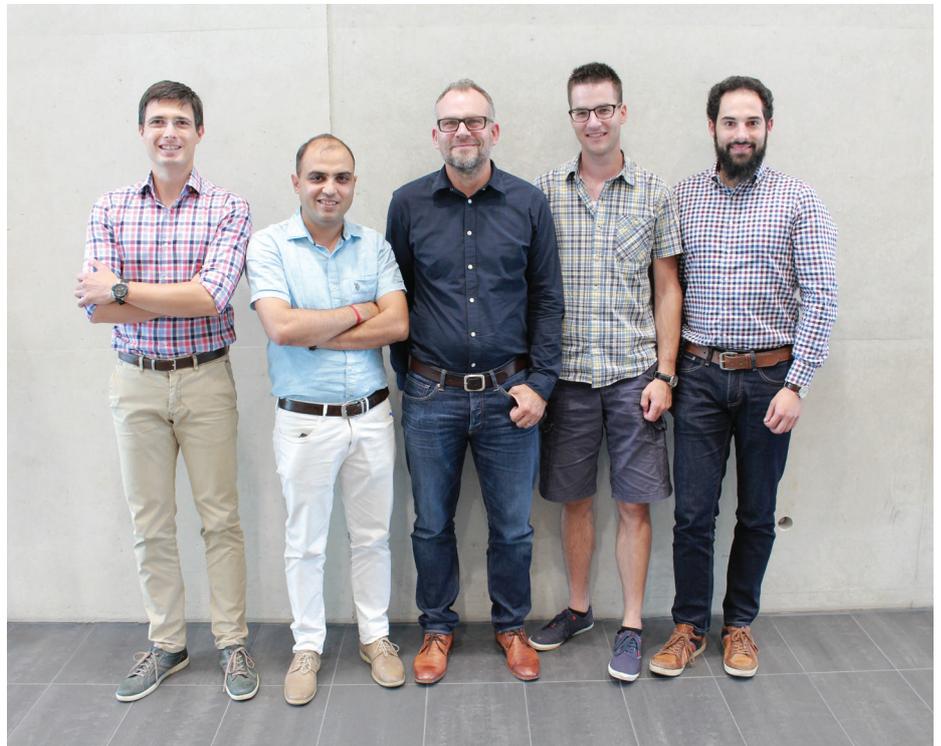


ABBILDUNG 6. Thermische Ergebnisse, welche die Temperatur im MEMS-Coriolis-Chip anzeigen.

ihnen ermöglichen, Sensoren von höchster Qualität herzustellen.

Christof Huber lässt sich von seiner Arbeit inspirieren, wenn er sieht, wie seine Modellierung zu Änderungen an den Gerätekonstruktionen führt, welche die Zufriedenheit der Endress+Hauser-Kunden erhöhen. „Diese Instrumente werden eingesetzt, um die Probleme der Kunden zu lösen. Wir erleben unsere Innovation in der Praxis, wenn sie tatsächlich zum Einsatz kommt. Diese Rückmeldungen sind für unsere Arbeit eine große Motivation.“ ❖



Von links nach rechts: Anastasios Badarlis, Dr. Vivek Kumar, Dr. Christof Huber, Benjamin Schwenter und Patrick Reith.

Die E+H Flowtec AG ist ein Unternehmen der Endress+Hauser Gruppe mit Sitz in Reinach, Schweiz. Truedyne Sensor AG ist ein Tochterunternehmen der Endress+Hauser Flowtec AG.

Simulations-Apps bringen Tribologie-Forschung voran

Forscher der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der Technischen Universität München (TUM) haben ihr multiphysikalisches Modell in eine App zur Simulation von thermoelastohydrodynamisch (TEHD) geschmierten Getriebekontakten überführt. Ihre Geschichte ist eine Lektion in der Bewältigung komplexer, gekoppelter multiphysikalischer Probleme, die Strukturmechanik und Wärmeübertragung mit numerischer Strömungsmechanik verbinden.

von **VALERIO MARRA**

Ein gutes Beispiel dafür, wie komplex Simulationsprobleme des 21. Jahrhunderts sind, ist die elastohydrodynamische (EHD) Schmierung. EHD beschreibt die Kopplung zwischen den Verformungen zweier Gegenläufigen, z.B. in Lagern und Getrieben, und der Hydrodynamik, die zur Trennung beider Flächen führt. Werden thermische Effekte berücksichtigt, spricht man von thermo-EHD (TEHD). Die Schmierfilmdicke liegt in der Regel in der Größenordnung von Mikrometern oder darunter, ist aber ausreichend, um eine geringe Reibung und einen geringen Verschleiß zu gewährleisten. Das detaillierte Verständnis der Mechanismen von TEHD trägt dazu bei, die Leistungsdichte, den Wirkungsgrad und das NVH-Verhalten (Noise-Vibration-Harshness) von Antriebssystemen zu verbessern.

Der Schlüssel liegt in der Gestaltung der geschmierten Kontakte von Maschinenelementen, um den Schmierstoff selbst als Maschinenelement zu behandeln. Die TEHD-Simulation trägt zu einem vertieften Verständnis der geschmierten Kontakte bei und reduziert die Anzahl der Prototypen. Die multiphysikalische

Modellierung und Computersimulation von TEHD-Kontakten ist der beste Weg, um ein solches Problem im Kern zu lösen (Abbildung 1).

⇒ ZUM MESSEN ZU KLEIN

Bei Schmierfilmen und Verformungen der Festkörper in Mikron ist jeder Versuch, mehr über TEHD zu erfahren, indem ein Sensor im Kontaktbereich platziert wird, äußerst schwierig. „Die Schmierfilmdicke zwischen zwei Zahnflanken liegt im Bereich von einem Mikron, was etwa einem Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haares entspricht. Typische Anpressdrücke von bis zu 2 GPa entsprechen etwa 30 Pkw auf der Fläche eines Daumennagels“, erklärt Thomas Lohner, Abteilungsleiter EHD-Tribokontakt und Effizienz der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der Technischen Universität München (TUM).

Mit Hilfe der numerischen Simulation können Ingenieure TEHD-Kontakte konstruieren, um daraus geeignete Kombinationen von Zahnradoberflächen und Schmierstoff abzuleiten. Die Schwierigkeit besteht darin, dass die

TEHD-Simulation ein gekoppeltes bzw. multiphysikalisches Problem ist. Das Schmiermittel ist ein Fluid, so dass das Modell eine Strömungssimulation (CFD) erfordert, für welche die modifizierte Reynolds-Gleichung, eine reduzierte Form der Navier-Stokes-Gleichungen, häufig verwendet wird. Schmiermitteleigenschaften wie die Viskosität hängen stark von Druck- und Temperaturschwankungen ab. Außerdem wird das Fließverhalten des Schmierstoffes bei hohen Schergeschwindigkeiten nichtlinear. Die Kontaktwärme wird durch Scherung und Kompression innerhalb des dünnen Schmierfilms erzeugt und

„Die Kopplung verschiedener Gesetze und Gleichungen ist das Wesentliche an COMSOL und das hat uns bestens geholfen.“

– THOMAS LOHNER, ABTEILUNGSLEITER EHD-TRIBOKONTAKT UND EFFIZIENZ

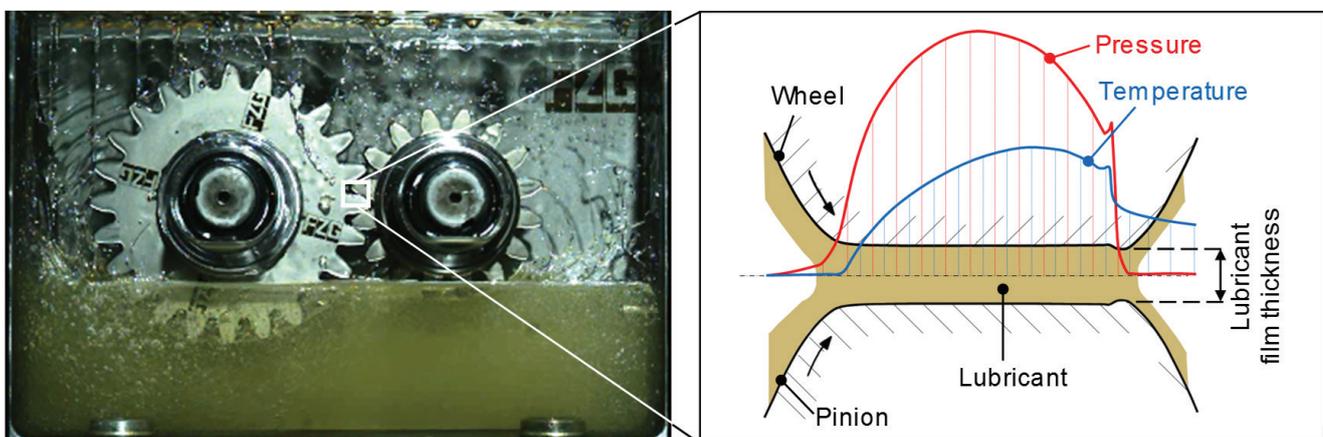


ABBILDUNG 1. Hochgeschwindigkeits-Kamerabild eines tauchgeschmierten Zahnradpaares im Betrieb (links) und schematische Darstellung des EHD-Kontaktes (rechts).

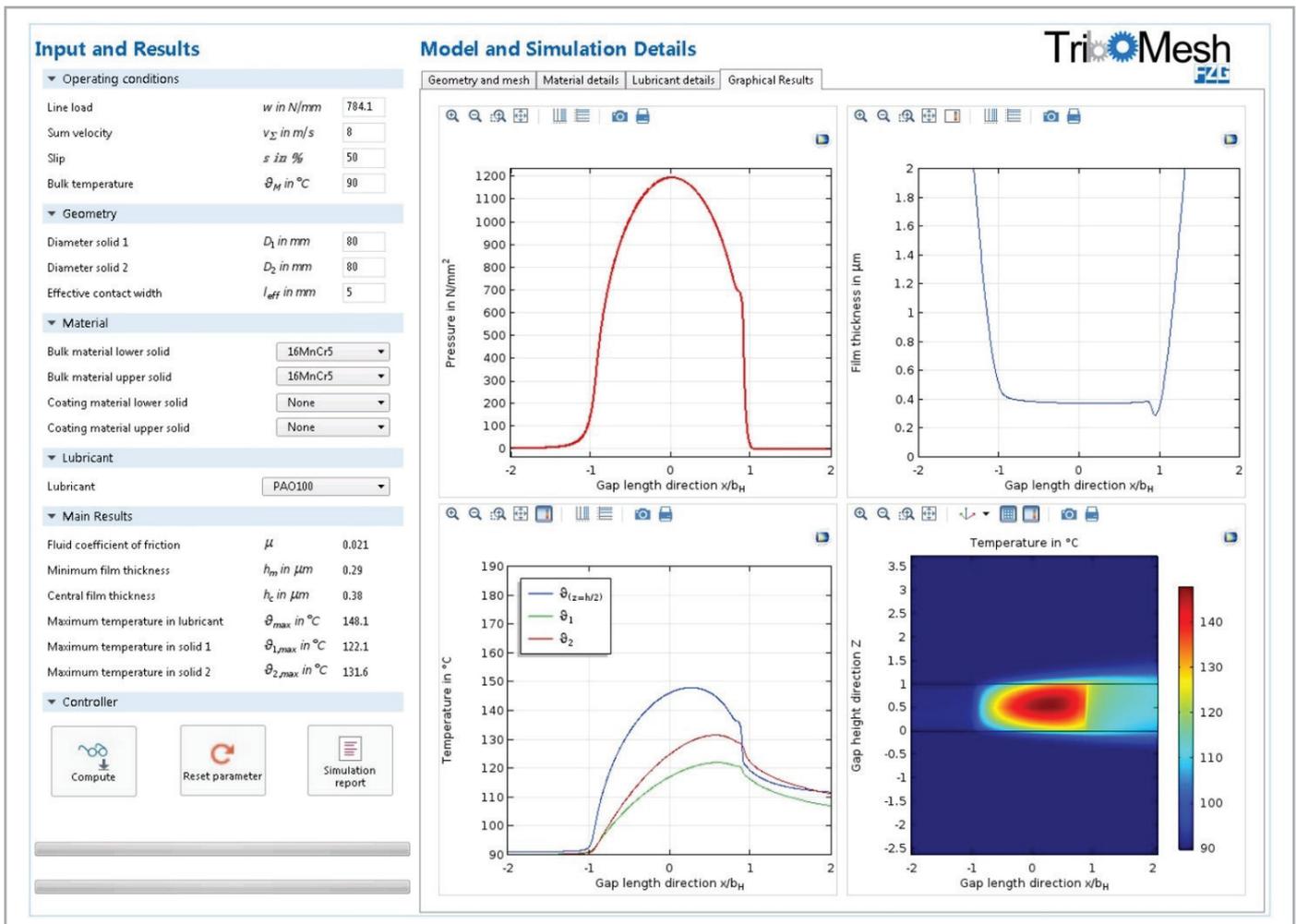


ABBILDUNG 2. Diese maßgeschneiderte Simulations-App verpackt eine komplexe, gekoppelte Physiklösung mit TEHD zu einem leicht zugänglichen Werkzeug für jeden im Forschungszentrum.

durch Konvektion und Wärmeleitung verteilt. Temperaturänderungen beeinflussen die Schmiereigenschaften, die die Hydrodynamik und damit die elastische Verformung und damit die Wärmeentwicklung beeinflussen. Jede Größe beeinflusst die andere, was zu einer hochgradig nichtlinearen Iterationsschleife führt, einschließlich der elastischen Verformung der Zahnradflächen, die durch eine gekoppelte strukturelle Analyse ermittelt wird.

⇒ VOM PAPIER ÜBER DAS MODELL ZUR APP

Lohner und sein Team entwickelten eine App, die auf einer von einem Kollegen, Prof. Wassim Habchi von der Libanese American University, Byblos, Libanon, veröffentlichten Lösungsmethode basiert¹. Eine Veröffentlichung ist jedoch kein funktionierender Code, der Antworten vorhersagen kann. „Wir haben die Lösung mit der Software COMSOL Multiphysics implementiert, die wir als komfortabel empfunden haben“, erklärt Lohner. „Sie erlaubte es uns, die Reynolds-Gleichung

nach Bedarf zu modifizieren und sie mit anderen physikalischen Größen zu koppeln, um unser mathematisches TEHD-Modell zu erstellen“, sagte er. „Die Kopplung verschiedener Gesetze und Gleichungen ist das Wesentliche an COMSOL und das hat uns bestens geholfen.“

Der Hauptvorteil der Verwendung der Software ist die Möglichkeit, die Physik auszuwählen, benutzerdefinierte Gleichungen hinzuzufügen und dann alles miteinander zu koppeln, um eine funktionierende Lösung zu erstellen^[2], ohne die Details der verfügbaren numerischen Lösungstechniken kennen zu müssen, und sich stattdessen auf die Modellierungsaspekte zu konzentrieren. „Wir sind ein Forschungszentrum, das sich mit der Konstruktion und Optimierung von Maschinenelementen, insbesondere von Getrieben, beschäftigt“, erklärt er. „Die Benutzeroberfläche und der multiphysikalische Ansatz hinter COMSOL erlaubten es uns, uns auf die technischen Probleme zu konzentrieren und nicht auf die numerischen Algorithmen hinter der Lösung. Darüber hinaus profitieren wir von der kontinuierlichen Weiterentwicklung

und Aktualisierung der Software.“ Für die Druck- und Schichtdickenberechnung nutzten die Forscher das Weak Form Boundary PDE Interface zur Eingabe der verallgemeinerten Reynolds-Gleichungen¹. Für die Temperaturberechnung verwendeten die Forscher hauptsächlich vordefinierte Interfaces, die in der Software² zur Verfügung stehen.

Lohner und sein Team entwickelten eine Simulations-App namens „TriboMesh“ (Bild 2), die ihre Arbeit im Forschungszentrum noch einfacher machte. Dazu wurde das in der Software enthaltene Tool Application Builder verwendet. Apps ermöglichen es ihren Kollegen, die Simulation auf praktische Weise zu nutzen, um nach neuen Lösungen zu suchen.

Die Simulations-App wurde bereits an ausgewählten Kollegen auf lokalen Arbeitsplätzen eingesetzt. Künftig wird die App auch Kollegen und Projektpartnern über das Produkt COMSOL Server™ zur Verfügung stehen, mit dem sich Apps über einen Webbrowser ausführen lassen.

Eine Anwendung der App dient dem Verständnis, wie eine diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung (DLC) die

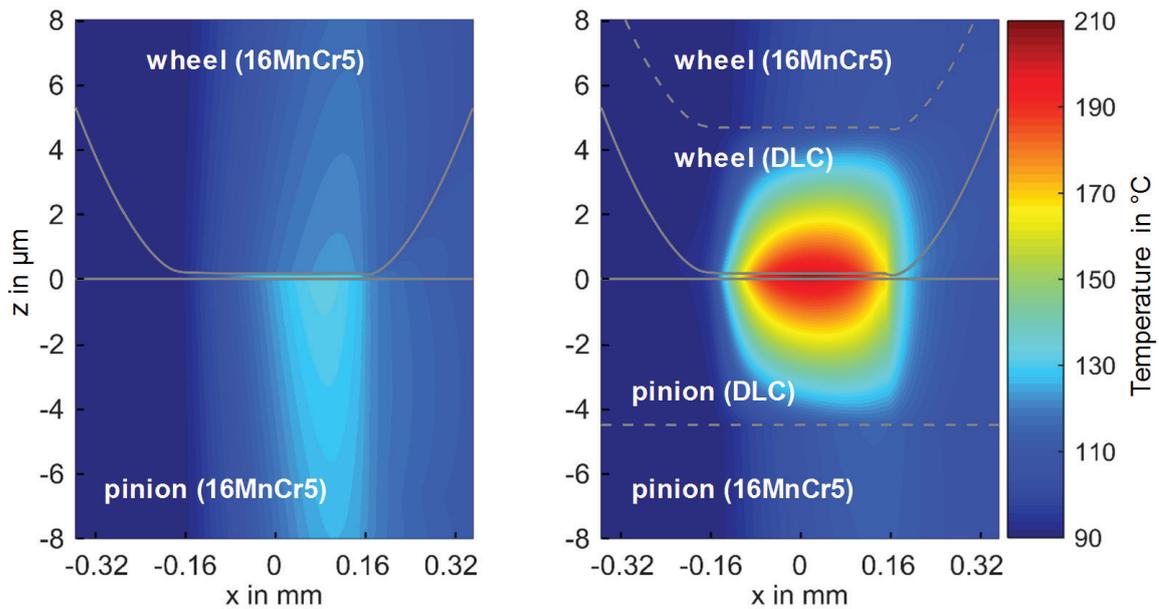


ABBILDUNG 3. TEHL-Simulationsergebnisse: Temperaturverteilung eines unbeschichteten (links) und eines DLC-beschichteten Zahnradpaares (rechts).

Effizienz von Zahnrädern verbessert. „Wir führten Prüfstandsversuche durch, die zeigten, dass der Reibungskoeffizient bei DLC-beschichteten Getrieben im Vergleich zu unbeschichteten Getrieben deutlich niedriger ist“, erklärt Lohner. Aber warum? Die Beschichtung befand sich auf der Oberfläche, also wie kann sie den Schmierstoff beeinflussen? Die Untersuchung mit der App und allen physikalischen Eingaben eines Prüfstandes zeigte, dass die DLC-Beschichtung die Wärme im TEHD-Kontakt einfängt, die Viskosität des Schmierstoffs senkt und die Reibung verringert (Abbildung 3)³. „Die DLC-Beschichtung sorgt für Wärmedämmung, und ohne die Simulation hätten wir unsere Hypothesen nicht gut beweisen können. Wir haben ein detailliertes Verständnis der Wärmeströme im System und des daraus resultierenden Schmierstoffverhaltens gewonnen“, so Lohner.

⇒ EIN RAT FÜR ANDERE: KLEIN ANFANGEN UND AUSBAUEN

Für diejenigen, die Multiphysik-Simulationen und -Apps nutzen, geben Lohner und sein Team einen klugen Rat, der auf ihren Erfahrungen basiert. „Es ist fast unmöglich für jemanden, der mit der Arbeit an sehr komplexen Systemen beginnt, sofort das ganze Problem zu lösen“, sagte er. „Sie müssen Ihr Problem modifizieren, um es im ersten Schritt so einfach wie möglich zu machen.“ In seinem Beispiel modifizierten sie im ersten Schritt die Reynolds-Gleichung, um sie mit einfachen Elastizitätsgleichungen zu koppeln, wobei thermische Effekte ignoriert wurden. „Wir sind dann dazu übergegangen, Schritt für Schritt komplexere Effekte hinzuzufügen“, sagte er. „Sie haben in COMSOL Zugriff auf die gesamte benötigte Komplexität, so dass es einfach ist, gleich alles in Ihren Ansatz aufzunehmen.“ Er warnte davor,

sich zu der Vorstellung verleiten zu lassen, diese Zugänglichkeit sei das Gleiche wie die richtige Lösung des Gesamtproblems. „Sie müssen wirklich Schritt für Schritt methodisch vorgehen, denn das Problem ist sehr komplex. Sie müssen sicherstellen, dass jeder Schritt überprüft wird, bevor Sie zum nächsten Schritt übergehen“, sagte er. ❖

REFERENCES

1. W. Habchi, *A full-system finite element approach to elastohydrodynamic lubrication problems: application to ultra-low-viscosity fluids [Dissertation]*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, 2008.
2. Thomas Lohner, Andreas Ziegler, Johann-Paul Stemplinger, and Karsten Stahl, *Engineering software solution for thermal elastohydrodynamic lubrication using multiphysics software*, *Advances in Tribology*, Volume 2016 (2016), Article ID 6507203.
3. Andreas Ziegler, Thomas Lohner, Karsten Stahl, *TEHL simulation on the influence of lubricants on the frictional losses of DLC coated gears*, *Lubricants*, Volume 6 (2018), doi:10.3390/lubricants6010017.



Mitglieder der Forschungsgruppe EHD-Tribokontakt und Effizienz der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau (FZG) der Technischen Universität München (v.l.n.r.): Andreas Ziegler, wissenschaftlicher Mitarbeiter; Enzo Maier, wissenschaftlicher Mitarbeiter; Thomas Lohner, Abteilungsleiter; und Karsten Stahl, Professor und Direktor des FZG.

Create
THE
Future

DESIGN CONTEST 2018

15th Anniversary

HOW WILL YOUR DESIGNS CHANGE THE FUTURE?

The world's greatest inventions started with an innovator sharing their idea with the world. **Now it's your turn.**

CALL FOR ENTRIES

WIN \$20,000 & GLOBAL RECOGNITION

Now accepting entries!

For Complete Details VISIT:
CreateTheFutureContest.com

JOIN THE CONVERSATION: #CTF2018   

PRINCIPAL
SPONSORS



EFFIZIENZVERBESSERUNG BEIM SINTERN VON EISENERZ

Verfahrenstechniker nutzen die Multiphysik-Simulation, um die Massenproduktion von Stahl schneller, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher zu gestalten.

von **ZACK CONRAD**

Im Mittelpunkt der Fertigung steht das ständige Bestreben, gleichzeitig Effizienz und Qualität zu verbessern, wofür die Stahlindustrie ein Paradebeispiel ist. Da die Stahlproduktion mit einer langen Prozesskette verbunden ist, gibt es reichlich Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Das VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI), eine der führenden europäischen Forschungseinrichtungen in der Entwicklung der Eisen- und Stahlerzeugungstechnologie, nutzt derzeit die Multiphysik-Simulation, um ihre Konfigurationen zu optimieren und zu verbessern.

⇒ VORBEREITUNG DES SINTERS FÜR DEN HOCHOFEN

Ein wichtiger Schritt in der Stahlproduktionslinie ist der Sinterprozess, bei dem eine Mischung aus feinem Eisenerz und anderen Materialien für einen Hochofen vorbereitet wird, um sein Grundmetall auszuschmelzen und schließlich die endgültige Form des Stahls herzustellen. Beim Sintern wird mit hohen Temperaturen ein pulverförmiges Gemisch gebacken, bis es zu einer porösen Masse verschmilzt, die dann in den Hochofen eingebracht wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird das Ausgangsgemisch, bestehend aus Eisenerzfeingut, Koks (Brennstoff) und Flussmittel (Kalkstein), der Anlage zugeführt und gezündet, während Luft von unten angesaugt wird, um die Koksverbrennung nach unten zu beschleunigen und das teilweise Schmelzen und Erstarren des Erzes, das Kalzinieren und Trocknen zu fördern.

Effizienzsteigerungen, insbesondere in der Fertigung, manifestieren sich oft durch Verkürzung der Durchlaufzeiten. „Wenn wir den Prozess beschleunigen und die Zeit bis zur Fertigstellung verkürzen können, steigt die Effizienz“, erklärt Dr. Yalcin Kaymak, Forscher am BFI. „Ein höherer Wirkungsgrad erhöht dann unsere Produktivität, spart Energie und reduziert sogar die Emissionen.“ Bei Sinterprozessen wird eine Verkürzung der Fertigstellungszeit durch eine schnellere Verbrennung des Gemisches erreicht. Der Gesamtwirkungsgrad hängt auch von Faktoren wie Durchlässigkeit und Porosität der Mischung, Durchflussraten, Temperaturfeld und Sinterfestigkeit insgesamt ab. Dr. Kaymak, Dr. Hauck (BFI) und Dr. Hillers (Shuangliang Clyde Bergemann) untersuchen die Auswirkungen all dieser Faktoren in ihren numerischen Simulationen.

Eine mögliche Lösung, die vom BFI untersucht wurde, ist die Belüftung der Rohmischung während der Zuführung mittels horizontaler und/oder vertikaler Permeabilitätsstäbe (Abbildung 2). Während sich das Förderband bewegt, bilden horizontale Permeabilitätsstäbe einen horizontalen, ovalen, lokal belüfteten Bereich. Die vertikalen Permeabilitätsstäbe schneiden etwa rechteckige Belüftungsbereiche in das Packungsbett. In diesem Fall ist der betreffende Bereich eine vertikale Ebene, die der

Stäbe, wodurch die Porosität am stärksten erhöht wird.

⇒ MULTIPHYSIK-MODELLIERUNG DES SINTERPROZESSES

Das mathematische Modell zur Simulation eines Verbrennungsprozesses beim Sintern von Eisenerz ist echte Multiphysik, bestehend aus zahlreichen Teilprozessen, die Wärmeübertragung, chemische Reaktionen wie Schmelzen und Erstarren sowie poröse Medienströme beinhalten. Um diese Phänomene effektiv zu integrieren, wird die Multiphysik-Simulation eingesetzt. „COMSOL Multiphysics ist schnell und bietet viel Flexibilität“, sagt Dr. Kaymak. „Sie können Ausdrücke bearbeiten und das Netz nach Ihren Bedürfnissen steuern.“ Die Flexibilität bei der Eingabe von benutzerdefinierten Ausdrücken wird voll ausgeschöpft, indem unabhängig

vertikalen Balkenachse folgt. Die Permeabilitätsstäbe erhöhen die Porosität des Bettes, wodurch die Luftzufuhr zum Brennstoff verbessert, die Verbrennung beschleunigt und der Wirkungsgrad erhöht wird. Der Fokus der Simulation lag auf der Bestimmung der optimalen Konfiguration der

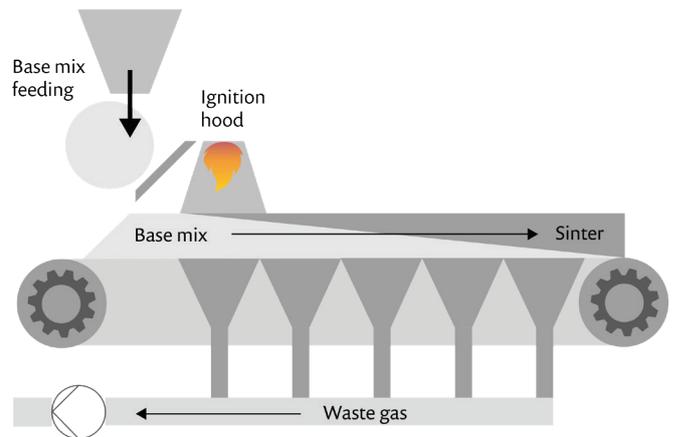


ABBILDUNG 1. Ablaufschema des Sinterprozesses.

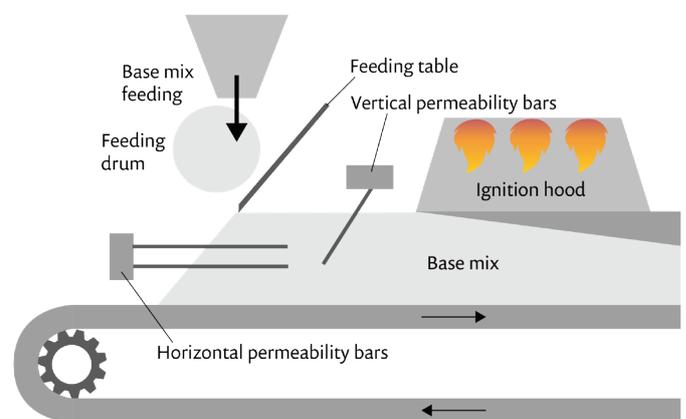


ABBILDUNG 2. Ablaufschema des Sinterprozesses mit zusätzlichen Permeabilitätsstäben.

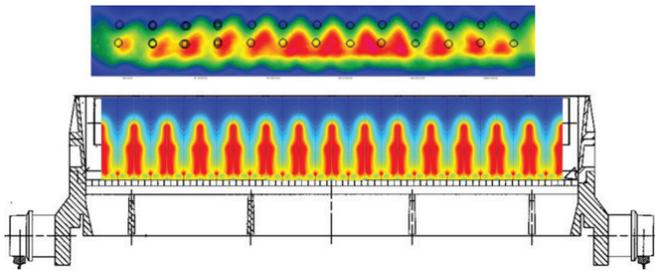


ABBILDUNG 3. Gemessene (oben) und simulierte (unten) Hochtemperaturzone am Austritt.

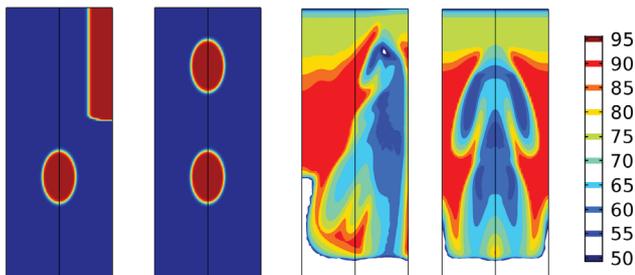


ABBILDUNG 4. Qualitätsschätzungen für zwei Permeabilitätsstab-Konfigurationen.

entwickelte Porositätsverteilungen manuell in das Modell implementiert werden, ein entscheidender Schritt bei der Charakterisierung der lokalen Permeabilität des Basismixes. Zur Bestimmung dieser Verteilungen werden experimentelle Luftgeschwindigkeitsmessungen bestimmter Konfigurationen verwendet. Indem man die Luft durch das Gemisch strömen lässt, können die resultierenden Luftgeschwindigkeiten gemessen und die Porositätsverteilung definiert und direkt in die Software eingegeben werden.

Nach sorgfältiger Untersuchung der Porositätsverteilung und deren Einbindung in das Gesamtmodell kann anschließend ein transienter Sinterprozess simuliert werden, der eine Temperaturprofil-Definition und eine gründliche Untersuchung verschiedener Konfigurationen erbringt. Zusätzlich wird die Funktion der globalen gewöhnlichen Differentialgleichungen für den zeitintegrierten Betrieb verwendet, um zahlreiche relevante Größen zu berechnen, was eine umfassende Charakterisierung der Auswirkungen der Konfigurationen auf den Prozess ergibt. Diese Größen umfassen den gesamten Energieein- und -auslass, den Feuchtigkeitsgehalt, die gesamten Einlassstoffe, den gesamten Energieeinlass an der Zündhaube, die gesamten Auslassstoffe und das gesamte Gasvolumen.

Da die Verbrennung ein so wichtiger Teil des Sinterprozesses ist, hat das Temperaturprofil einer bestimmten Konfiguration einen direkten Einfluss auf die Fertigstellungszeit und die Sinterfestigkeit. Die Kaltfestigkeit ist ein wichtiger Indikator für die Beurteilung der Sinterqualität, da eine hohe Festigkeit für Sinter bedeutet, dass sie den rauen Bedingungen im Hochofenprozess standhält. Die Sinterfestigkeit wird durch Taumeltests gemessen und steigt in der Regel mit der Zeit über die Schmelzstarttemperatur hinaus an. So können die Informationen über die lokalen zeitabhängigen Temperaturprofile zur Abschätzung der lokalen Kaltfestigkeit herangezogen werden. Dadurch ergibt sich eine Qualitätsverteilung über den Querschnitt, wie oben in Abbildung 3 dargestellt. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Temperaturprofile mit den mit der Infrarot-Thermografie beobachteten Anlagenabflüssen verglichen und als fundiert erwiesen. Die kleinen Kreise in der gemessenen Thermografie in Abbildung 4 zeigen die Lage der horizontalen Permeabilitätsbalken. Es ist leicht zu erkennen, dass die Positionen der Permeabilitätsstäbe

mit den Tieftemperaturbereichen übereinstimmen. Der gleiche Trend wird auch in den Simulationsmodellen berechnet.

⇒ ERGEBNISSE UND WEITERENTWICKLUNG

Die Simulationen haben gezeigt, dass mit der optimalen Konfiguration der Permeabilitätsstäbe die Sintergeschwindigkeit um bis zu 40% erhöht werden kann. Diese optimalen Konfigurationen bestehen entweder aus zwei gestapelten Reihen von horizontalen Stäben oder vertikalen Stäben mit dazwischen liegenden horizontalen Stäben. Die Konfiguration mit zwei Reihen von horizontalen Stäben ist in Abbildung 5 zu sehen. Nun, da das BFI versucht, die Komplexität zu erhöhen und den Anwendungsbereich dieses Modells zu erweitern, besteht der nächste Schritt darin, die Qualität und Festigkeit während des Sinterprozesses sicherzustellen.

Um zusätzliche Genauigkeit und Möglichkeiten zu schaffen, ist geplant, das Modell um Phänomene wie Diffusion und Dispersion in den Konvektionsgleichungen sowie um NO_x-Emissionen zu erweitern. Darüber hinaus ist geplant, mit dem Application Builder benutzerfreundliche Simulations-Apps zur Unterstützung der Anlagenbetreiber zu erstellen und zu implementieren. Experten können die

Benutzeroberfläche anpassen und die von der App bereitgestellten Ein- und Ausgaben steuern, so dass sich Personen ohne Simulationskenntnisse bei der Ausführung der Apps ausschließlich auf die relevanten

„COMSOL Multiphysics ist schnell und bietet viel Flexibilität.“

— YALCIN KAYMAK,
RESEARCHER AT BFI

Parameter konzentrieren können. Diese Apps können anschließend mit dem Produkt COMSOL Server™ in der gesamten Organisation eingesetzt werden, wodurch die Leistungsfähigkeit der Multiphysik-Modellierung verbreitet wird. Von besonderem Interesse sind für sie der spezifische Energiefluss, die Betttemperatur, die Abgastemperatur, der Koksverbrauch, die Kalzinierung, die Sulfatierung, die Kondensation und die Sinterqualität. „Die Bediener haben keine Erfahrung mit der Simulation und kennen die Details der Software nicht“, erklärt Dr. Kaymak. „Aber mit einer benutzerfreundlichen App können sie mit den Parametern, die für sie viel wichtiger sind, kreativ sein, schnelle Änderungen modellieren und die Effekte sofort sehen.“ ❖



ABBILDUNG 5. Die Zuführung der Sinteranlage erfolgt mit zwei Reihen von horizontalen Permeabilitätsstäben..

Der Klang von Perfektion

Akustische Metaoberflächen werden sorgfältig entwickelt, um Schallwellen zu steuern, zu lenken und zu manipulieren, um eine bestimmte akustische Eigenschaft (z.B. einen negativen Brechungsindex) zu erzeugen, der in der Natur nicht ohne weiteres verfügbar ist. Ein Forscherteam der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) in der Schweiz hat eine neuartige „aktive“ akustische Metaoberfläche simuliert, die zur Verbesserung der Akustik von Konzertsälen und schalldichten Häusern oder zur Dämpfung störender Motorgeräusche während eines Fluges eingesetzt werden kann.

von **GEMMA CHURCH**

Eine grundlegende Einschränkung herkömmlicher akustischer Dämmungen besteht darin, dass ihre Abmessungen ihre Verwendung frequenzmäßig begrenzen (je dünner, desto geringer die Leistung bei tiefen Frequenzen), oder dass sie auf Resonanzen angewiesen sind, um ihre akustische Wirkung zu entfalten, und daher auf ein sehr schmales Frequenzband beschränkt sind. So wirkt beispielsweise ein Membranabsorber (Bassfalle) in der Ecke eines Aufnahmestudios, der tieffrequente Töne absorbiert, die sich aufbauen und die Qualität des erzeugten Klangs stören, nur in einem begrenzten Frequenzbereich um seine Resonanz herum. Diese störenden tiefen Frequenzen erstrecken sich jedoch in der Regel über den Bereich von 20 bis 200 Hz, und eine einzige akustische Dämmung kann nicht über diesen gesamten Frequenzbereich absorbieren.

⇒ RICHTEN DES WELLENFRONTVERKEHRS

Es ist nicht sinnvoll, ein Design zu implementieren, das eine Schallabsorption bei niedrigen Frequenzen bietet, da die resultierende Struktur zu sperrig und zu schwierig zu optimieren wäre. Hervé Lissek, Leiter der Akustikgruppe an der EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), erklärte: „Traditionelle Membranresonatoren sind auf einen Bereich von wenigen Hertz beschränkt, eine Einschränkung, die ihre Hauptanwendung verhindert. Unsere Idee war es, ein Design zu entwickeln, das in seiner Gesamtheit breitbandig und aktiv ist.“ Dies führte zur Entwicklung des

Active Electroacoustic Resonator (AER) Konzeptes, bei dem ein konventioneller Lautsprecher als Membranabsorber eingesetzt wird, dessen akustisches Verhalten elektrisch verändert werden kann (Abbildung 1).

Mit den Erkenntnissen aus der Untersuchung von AERen setzten sich Lissek und sein Team mit dem Konzept der akustischen Metaoberflächen auseinander. Eine akustische Metaoberfläche ist im Grunde genommen eine Oberfläche, die aus kleinen akustischen Elementen (Membranen, kleinen Perforationen, Hohlräumen usw.) besteht, die so konstruiert sind, dass sie als Ganzes neue akustische Eigenschaften gegenüber einzelnen Elementen bieten. Im Metaoberflächenkonzept verleiht die Baugruppe die akustischen Eigenschaften auf Wellenlängen, die wesentlich länger sind als die Größe der einzelnen Elemente (diese Einheitszellen werden daher als „subwellenlang“ eingestuft). Die Metaoberfläche kann dann entweder so konstruiert werden, dass sie Schallabsorption bietet, oder es können direkte Wellenfronten über die Metaoberfläche in einem vorgegebenen Winkel reflektiert werden.

⇒ AKTIVE ADAPTION KÖNNTE KLANG-REGENBOGEN ERZEUGEN

Um eine akustische Metaoberfläche zu modellieren, müssen Sie diese Oberfläche in Subwellenlängen-Einheiten zerlegen, um die akustische Wellenfront künstlich umzugestalten und das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Die von Lissek



ABBILDUNG 1. Aktiver elektroakustischer Resonator-Prototyp. Bildnachweis: EPFL/Alain Herzog.

und seinem Team vorgeschlagene aktive akustische Metaoberfläche besteht aus einem Oberflächenarray von Subwellenlängen-Lautsprechermembranen, von denen jede mit programmierbaren individuellen aktiven akustischen Impedanzen ausgestattet ist, die eine lokale Kontrolle der verschiedenen Reflexionsphasen über die Metaoberfläche ermöglichen.

Über ein aktives Regelwerk wird die Reflexionsphase über die Metaoberfläche gesteuert. Dieses ist abgeleitet vom AER-Konzept, bei dem AERen durch elektroakustische Regelverfahren abgestimmt oder modifiziert werden können (Abbildung 3). Lissek führte aus: „Wir können die Art und Weise, wie diese Metaoberfläche auf ein Klangprofil reagiert, verändern, indem wir die Membranen elektrisch optimieren. Außerdem können sich die Membranen so aktiv an den einfallenden Schall anpassen. Wenn Sie zum Beispiel versuchen, das Triebwerksgeräusch eines Flugzeugs zu verbergen, wird sich die aktive akustische Metaoberfläche anpassen, da sich die Frequenz des Triebwerks während der verschiedenen Flugphasen im Bereich von einigen hundert bis zu einigen tausend Hertz ändert“. Bei einem AER ist der Controller dafür bekannt, eine Vielzahl von akustischen Impedanzen auf einer einzelnen Lautsprechermembran zu erreichen, die als akustischer Resonator verwendet wird, mit der Möglichkeit, seine Resonanzfrequenz um mehr als eine Oktave zu verschieben.

Man könnte dieses Konzept sogar dazu nutzen, Schallwellen in einer vorgeschriebenen Weise zu reflektieren. Lissek fügte hinzu: „Wenn

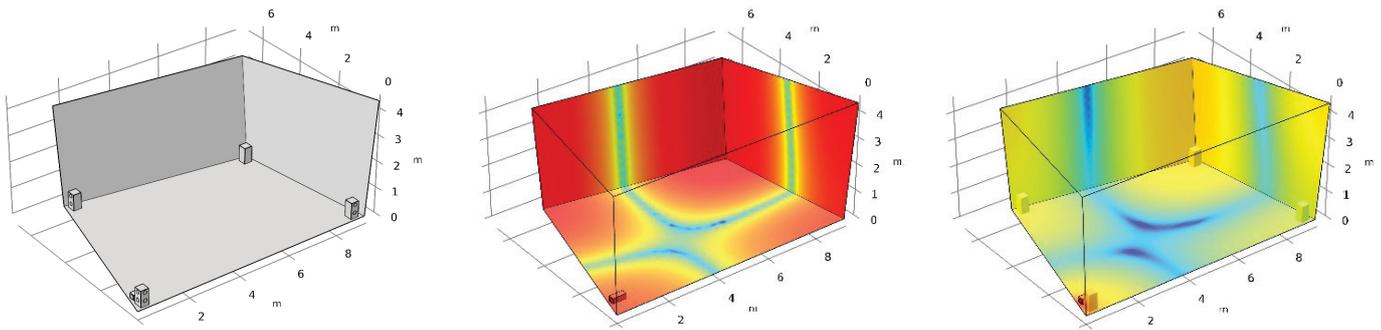


ABBILDUNG 2. Links: Geometrie des Reflexionsraumes mit vier AER-Prototypen in den 4 Ecken. Mitte und rechts: Schalldruckpegelverteilung in der Kammer, erregt bei Mode 110 mit 35,3 Hz ohne bzw. mit Absorbern.

Breitbandrauschen (das akustische Gegenstück zu weißem Licht) auf eine akustische Metaoberfläche trifft, dann könnte diese das Rauschen aufspalten und als akustisches Prisma wirken, in dem sie jede konstitutive Frequenz in verschiedene Richtungen lenkt. Aus künstlerischer Sicht gibt es viele faszinierende Möglichkeiten, da man so einen Regenbogen des Klangs entfalten könnte, aber die wichtigsten Anwendungen liegen in der Lärminderung.“

⇒ NUMERISCHE SIMULATION DIENT AKUSTISCHEM DESIGN

Es gibt viele komplexe Phänomene, die bei der Simulation einer akustischen Metaoberfläche und der umgebenden akustischen Umgebung berücksichtigt werden müssen. Lissek erklärte: „COMSOL Multiphysics gibt uns die Möglichkeit, die Klangleistung der von uns entwickelten Geräte zu beurteilen. Außerdem gibt sie uns einen genauen Einblick in die Physik der Geräte, die wir vielleicht nicht experimentell beurteilen können.“

Gehen wir zurück zu unserem vorherigen

„COMSOL Multiphysics gibt uns die Möglichkeit, die Klangleistung der von uns entwickelten Geräte zu beurteilen. Außerdem gibt sie uns einen genauen Einblick in die Physik der Geräte, die wir vielleicht nicht experimentell beurteilen können.“

— HERVÉ LISSEK, HEAD OF THE ACOUSTIC GROUP AT THE EPFL

Beispiel eines Aufnahmestudios und erweitern es, so dass wir jetzt vier kleine aktive Absorber (Abbildung 2) in der Ecke eines Raumes sitzen haben, um tieffrequente Geräusche zu absorbieren. Um zu simulieren, wie diese Geräte den Schall im Raum absorbieren und beeinflussen, müssen Sie den Schalldruck im Raum an verschiedenen Stellen kennen. Lissek erklärte: „Mit der Multiphysik-Simulation erhalten wir sofort die Frequenzverteilung im Raum mit und ohne aktive Absorber. Wir können dann die Verteilung des Schalls im Raum modellieren, um wichtige Parameter wie die modale Abklingzeit des Schalls im Raum bei seinen Resonanzfrequenzen zu lernen.“

„Wir können das alles in nur zehn Sekunden mit der Software machen. Wir brauchen nicht an jedem Punkt im Raum akustische Messungen. Wir können die Schalldruckverteilung leicht abbilden, indem wir die Absorber an verschiedene Positionen im Raum bewegen und extrapolieren, wie sich dadurch die Schalldruckverteilung ändert“, fügte Lissek hinzu.

⇒ DIE PASSENDE RICHTWIRKUNG MIT DEM RICHTIGEN METAOBERFLÄCHENDESIGN FINDEN

Viele verschiedene Arten von akustischen Metaoberflächen wurden von Lissek und seinem Team entworfen und simuliert. Dazu gehören spiralförmige akustische Einheitszellen, Helmholtz-Resonatoren und aktive akustische Metaoberflächen.

Die Reflexionseigenschaften wurden zunächst festgelegt, um individuelle Steuergesetze für jede AER-Einheitszelle zu definieren. Die ermittelten Regeleinstellungen wurden dann auf eine AER-Einheitszelle auf Basis eines handelsüblichen „Standard“-Elektrodynamiklautsprechers angewendet, um die Machbarkeit der angestrebten Reflexionsphasen entlang einer Metafläche von 32 Elementen experimentell zu

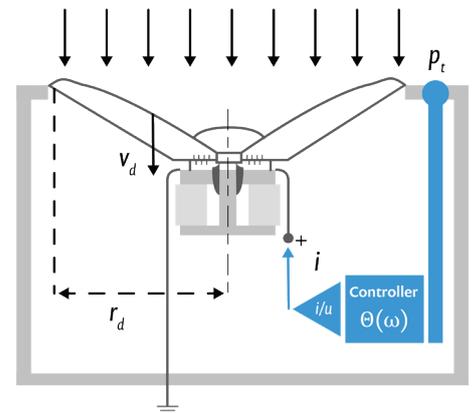


FIGURE 3. Das Konzept der Aktiven Elektroakustischen Resonatoren (AER).

beurteilen (Abbildung 4). Nachdem die Zielreflexionskoeffizienten verifiziert wurden, wurde die Metasurface numerisch modelliert und eine Vollwellensimulation durchgeführt. „Die einzelnen Elemente bewegen sich wie Kolben. Sie unterliegen keiner komplexen Strukturmechanik, deshalb haben wir einfach die erreichbare akustische Impedanz jeder Membran des Modells zugeordnet“, erklärt Lissek.

Zwei Fälle wurden mit einem ebenen Wellenhintergrunddruck mit einem Einfallswinkel von -45° simuliert. Der gewünschte Winkel für die über die Metafläche reflektierte Welle wurde auf 60° und 0° eingestellt, wodurch das Snelliussche Brechungsgesetz verletzt wurde. Die Simulationsergebnisse in den Abbildungen 5 und 6 stellen die reflektierten Schalldruckpegel über der xz-Ebene für die beiden untersuchten Winkel bei $f = 350$ Hz dar. Es zeigt sich, dass die akustische Impedanz, die den Zellen der Metaoberfläche auferlegt wird, es tatsächlich erlaubt, die Wellenfronten in Richtung des vorgeschriebenen Winkels zu lenken.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den erreichten Richtwirkungen und den angestrebten Abstrahlwinkeln besteht, was die Wirksamkeit der AER bestätigt, eine kohärente Steuerung über ein relativ

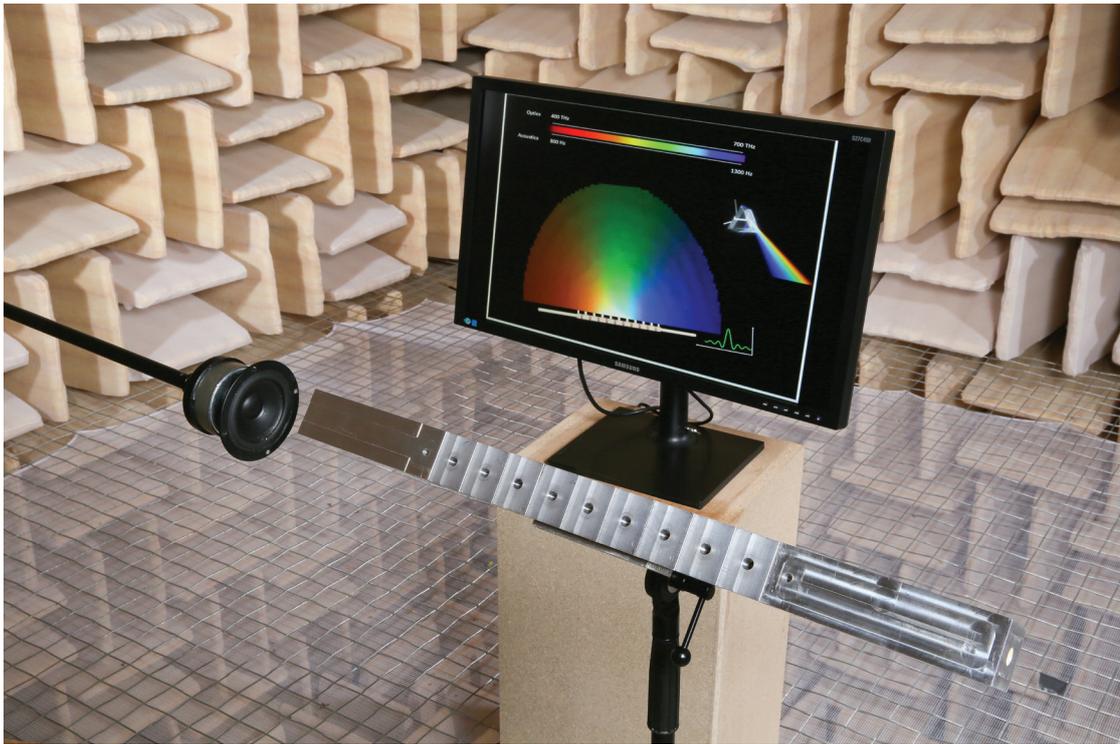


ABBILDUNG 4. Prototyp eines akustischen Dispersionsprismas. Bildnachweis: EPFL/Alain Herzog.

mehr Informationen über die reflektierten Welleneigenschaften liefern (z.B. sollte die Verkürzung der Metafläche in Richtung der x- und y-Achse die Richtungsabhängigkeit der reflektierten Welle erhöhen)“. Sie integrieren auch die Modellierung von Stromkreisen, um einen besseren Einblick in die Kopplung zwischen dem akustischen Bereich und den in der aktiven Steuerung verwendeten elektrischen Größen, wie z.B. den in die einzelnen AERen fließenden elektrischen Strom, zu erhalten. Dies könnte ihnen auch helfen, fortgeschrittene Kontrollstrategien

breites Frequenzband (fast eine Oktave um 350 Hz) zu erreichen. Nachdem die Forscher die Wirksamkeit der aktiven akustischen Metasurfaces über einen größeren Frequenzbereich nachgewiesen hatten, konnten sie ihr Design und ihre experimentellen Untersuchungen mit Hilfe der Simulation weiterentwickeln. Lissek fügte hinzu: „Ich sehe mich nicht als Experte in der FEM-Modellierung. Einer der größten Vorteile von COMSOL Multiphysics für mich ist, dass es eine einfache und benutzerfreundliche, aber dennoch leistungsstarke Reihe von Tools bietet, die leicht zugänglich sind.“

⇒ WEITERFÜHRUNG DER METAOBERFLÄCHEN-FORSCHUNG

Die Forscher wollen zu einer vollständigen 3D-Simulation der akustischen Metaoberfläche übergehen. Lissek erläuterte: „Für die Zwecke dieser Voruntersuchung haben wir ein vereinfachtes 1D-Modell verwendet (was voraussetzt, dass die Metafläche eine unendliche Größe in Richtung der y-Achse), das eine schnellere Berechnung ermöglicht. Aber ein Modell, das die reale 2D-Metafläche in einem vollständigen 3D-Akustikbereich berücksichtigt, sollte

zu entwickeln, z.B. durch die elektrische Verbindung aller AERen.

Um ihre Arbeit weiter auszubauen, möchten Lissek und sein Team untersuchen, wie man solche akustischen Metaoberflächen in eine Raumgestaltung integrieren kann. „Stellen Sie sich zum Beispiel die Möglichkeiten eines Theaters oder eines Konzertsaals mit akustischen Metaflächen vor, bei denen die Schallreflexionen räumlich gesteuert werden können, um eine gleichbleibende Klangqualität zu erzielen. Wenn wir die Schallausbreitung in einem Raum elektrisch steuern könnten, wäre das der Heilige Gral für jeden Akustiker“, schloss Lissek. ✦

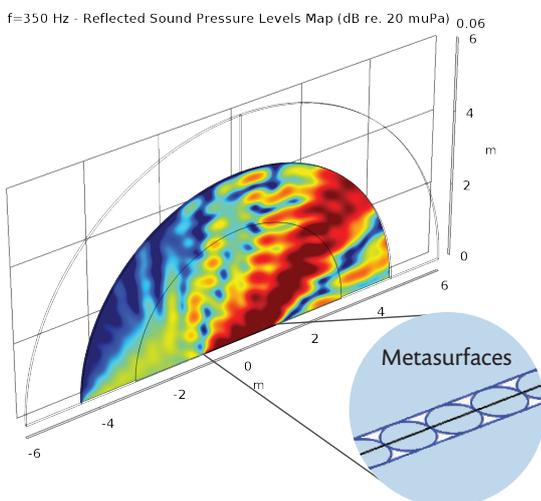


ABBILDUNG 5. Reflektierte Schalldruckpegel mit 32x32 Einheitszellen bei $f = 350$ Hz, für einen vorgeschriebenen Abstrahlwinkel von 60° .

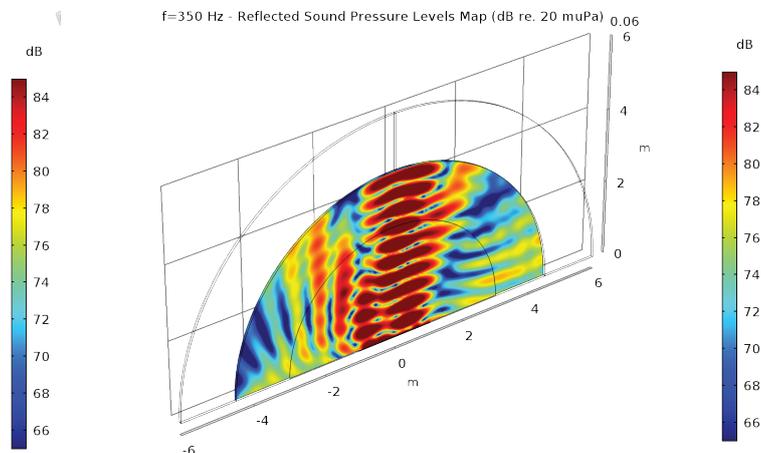


ABBILDUNG 6. Reflektierte Schalldruckpegel mit 32x32 Einheitszellen bei $f = 350$ Hz, für einen vorgeschriebenen Abstrahlwinkel von 0° .

OPTIMIERUNG VON PKW-DESIGNS MIT SIMULATIONS-APPS

Das Team von Mahindra entschied sich für Simulations-Apps, um den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen und eine Kultur der Zusammenarbeit zu fördern.

von **ADITI KARANDIKAR**

Produktdesign ist für moderne Automobilhersteller ein iterativer Prozess, der die Zusammenarbeit von CAE-Analysten, Konstrukteuren, dem Fertigungsteam und den Zulieferern erfordert. Die beschleunigte Einführung neuer Fahrzeuge erfordert eine effiziente Zusammenarbeit, um den Iterationsprozess zu rationalisieren und einen Wettbewerbsvorteil in der heutigen Konsumwelt zu erhalten. Eine der Hauptanstrengungen für ein Unternehmen wie Mahindra ist es, seine Prozesse zu erneuern und gleichzeitig die Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten, die seine Kunden erwarten. Entscheidend für den Erfolg des Teams sind Simulations-Apps, die den Designprozess integrativer und robuster gestalten.

⇒ HERAUSFORDERUNGEN WÄHREND DES PRODUKTDESIGNS

Zusammenarbeit kann ein zeitraubender Prozess sein, bei dem verschiedene Teams ihre Kompetenzen sinnvoll und effizient bündeln müssen. Konstrukteure fordern Evaluierungen neuer Konzepte oder Anpassungen bestehender Konstruktionen, was aufgrund der Komplexität der Physik schwierig sein kann. CAE-Analysten verfügen dagegen über die Simulationsexpertise, um eine hohe Komplexität zu bewältigen. Sie können bei der Konzeptbewertung durch eine detaillierte CAE-Analyse helfen. Aber mit einer begrenzten Anzahl von Analysten und einer steigenden Anzahl von Anfragen kann es schwierig sein, diese Bewertungen rechtzeitig zu erstellen.

Die Vorlaufzeit für eine bestimmte Fahrzeugkomponente hängt von der Anzahl der für die Fertigstellung erforderlichen Iterationen ab und kann in manchen Fällen Monate dauern. Je nach Komplexität des eingereichten Entwurfs kann die CAE-Analyse allein

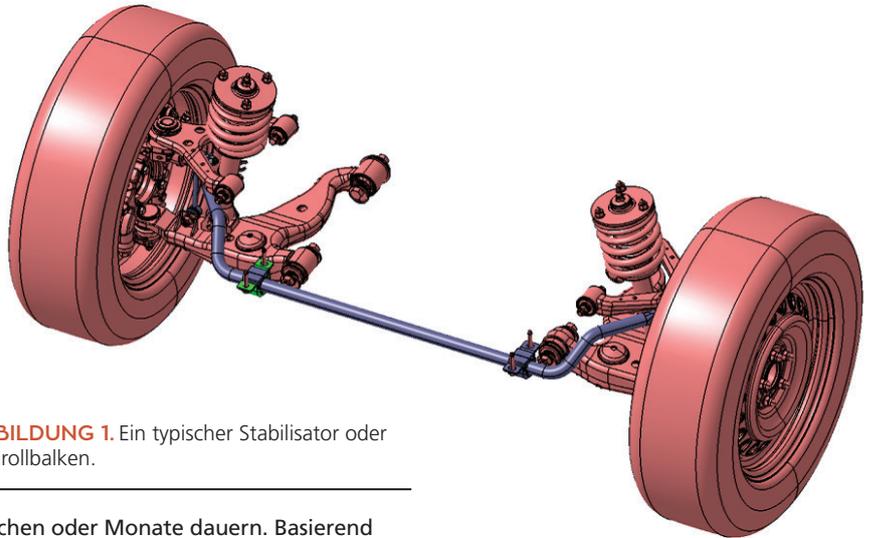


ABBILDUNG 1. Ein typischer Stabilisator oder Antirollbalken.

Wochen oder Monate dauern. Basierend auf den Simulationsergebnissen nimmt das Designteam bestimmte Änderungen vor und wartet erneut auf die Validierung des Designs durch das CAE-Team. Diese Iterationen sind entscheidend für die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Fahrzeugs.

Um den Wettlauf mit der Zeit zu überwinden, hat das Methoden-Team von Mahindra das Tool Application Builder der COMSOL Multiphysics® Software untersucht. Das Team prüfte verschiedene Optionen für die Stabilisator- und Fahrwerkskonstruktionen mittels Simulations-Apps. Der Einsatz von Apps führte zu einer deutlichen Verkürzung der Iterationszeiten gegenüber dem konventionellen Ansatz.

⇒ EIN INNOVATIVER ANSATZ ZUR GESTALTUNG DES STABILISATORS

Eine kritische Komponente der

Der Einsatz von Apps führte zu einer deutlichen Verkürzung der Iterationszeiten gegenüber dem konventionellen Ansatz.

Federung, die zur Begrenzung des Wankens eines Fahrzeugs verwendet wird, ist der Stabilisator, der in Abbildung 1 dargestellt ist. Die Konstruktion ist in der Regel entweder ein hohler oder ein massiver Träger mit mehreren Biegungen. Um die Verformungen und Spannungen in einem solchen Bauteil genau zu modellieren, muss das Konstruktionsteam sicherstellen, dass die entsprechenden Steifigkeits- und Spannungsniveaus eingehalten werden, entweder in Zusammenarbeit mit den CAE-Analysten oder durch eine Validierung bei ihren Lieferanten. Nachdem das Modell validiert wurde und die Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Experimenten waren, wurde eine Simulations-App erstellt.

Die Simulations-App des Stabilisators lässt eine Vielzahl von Designkonfigurationen zu, wie beispielhaft in Abbildung 2 zu sehen, mit bis zu fünfzehn Biegungen und der Möglichkeit, zwischen hohlen und massiven Stäben zu wählen. Der Endanwender, in der Regel ein Mitglied des Konstruktionsteams, gibt die Koordinaten der Biegungen ein, um die Geometrie des Stabilisators darzustellen und liefert die Lagerposition, die Steifigkeit der Lagerbuchsen und die Querschnittparameter. Der CAE-Analytiker definiert die Randbedingungen innerhalb der App, wodurch es für den Konstrukteur einfach und schnell möglich

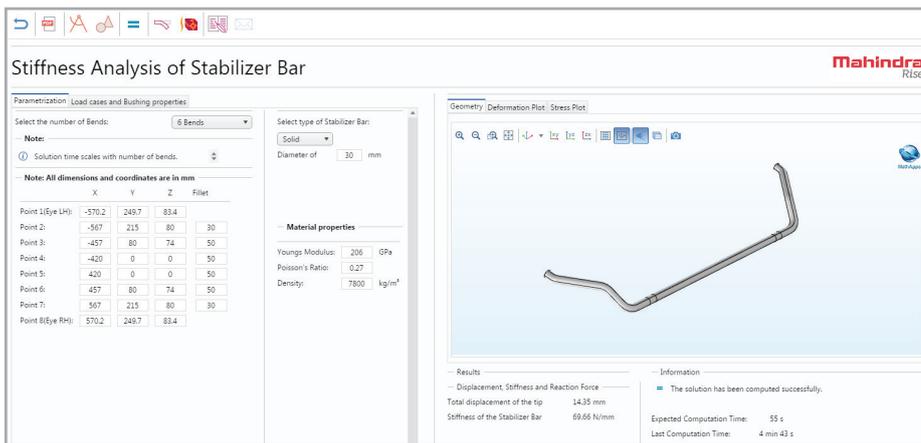


ABBILDUNG 2. Simulations-App, mit der man die Geometrie erstellen und die Steifigkeit und die Verformung eines Stabilisators berechnen kann.

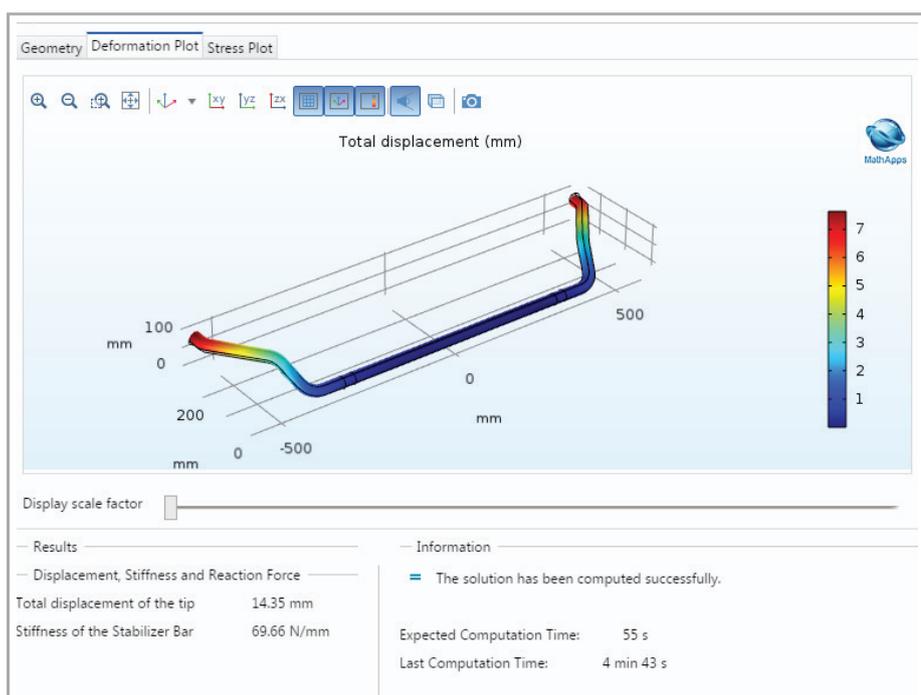


ABBILDUNG 3. Die Ergebnisse einer App, die die Steifigkeit einer bestimmten Konfiguration eines Stabilisators berechnet.

ist, genaue Simulationen durchzuführen, die Steifigkeit des Balkens zu berechnen und die Spannungen für Standardlastfälle zu modellieren, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Die typische Laufzeit der Anwendung beträgt Minuten, wodurch das Designteam in die Lage versetzt wird, aufeinanderfolgende Iterationen durchzuführen und sofortiges Feedback zu ihren Entwürfen zu erhalten. Da die Simulations-App auf einem validierten multiphysikalischen Modell basiert, ist das Design-Team von den Ergebnissen überzeugt, ohne dass eine zusätzliche Schulung in der Simulation erforderlich ist. Das Team von Mahindra hat festgestellt, dass die Apps viel Zeit sparen und die Zusammenarbeit fördern. Darüber hinaus hat die neue Kultur der Zusammenarbeit ein größeres Verantwortungsgefühl für

das Endprodukt gefördert, da das Design in ein bis zwei Tagen erstellt werden kann, was die Abhängigkeit vom Lieferanten verringert.

⇒ REDUZIERUNG DER ITERATIONEN IN DER FAHRWERKSKONSTRUKTION

Das Chassis ist eine weitere wichtige tragende Komponente, die dem Fahrzeug Steifigkeit verleiht und als Basis für die Montage anderer Komponenten wie Motor und Getriebe dient. Eine der üblichen Architekturen besteht aus einem Leiterraum mit zwei langen Längsträgern und mehreren Querträgern (Abbildung 3). Anzahl, Größe, Lage und Form der Querträger sind wichtige Parameter, die bereits in einem frühen Stadium des Konstruktionsprozesses festgelegt werden.

Die Belastung des Fahrgestells führt zu kombinierten Biege- und Torsionsbeanspruchungen, für die es keine einfachen analytischen Lösungen gibt. Der konventionelle Ansatz zur Bewältigung dieses Problems beinhaltet die Bewertung mehrerer Chassis-Konfigurationen auf Grundlage der Anforderungen an den Aufbau, gefolgt von zahlreichen CAE-Iterationen zur Fertigstellung des Designs. Der richtige Aufbau sorgt dafür, dass alle Teile störungsfrei zusammenwirken und für die Montage und Demontage gut zugänglich sind. Das beste Design muss strukturell solide sein und gleichzeitig die Anforderungen an den Aufbau erfüllen. Jede vollständige CAE-Iteration umfasst drei separate Analysen: Biegesteifigkeit, Torsionssteifigkeit und Mode. Dieser Ansatz erfordert drei bis vier vollständige CAE-Iterationen, die in der Regel zwei bis drei Wochen dauern.

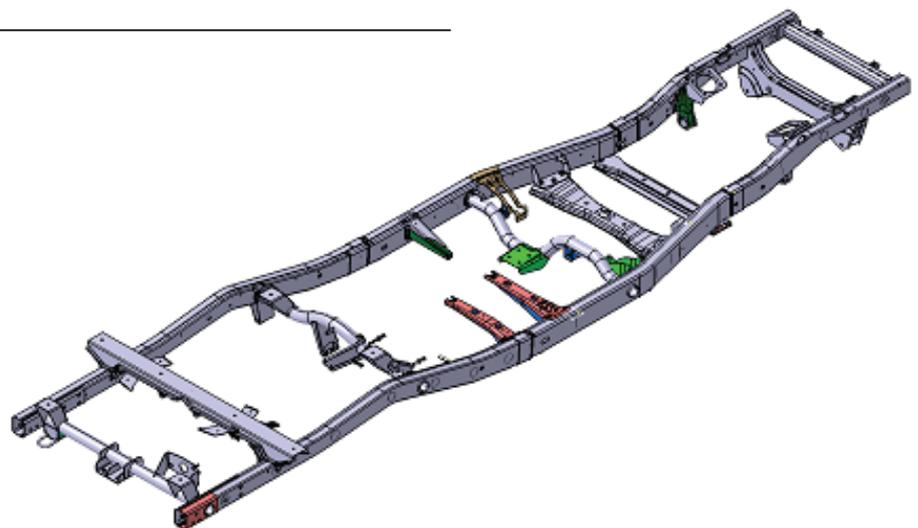


ABBILDUNG 4. In CATIA®-Software erstellte Geometrie, die die Struktur eines typischen Nutzfahrzeug-Chassis darstellt.

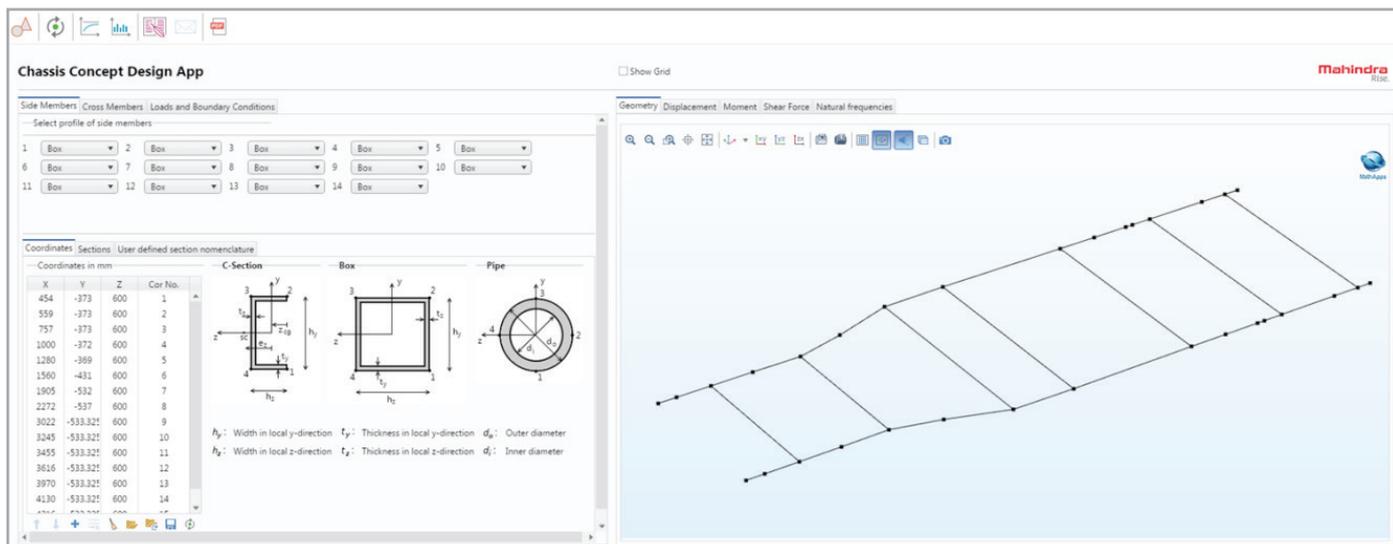


ABBILDUNG 5. Die Benutzeroberfläche der Fahrwerks-App auf Mahindras internem, MathApps genannten, Portal.

Mit COMSOL Multiphysics konnte das Team die drei getrennten Analysen kombinieren, so dass nur eine oder zwei vollständige CAE-Iterationen durchgeführt werden mussten, was wertvolle Zeit spart. Anschließend erstellten sie eine Simulations-App für das Chassis-Design mit einem 1D-Balkenmodell (Abbildung 5) basierend auf der Timoschenko-Balken-Theorie. Der Endanwender muss das zugrunde liegende mathematische Modell nicht kennen, um von den Ergebnissen der App zu profitieren. Die Simulation kann in Sekundenschnelle durchgeführt werden, selbst bei einer komplizierten Fahrwerkskonstruktion mit verschiedenen Querprofilen und Stützen. Die Balkenanalyse liefert schnelle und zuverlässige Ergebnisse für eine Vielzahl von Konfigurationen und berechnet sowohl Torsions- als auch Biegesteifigkeit und Durchbiegung, wie in Abbildung 6 gezeigt. Die Simulations-App wird vom Drive-Away-Chassis (DAC) Fahrwerksteam verwendet, das für das Design des Chassis und des Stabilisators verantwortlich ist. Die App bietet den Komfort, verschiedene Designparameter durch einfache Textfelder auszuwerten, anstatt für jede Konfiguration ein CAD-Modell zu erstellen, was sowohl für den CAE-Analysten als auch für das DAC-Fahrwerksteam eine Zeitersparnis bedeutet.

⇒ **SIMULATIONS-APPS UND DER WEG IN DIE ZUKUNFT**

Die Einzigartigkeit der bei Mahindra verwendeten Apps liegt in ihrer Fähigkeit, ein breites Spektrum an parametrischen Variationen, Physik und Randbedingungen zu verarbeiten. So konnten die Konstrukteure bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten ausloten, ohne

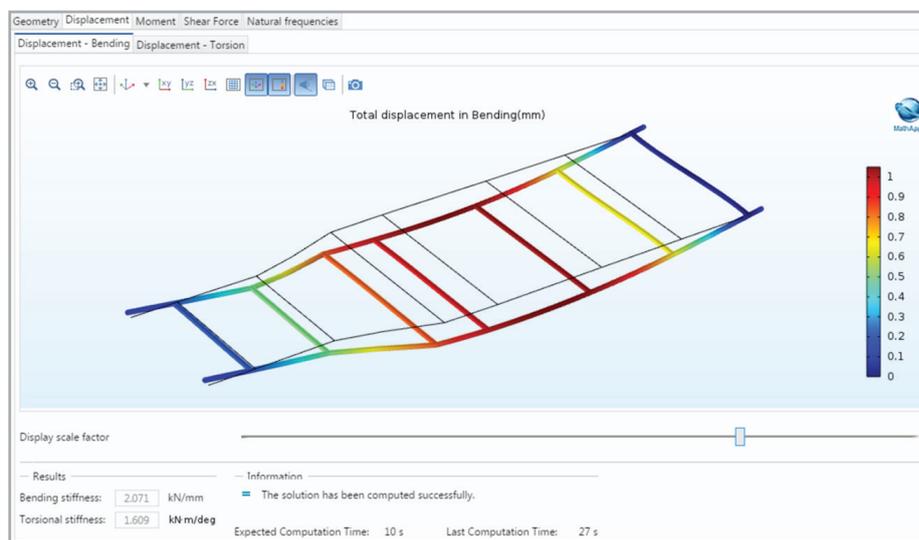


ABBILDUNG 6. Simulationsergebnisse aus der Fahrwerks-App für eine bestimmte Konfiguration.

sich auf die CAE-Analysten verlassen zu müssen oder zusätzliche Schulungen in der numerischen Modellierung zu erhalten. Die Ergebnisse der parametrischen Studien werden im Rahmen der Konstruktionsrichtlinien präsentiert und ermöglichen effiziente und kostengünstige Produkte.

Die Simulations-Apps wurden auf Basis detaillierter Diskussionen mit Designern und CAE-Analysten entwickelt, bevor sie über eine lokale Installation des Produktes COMSOL Server™ in verschiedenen Teams bei Mahindra eingesetzt wurden. Komplexe Designkonfigurationen, die bisher unter der Aufsicht der CAE-Analysten standen, wurden den Designern über eine komfortable und einfach zu bedienende Plattform zugänglich gemacht. Die Multiphysik-Simulation und -Apps ermöglichten es Mahindra, ihre Analysefähigkeiten auch auf die Vibroakustik und die Thermostrukturanalyse auszudehnen. ❖

MULTIPHYSIK SCHÜTZT WINDKRAFTANLAGEN WENN DER BLITZ EINSCHLÄGT

Multiphysik-Simulationen helfen NTS-Ingenieuren zu verstehen, was passiert, wenn ein Blitz eine Windkraftanlage trifft.

von **GARY DAGASTINE**

Während die Welt ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringert, wächst der globale Markt für Windenergieanlagen, der in den nächsten Jahren voraussichtlich rund 70 Milliarden Dollar jährlich erreichen wird. Während Windkraft in dieser Größenordnung eine große Leistung ist, hindert eine weitere starke Naturgewalt die Industrie daran, ihr volles Potenzial auszuschöpfen: Blitze.

Blitzeinschläge sind die Hauptursache für ungeplante Stillstandszeiten in Windkraftanlagen, die nicht nur für den Verlust von unzähligen Megawatt Leistung, sondern auch für enorme Betriebs- und Wartungskosten verantwortlich sind.

Windkraftanlagen sind aufgrund ihrer großen Höhe, ihrer exponierten Lage und ihrer großen rotierenden Flügel besonders anfällig für Blitzeinschläge. Blitze können sowohl direkt als auch

indirekt Schäden an nahezu allen Komponenten von Windkraftanlagen anrichten, einschließlich Flügeln, Steuerungssystemen und anderen elektrischen Komponenten. Die Reparatur ist nicht nur teuer, sondern angesichts der logistischen Beschränkungen auch physisch anspruchsvoll.

Lightning Technologies, ein Unternehmen der NTS, ist weltweit führend in der Entwicklung und Validierung anspruchsvoller

Blitzschutzsysteme für die Luft- und Raumfahrtindustrie, darunter Flugzeuge, Raumfahrzeuge und Startanlagen. Sie entwickelten auch Systeme für Windkraftanlagen, Industrieanlagen, Golfplätze, Themenparks und andere risikoreiche Standorte.

Die Ingenieure von NTS sind aktiv in die Gremien der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) eingebunden, die die Blitzstärken und -situationen definieren, denen die Rotorblätter standhalten müssen. Industrievorschriften wie die IEC 62305 verlangen von den Herstellern von Windkraftanlagen, dass sie Blitzschutzkonzepte in ihre Flügel integrieren. Für einen maximalen Schutz ist es wichtig zu wissen, wie viel Blitzstrom nach einem Blitzeinschlag durch ein Blatt fließt und wo genau er fließen wird. Das Problem ist, dass einfache Annahmen über das Verhalten des Blitzstroms oft zu ungenauen Schlussfolgerungen führen.

⇒ TIEFE EINBLICKE IN DEN BLITZSTROM

NTS betreibt eines der vollständigsten Blitzsimulationslabore der

Welt von einer über 1.600 m² großen Anlage in Pittsfield, MA, USA, mit 4,3 und 7,6 m hohen Blitzgeneratoren, die bis zu 2,4 MV erzeugen können (Abbildung 1).

NTS beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit der Erforschung und Entwicklung von Schutzkonzepten für Rotorblätter von Windkraftanlagen. Da diese Rotorblätter Tragflächen sind, ist das Wissen des Unternehmens über Luft- und Raumfahrtanwendungen direkt übertragbar.

Justin McKennon, der das Modellierungs- und Analyseteam bei NTS Pittsfield leitet, hat erklärt, dass traditionelle Windkraftanlagenschutzsysteme aus einer Oberflächenschutzschicht (SPL) bestehen, die die leichten, hochfesten Kohlefaser-Verbundblätter abdeckt. Häufig besteht die SPL aus einem leitfähigen Netz, das den Blitzstrom von der Stelle, an der er „angesetzt“ hat (also einschlug) zur Narbe und von dort zum Boden transportiert.

„Viele Blattarchitekturen verfügen über geschichtete Kohlefaserstrukturen, die parallel zur SPL verlaufen, mit periodischen elektrischen Verbindungen zwischen

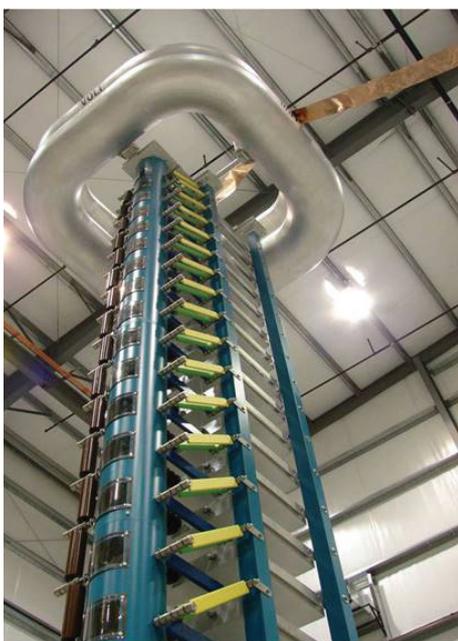


ABBILDUNG 1. Hochspannungsgenerator (2,4 MV Marx Generator) in Betrieb bei NTS.

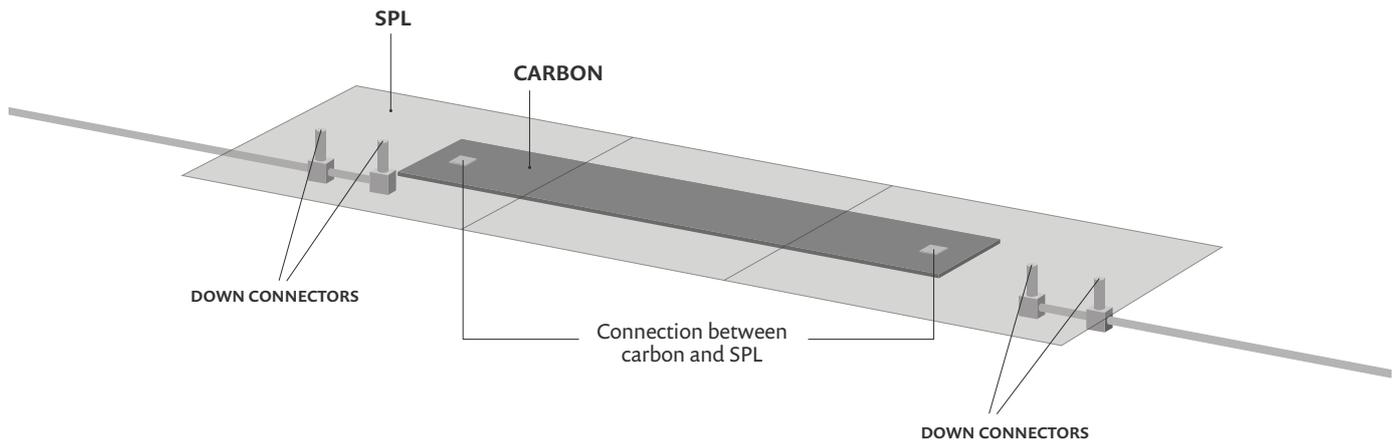


ABBILDUNG 2. Geometrie des dünnen Aluminium-Oberflächenschutzes (SPL) auf einem Kohlefaser-Stack.

dem Stack und der SPL über die gesamte Blattlänge“, erläutert McKennon. „Dies geschieht, um zu verhindern, dass sich zwischen den beiden ein hohes Spannungspotential entwickelt, denn wenn das passiert, könnte es zu einem Lichtbogen kommen und das Blatt beschädigen. Diese elektrischen Verbindungen können zwar die Spannung reduzieren, lassen aber auch Strom im Kohlenstoff fließen, was zusätzliche konstruktive Überlegungen nach sich zieht.“

Es ist nicht trivial, die Fähigkeit eines Kohlefaser-Stacks zur Übertragung verschiedener Strommengen und andere Faktoren wie wahrscheinliche Einschlagstellen und Durchschlagmöglichkeiten zu verstehen. McKennon sagte, dass angesichts der Kosten für die physische Prüfung dieser Blätter, von denen einige 70 oder mehr Meter lang sind, die numerische Modellierung von Blitzeffekten zu einem entscheidenden Teil des Designprozesses geworden ist.

„Aufgrund der Komplexität der Physik ist es jedoch leicht, falsche Annahmen zu treffen, die einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Modelle haben können“, sagt McKennon.

⇒ SIMULATION REDUZIERT OVERENGINEERING

Eine übliche, aber oft unzulässige Annahme ist die, dass die Leitfähigkeit des Kohlefaser-Stacks in alle Richtungen gleich ist, auch wenn es in Wirklichkeit erhebliche Unterschiede in

der Leitfähigkeit des Kohlenstoffs in verschiedenen Richtungen geben könnte.

Abbildung 2 zeigt die Geometrie eines Kohlefaser-Stacks, der 5 mm unter einem 500 µm dicken SPL-Netz aus Aluminiumblech angeordnet ist, dessen Leitfähigkeit nach experimentellen Messungen eingestellt

ist. Die Leitfähigkeit des Kohlenstoffs wird ebenfalls nach experimentellen Werten eingestellt, sowohl sein idealisiertes isotropes als auch sein realistisches anisotropes Verhalten wurden im COMSOL-Modell berücksichtigt.

Eine analytische Darstellung einer IEC-Standard-Stromkurve wird verwendet, um Strom in ein Ende der SPL einzuspeisen. Der Strom fließt am anderen Ende durch einen Ableiter, der aus Kupfer besteht, wie auch alle anderen Verbindungen zum Kohlenstoff.

Um seine Entwürfe zu untersuchen und die Ausbreitung elektromagnetischer Impulse zu modellieren, löste McKennon eine Zeitbereichswellengleichung für das magnetische Vektorpotential in der COMSOL Multiphysics® Software. Die Ergebnisse ermöglichten es

ihm, die zugehörigen Ströme, elektrischen Felder und andere Größen an diesen Punkten zu bestimmen und so einen Einblick in das Gesamtverhalten des Stroms in der gesamten Struktur zu erhalten.

Der isotrope Fall unterschätzt die Menge des durch die SPL fließenden Stroms, was bedeutet, dass mehr Strom

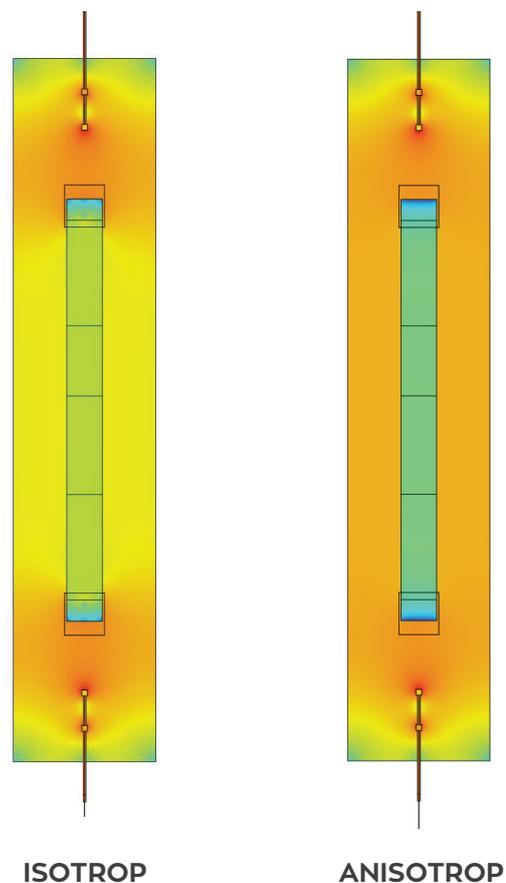


ABBILDUNG 3. Simulationsergebnisse zeigen, dass die Strommenge in der SPL im idealisierten isotropen Fall deutlich geringer ist als im realistischeren anisotropen Fall.

„Unsere Fähigkeit, Modelle schnell zu simulieren und umzusetzen, reduziert das Projektrisiko erheblich und ermöglicht das Erlangen technischer Daten fast auf Abruf.“

durch den Kohlenstoff und nicht durch die SPL fließt (Abbildung 3). Kohlenstoff besteht aus vielen Schichten einzelner Fasern. Es ist einerseits sehr leitfähig in Faserrichtung, andererseits ist das Ein- und Ausleiten von Strom eine große Herausforderung. Wenn zu viel Strom durch eine Schnittstelle zwischen dem Kohlenstoff und etwas anderem fließen muss, können viele der einzelnen Fasern durch Erwärmung und/oder Bogenbildung verbrannt werden (Abbildung 4). Kohlenstoff nimmt die primären strukturellen Belastungen auf, und Beschädigungen reduzieren die Lebensdauer der Rotorblätter erheblich und können in einigen Fällen zu einem katastrophalen Verlust der Rotorblätter führen. Mehr Strom im Kohlenstoff ist daher etwas, was Ingenieure unbedingt vermeiden wollen.

Der isotrope Fall überschätzt die Strommenge im Kohlenstoff stark, da er die sehr realen orientierungsabhängigen Widerstände im Kohlenstoff ignoriert (Abbildung 5). So scheint der Kohlenstoff aufgrund seines großen Volumens und seiner vergleichbaren Länge bezüglich der SPL ein bevorzugter Strompfad zu sein, obwohl er es in Wirklichkeit nicht ist. Eine solche Überschätzung würde zusätzliche Herausforderungen mit sich bringen, die nicht vorhanden sind, was den Entwicklungsprozess verlangsamen und zu einem überentwickelten Produkt führen würde.

McKennon sagt: „Bei der Modellierung solch komplexer Physik muss man wirklich wissen, was wichtig und was nur Rauschen ist, und man muss sein Modell Schritt für Schritt sorgfältig aufbauen, damit keine Fehler oder falschen Annahmen eingeführt werden, die sich erheblich auf die Ergebnisse auswirken können“.

⇒ ZUVERLÄSSIGE ERGEBNISSE FÜR BUSINESSSENTScheidungen

„Unsere Fähigkeit, Modelle schnell zu simulieren und umzusetzen, reduziert das Projektrisiko erheblich und ermöglicht das Erlangen technischer Daten fast auf Abruf“, so McKennon. „Anstatt viel Zeit und Geld in die Herstellung komplexer Prüflinge zu investieren, können wir mit COMSOL die physikalischen Phänomene simulieren und den Problembereich für diese Projekte drastisch reduzieren. In vielen Fällen können kritische Daten einfach nicht an realen Testobjekten gemessen werden, was eine Simulation und Analyse erfordert, um diese Lücken zu füllen.“

„Zeit ist Geld in unserer Branche, und unsere Kunden sind sehr zufrieden mit dem Service, den wir dank dieser Fähigkeiten bieten können. Tatsächlich sind einige Kunden so überzeugt von der Validität unserer Simulationen, dass sie damit begonnen haben, ihre Geschäftsentscheidungen ausschließlich auf der Grundlage unserer Ergebnisse und mit wenig experimenteller Überprüfung zu treffen. Wir können es uns einfach nicht leisten, Fehler zu machen, und COMSOL ist ein wertvolles Werkzeug, auf das wir uns verlassen können, um wirklichkeitsgetreue Genauigkeit zu liefern.“ ❖

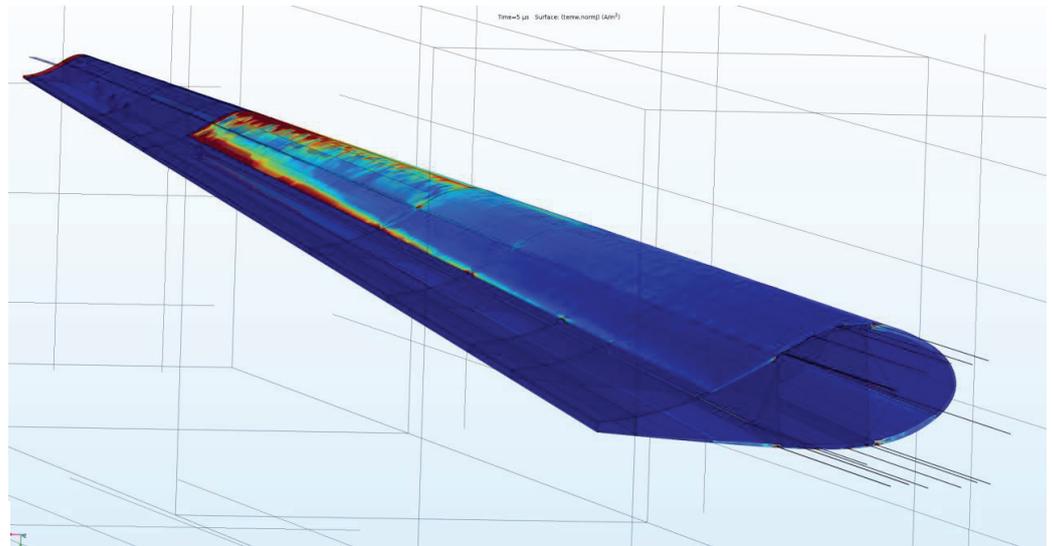


ABBILDUNG 4. Simulationsergebnisse, die die Stromdichte an einem beispielhaften Rotorblatt einer Windkraftanlage aus mehreren Kohlefaser-Stacks zeigen.

Current flowing through carbon

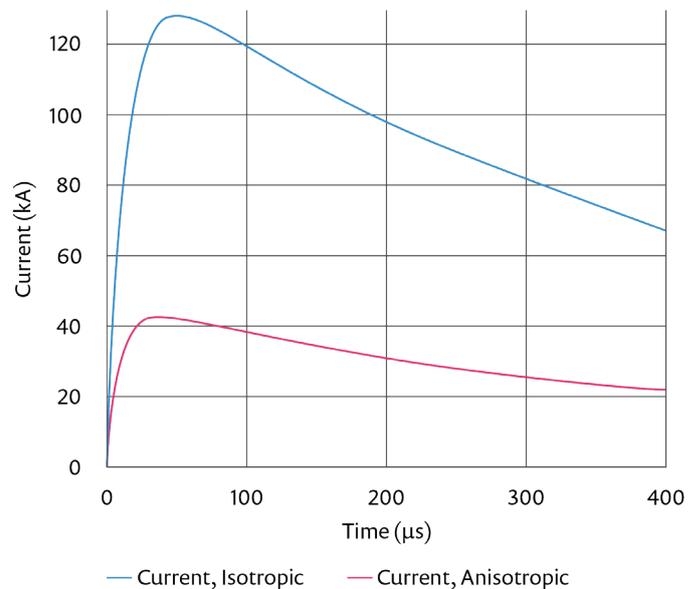


ABBILDUNG 5. Eine Darstellung der Stromniveaus in den Fällen isotropen und anisotropen Kohlenstoffs.



Justin McKennon, Leiter des Modellierungs- und Analyseteams, NTS.

COMSOL CONFERENCE 2018

AUGUST 9-10
BANGALORE, INDIA

OCTOBER 3-5
BOSTON,
UNITED STATES

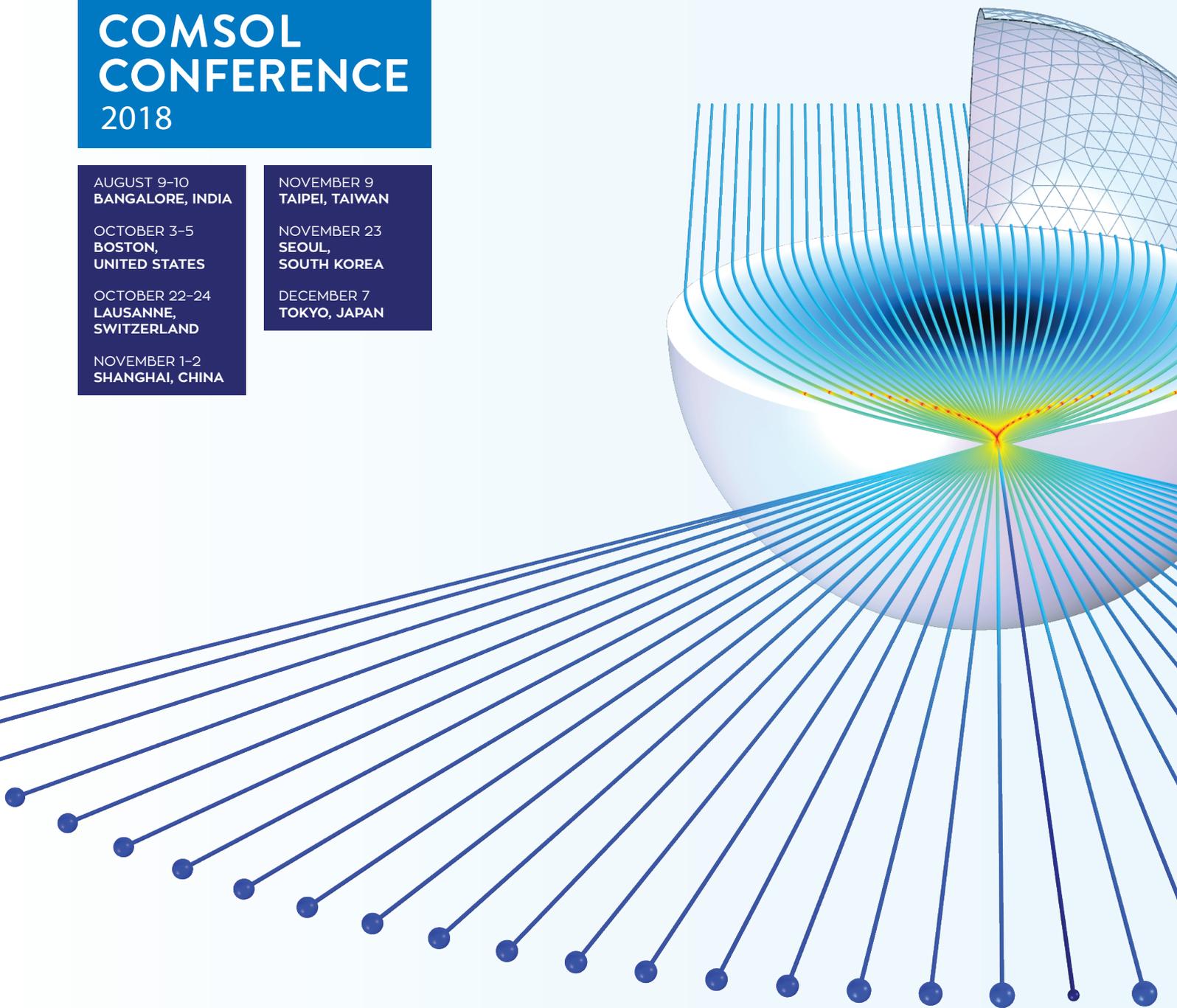
OCTOBER 22-24
LAUSANNE,
SWITZERLAND

NOVEMBER 1-2
SHANGHAI, CHINA

NOVEMBER 9
TAIPEI, TAIWAN

NOVEMBER 23
SEOUL,
SOUTH KOREA

DECEMBER 7
TOKYO, JAPAN



Experience the premier event for
multiphysics simulation.

Register today at:
comsol.com/conference

 COMSOL

MINT-Ausbildung: Simulations-Apps bereiten Schüler auf das Leben jenseits des Klassenzimmers vor

VON IVANA MILANOVIC, UNIVERSITY OF HARTFORD

Früher war der Unterricht einfach - wir hatten Kreide und Tafeln, Übungs- und Hausaufgaben. Viele Jahrzehnte hat sich daran nicht viel verändert, unabhängig davon, mit welchen Werkzeugen wir gearbeitet haben: Bleistift, Rechenschieber oder Taschenrechner. Die ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge wurden in Wahlfächern und Graduiertenkursen durchgeführt, um aktuelle Themen und die neuesten Kenntnisse zu vermitteln. Professoren referierten (mit oder ohne sokratischen Diskussionen) und machten viele Herleitungen.

Unser Wunsch und Bedürfnis, das Lernen der Studenten zu verbessern und die Absolventen besser auf eine erfolgreiche Karriere vorzubereiten, führte uns dazu, verschiedene pädagogische Modelle wie problem-, projekt- und kompetenzorientiertes Lernen (Inquiry Based learning, kurz: IBL) zu erforschen. Allerdings erfordern diese einen erheblichen Zeitaufwand, sowohl innerhalb als auch außerhalb des Kursraumes.

Und wer hat schon Zeit für solche Dinge im Rahmen von Vorlesungen, in denen die Abdeckung des Stoffes nicht viel mehr zulässt? Wie können wir die Qualität der Ausbildung in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT) steigern?

Unser Ansatz kombiniert problem- und kompetenzorientiertes Lernen, numerische Simulationen und Apps mit der Software COMSOL Multiphysics® und unterstreicht die Bedeutung von außerschulischem Lernen, unterstützt durch effektives Referenzmaterial und Mentoring. Wir haben uns außerdem von

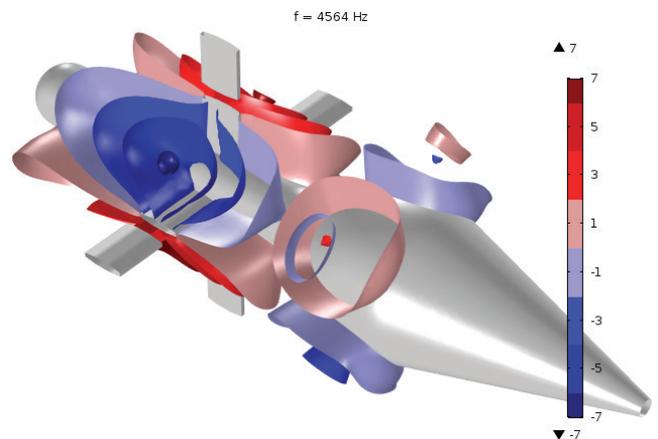
„Unsere Erfahrung zeigt, dass die Integration von mathematischer Modellierung, numerischer Simulation und Visualisierungstechniken die Leistung unserer Studierenden innerhalb des Kurses stark beeinflusst und darüber hinaus ihre Zukunft über den akademischen Bereich hinaus inspiriert hat.“

der standardmäßigen Bereitstellung von Material abgewandt und konzentrieren uns auf das, was für den Erfolg unserer Studenten entscheidend ist, was zu mehr engagierten Studenten geführt hat, die wiederum bessere akademische Leistungen erbringen.

An der University of Hartford haben wir simulationsbasiertes Design und IBL in zwei aufeinander folgende Junior-Jahrgänge eingebettet: Strömungsmechanik und Wärmetransport. Beide Kurse wurden so modifiziert, dass sie kontextualisierte Simulationen mit Applikationsentwicklung enthalten, die technische Kompetenz in der Modellierung, ein tieferes Verständnis von Thermofluid-Konzepten durch die Lösung realistischer technologischer Probleme und die Erstellung von technischen Berichten für jede Simulation vermitteln. Apps beinhalten die Erstellung einer vereinfachten Oberfläche, welche die volle Leistungsfähigkeit des zugrunde

liegenden Modells beinhaltet, ohne den Endbenutzer seiner Komplexität auszusetzen. Um dies zu erreichen, haben wir uns entschieden, uns von benoteten und gewichteten Hausaufgaben zu lösen. Die Beherrschung der Theorie und der analytischen Probleme wird durch Diskussionen im Unterricht und Selbststudium erreicht, während die Bewertung der theoretischen Kenntnisse und analytischen Fähigkeiten auf großen Prüfungen während des Semesters basiert.

Akkreditierungsanforderungen und wirtschaftliche Restriktionen führen zu Studiengängen, die in der Regel keine Computational Fluid Dynamics (CFD)-Kurse enthalten. Unsere Erfahrung zeigt jedoch, dass die Integration von mathematischer Modellierung, numerischer Simulation und Visualisierungstechniken die Leistung unserer Studierenden innerhalb des Kurses stark beeinflusst und darüber hinaus ihre Zukunft über den akademischen Bereich hinaus inspiriert hat.



Druck-Isoflächen in einer typischen Mehrstromdüse eines Strahltriebwerks. Bild mit freundlicher Genehmigung von Prof. Ivana Milanovic, University of Hartford, Khairul Zaman und Christopher Miller, NASA Glenn Research Center, „Resonance & Tones in Multi-Stream Nozzle Flows“, NASA Report 2017. Die Studenten Iliana Albion-Poles und Jeffrey Severino setzen diese Arbeit mit Unterstützung des Connecticut Space Grant for Faculty Research fort.



ÜBER DIE AUTORIN

Ivana Milanovic ist Professorin für Maschinenbau an der Universität Hartford. Sie ist Beitragsautorin für mehr als 90 Fachartikel, NASA-Berichte, Konferenzbeiträge und Software-Releases. Dr. Milanovic ist Mitglied der Connecticut Academy of Science and Engineering, einem Gremium von Wissenschaftlern und Ingenieuren im US-Bundesstaat, das staatliche Behörden und die Gesetzgebung unterstützt und Einblicke gewährt. Sie promovierte in Maschinenbau an der Tandon School of Engineering, New York University, und absolvierte ihr Studium an der Universität Belgrad, Serbien.