

COMSOL NEWS

**DAS MULTIPHYSIK-
SIMULATIONSMAGAZIN**

Kommerzialisierung der Fusionsenergie

General Fusion erreicht
Projektmeilenstein mit
Multiphysik-Simulation

SEITE 6



**Arzneimittel- und
Laborgerätehersteller
reduziert Prototypenent-
wicklung durch
simulationsgestützte F&E**

SEITE 13

Entwicklung von Spitzentechnologie für eine Welt im Wandel

Während unsere Welt sich weiterentwickelt, müssen die Produkte, Werkzeuge und Arbeitsabläufe, die unsere Gesellschaft prägen, Schritt halten. Technologische Fortschritte, die einst in weiter Ferne schienen, sind heute alltäglich, wie das Hören von Musik über einen Lautsprecher, der auch als persönlicher Assistent dient, oder das Fahren eines Autos mit autonomen Fähigkeiten. Um in der sich ständig verändernden Technologielandschaft und auf wettbewerbsintensiven Märkten an der Spitze zu bleiben, suchen Organisationen weltweit stetig nach Möglichkeiten, schneller, intelligenter und kostengünstiger zu innovieren.

In der diesjährigen Ausgabe der *COMSOL News* finden Sie neun großartige Beispiele für solche Innovationen. Auf Seite 16 erfahren Sie mehr über ein neuartiges Konzept für Doppelbatterien von IAV, das Fahrzeugherstellern und Batterieentwicklern neue Möglichkeiten eröffnet. In einem weiteren Beitrag lesen Sie, wie die NASA mithilfe von thermischen Modellen und experimentellen Tests eine neue Technologie zur Entfernung von Kohlendioxid für Astronauten entwickelt hat, die auf der Internationalen Raumstation (ISS) leben und arbeiten. In unserem Feature berichten wir über den Einsatz von Simulation bei General Fusion für die Entwicklung eines Fusionsreaktors, der im Februar 2025 erstmals Plasma erzeugt hat.

Unternehmen nehmen die Integration von Simulationssoftware in ihren zentralen F&E-Prozess sehr ernst. So hat beispielsweise Sartorius, ein auf Seite 13 vorgestelltes Life-Science-Unternehmen, eine neue Abteilung für CAE aufgebaut. Um den sich ständig weiterentwickelnden technologischen Anforderungen immer einen Schritt voraus zu sein, braucht es große Ideen, Einfallsreichtum und die Bereitschaft, Grenzen zu überschreiten. Modellierung und Simulation erleichtern den Übergang vom Konzept zur Realität.

Rachel Keatley
COMSOL, Inc.

INTERAGIEREN SIE MIT DER COMSOL-COMMUNITY

BLOG comsol.de/blogs

FORUM comsol.com/forum

LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc-

Facebook® facebook.com/multiphysics

X (formerly known as Twitter®) x.com/@COMSOL_Inc

Wir freuen uns über Ihre Kommentare zu *COMSOL News*. Kontaktieren Sie uns unter info@comsol.com. Um diese Artikel und die dazugehörigen Ressourcen (einschließlich Referenzen und Modelle) online zu sehen, besuchen Sie comsol.com/stories.

© 2025 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Server und COMSOL Compiler sind eingetragene Marken oder Marken von COMSOL AB. Alle anderen Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber. COMSOL AB und seine 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.de/trademarks.

LinkedIn ist eine Marke der LinkedIn Corporation und ihrer Tochtergesellschaften in den USA und/oder anderen Ländern. Facebook ist eine eingetragene Marke von Meta Platforms, Inc. X ist eine eingetragene Marke von X Corp.

INHALT



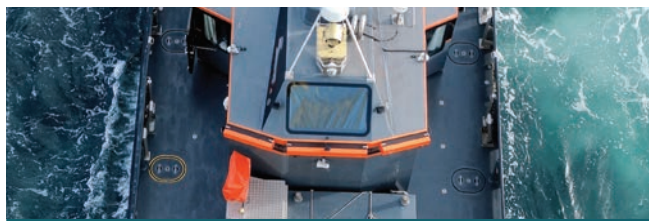
SIMULATIONSBASIERTE PRODUKTENTWICKLUNG

- 4** 9 Beispiele für den Einsatz von Modellierung und Simulation in verschiedenen Branchen
COMSOL, USA
- 6** Kompression der Wartezeit auf eine Zukunft mit Fusion
General Fusion, Kanada
- 13** Life-Science-Unternehmen beschleunigt biopharmazeutische F&E mit dedizierter CAE-Abteilung
Sartorius, Deutschland
- 33** Ein offenes Ohr für die Welt dank Hörgerätetechnologie
Sonion, Niederlande



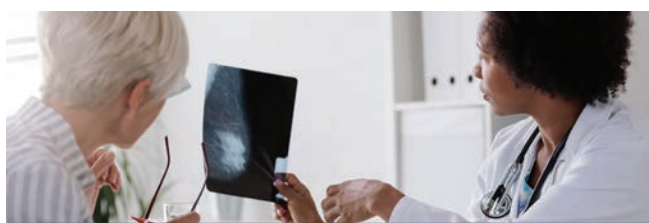
DEMOKRATISIERUNG DER SIMULATION

- 16** Entwicklung von Elektrofahrzeugen mit einem Doppelbatterieansatz
IAV, Deutschland
- 22** Training von Tauchfahrzeugen für die Visualisierung von Unterwasserstrukturen
University of Southern Mississippi, USA



DESIGNOPTIMIERUNG

- 10** Erfüllung von Qualitätsstandards in der Öl- und Gasförderung mit Ultraschallwandlern
Baker Hughes, USA
- 20** Wie Topologieoptimierung das Generative Design verbessert
COMSOL, USA
- 30** Bessere Bootsanlegerdesigns für Offshore-Windkraftanlagen
Wood Thilsted, Dänemark
- 36** Neue CO₂-Entfernungstechnologie für besseres Leben im Weltraum
NASA Ames Research Center, USA



FORSCHUNG

- 26** Personalisierte onkologische Behandlung dank Simulations-App
iBMB Srls, Italien

COMSOL, Massachusetts, USA

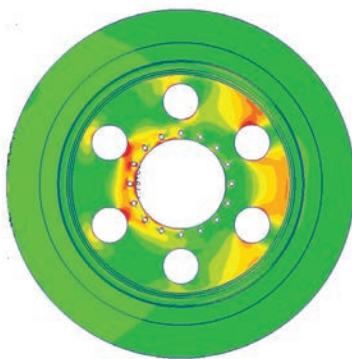
9 Beispiele für den Einsatz von Modellierung und Simulation in verschiedenen Branchen

von MACKENZIE MCCARTY

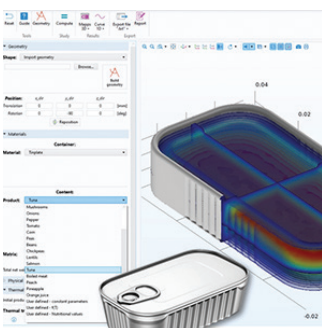
Es gibt unzählige Beispiele für Unternehmen, die Multiphysik-Modellierung und Simulations-Apps einsetzen, um Innovationen zu verwirklichen und bestehende Designs zu optimieren, damit diese nachhaltiger, kostengünstiger oder einfach besser werden. Lesen Sie weiter und entdecken Sie neun Industriebeispiele, die auf der COMSOL Conference vorgestellt wurden.

Bergwerksaufzüge

Die Trommelhebesysteme, die ABB an Bergbauunternehmen weltweit liefert, bestehen aus vielen Teilen, darunter ein Motor, ein Steuerungssystem und ein Trommelsystem. Jede einzelne Komponente muss Anforderungen an Effizienz, Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllen. Um diese Anforderungen zu gewährleisten, haben die Ingenieure von ABB einen mechanischen digitalen Zwilling ihrer Hebesysteme entwickelt, mit dem die Spannungsverteilung simuliert werden kann. So lassen sich potenzielle Problembereiche identifizieren und die Designs optimieren, um ein Versagen der Seile zu vermeiden.



comsol.com/paper/134242



Lebensmittelsicherheit

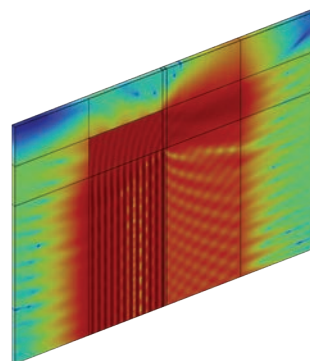
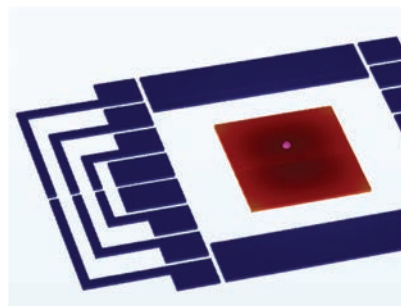
BE CAE & Test entwickelte eine eigenständige Simulations-App für Lebensmittelingenieure, die Konserven sterilisieren, um die Reduzierung von Bakterien nach einer Wärmebehandlung, die Prozesseffizienz und die Temperaturverteilung in der Dose während des Sterilisationszyklus vorherzusagen. Mit der App kann jeder ganz einfach die Dosenform, die Art des Lebensmittels und die Wärmebehandlung auswählen und die Ergebnisse visualisieren.

comsol.com/paper/135542

Testgeräte für Leistungselektronik

In der Leistungselektronik sind Komponenten wie mikroelektronische Chips extremen Temperaturschwankungen ausgesetzt, die mit der Zeit zu einer Verschlechterung ihrer Eigenschaften führen können. KAI hat eine Simulations-App entwickelt, mit der das Layout eines Testgeräts hochgeladen und ohne direkte Unterstützung durch den Simulationsspezialisten schnell thermische Simulationen durchgeführt werden können.

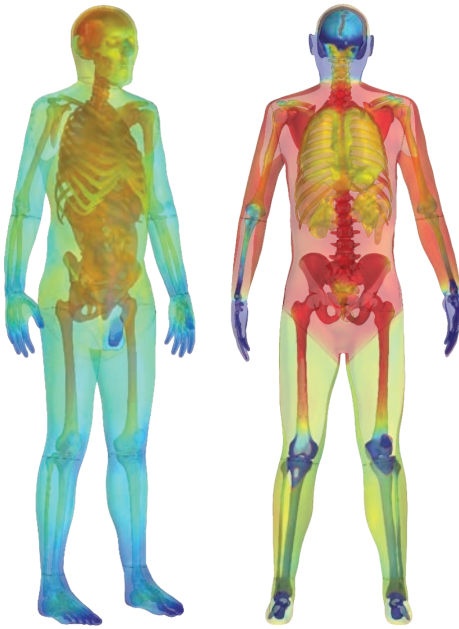
comsol.com/paper/135392



Lärmschutzwände

Phononic Vibes SRL und die Universität Coimbra haben mithilfe numerischer Modellierung die Leistungsfähigkeit belüfteter Lärmschutzwände untersucht, um verkehrsbedingten Lärm zu reduzieren. Die Teams modellierten ein Einheitszellen-Design, um die Schalldämmung zu berechnen und akustische Bandlückenfrequenzen zu analysieren. So konnten sie eine Lärmschutzwand entwickeln, die eine effektive Schalldämmung bietet, ohne die Belüftung zu beeinträchtigen.

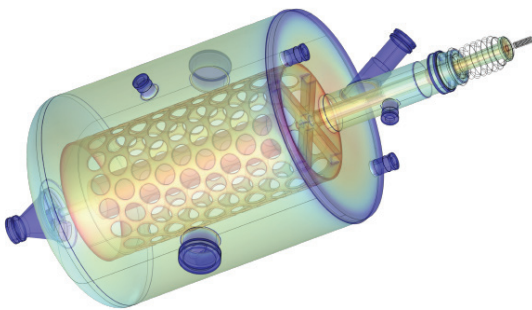
comsol.com/paper/134562



Erfrierungen vorhersagen

Bestehende Richtlinien zur Vorhersage von Erfrierungen erwiesen sich als zu vereinfacht. Für eine umfassendere Analyse der menschlichen Thermoregulation verwendete das United States Army Research Institute of Environmental Medicine anatomisch korrekte geometrische Darstellungen, die Hautschichten, Fett, Muskeln, Knochen und Organe berücksichtigten. Auf dieser Grundlage konnte das Team das Auftreten von Erfrierungen anhand der Hautstelle, der Schutzkleidung, des Geschlechts und der körperlichen Betätigung genauer vorhersagen.

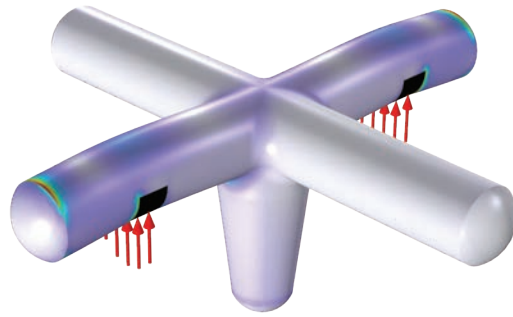
comsol.com/paper/136232



Energiespeicherung

Das Horizont Europa-Projekt Hystore entwickelt vier verschiedene Ansätze für thermische Energiespeichersysteme. Für dieses Projekt hat Inova Lab eine innovative Heizmethode entwickelt, die anstelle der herkömmlichen Mikrowellenheizung eine HF-Heizung für thermochemische Materialien verwendet. Das Team nutzte Simulation, um die Leistungsdichteverteilung des Systems zu verstehen und so die Leistung der Elektroden zu optimieren.

comsol.com/paper/134462



Additive Fertigung mittels Kaltgasspritzen

Beim Kaltgasspritzen wird Metallpulver aus mehreren Materialien mit hoher Geschwindigkeit aufgebracht, wodurch die Ermüdungsfestigkeit von Edelstählen verbessert wird. Triton Systems nutzte Modellierungen, um die Ermüdungslebensdauer bestimmter Edelstähle mit und ohne Kaltgasspritzbeschichtung aus mehreren Materialien vorherzusagen, was im Vergleich zu physischen Tests erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen ermöglichte.

comsol.com/paper/135902



Leichter Flugdatenschreiber

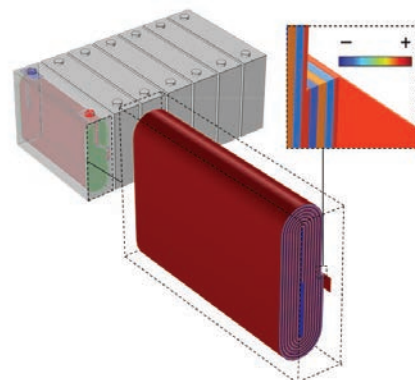
Serma Ingénierie hat einen leichtgewichtigen Flugdatenschreiber entwickelt, der mit leichten Hubschraubern kompatibel ist und die Normen für Stoß-, Druck- und Brandschutz erfüllt. Um sicherzustellen, dass das Design den Brandtest besteht, kombinierte das Team Wärmetransport-Modellierung mit experimentellen Tests. Durch die Simulation der Flammeneinwirkung konnte das optimale Verhältnis der Abmessungen der internen Materialien ermittelt und die Feuerbeständigkeit des Systems effizient getestet werden. Anschließend entwarf das Team mithilfe der Formoptimierung ein kompaktes Gehäuse für das Gerät.

comsol.com/paper/135042

Batterien für Elektrofahrzeuge

Veryst Engineering nutzte Multiphysik-Simulationen, um die bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugbatterien häufig auftretenden Designprobleme zu lösen und Einblicke in die Lebensdauer der Batterien zu gewinnen. Das Team testete simulativ die Bedingungen für die Lebensdauer, das Wärmemanagement und die strukturelle Haltbarkeit eines prismatischen Lithium-Ionen-Akkupacks. Dadurch konnte die Testzeit verkürzt und eine optimale Strategie für das Wärmemanagement ermittelt werden.

comsol.com/paper/136062



General Fusion, Kanada

KOMPRESSION DER WARTEZEIT AUF EINE ZUKUNFT MIT FUSION

General Fusion arbeitet mit Veryst Engineering zusammen, um die Magnetized Target Fusion (MTF) in einem Proof-of-Concept-Fusionsreaktor zu simulieren und besser zu verstehen.

von JOSEPH CAREW

Magnetized Target Fusion Kraftwerke haben das Potenzial, mit vergleichsweise kostengünstiger Technologie und ohne Freisetzung von Kohlenstoffemissionen erhebliche Mengen an Energie zu erzeugen. In einem MTF-Reaktor wird Wasserstoffplasma (zum Beispiel Deuterium-Tritium oder D-T) in einen Flüssigmetallbehälter injiziert, der sich im Inneren des Fusionsreaktors befindet. Der Flüssigmetallbehälter wird dann durch eine Reihe von Kolben komprimiert und umgeformt, wobei sich die Dichte und Temperatur des enthaltenen Plasmas auf Fusionsbedingungen erhöhen – und es schließlich zur Fusion kommt! In einer kommerziellen Anlage wird

dieser Vorgang einmal pro Sekunde wiederholt. Die flüssige Metallwand fängt die Energie der Neutronen ein, wandelt sie in Wärme um und leitet sie dann zu einem Wärmetauscher, um Dampf zu erzeugen und schließlich Strom zu produzieren.

Die Ingenieure von General Fusion wollen die MTF dazu

nutzen, Fusionsenergie in das kommerzielle Stromnetz zu bringen. Mit dem Bau der Lawson Machine 26 (LM26), der großtechnischen Fusionsdemonstrationsanlage von General Fusion, wurde ein wichtiger Meilenstein auf diesem Weg erreicht. Durch den Einsatz von Multiphysik-Simulationen ist es General Fusion gelungen, LM26 zu entwerfen und zu optimieren – ein großer Schritt in Richtung der fusionsbetriebenen Zukunftsvision des Teams.

» LM26 NUTZT DIE ELEKTRO-MAGNETISCHE KOMPRESSION EINES LITHIUM-LINERS, UM FUSIONS-BEDINGUNGEN ZU ERREICHEN

Ende 2024 wurde LM26 gebaut (Abbildung 1), um die Risiken für die spätere großtechnische Kommerzialisierung des MTF-Reaktors von General Fusion zu minimieren. Die Projektziele für LM26 sind das Erreichen von 1 keV, 10 keV und schließlich das Erreichen des wissenschaftlichen Breakeven.



ABBILDUNG 1 Das Team von General Fusion bei der Montage des LM26.

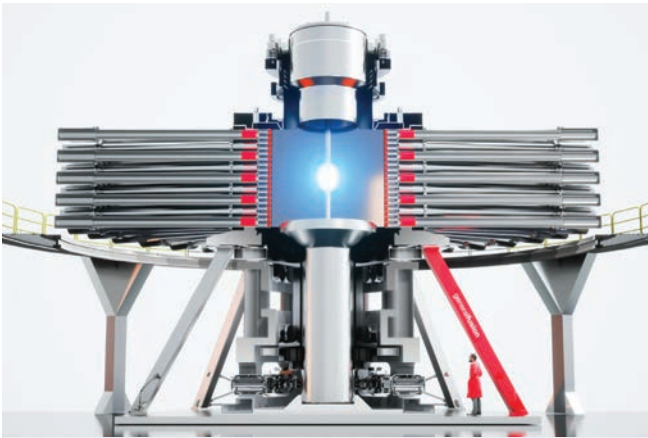


ABBILDUNG 2 Eine Darstellung des kommerziellen MTF-Reaktor-Designs von General Fusion.

LM26 ist so konzipiert, dass ein sphärisches Tokamak-Plasma in die Kammer injiziert und mithilfe eines festen Lithium-Liners komprimiert wird, um fusionsrelevante Plasmatemperaturen zu erreichen. Während der Kompression wird durch einen axialen Stromfluss in der Sanduhrstruktur ein toroidales Magnetfeld erzeugt, das das Plasma begrenzt und stabil hält. Dieser Prozess erzeugt die Plasmatemperaturen und -dichten, die zur Fusion von Plasmaionen und zur Freisetzung von Energie in Form von Neutronen führen.

Im MTF-Kraftwerkskonzept von General Fusion (Abbildung 2) lösen Kolben den Kompressionsprozess aus, nicht wie bei LM26 Magnetspulen. Die Kolben sind ein Alleinstellungsmerkmal des Ansatzes von General Fusion, da andere Fusionsverfahren auf supraleitenden Spulen, Lasern oder anderen teuren Geräten basieren.

„Bei der MTF gilt: Je größer das anfängliche Plasmavolumen, desto länger bleibt es heiß, wodurch wir mehr Zeit haben, das Plasma auf Fusionsbedingungen zu komprimieren“, erklärt Jean-Sebastien Dick, Engineering Analysis Manager bei General Fusion. „Bei General Fusion haben wir den Prozess wiederholt optimiert und einen Betriebspunkt für Kraftwerke entwickelt, der

nicht nur wirtschaftlich rentabel, sondern auch wettbewerbsfähig gegenüber anderen Energiearten auf dem Markt ist.“

» MODELLIERUNG DER MAGNETO-MECHANISCHEN KOMPRESSION EINES FESTEN LITHIUM-LINERS

LM26, bei dem ein fester Lithium-Liner komprimiert wird, ist für das Erreichen der wichtigen Temperaturschwellenwerte

von 1 keV, 10 keV und den wissenschaftlichen Breakeven ausgelegt. Mit der COMSOL Multiphysics® Software konnte das Team die internen Effekte modellieren, um die Leistung des LM26-Designs vorherzusagen (Abbildung 3). „Als ich zu General Fusion kam und die Herausforderungen sah, vor denen wir standen, dachte ich, dass COMSOL Multiphysics eine großartige Ergänzung für unsere Softwareausstattung wäre“, so Dick. „Das hat uns zu Veryst Engineering geführt, einem renommierten Experten im Bereich Multiphysik. Dort kennt man sich sehr gut mit COMSOL aus.“

Kalibrierung eines Lithium-Materialmodells mit Unterstützung von Veryst Engineering

Die Partnerschaft von General Fusion mit Veryst Engineering, einem COMSOL Certified Consultant und Ingenieurbüro, das sich auf hochgradig nichtlineare Simulationen und Materialmodellierung spezialisiert hat, war für die Entwicklung des LM26 von entscheidender Bedeutung. Sean Teller, leitender Ingenieur bei Veryst, arbeitete gemeinsam mit Dick an der Entwicklung von Materialmodellen, mit denen das Team die Reaktion des Lithium-Liners genau simulieren konnte. Diese Informationen waren für die genaue, prädiktive Modellierung der LM26-Liner-Trajektorien von entscheidender Bedeutung, sodass General Fusion den LM26 entwickeln und aufbauen konnte.

Teller erklärt: „Wir haben die Simulation mit COMSOL Multiphysics mit integrierten Versuchsplänen und Validierungen eingesetzt, damit das Team von General Fusion die Designs für LM26 schnell iterieren konnte. Die Vorhersagen der Modelle sind entscheidend, um die Fusionsbedingungen auf dem Weg zu einer realisierbaren sauberen Fusionsenergie zu erreichen.“

Einer dieser experimentellen Zugversuche umfasste die Messung des Materialverhaltens von festem Lithium. Mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera und Kraftmessdosen erhitzen Veryst und General Fusion das Lithium mit zwei

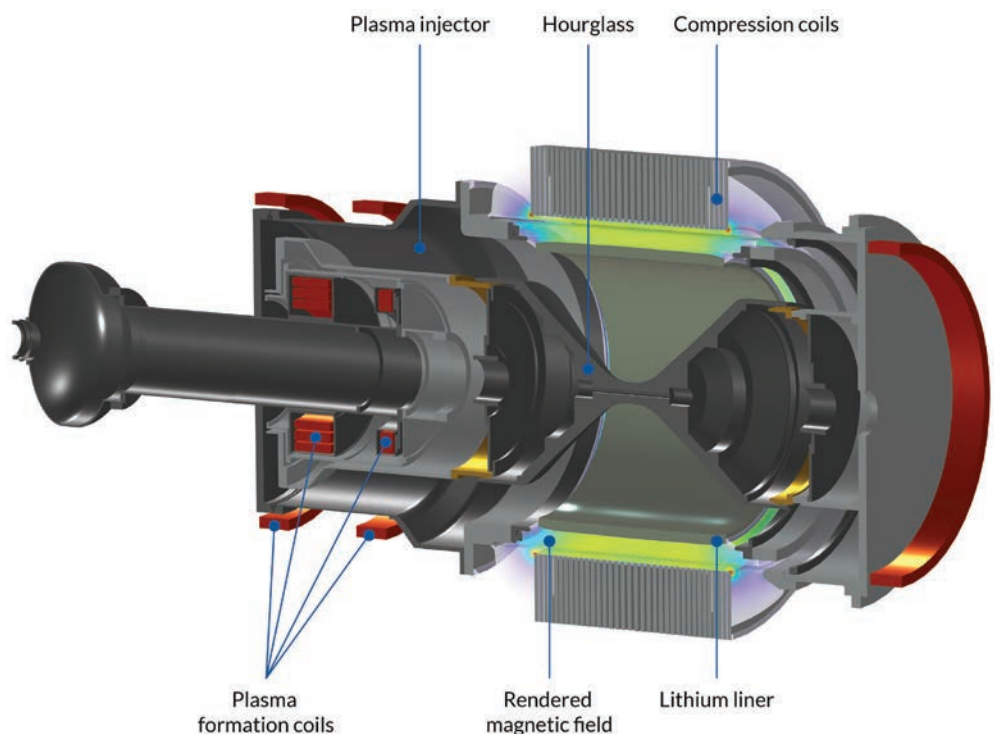


ABBILDUNG 3 Die Geometrie des LM26.

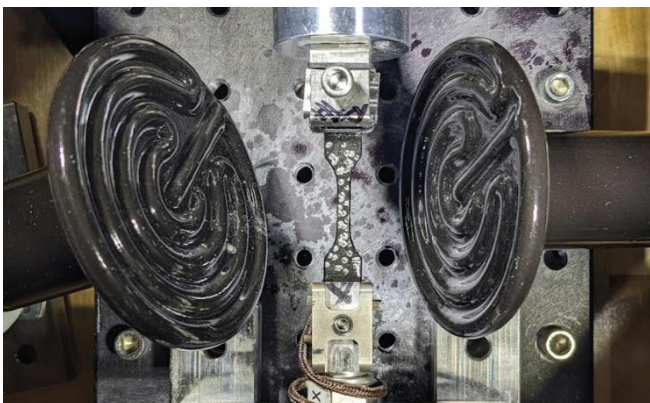


ABBILDUNG 4 Dieser Versuchsaufbau zeigt einen Zugversuch des Lithiums (Mitte, schwarz mit silbernen Punkten) zwischen zwei schwarzen Keramikheizelementen.

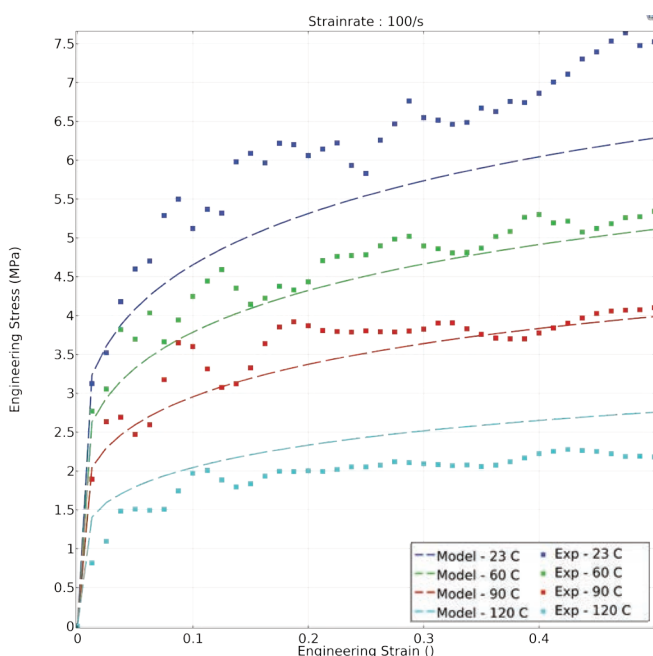


ABBILDUNG 5 Der Plot zeigt die experimentellen Daten (quadratische Datenpunkte) im Vergleich zur Vorhersage des Materialmodells (Striche).

Keramikheizelementen und zogen die Probe bis zum Bruch, um das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis zu messen (Abbildung 4). Die Ergebnisse dieser Experimente wurden anschließend zur Kalibrierung eines Johnson-Cook-Modells verwendet (Abbildung 5).

„Das vollständige Modell ist sehr komplex“, so Teller. „Es nutzt ein bewegliches Netz für das Lithium und das komprimierte Plasma, nichtlineare Festkörpermechanik und das Johnson-Cook-Materialmodell. Elektromagnetische Kräfte aus modellierten Schaltkreisen treiben die Kompression des Lithiums an. Der Lithium-Liner trifft auf die Sanduhrvorrichtung, daher ist die Erfassung des nichtlinearen Kontakts für genaue Vorhersagen von entscheidender Bedeutung.“ Der zwischen all diesen Modellkomponenten stattfindende Wärmetransport erhöht die Komplexität weiter.

Verschiedene LM26-Designs konnten gleichzeitig und in derselben Umgebung der COMSOL®-Software bewertet werden. Veryst und General Fusion verwendeten einen

zeitabhängigen, vollständig gekoppelten Löser und automatisches Neuvernetzen, um die großen Verformungen und Drücke im Inneren des LM26 zu erfassen.

„All dies erforderte eine enge Abstimmung zwischen den physischen Tests und den Finite-Elemente-Modellen, um grundlegende Erkenntnisse über dieses Kompressordesign zu gewinnen“, sagt Teller.

Während der Validierungskampagne der Modelle, die zur Entwicklung von LM26 führte, komprimierte General Fusion 40 Lithium-Liner mittels elektromagnetischer Kompression, um das COMSOL-Modell zu validieren. Das Team führte physische Experimente mit einem kleinen Prototyp des Kompressionssystems durch (Abbildung 6).

Um die Verformung des Liners zu messen, entwickelte General Fusion eine Structured-Light-Reconstruction-Technik. Dabei wurden Laserstrahlen verwendet, um die Geschwindigkeit an mehreren Punkten im Liner zu ermitteln. General Fusion setzte außerdem Photonen-Doppler-Velocimetrie ein, um die Geschwindigkeit des Mittelpunkts des Lithium-Liners zu messen. Durch diese Kombination konnte General Fusion die in den physischen Experimenten beobachtete Verformung nachbilden und zur Validierung mit den Simulationsergebnissen vergleichen. Anschließend verwendeten sie dieses geschwindigkeits- und temperaturabhängige Materialmodell (Abbildung 5) in nachfolgenden Simulationen des Plasmakompressors und stellten eine hohe Übereinstimmung zwischen den Testdaten und den Daten aus früheren Versuchen fest.

„Die Leistung des Kompressors wäre ohne die Erkenntnisse aus den frühen Simulationen und insbesondere aus dem

multiphysikalischen Modell, das die Entwicklung dieses Designs vorangetrieben hat, nicht möglich gewesen“, so Teller. „Diese Validierungen stärken das Vertrauen in zukünftige Modellierungsbemühungen, um die Geräte weiter zu verbessern, damit sie das Lawson-Kriterium erfüllen und saubere Energie liefern.“

Anpassung der Kompressorimpedanz

Eine der Schlüsselkomponenten des LM26 ist sein elektromagnetischer Kompressor, der für die schnelle Kompression des magnetisierten Plasmas verantwortlich ist. Ein erfolgreiches Design eines elektromagnetischen Kompressors muss in der Lage sein, seine Impedanz an die Kompressionszeit des Reaktors anzupassen. Wenn Impedanz und Kompression dem gleichen Zeitmaß folgen, ermöglicht dies eine „effiziente Kompression“, bei der die elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt wird. Eine „effiziente Kompression“ wandelt einen erheblichen Teil der ursprünglich gespeicherten elektrischen Energie in kinetische Energie um.

Mithilfe von Modellierung und Simulation konnte General Fusion die Impedanz der Stromversorgung anpassen, die Auswirkungen von Designänderungen auf die Leistung untersuchen und die Kompressionseffizienz maximieren.

Für das Tuning der Impedanz nahm Dick mithilfe der Software Anpassungen an der Anzahl der Windungen in den Spulen des Kompressors vor, veränderte den anfänglichen Abstand zwischen dem Liner und den Spulen (bekannt als „Luftspalt“) und passte die Kompression des Liners entlang seiner Bewegungsbahn an. Darüber hinaus muss die Form des

Liners entlang der Kompression kontrolliert werden, um ein stabiles Plasma zu gewährleisten. Dies erfordert eine Iteration der Liner-Dicke und des axialen Abstands zwischen den Spulen. Dick löste das Modell nach verschiedenen Designanpassungen und verglich die Ergebnisse, um festzustellen, ob der Reaktor eine stabile Plasmakompression erreichen konnte.

„Wir haben mehrere Materialcharakterisierungskampagnen durchgeführt, um sicherzustellen, dass dieser Liner unter den hohen Dehnungsraten und plastischen Verformungen, denen er in diesen Kompressoren ausgesetzt ist, wie erwartet funktioniert“, sagt Dick.

Validierung der Modelle

Wie bei den Versuchsaufbauten zur Validierung der Materialeigenschaften führte General Fusion interne Validierungen durch, um sicherzustellen, dass die Advektion des Magnetfelds durch den Liner mit den analytischen Vorhersagen übereinstimmte.

„Wir haben mit jeder dieser Spulen einen separaten Test durchgeführt, um ihren Widerstand und ihre Induktivität in ihren Schaltkreisen abzustimmen und sicherzustellen, dass sie so genau wie möglich mit unseren experimentell gemessenen Werten übereinstimmen“, sagt Dick. Um die Lösungszeit zu verkürzen, stützte sich Dick auf eine 2D-achsensymmetrische Simulation (Abbildung 7) des Betriebs des Reaktors.

» MEHR DATENPUNKTE DURCH SIMULATION

„Dank des COMSOL-Frameworks konnten wir die Komplexität schrittweise erhöhen, Vertrauen in unsere Designvorstellungen aufbauen und wiederholte Designphasen vermeiden“, so Dick. „Wir mussten keine wesentlichen Teile dieser Experimente ändern. Sie verliefen stets wie vorgesehen.“

Das Team von General Fusion kann seine Simulationen außerdem in einem wesentlich kürzeren Zeitrahmen durchführen. Dies ist dem Einsatz des *Cluster-Sweep-Knotens* in COMSOL Multiphysics zu verdanken, mit dem ein großer Cluster-Job erstellt werden kann, der sich über mehrere Knoten verteilt. Je mehr Knoten hinzugefügt wurden, desto mehr Parameterwerte können parallel berechnet werden. General Fusion nutzte dieses Feature, um mehrere Parameter schneller zu bearbeiten.

„Früher hätten diese Simulationen mehrere Wochen oder sogar Monate in Anspruch genommen, doch nun können wir sie in weniger als 24 Stunden durchführen“, sagt Dick. „In

dieser Zeit können wir auf unserem Cluster Hunderte von Simulationen durchführen.“

Das Team konnte die Daten aus der Simulation nutzen, um einen sicheren Betriebsbereich für den Reaktor zu entwickeln.

» DIE ZUKUNFT DER SIMULATION UND DER FUSIONSENERGIE

Mithilfe von Simulation konnte das Team von General Fusion die Komplexität seines LM26-Designs schrittweise erhöhen. Die Kombination aus Realversuchen und multiphysikalischen Simulationen war für die Entwicklung des Proof-of-Concept-Modells von entscheidender Bedeutung. Multiphysik-Simulation und Fusionsforschung werden auch weiterhin untrennbar miteinander verbunden sein, wenn das Team die Fusionsenergie auf ein neues Niveau hebt.

LM26 hat im Februar 2025 erstmals Plasma erzeugt und bildet nun regelmäßige Plasmen, während das Team von General Fusion seine Leistung optimiert, um den nächsten Schritt vorzubereiten – die Kompression von Plasmen zur Fusion und Erzeugung von Wärme.

„Wir betrachten nicht mehr nur die Aerodynamik, die Fluidodynamik oder die



ABBILDUNG 6

Prototyp 0, die kleine Version des Kompressionssystems des LM26.

Strukturmechanik getrennt, sondern setzen alles zusammen“, so Dick. „Mir gefällt die Herangehensweise von COMSOL an die Welt der Simulation sehr gut. Ich mag den kanonischen, inkrementellen Ansatz, bei dem man Komplexität aufbauen kann, indem man die physikalischen Aspekte wie Puzzleteile zusammensetzt. Ich glaube, dass dies die Zukunft der Simulation sein wird, da Innovationen sehr komplex sind und viele verschiedene physikalische Aspekte miteinander kombiniert werden müssen.“ ☺

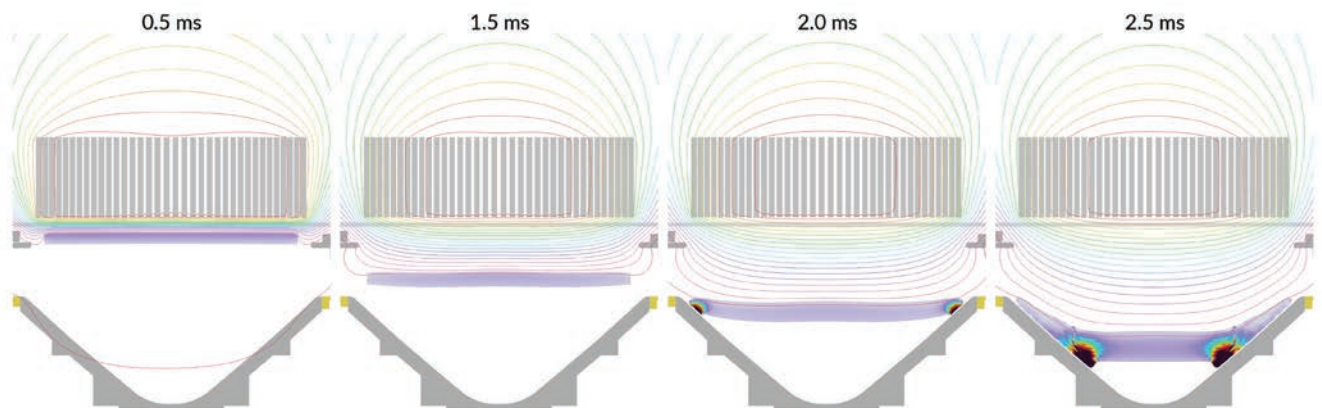


ABBILDUNG 7 Ein 2D-achsensymmetrisches Modell des Reaktors, das die hydrostatischen Druckkonturen im Lithium und die poloidalen Magnetflusskonturen in allen Körpern zeigt. Die zentralen leitenden Kegel sind unten zu sehen, und die mit der Stromversorgung verbundenen Spulen sind die grauen Körper oben.

Baker Hughes, USA

ERFÜLLUNG VON QUALITÄTSSTANDARDS IN DER ÖL- UND GASFÖRDERUNG MIT ULTRASCHALLWANDLERN

Baker Hughes spart 30 % der Prototypenentwicklungskosten durch den Einsatz von 3D-Ultraschallsimulationen zur Untersuchung der Ausbreitung akustischer Wellen, zur Erfassung experimenteller Reaktionen und zur Optimierung von Wandlern, die zum Prüfen von gefördertem Öl und Gas eingesetzt werden.

von **MACKENZIE MCCARTY**

Bevor Öl und Gas zum Heizen von Häusern, zum Betanken von Autos und zur Stromerzeugung verwendet werden können, durchlaufen sie umfangreiche Raffinerie-, Transport-, Förder- und Testprozesse. Baker Hughes konzentriert sich auf den ersten Schritt dieses Prozesses, den sogenannten Upstream-Schritt, und nutzt dabei speziell die Cement-Bond-Logging-Technologie zur Bewertung der Gasqualität. Das Unternehmen nutzt Multiphysik-Simulationssoftware, um seine Ultraschallwandler zu entwickeln und zu verbessern, die bei Puls-Echo- und Pitch-Catch-Tests zum Einsatz kommen, zwei gängigen Methoden zur Prüfung von gefördertem Öl und Gas.

» ERFORSCHUNG DER ÖL-UND GASFÖRDERUNG

Wenn im Upstream-Prozess ein Loch gebohrt wird, um Gas zu fördern, muss die Bohrung verstärkt werden, um die Strömung des Fluids in ihrem Inneren zu kontrollieren. Die Bewertung der Zementbindung ist ein wichtiger Schritt in diesem Prozess. Nach dem Bohren eines Bohrlochs wird Zement zwischen die Verrohrung und die Formation injiziert, um die Verbindung zwischen den Förderzonen im Bohrloch zu verhindern. Wie Haiqi Wen, leitender Wissenschaftler bei Baker Hughes, erklärt, bildet die Zementummantelung eine hydraulische Abdichtung, die die Verbindung zwischen den Zonen und das Entweichen von Fluiden an die Oberfläche verhindert.

Zwei häufig verwendete Ultraschallwerkzeuge, die über ein Kabel in das Bohrloch eingeführt werden, um genaue Abschätzungen der Bohrlochintegrität und der Isolierung der Fluidzone zu erhalten, werden als Cement Bonding Logs

(CBL) und Variable Density Logs (VDL) bezeichnet. Die Ergebnisse des CBL liegen in Form einer Wellenform vor, anhand derer die Verbindungsqualität zwischen der Verrohrung und dem Zement auf der Grundlage der Amplitude und des Abklingkoeffizienten der Wellenform bestimmt werden kann. Die VDL ist „eher eine visuelle Darstellung aller Wellenformen, mit der man mehr Informationen über die Bindungsqualität zwischen der Formation und dem Zement erhält“, so Wen.

Die Prüfung von Öl und Gas am Förderort stellt sicher, dass das Produkt den Qualitätsstandards entspricht, bevor es den weiteren Prozess durchläuft. Dabei werden Verunreinigungen identifiziert, die den Wert oder die Verwendbarkeit beeinträchtigen könnten, und durch die Analyse

der Zusammensetzung und der Förderraten wird die Produktion optimiert. Die Prüfung liefert außerdem Daten, anhand derer die Betreiber die Reservoirbedingungen besser verstehen, Sicherheitsrisiken erkennen und zukünftige Verbesserungen vornehmen können.

Piezoelektrische Wandler werden im vorgelagerten Teil des Prozesses, in der Testphase, eingesetzt. Wen und sein Team verwendeten die Software COMSOL Multiphysics®, um ihre piezoelektrischen Wandler zu modellieren (Abbildung 1). Mithilfe der integrierten Multiphysik-Funktionen der Software koppelten sie Fluide mit piezoelektrischen Wandlern, elastische Wellen mit Druckakustik und einen externen Stromkreis an das piezoelektrische Element. So konnten sie genau

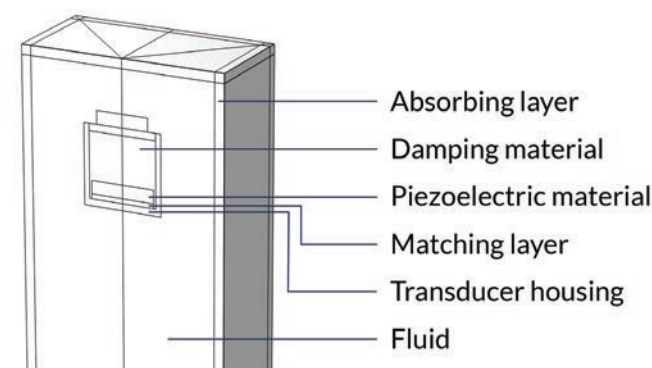


ABBILDUNG 1 Die Modellgeometrie des piezoelektrischen Wandlers.

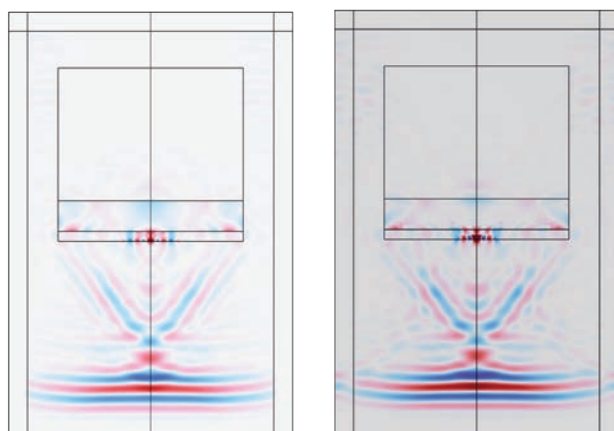


ABBILDUNG 2 Ein kurzes Pulssignal wird durch das einfache 2D-achsensymmetrische Modell (links) und das 3D-Modell (rechts) gesendet und zeigt, dass die Wellenausbreitung in beiden Modellen nahezu identisch ist.

untersuchen, wie mehrere physikalische Phänomene zusammenwirken, und die Umwandlung von Spannungssignalen in elastische Wellen sowie die Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) an den Rändern des Wandlers mit benutzerdefinierten Schaltungsparametern modellieren.

„Ich habe an den Rändern absorbierende Schichten angeordnet, um einfallende Wellen zu absorbieren“, erklärt Wen und fügt hinzu: „Die Ränder übernehmen außerdem Frequenzfilter- und Scanfunktionen. Um Zeit zu sparen, wird nur ein Achtel des Modells simuliert, aber durch die Anwendung gespiegelter Datensätze erhalten wir die vollständige Modellantwort und alle Daten.“

Ein wesentlicher Bestandteil des Wandlerdesigns ist die

Dicke des piezoelektrischen Wandlers im Verhältnis zur Wellenlänge und zur absorbierenden Schicht. Bei diesem Design ist die Wandlerdicke auf eine halbe Wellenlänge und die Schichtdicke auf eine Viertelwellenlänge festgelegt.

Wen untersuchte zwei verschiedene Methoden während er die Abmessungen des Wandlers und die Netzeinstellungen festlegte – Form Assembly und Form Union. Form Assembly erzeugt ein diskontinuierliches Netz an der Grenzfläche, während Form Union ein kontinuierliches Netz erzeugt. „Ich denke, dass Form Union in der Regel etwas robuster ist, aber es entstehen viel feinere Elemente an der Grenzfläche, was die Simulation in einigen Fällen etwas verlangsamen kann“, so Wen.

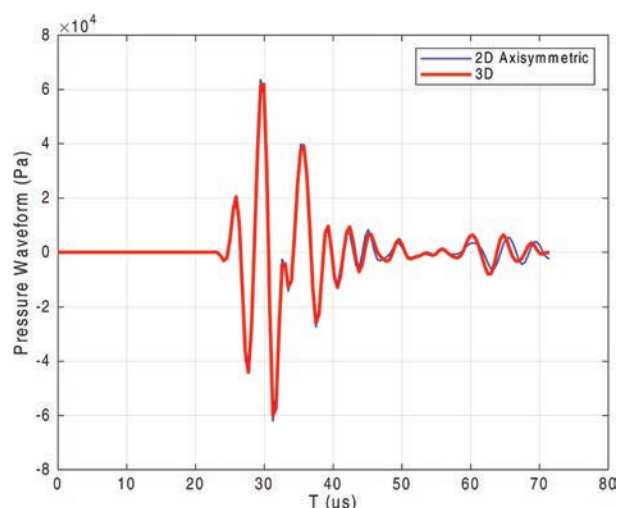


ABBILDUNG 3 Ein kurzes Pulssignal wird durch das einfache 2D-achsensymmetrische Modell (links) und das 3D-Modell (rechts) gesendet und zeigt, dass die Wellenausbreitung in beiden Modellen nahezu identisch ist.

» REDUZIERUNG DER PROTOTYPING-KOSTEN DURCH SIMULATION

Wen erstellte ein vereinfachtes, achsensymmetrisches 2D-Modell sowie ein vollständiges 3D-Modell (Abbildung 2) und validierte beide Modelle anhand experimenteller Tests. Dazu wird ein kurzes Pulssignal ausgesendet, das auf die Zementoberfläche des Bohrlochs trifft. Wenn die Verbindungsqualität gut ist, zeigt der Empfänger keine starken Signale, da die Materialien fest miteinander verbunden sind und keine Hohlräume oder Risse aufweisen. In diesem Fall durchdringt das Signal die Oberfläche. Bei schlechter Verbindungsqualität hingegen zeigt der Empfänger Reflektionen des Signals, da es auf Risse oder Hohlräume trifft.

„In dieser Arbeit habe ich die Wellenausbreitung und die Druckantwort verglichen. Wie Sie sehen können, sieht die Wellenausbreitung fast identisch aus“, erklärt Wen. „Bei Achsensymmetrie kann für schnellere Simulationsergebnisse das 2D-Modell verwendet werden, andernfalls muss das 3D-Modell zum Einsatz kommen.“ Die Ergebnisse des 3D-Modells werden durch Auswertung der Druckantwort an der yz-Schnittfläche ermittelt, wo $x = 0$ ist (siehe rechts in Abbildung 2). „Bei dieser Druckantwort stimmt das 2D-Modell fast vollständig mit dem 3D-Modell überein“, so Wen. Er verglich die Ergebnisse mithilfe von LiveLink™ for MATLAB®, einem Schnittstellenprodukt, das die Software COMSOL Multiphysics mit der Software MATLAB® verbindet (Abbildung 3).

Die COMSOL-Simulationsergebnisse und Messdaten stimmen im Nahfeld gut überein, wie über LiveLink™ for MATLAB® dargestellt (Abbildung 4). Die Ergebnisse zeigen, dass der maximale Druck auf der Achse liegt, wobei die Mittenfrequenz des Wandlers in diesen Daten eine Amplitude von 280 kHz aufweist. Wie Wen jedoch hervorhob, „gibt es einige Unstimmigkeiten, die wir zu klären versuchen“. Ein Beispiel hierfür ist das Vorhandensein von Nebenkeulen in den Messdaten, die in den Simulationsergebnissen nicht vorhanden waren. Eine weitere Unstimmigkeit ist die lokale Auslöschung, die in den Simulationsergebnissen zu beobachten ist, während die Messdaten einen kontinuierlichen Abfall zeigen.

„Ich vermute, dass das Problem mit der Modellierung des piezoelektrischen Materials zusammenhängt, da es sich in der praktischen Anwendung um einen Verbundwerkstoff handelt. In unserer aktuellen Studie behandeln wir es jedoch

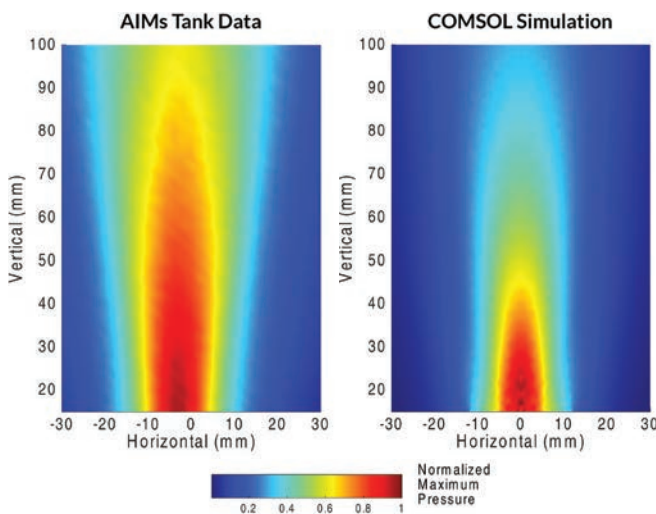


ABBILDUNG 4 Der Spitzendruck in den Messdaten (links) und den COMSOL-Simulationsergebnissen (rechts) zeigt im Nahfeld eine gute Übereinstimmung.

als homogenes Material“, erklärt Wen. „Wir arbeiten weiterhin daran, dies zu verbessern.“

„Insgesamt haben wir durch Simulationen etwa 30 % der Prototypenkosten eingespart“, so Wen. „Früher mussten wir, wenn wir neue Wandler benötigten, in der Regel eine Charge verschiedener Wandler mit unterschiedlichen Spezifikationen bestellen. Da wir nun jedoch Simulationssoftware wie COMSOL® einsetzen, müssen wir lediglich überprüfen, ob die Charge einige gute Designs enthält. Dann müssen wir nur noch diese Designs bestellen, anstatt alle neuen Wandlerdesigns zu bestellen und zu testen, welches am besten funktioniert“, so Wen.

» PULSE-ECHO- UND PITCH-CATCH-TESTS

Um ihre Arbeit fortzusetzen, nutzten Wen und sein Team COMSOL Multiphysics zur Simulation und Optimierung von Pulse-Echo- und Pitch-Catch-Tests. Ihre Pulse-Echo-Simulation stellt eine ultraschallbasierte zerstörungsfreie Prüfmethode dar, bei der Ultraschallpulse ausgesendet werden, um Materialfehler zu identifizieren oder für weitere Informationen die reflektierten Wellenformen zu analysieren. Wen und sein Team sendeten Wellen aus, die von einem Metallgehäuse reflektiert wurden, wobei der Wandler sowohl als Sender als auch als Empfänger fungierte. Nach der Messung mit einer Punktsonde können die Wellenformdaten analysiert werden.

Wen wendete die Hilbert-Transformation an, um die Wellenformhüllkurve zu extrahieren. Anschließend „kann man die FFT [Fast Fourier Transformation] davon abziehen,

„Insgesamt konnten wir durch Simulationen etwa 30 % der Prototypenkosten einsparen.“

— HAIQI WEN, LEITENDER WISSENSCHAFTLER BEI BAKER HUGHES

um einen der Frequenzpeaks zu erhalten, und dieser Peak entspricht der internen Reflexion innerhalb des Gehäuses. Wenn man das Signal sendet, gibt es die erste Reflexion, aber es gibt tatsächlich auch eine interne Reflexion“, erklärt Wen. Die Gehäusemessungen können dann auf der Grundlage der Frequenz berechnet werden.

Die Hilbert-Transformation kann auch verwendet werden, um die Hüllkurve der Wellenlänge in Tonhöhenmessungen zu extrahieren, wodurch die Amplitude der Peaks verfolgt werden kann. Die Peaks in dieser Studie werden durch die blauen und roten Punkte in Abbildung 5 dargestellt. Wen plottete die Wellenamplitude als Funktion des Wandlerabstands, wodurch die Exponentialkurve angepasst werden konnte (dies ist in Abbildung 5 nicht dargestellt). Er verglich die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen dem Wasser im Rohr und dem Schaumzement, um die Materialeigenschaften innerhalb des Gebiets zu verstehen.

„Die Herausforderung besteht darin, dass man den Peak einer relativ geringen Amplitude sehen kann. In realen Anwendungen wird

dies sehr schwierig sein, da man naturgemäß unter einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis leidet, insbesondere bei höheren Frequenzen“, erklärt Wen. Er führt weiter aus, dass es schwieriger sein wird, aussagekräftige Signale zu erfassen, wenn die Schallwellen sehr schnell gesendet und empfangen werden.

Die Simulation der beiden Testmethoden in COMSOL Multiphysics ermöglicht eine effizientere Erfassung der Daten aus den Ultraschallmessungen, und die Modellierung des Wandlers schont Ressourcen und optimiert gleichzeitig das Design. Mithilfe der Simulation können Wen und sein Team untersuchen, wie sich die Welle durch verschiedene Materialien ausbreitet, und feststellen, wodurch die endgültige Wellenform entsteht. „Das ist etwas, was nur die Simulation leisten kann, da wir diese Informationen aus den Testversuchen nicht gewinnen können“, erklärt Wen. Letztendlich hilft dies Baker Hughes, die Effizienz und Genauigkeit in der vorgelagerten Phase des Öl- und Gasförderungsprozesses zu verbessern. ☺

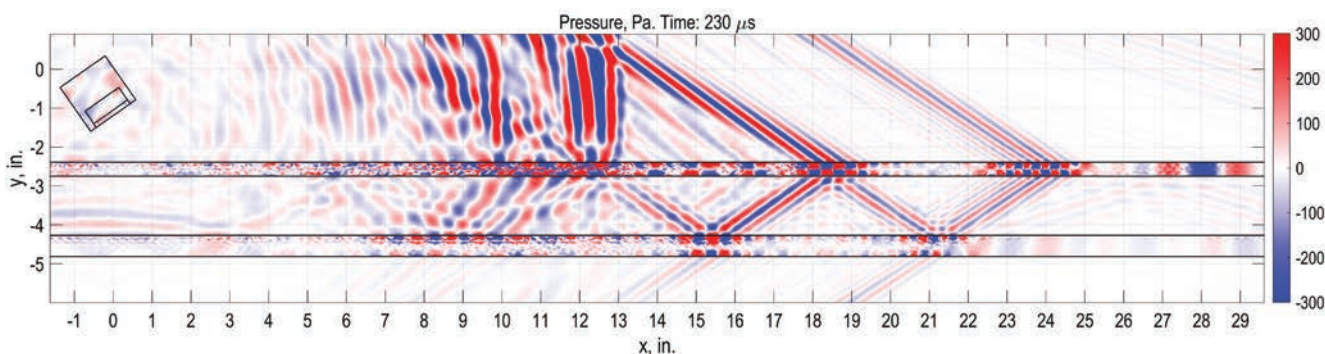


ABBILDUNG 5 Pitch-Catch-Simulation von Druckwellen in Wasser und Schaumzement mit Peaks bei (18,5; -2,5), (21; -4,5), (23,5; -2,5) und (28; -2,5), wobei die beiden horizontalen Bänder die Rohre darstellen.

Sartorius, Deutschland

LIFE-SCIENCE-UNTERNEHMEN BESCHLEUNIGT BIOPHARMAZEUTISCHE FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG MIT DEDIZIERTER CAE-ABTEILUNG

Sartorius verlässt sich auf seine Abteilung für Computer-Aided Engineering (CAE), um Geräte für die Herstellung von Biopharmazeutika zu optimieren.

von JOSEPH CAREW

Biopharmazeutika sind wirksame Behandlungsmethoden für Krankheiten wie Krebs, Multiple Sklerose und Rheuma. Diese neuartigen Arzneimittel sind hochkomplex und ihre Herstellung erfordert Bioreaktoren, biotechnologische Verfahren sowie einen erheblichen Zeit- und Ressourcenaufwand. Die Abteilung für Computer Aided Engineering (CAE) des internationalen Pharmazie- und Laborgeräteherstellers Sartorius hat festgestellt, dass der Einsatz der Software COMSOL Multiphysics® ihnen dabei hilft, häufige Herausforderungen in der Produktion zu meistern, indem sie die Entwicklung beschleunigt, die Anzahl der Prototypen reduziert, Innovationen unterstützt und Tests optimiert.

» EINES VON ZEHNTAUSEND: DIE HERSTELLUNG EINES ERFOLGREICHEN BIOPHARMAZEUTIKUMS

Ein Biopharmazeutikum ist ein pharmazeutisches Arzneimittel, das aus biologischen Quellen hergestellt,

extrahiert oder synthetisiert wurde. Im Gegensatz zu chemischen Arzneimitteln können Biopharmazeutika auf bestimmte Zellen zugeschnitten sein und unter anderem Impfstoffe, somatische Zellen, Gewebe und Vollblut umfassen. Ein aktuelles, bemerkenswertes Beispiel für den Erfolg

von Biopharmazeutika ist der COVID-19-Impfstoff. Biopharmazeutika verfügen zwar über beeindruckende Fähigkeiten, doch der Entwicklungsprozess birgt auch Herausforderungen.

„Nur einer von zehntausend neuen Arzneimittelkandidaten kommt auf den Markt“, sagt Dr. Friedrich Maier, leitender

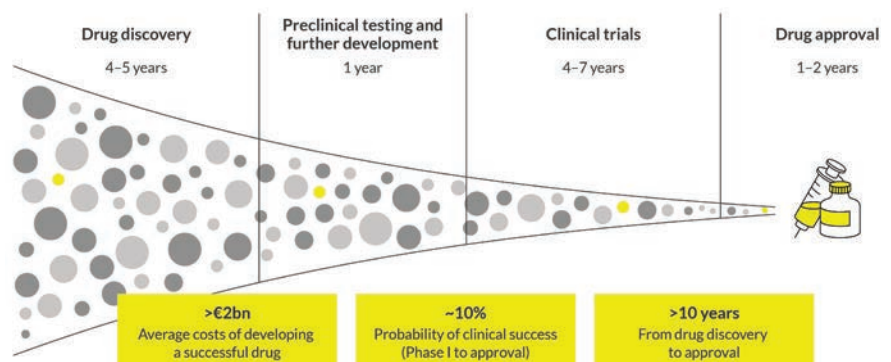


ABBILDUNG 1 Von allen Medikamentenkandidaten erreicht nach einem langen und kostspieligen Entwicklungsprozess nur einer von zehntausend die Marktreife.

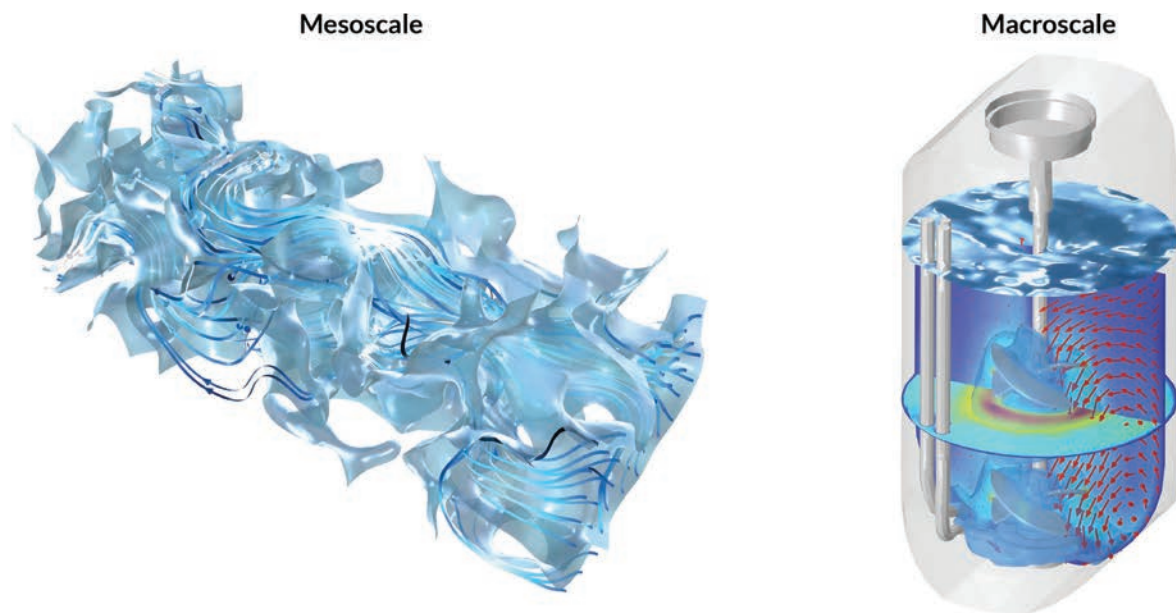


ABBILDUNG 2 Modelle im Mesobereich visualisieren den Durchfluss durch kleinere Komponenten (links), während Modelle im Makrobereich eine Bewertung der Geräteleistung ermöglichen (rechts).

Wissenschaftler für CAE-Simulation bei Sartorius. „Die Entwicklung eines Medikaments erfordert über zwei Milliarden Euro an Investitionen, ganz zu schweigen vom erheblichen Zeitaufwand.“ (Abbildung 1)

Biopharmazeutika sind vor allem aufgrund ihrer komplexen molekularen Struktur, der speziellen Herstellungsverfahren und der regulatorischen Anforderungen in der Branche teuer in der Entwicklung. Insbesondere physische Experimente sind kostspielige Investitionen. Modellierung und Simulation entlasten hier und reduzieren die Abhängigkeit von solchen Experimenten. Die Modelle richtig zu erstellen kann jedoch schwierig sein, denn die nachzubildenden biologischen Prozesse sind komplex, unterliegen starken Schwankungen und lassen sich nicht einfach replizieren. Sartorius unterstützt seine Kunden aus den Bereichen Biopharma und Life Science durch die sorgfältige Integration der biologischen Prozesse in seine Geräte, um die Fehlerfortpflanzung zu minimieren und die Produktausbeute zu maximieren.

» EINRICHTUNG EINER CAE-ABTEILUNG UND OPTIMIERUNG DER ENTWICKLUNG

Im Jahr 2019 führte Sartorius eine interne CAE-Abteilung ein, um die Herausforderungen in der Produktion zu bewältigen, und Maier wusste genau, wo er ansetzen musste: „Unser erster Schritt bestand darin, die Tools zu definieren, die wir einsetzen wollten“, erklärt er.

Maier und sein Team suchten nach Möglichkeiten, den Austausch von Erkenntnissen und Ergebnissen zwischen den Ingenieuren, die die Geräte entwickelten, und den Wissenschaftlern, die den Prozess untersuchten, zu verbessern. Das Team entschied sich für die Software COMSOL Multiphysics, die seitdem zu einem wichtigen Bestandteil des CAE-Toolkits und zu einem wesentlichen Faktor für eine erfolgreiche Kommunikation und Problemlösung geworden ist.

Die CAE-Abteilung schulte Ingenieure in der Verwendung von Simulationssoftware, um eine interne Simulationscommunity aufzubauen, die Qualitätsprüfungen für die Projekte des Unternehmens durchführen kann. „Unsere Probleme werden durch die Physik, den Prozess, die Dimensionen in Raum und Zeit sowie durch die Materialien oder Materialwechselwirkungen definiert, die bei den Modellierungsansätzen berücksichtigt werden müssen“, erklärt Maier.

Nach einigen Jahren des Bestehens der CAE-Abteilung bei Sartorius verfügt das Team nun über einen etablierten Entwicklungsprozess, der einen CAE- und einen V-Modell-Ansatz kombiniert. „In der Ideenphase betrachten wir

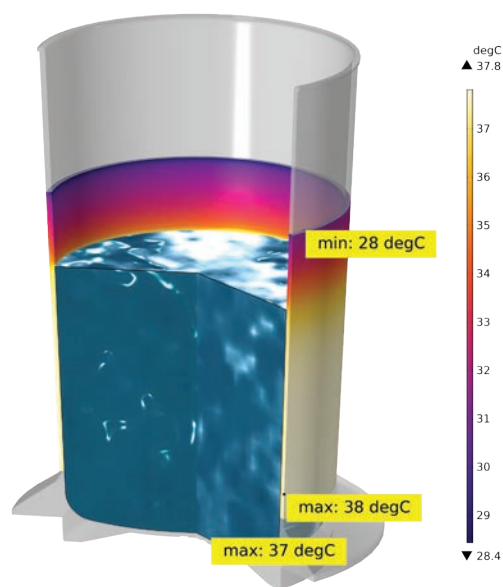


ABBILDUNG 3 Das Modell erfasst das vorübergehende Verhalten des Heizmantels und zeigt die Temperaturverteilung, die Leistung der Sensoren und Schalter sowie die Heizleistung. Darüber hinaus werden potenzielle Hotspots identifiziert, die die Materialintegrität beeinträchtigen könnten.

das Kostenniveau, schlüsseln es auf die Hauptpositionen auf und bauen dann, sobald wir die internen Prozesse verstanden haben, wieder eine Systemebene auf“, sagt Maier. Dieser Ansatz erstreckt sich über die gesamte Produktionskette, einschließlich der ausgereiften Phasen, in denen Experten hinzugezogen werden, um das Design zu optimieren, Ideen zur

Produktverbesserung auszutauschen und schließlich einen digitalen Prototyp zu erstellen.

Die CAE-Abteilung bei Sartorius ist an einer Vielzahl von Projekten beteiligt, die verschiedene Größenordnungen umfassen und ein breites Spektrum an biopharmazeutischen Geräten abdecken. Jedes Projekt wird unabhängig durchgeführt, was fokussierte Innovationen ermöglicht. In einer Initiative entwickelte das Team beispielweise einen Bioreaktor. Gleichzeitig wurde unabhängig vom Bioreaktorprojekt die 3D-Modellierung von Membranstrukturen im Mesobereich erforscht. Die Erkenntnisse aus diesem Mesomodell verbessern jedoch das Design von Filtern, die integrale Bestandteile von Bioreaktoranlagen und anderen biopharmazeutischen Geräten sind (Abbildung 2).

Die meisten ihrer Simulationen finden in diesem Makrobereich statt, aber Maier und das CAE-Team untersuchen auch Systeminteraktionen. „Betrachtet man die gesamte Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zum Medikament, so gibt es eine Vielzahl von Anforderungen, die auf unseren Schreibtischen landen, angefangen bei Pipetten über Mischer, den nachgelagerten Bereich bis hin zu zahlreichen Filtrationschromatographie-Schritten, dem Einfrieren und der endgültigen Abfüllung, bis wir die Medikamentendosis erreichen“, erklärt Maier. Angesichts dieser breiten Projektpalette muss das CAE-Team in der Lage sein, mehrere physikalische Bereiche zu modellieren.

„Biopharma ist multiphysikalisch“, sagt Maier. „Bei unseren Produkten müssen wir uns auf die Strukturmechanik konzentrieren, die die Robustheit der Geräte gewährleistet, aber wir müssen auch die Strömungsmechanik berücksichtigen und die Performance kennen. Wir haben es überall mit Flüssig-Systemen zu tun... und hier ist COMSOL Multiphysics definitiv sehr hilfreich.“

» VOM MODELL ZUM SERIENREIFEN GERÄT

Die CAE-Abteilung von Sartorius hat COMSOL Multiphysics häufig für spezielle CFD-Anwendungen wie Mischer und poröse Medien eingesetzt. Darüber hinaus hat sie an Projekten gearbeitet, bei denen Vereisung, Schweißen, reaktiver Transport, Wärmetransportprozesse und Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) berücksichtigt werden mussten. Durch den Einsatz der gleichungsbasierten Modellierung hat Maier auch Steuerungen und



ABBILDUNG 4 Der Univessel® SU mit nahtlos installiertem Heizmantel.

Regelprozesse integriert, um die Designleistung zu verbessern, die Entwicklungszeiten zu verkürzen und den Prototypenbau zu reduzieren.

Die Simulationen der CAE-Abteilung haben Experten im gesamten Unternehmen detaillierte Einblicke in vielfältige Phänomene ermöglicht. Bei der Ursachenanalyse können die Experten ihr Wissen durch Erkenntnisse ergänzen, die mit praktischen Tests nicht möglich wären, beispielsweise mit Einblicken in das Innere eines Geräts. Die Simulation unterstützt auch die Konstrukteure von Sartorius bei ihren Testprozessen.

„Wir hinterfragen die Tests und die Tests hinterfragen uns. Es ist also ein ständiger Austausch“, erklärt Maier. Die Ergebnisse können Unsicherheiten sowohl in den Tests als auch in den Simulationen aufzeigen. Auf dieser Grundlage kann das Team die Tests um zusätzliche Simulationen oder schwer messbare Kennzahlen erweitern und so seine Testbemühungen optimieren.

» ENTWICKLUNG VON BIOREAKTORZUBEHÖR MIT EINEM EINZIGEN PROTOTYP

Während der COVID-19-Pandemie hat das Univessel® SU-Bioreaktorportfolio den Bedarf an hochwertigen Produkten für die Herstellung von Biopharmazeutika deutlich gemacht. Der ursprüngliche Univessel® SU-Bioreaktor war eine Schlüsselkomponente bei der Herstellung des ersten COVID-19-Impfstoffs von BioNTech. Aufgrund seines Erfolgs beschloss Sartorius, ihn zu aktualisieren und um weitere Funktionen und Größen zu ergänzen. Eine dieser Funktionen ist ein wichtiger

Bioreaktorzubehör: ein Heizmantel.

Die Entwicklung des Heizmantels entspricht dem typischen Ansatz der CAE-Abteilung. Das Team begann seine Untersuchungen mit einem handelsüblichen Heizmantel, der jedoch nicht effizient genug war, und beschloss, ein besseres Design zu modellieren. Die Erstellung des Modells für das neue Heizmanteldesign (Abbildung 3) umfasste CFD, Wärmetransport und gleichungsbasierte Modellierung, um die Sensoren, Schalter und Regler zu berücksichtigen. Laut Maier lieferten die Ergebnisse dem Entwicklungsteam klare Empfehlungen, beispielsweise wo Schalter und Sensoren platziert und wie die Heizung verteilt werden sollten, was zu intelligenten Designs führte.

„Wir haben eine hervorragende transiente Simulation erzielt und konnten daraus ein optimiertes Design ableiten“, so Maier. Die Simulation und die realen Experimente ergaben übereinstimmende Temperaturwerte, sodass das Team nur einen einzigen Prototyp seines Designs herstellen musste (Abbildung 4).

Dank der Tools, die dem CAE-Team von Sartorius zur Verfügung stehen, hat das Unternehmen eine effiziente und leistungsstarke Abteilung aufgebaut, die die Herausforderungen der biopharmazeutischen Produktion meistert und dabei ein Ziel vor Augen hat: „Wir möchten Wissenschaftler und Ingenieure in die Lage versetzen, Fortschritte in den Bereichen Life Science und Bioprozessierung zu vereinfachen und zu beschleunigen und ihnen die Entwicklung neuer, besserer und erschwinglicherer Medikamente ermöglichen“, sagt Maier. ☺

IAV, Deutschland

ENTWICKLUNG VON ELEKTROFAHRZEUGEN MIT EINEM DOPPELBATTERIEANSATZ

Unter Berücksichtigung von Energieeffizienz, Energiedichte und Umweltaspekten kombinierte die IAV die komplementären Batterietechnologien Natrium-Ionen- und Lithium-Eisenphosphat-Festbatterie zu einem Doppelbatteriesystem, das mittels multiphysikalischer Simulation optimiert und validiert wurde und neue Möglichkeiten für Automobilhersteller und Batterieentwickler eröffnet.

von JOSEPH CAREW

Ein wichtiges Ziel für diejenigen, die die Welt elektrifizieren wollen, besteht in der Vermeidung seltener Rohstoffe, die für die Herstellung herkömmlicher Batterien benötigt werden – ohne dabei Abstriche bei der Energiedichte zu machen. Lithium-Ionen-Akkus sind der gebräuchlichste Energiespeicher in heutigen Elektrofahrzeugen, obwohl sie teuer und mit Nachhaltigkeits- und Umweltbedenken verbunden sind. Ingenieure und Entwickler in der Batterieindustrie untersuchen alternative chemische Zusammensetzungen und Designs, um neue Ansätze zu finden, die diese Aspekte berücksichtigen und die Kosten senken, während sie gleichzeitig die Anforderungen der meisten Lithium-Ionen-Anwendungen erfüllen.

Die IAV ist eines der weltweit größten Ingenieurbüros. In einem breiten Portfolio, das auf die Zukunft der Mobilität ausgerichtet ist, spielt die Entwicklung von Batterien eine entscheidende Rolle. Ein Team von IAV-Ingenieuren, darunter Jakob Hilgert, technischer Berater des Unternehmens, war überzeugt, dass IAV mit dem richtigen Ansatz bessere Batteriedesigns entwickeln könnte. Aufbauend auf dem Verständnis, was bestehende Designs mit ihren jeweiligen chemischen Zusammensetzungen erfolgreich macht - und was sie behindert -, entwickelte das Team einen neuartigen

Ansatz zur Lösung von Problemen in Bezug auf Energiedichte, Haltbarkeit und Wärmemanagement: ein Doppelbatteriedesign.

Anstatt sich ausschließlich auf Lithium-Ionen-Zellen zu konzentrieren, haben die IAV-Ingenieure zwei alternative Batteriechemien miteinander kombiniert, um ein kostengünstigeres und umweltfreundlicheres System für Elektrofahrzeuge zu entwickeln. Ausgehend von diesem Ansatz wandte sich die IAV der multiphysikalischen Simulation zu, um ihre Doppelbatterielösung erfolgreich zu entwickeln und zu validieren.

» VERMEIDUNG TYPISCHER PROBLEME

Lithium-Ionen-Batterien (Abbildung 1) werden aufgrund ihrer hohen Energiedichte häufig, doch ihre Herstellung kann mit Umweltnachteilen verbunden sein. Der Abbau von Lithium im Tagebau zerstört die Vegetation, hinterlässt giftige Böden und erzeugt Staub, der das Krankheitsrisiko für Tiere und Menschen. Die Herstellung dieser Batterien ist zudem von einem relativ seltenen Material abhängig. Die Ingenieure der IAV wollten diese Probleme bei der Auswahl der Technologien für ihr



ABBILDUNG 1 Lithium-Ionen-Akkus in einer Reparaturwerkstatt.

Doppelbatteriekonzept vermeiden.

„Wir müssen uns auf Batterien einstellen, bei denen Recycling und Ressourcen eine größere Rolle spielen“, sagt Hilgert. „Wir können nicht einfach nur die Zelle mit der theoretisch höchsten Energiedichte als unsere Dauerlösung betrachten.“

Stattdessen entschied sich das Team der IAV für eine Kombination aus einer Natrium-Ionen-Batterie (SIB) und einer Lithium-Eisenphosphat-Solid-State-Batterie (LFP-SSB), da sich die beiden in ihren Eigenschaften vorteilhaft ergänzen. SIBs (Natrium-Ionen-Batterien) gelten als kostengünstiger, ressourcenschonender und besser recycelbar als herkömmliche Lithium-Ionen-Akkus. Im Gegenzug haben sie meist eine geringere Energiedichte und

eine kürzere Lebensdauer. LFP-Batterien (Lithium-Eisenphosphat) zeichnen sich durch eine hohe Stabilität und lange Lebensdauer aus. Ihre Energiedichte ist allerdings geringer als die konventioneller Lithium-Ionen-Zellen. In der Solid-State-Variante (LFP-SSB) lässt sich die Energiedichte hingegen steigern. Durch die Kombination einer SIB mit einer LFP-SSB lassen sich diese unterschiedlichen Eigenschaften gezielt miteinander verbinden – mit dem Ziel, die Umweltbilanz zu verbessern (Abbildung 2), die Herstellungskosten zu senken und gleichzeitig eine hohe Energiedichte für anspruchsvolle Anwendungen zu erreichen.

„Die Entwicklung von Batterien für den Einsatz in Fahrzeugen schreitet rasch voran. Damit einher geht eine steigende Nachfrage

nach knappen Rohstoffen“, so Hilgert. „Die Diversifizierung der Zellchemie ist ein vielversprechender Ansatz, um auf Marktschwankungen zu reagieren und gleichzeitig die Systemkosten zu minimieren.“

Gewährleistung der thermischen Kompatibilität

Das Doppelbatteriedesign der IAV wurde unter anderem auch entwickelt, um die thermische Kompatibilität zwischen einer SIB und einer LFP-SSB zu testen. Die Idee bestand darin, die Abwärme der SIB in die LFP-SSB zu leiten, um deren Zellen schnell zu aktivieren und sie in die höheren Temperaturbereiche zu bringen, in denen sie am besten funktionieren⁵ – während gleichzeitig verhindert wird, dass die SIB ihre maximale Betriebstemperatur überschreitet – was die Gesamtenergieeffizienz des Systems erhöht.

„Wenn einige Zellen hohe Temperaturen vertragen und andere niedrige, lässt sich die Abwärme der heißen Zellen nutzen, um die kühleren zu erwärmen – und umgekehrt“, sagt Hilgert. „Deshalb haben wir ein Kühlsystem entwickelt, das die Energie von Zellen, die kühler sein wollen, auf Zellen überträgt, es wärmer mögen.“

Zellen mit flüssigem Elektrolyten haben eine begrenzte thermische Stabilität und müssen gekühlt werden (dies gilt sowohl für Natrium- als auch für Lithiumzellen), um Temperaturen über ~60°C zu vermeiden. Festkörperzellen können aufgrund ihres festen Elektrolyten bei höheren Temperaturen betrieben werden, und benötigen eine höhere Temperatur, um eine nutzbare Ionenleitfähigkeit zu erreichen. Daher müssen die SIB-Zellen in diesem Konzept gekühlt werden,

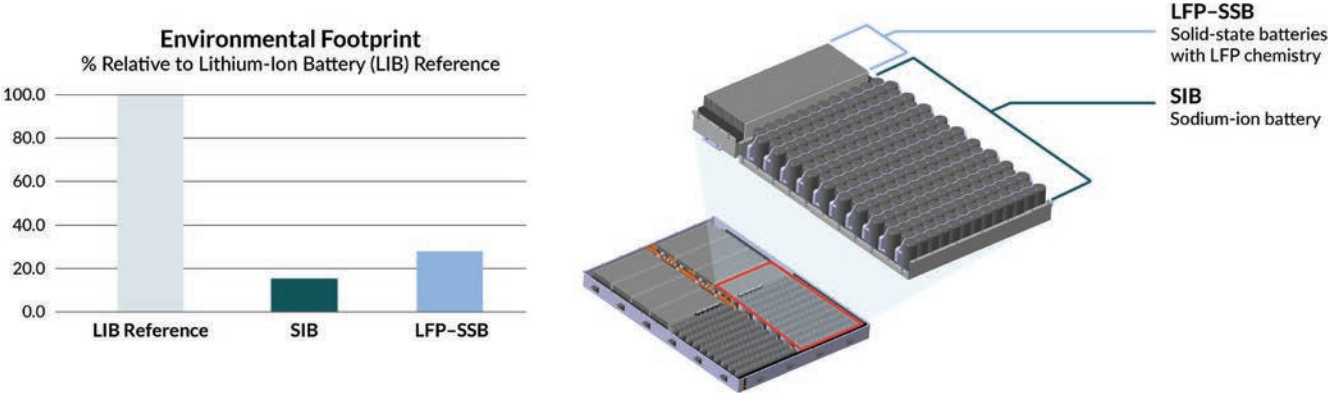


ABBILDUNG 2 Ein Vergleich der beiden Batterietechnologien, die beim Doppelbatterieansatz verwendet werden.

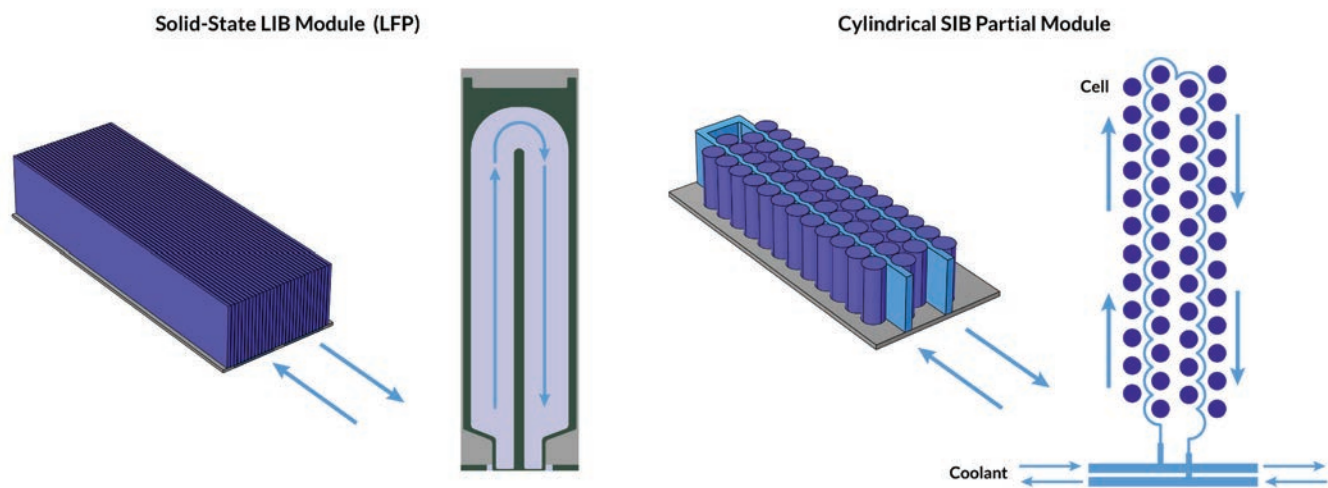


ABBILDUNG 3 Die beiden Batterietechnologien, wie sie im COMSOL-Modell dargestellt sind.

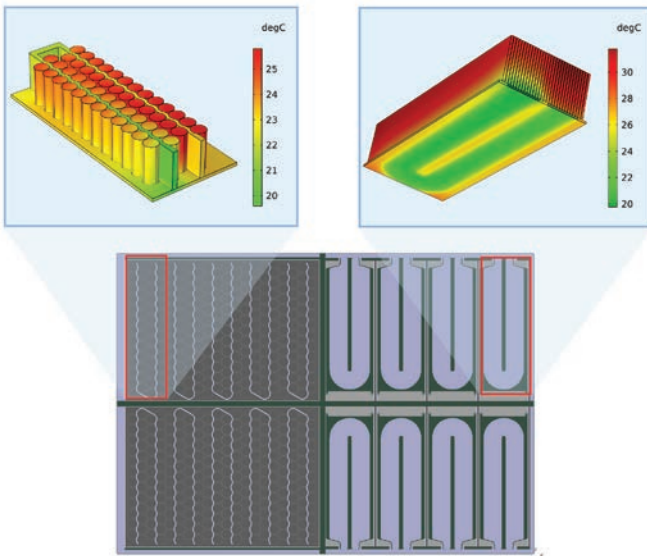


ABBILDUNG 4 Die beiden Batterietechnologien arbeiten als ein System.

während die SSB-Zellen geheizt werden müssen, wobei beide Zellen vom gegenseitigen Wärmeaustausch profitieren. Die IAV-Ingenieure wussten, dass insbesondere diese Wechselwirkung eine große Herausforderung für die Optimierung darstellen würde, und waren überzeugt, dass Modellierung und Simulation eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung dieser Komplexität spielen würden. Zu diesem Zweck setzte das Team die Software COMSOL Multiphysics® ein.

» ENTWICKLUNG DES BATTERIESYSTEMS

Die IAV begann vor mehr als einem Jahrzehnt mit der Nutzung von COMSOL Multiphysics®, um ihren Design-Workflow zu verbessern.

„Wir haben eine Vielzahl spezialisierter Werkzeuge für unterschiedliche Fachgebiete verwendet“, sagte Hilgert. „Als wir begannen, mit Batterien zu arbeiten, war es an der Zeit zu sagen: ‚Wir brauchen ein einziges Werkzeug, das all diese Themen abdeckt.‘“

Der umfassende Workspace der Plattform ermöglicht es der IAV, unnötige Prototypen für Kunden zu vermeiden und ihre Designs einfach zu optimieren. Mit dem Doppelbatteriemodell können die IAV-Ingenieure verschiedene Parameter anpassen (z. B. die Auswirkungen auf die Kühlung bestimmter Schaltkreise oder auf die maximale Leistung die Zellen bei einer bestimmten Temperatur) und das Design so ändern, dass jede reale Implementierung so effizient wie möglich ist. „Wenn man dieses Wissen hat und nicht alle diese Parameter erraten muss, ist der technologische Reifegrad des Prototyps viel höher“, so Hilgert.

Aufgrund der multiphysikalischen Natur der Batteriemodellierung waren die Fähigkeiten der COMSOL® Software für das Entwicklungsprojekt des Doppelbatteriesystems (Abbildung 3) gut geeignet: Die Entwicklung funktionsfähiger Batterien erfordert ein adäquates Thermomanagement, ein Verständnis, wie die Materialien der verschiedenen Zellen innerhalb ihrer Module funktionieren werden, Kenntnisse über die verschiedenen Drücke innerhalb der internen Prozesse in der Batterie sowie ein elektrochemisches Verständnis des Ganzen. Außerdem muss verstanden werden, wie sich das Quellen und Schrumpfen während des Ladens und Entladens auf die Mechanik dieser Systeme auswirken kann.

„Ein hochintegrierter modellbasierter Entwicklungsprozess kann genutzt werden, um das Potenzial verschiedener Zellchemien, Designs und Kühlkonzepte zu untersuchen“, sagt Hilgert. „Er reduziert den Bedarf an physischen Prototypen und ermöglicht eine Leistungsoptimierung im Hinblick auf die typischen Anforderungen von Automobilanwendungen.“

» HEIZEN, KÜHLEN UND DESIGNOPTIMIERUNG

Die IAV-Ingenieure konnten die Leistung des Doppelbatteriekonzepts mithilfe einer gekoppelten Multiskalen- und Multidomain-Simulation verifizieren (Abbildung 4). Das Team stellte fest, dass das Design während der Konzeptentwicklung wie gewünscht funktionierte und den Weg für ein verbessertes Batteriedesign ebnete. Das Modell zeigte eine sehr schnelle Aktivierung von Solid-State-Zellen bei Bedarf mit einer teilweise Vorkonditionierung durch die Abwärme der SIB. Das Team optimierte das Thermomanagement der beiden Zellen und reduzierte die Zeit und die Energie, die für die SSB-Aktivierung bei Kälte benötigt wird.

„Die Simulationen haben gezeigt, dass es tatsächlich möglich ist, das zu tun, was wir uns vorgestellt haben“, sagt Hilgert. „Die Abwärme kann tatsächlich durch das Kühlsystem transportiert werden, und die Wärmemenge reicht aus, um den anderen Teil der Batterie zu erwärmen.“

Die IAV war in der Lage, mit ihrem Modell, das als virtueller Prototyp fungierte, verschiedene Szenarien durchzuspielen und dabei unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber verschiedenen Umgebungsbedingungen oder Parameterwahlen

zu vergleichen. Dem Team ist es gelungen, die 3D-Zelltemperaturverteilung, die elektrochemische P2D-Modellierung und die 1D-Kühlkreisdynamik in ein Gesamtmodell des elektrischen Antriebsstrangs zu integrieren.

» DEMOKRATISIERUNG DES DOPPELBATTERIEMODELLS MIT APPS

Sobald die Simulationsspezialisten der IAV ein White-Box-Modell für einen Kunden entwickelt haben, verwenden sie häufig den Application Builder in COMSOL Multiphysics, um die Funktionalität zusätzlich in eine Simulations-App zu verpacken - eine benutzerdefinierte, konfigurierte Benutzeroberfläche mit begrenzten Ein- und Ausgaben, die der Kunde intern an Kollegen in verschiedenen Bereichen verteilen kann, die damit selbst Simulationen durchzuführen und die Ergebnisse in ihrem jeweiligen Kontext auswerten. Die Benutzer der App benötigen keine detaillierten Kenntnisse des zugrunde liegenden komplexen Modells. Stattdessen sind die Simulations-Apps so konzipiert, dass sie einfach zu bedienen und robust sind, was sie ideal für die vielen Kunden der IAV macht, die „diese Simulationen aufgaben an Personen verteilen wollen, die normalerweise keine Modellierung durchführen“, wie Hilgert es ausdrückt.

„Wir können mit der Grundfunktionalität beginnen und sie an alle verteilen, und niemand wird Probleme damit haben, sie zu nutzen. Später, wenn die Dinge detaillierter werden, können wir die Apps mit der Anwendung wachsen lassen und mehr Physik, mehr Optionen, mehr Schaltflächen hinzufügen“, so Hilgert.

IAV-Ingenieure verwenden COMSOL Compiler™, um ihre Simulations-Apps in eigenständige ausführbare

„COMSOL Compiler als Verteilungsoption zu haben, ist ein großer Vorteil für unsere Arbeit. Wir können unsere eigenen Modelle für Simulations- oder Profilerstellungstests verwenden, indem wir sie zu Apps kompilieren und dann andere Leute ihre Arbeit machen lassen, ohne auf Lizenzen warten zu müssen.“

— JAKOB HILGERT, TECHNISCHER BERATER BEI IAV

Dateien umzuwandeln, die sie zusammen mit den White-Box-Versionen der zugrunde liegenden Modelle an ihre Kunden senden. Diese können sie dann ohne COMSOL-Lizenz ausführen (Abbildung 5). Dadurch wird der Einsatz von Simulationen in verschiedenen Entwicklungsumgebungen erleichtert. Im Fall des Doppelbatteriedesigns können Kühltystemingenieure parallele Optimierungsberechnungen ohne COMSOL-Lizenzen durchführen. Der optimierte Zugriff auf Simulationsergebnisse führt zu effizienteren Entwicklungsprozessen und hat die Akzeptanz der modellbasierten Entwicklung sowohl intern als auch bei den Kunden der IAV erheblich verbessert.

„COMSOL Compiler als Verteilungsoption zu haben, ist ein großer Vorteil für unsere Arbeit“, sagt Hilgert. „Wir können unsere eigenen Modelle für Simulations- oder Profilerstellungstests verwenden, indem wir sie zu Apps kompilieren und dann andere Leute ihre Arbeit machen lassen, ohne auf Lizenzen warten zu müssen.“

Die Fernsteuerung der von der IAV entwickelten Apps erfolgt über Java-Code, der über die API der COMSOL Software bereitgestellt wird. Mit dieser Fernsteuerung können

Nutzer sich wiederholende Modellierungsschritte automatisieren. Das Team implementiert auch Functional-Mock-up-Unit-Interfaces (FMU), die es mit Fahrzeug-simulationsumgebungen in Drittanbietersoftware für die Co-Simulation koppelt.

Nutzer der Doppelbatterie-App erhalten die Spannung, den Ladezustand, die Temperaturen und die Verlustleistung als Eingaben für das Batteriemanagementsystem und das Kühltystem. Konstrukteure können die internen Zellzustände über

diese Apps einsehen und Änderungen am Kühltystem vornehmen, während sie die unterschiedliche Batterieleistung bewerten.

Interne Nutzung der Apps

IAV-interne Apps sind häufig für die Co-Simulation mit COMSOL Multiphysics® und externen Toolchains ausgelegt und werden über die IAV Virtual Test Bed Schnittstelle gesteuert. Abbildung 6 zeigt eine Beispiel-App für Batteriemodule, die für die Co-Simulation verwendet wird und dem Anwender grundlegende Feedback-Informationen über die internen Zustände der Modelle wie Strom, Spannung, Temperaturen etc. liefert. Die Ergebnisse der App werden als Echtzeit-Datenstrom an andere Programme im Co-Simulations-Framework weitergeleitet, wo eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse erfolgt.

» ZWEI GEWINNT – DER WEG ZU EINER BESSEREN BATTERIE

IAV sieht in ihrem Doppelbatteriekonzept ein mögliches Vorbild dafür, wie sich selbst gegensätzliche Anforderungen in der Batterietechnologie durch clevere Kombinationen erfüllen lassen.

„Der Doppelbatterie-Ansatz bietet Automobilherstellern und Batterieentwicklern mehr Möglichkeiten zur Problemlösung“, sagt Hilgert. „Er zeigt auch, dass es möglich ist, Zukunftstechnologien mit ganz unterschiedlichen Prinzipien in bestehende Rahmenbedingungen zu integrieren.“

„COMSOL Compiler als Verteilungsoption zu haben, ist ein großer Vorteil für unsere Arbeit. Wir können unsere eigenen Modelle für Simulations- oder Profilerstellungstests verwenden, indem wir sie zu Apps kompilieren und dann andere Leute ihre Arbeit machen lassen, ohne auf Lizenzen warten zu müssen.“ ☺

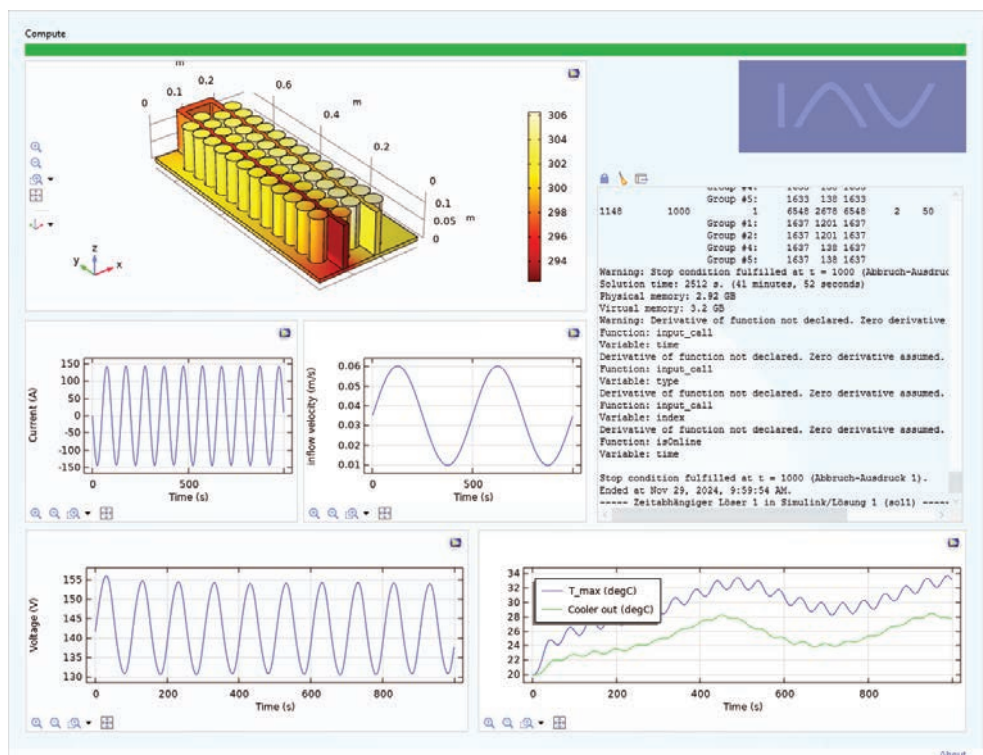


ABBILDUNG 5 In der App für Batteriemodule der IAV bieten Ausgabediagramme dem Nutzer während der Ausführung eine bequeme visuelle Rückmeldung über den Zustand des Modells.

COMSOL, USA

WIE TOPOLOGIE- OPTIMIERUNG DAS GENERATIVE DESIGN VERBESSERT

Generatives Design und Topologieoptimierung automatisieren den Designprozess und ermöglichen so effizientere Designiterationen. Beide Ansätze bieten Vorteile, und durch die Kombination der Methoden können Konstrukteure ein Produkt entwickeln, das die Vorteile beider Ansätze vereint.

von **BETH BEAUDRY**

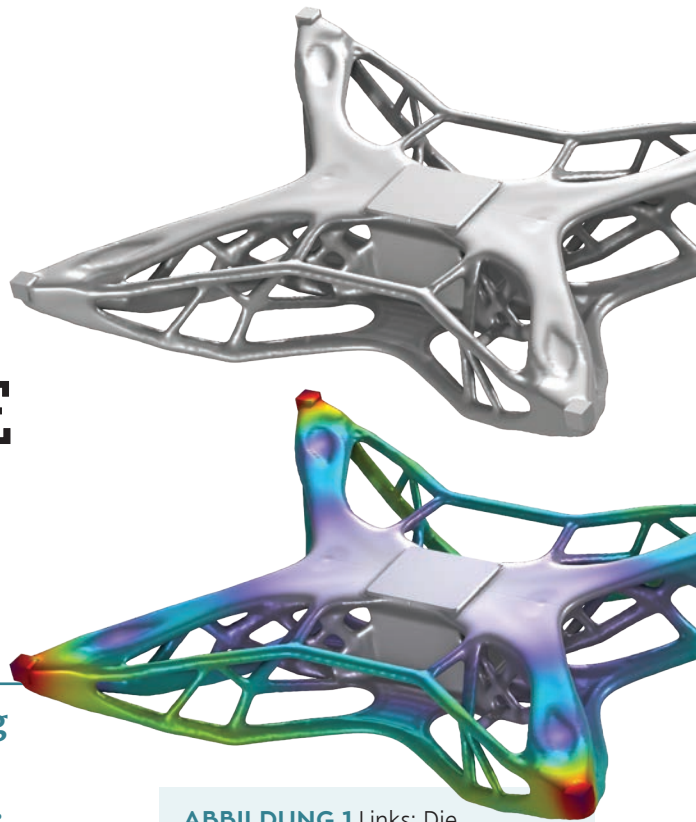


ABBILDUNG 1 Links: Die Topologieoptimierungsfunktion in COMSOL Multiphysics® mit dem Add-On-Produkt Optimization Module kann verwendet werden, um ein leistungsfähiges Drohnenmodell zu erstellen. Rechts: Das Modell ist mit der Verschiebung dargestellt, um den Optimierungsprozess zu veranschaulichen.

Generatives Design ermöglicht durch die Automatisierung von Designprozessen mehr Freiheit in der Fertigung. Obwohl die Topologieoptimierung als eine Form des generativen Designs betrachtet werden kann, eignet sie sich aufgrund ihrer Andersartigkeit gut für die Integration in einen hybriden Ansatz, der beide Verfahren kombiniert.

Die Hauptähnlichkeit zwischen generativem Design und Topologieoptimierung besteht darin, dass in beiden Fällen Software verwendet wird, um Designs auf der Grundlage definierter Kriterien zu erzeugen, anstatt sie für jede Designiteration manuell zu erstellen. Der generative Designprozess unterscheidet sich jedoch von der Topologieoptimierung dadurch, dass er die Anforderungen

des Designers an die Ausgestaltung des Endprodukts stärker in den Vordergrund stellt. Aus diesem Grund wird er oft als regelbasierter Prozess bezeichnet. Die Topologieoptimierung hingegen wird häufiger eingesetzt, wenn der Schwerpunkt eher auf der Produktleistung als auf der Ausgestaltung liegt. Sie ist zudem eher physik- als regelbasiert, d. h. die Optimierung richtet sich primär nach den physikalischen Gegebenheiten der Aufgabenstellung und sekundär nach den vom Designer festgelegten Regeln.

Da bei einem Verfahren der Schwerpunkt auf dem Design und bei dem anderen auf der Leistung liegt, kann ein hybrider Ansatz, der beide Methoden kombiniert, zu einem Endergebnis führen, das sowohl eine

gute Leistung als auch ein optimales Design aufweist. Ein hybrider Ansatz könnte darin bestehen, generatives Design und Topologieoptimierung für verschiedene Komponenten eines Gesamtprodukts einzusetzen. Der Designer entscheidet dann, wie er die Anforderungen der verschiedenen Komponenten ausbalanciert, z.B. welche Teile zugunsten einer besseren Leistung auf ein ansprechendes Design verzichten können und umgekehrt.

» EINE NÄHERE BETRACHTUNG DER TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

Bei der Topologieoptimierung erstellt der Designer einen virtuellen geometrischen Raum für seinen Entwurf und gibt einige erforderliche Parameter in die

Software ein. Die Software füllt dann den Entwurf durch iteratives Entfernen und Hinzufügen von Material, um ein optimiertes Design zu erzeugen, das in diesen geometrischen Raum passt. Die Topologieoptimierung wird in der Regel in einer frühen Phase des Designprozesses eingesetzt, da in diesem Stadium mehr Flexibilität und damit mehr Potenzial für Leistungsverbesserungen im Zusammenhang mit topologischen Änderungen des Design-Layouts besteht.

Um die Gestaltungsfreiheit der Topologieoptimierung besser zu verstehen, betrachten wir das folgende Beispiel für die Erstellung der Struktur einer Drohne. Für dieses Modell geben wir zwei Lastfälle, den Volumenanteil und eine minimale Längenskala als Eingaben vor.

In diesem Fall ist es unser Ziel, die Steifigkeit bei gegebenem Materialeinsatz zu maximieren. Die Lastfälle sind symmetrisch, so dass wir Zeit und Rechenressourcen sparen können, indem wir nur ein Viertel des Bauteils modellieren und nicht die gesamte Drohne. Das Modell wird dann während der Visualisierung der Ergebnisse repliziert, so dass wir am Ende des Prozesses das gesamte optimierte Design sehen können. (Abbildung 1)

In diesem Beispiel der Topologieoptimierung beginnt die Berechnung nur mit der Drohnenbatterie in der Mitte und den vier Motoren an den Ecken. Wir sehen, dass das ursprünglich modellierte Viertel im Rest des Designs gespiegelt wird und beobachten, wie die Software Material hinzufügt, um die Motoren miteinander und mit der Batterie in der Mitte zu verbinden. Das Verhältnis zwischen Steifigkeit und Gewicht des Materials wird so lange angepasst, bis das Endergebnis eine klare physikalische Interpretation zulässt.

» HERSTELLUNGSTAUGLICHKEIT

Die Komplexität des Designs ist ein entscheidender Faktor bei der Wahl des Fertigungsverfahrens. Die einzigartigen Ergebnisse des generativen Designs und der Topologieoptimierung eignen sich in der Regel nicht für die traditionelle Fertigung. Aus diesem Grund werden Designs, die mit diesen oder hybriden Methoden erstellt wurden, häufig mit additiver Fertigung produziert. Für das Beispiel des Drohnenmodells ist der Einsatz eines additiven Fertigungsverfahrens die beste Wahl.

Trotz dieser Kompatibilität ist die additive Fertigung nicht die einzige Möglichkeit, softwaregenerierte



ABBILDUNG 2 Verschiebung eines Felgenmodells.

Designs zum Leben zu erwecken. Die Vorbereitung eines optimierten Designs für die traditionelle Fertigung kann beispielsweise bedeuten, dass Fräsbeschränkungen im Optimierungsprozess berücksichtigt werden müssen. Um solche Einschränkungen zu berücksichtigen, können in COMSOL® spezielle Funktionen zur Topologieoptimierung verwendet werden.

Angenommen, ein topologieoptimiertes Felgendesign soll durch subtraktive Fertigung hergestellt werden. Abbildung 2 zeigt ein solches Beispiel, das mit COMSOL® modelliert wurde: Ein Felgendesign mit optimaler Steifigkeit wird erzeugt und entlang seiner Achse mit Fräsbeschränkungen versehen. Das Hinzufügen von Fräsbeschränkungen reduziert jedoch die Designfreiheit und damit die Steifigkeit bei gegebener Massenbeschränkung. In diesem Fall führt das Hinzufügen von Fräsbeschränkungen zu einem Design, das 30 % weniger steif ist als das, was mit einer herkömmlichen Topologieoptimierung erreicht worden wäre - ein notwendiger Kompromiss, um die Fertigungsanforderungen zu erfüllen.

Bei vollständiger Designfreiheit würde das optimale Design im Allgemeinen die gleichen Symmetrieeigenschaften wie die Lastfälle aufweisen. Es können jedoch viele Lastfälle erforderlich sein, um Symmetrie zu erreichen, und eine große Anzahl von Lastfällen kann zu hohen Berechnungskosten führen. In diesem Beispiel wird eine Designsymmetrie erwartet, da unser Rad drehbar sein muss, aber wir

stehen vor der Herausforderung, keine symmetrischen Lastfälle zu haben. Aus diesem Grund muss das gesamte Rad in jeder Optimierungsiteration modelliert werden, um zu sehen, wie sich die Lastfälle auf das Design auswirken.

Um hier Symmetrie zu erreichen, können wir die Sektorsymmetrie des Designs explizit erzwingen, indem wir einen der Sektoren optimieren und dann das Design während der Optimierung auf die anderen Sektoren kopieren. Ähnlich wie bei der Verwendung von Symmetriemerkmalen, die beim Design des Drohnenmodells hilfreich waren, macht dies den Prozess rechnerisch günstiger und effizienter.

Das Ergebnis ist ein optimiertes Design, das eine gute Leistung aufweist und gleichzeitig die Fertigungsanforderungen erfüllt.

» FAZIT

Wie das generative Design automatisiert auch die Topologieoptimierung den Designprozess und ermöglicht es den Designern, Optionen effizienter als durch manuelle Iterationen zu untersuchen. Sowohl das generative Design als auch die Topologieoptimierung können mit der Software COMSOL Multiphysics® durchgeführt werden, die auch Funktionen zur Anpassung des automatisierten Designs an bestimmte Fertigungsmethoden bietet. Diese Funktionen können in allen Bereichen der technischen und wissenschaftlichen Forschung sowie in allen Bereichen der Physik, einschließlich Strukturmechanik, Strömungsmechanik, Wärmetransport und Akustik, eingesetzt werden. ©

The University of Southern Mississippi, USA

TRAINING VON TAUCHFAHRZEUGEN FÜR DIE VISUALISIERUNG VON UNTERWASSERSTRUKTUREN

Die University of Southern Mississippi entwickelt Simulations-Apps, um unbemannte Unterwasser- und Oberflächenfahrzeuge mit maschinellem Lernen zu trainieren.

von JOSEPH CAREW

An einem ruhigen Tag vor der Küste von Mississippi wird ein kleines Oberflächenfahrzeug in einem Testgebiet systematisch hin und her gezogen. Es handelt sich dabei um eine Sensorplattform mit einer geringen magnetischen Signatur, die damit beschäftigt ist, den Meeresboden nach ferromagnetischen Zielen abzusuchen. Diese Scans sind nur ein Teil eines

ehrgeizigen Projekts, das vom Roger F. Wicker Center for Ocean Enterprise der University of Southern Mississippi (USM) durchgeführt wird. Durch eine Kombination aus Modellierung, Simulation und maschinellem Lernen (ML) legen die Forscher der USM den Grundstein für intelligente unbemannte Unterwasserfahrzeuge (UUVs), die autonom agieren und präzise aufdecken können, was unter den Wellen verborgen liegt.

» MODELLIERUNG FERROMAGNETISCHER STRUKTUREN AUF DEM MEERESBODEN

Auf dem Grund der meisten Häfen (und allgemein auf dem gesamten Meeresboden) befindet sich ferromagnetisches Material wie anthropogene Strukturen, Trümmer und auch Blindgänger. Um zu verhindern, dass der Hafenverkehr mit diesen Gefahren kollidiert, müssen Seekarten deren Positionen genau wiedergeben. Eine der effektivsten Methoden zum Scannen solcher magnetischen Anomalien unter Wasser ist der Einsatz von UUVs mit moderner Sensorausrüstung. Diese Fahrzeuge bringen jedoch gewisse

Herausforderungen mit sich: Sie sind teuer in der Herstellung, ihre Messungen sind technisch aufwendig – und durch Störsignale von der Plattform selbst sowie Umwelteinflüsse wie Wind, Wellen oder Hintergrundrauschen liefern sie nicht immer ein zuverlässiges Bild. Erschwerend kommt hinzu, dass bestimmte Signaturen des Meeresbodens nicht eindeutig sind, sodass Scans unterschiedlicher Unterwassergegebenheiten ähnlich aussehen können. Ein Team der USM untersucht, wie diese Herausforderungen bewältigt werden können, um den Weg für eine bessere UUV-basierte Sensorik und Kartierung zu ebnen.

„Wir führen zahlreiche datengestützte Tests und Bewertungen neuer unbemannter Systemplattformen durch – sowohl unter Wasser als auch an der Oberfläche (Abbildung 1) – und beschäftigen uns mit der Integration hochentwickelter Sensoren“, erklärt Dr. Jason McKenna, Forscher an der USM. „Insbesondere untersuchen wir die Integration von Magnetsensoren in UUVs, wo es viele Umgebungs- und Plattformstörsignale gibt.“ Das Forschungsteam nutzte Modellierung (validiert durch empirische Daten), Simulations-Apps und maschinelle



ABBILDUNG 1 Die Sensorplattform, die die USM zur Aufzeichnung der experimentellen Daten verwendet hat.

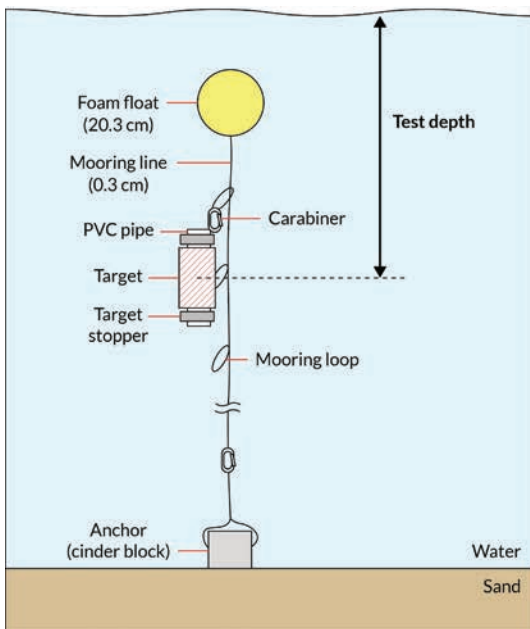


ABBILDUNG 2 Der 20,3 cm lange zylindrische Magnet mit einem Durchmesser von 2,5 cm.

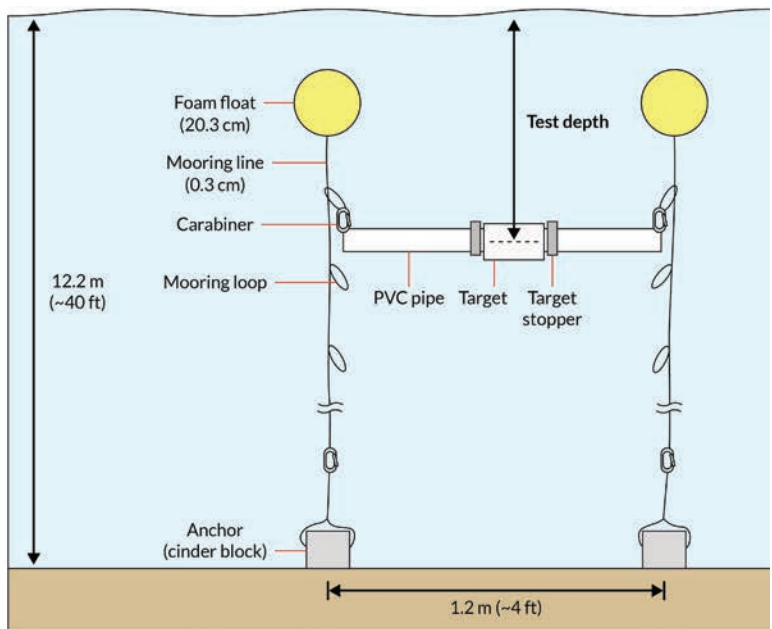


ABBILDUNG 3 Das 30,5 cm lange horizontale Stahlrohr mit einem Durchmesser von 11,4 cm.

Lerntechniken, um ein Computersystem zu entwickeln, das in ein UUV integriert werden kann, um die automatische Zielerkennung (automatic target recognition, ATR) zu verbessern und die Genauigkeit der vom Fahrzeug registrierten Magnet- und letztlich Gravitationsfelddaten zu erhöhen.

» NICHT GANZ 20.000 MEILEN UNTER DEM MEER

Vor der Erstellung der Modelle musste das Team reale Daten erheben, die zum Benchmarking und zur Validierung der Modelle verwendet werden konnten. Dazu begaben sie sich in eine kontrollierte Meeresumgebung mit bekannten Zielen, die mit hochpräzisen Schwerkraft- und Magnetsensoren vermessen wurden. Das physische Experiment fand in der Nähe des Golfs von Mexiko statt, wo das Team eine Sensorplattform mithilfe eines Windensystems 70 Meter zwischen zwei Punkten zog. Unter der Wasseroberfläche scannte die Sensorplattform eines von zwei Zielen: einen 20,3 cm langen, senkrecht stehenden zylindrischen Magneten mit einem Durchmesser von 2,5 cm (Abbildung 2), oder ein 30,5 cm langes, waagrecht liegendes Stahlrohr mit einem Durchmesser von 11,4 cm (Abbildung 3). Das Team wiederholte diesen Vorgang mehrmals für jedes Ziel, wobei sich die Behälter mit dem Magneten oder dem Rohr in Tiefen von 1 Meter, 3 Metern und 5 Metern befanden.

„Die zugrunde liegende Physik

folgt hier einem Abfall mit $1 \text{ über } r^3$, das Magnetfeld nimmt also mit zunehmender Entfernung sehr schnell ab.“, erklärt McKenna. „Wenn man irgendetwas messen möchte, muss man sich in der Nähe des Ziels befinden. Daher wird bei archäologischen Untersuchungen das Magnetometer in der Regel weit genug vom Schiff entfernt gezogen, dass es nicht durch dessen Signatur gestört wird, und auch nur wenige Meter über dem Meeresboden.“

McKenna erklärt, dass sein Team einen Magneten verwendet hat, der eine stärkere Signatur erzeugt, als der Sensor wahrscheinlich in der Praxis vorfinden würde. Dies war bewusst so gewählt.

„Die sonst von uns verwendeten Daten sind nie so sauber, aber dieses Experiment zeigt, dass man mit dem richtigen Ansatz, der richtigen Physik und den richtigen Randbedingungen eine gute Annäherung an das erreichen kann, was man bei einzelnen Zielen erleben würde“, so McKenna. „Dann beginnt man, alle diese Ziele zusammenzufassen, Plattformrauschen einzuführen und erhält so sehr komplexe Ergebnisse.“

» ENTWICKLUNG VON MODELLEN FÜR DIE ERZEUGUNG SYNTHETISCHER DATEN

Nach Abschluss der physischen Experimente musste das USM-Team mehrere Schritte durchlaufen, um die Algorithmen zu erhalten, die zur Verbesserung der Leistung

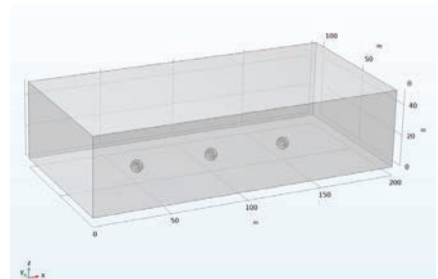


ABBILDUNG 4 Die von USM für die Modellierung verwendete Geometrie. Die drei inneren Kugeln stellen Rohre mit einer Länge von 30,5, 70 und 91,4 cm (12, 24 und 36 Zoll) dar.

der UUVs erforderlich waren. Letztendlich umfasste der Prozess die Erstellung von Potentialfeldmodellen und die Durchführung von Unsicherheitsquantifizierungsanalysen (UQ), die Erstellung von Simulations-Apps auf der Grundlage der validierten Modelle, mit denen ML-Algorithmen trainiert werden können, und schließlich die Verwendung dieser Algorithmen zum Trainieren der ML-Modi, um die UUVs bei der Erkennung von Objekten von Interesse zu unterstützen.

Potentialfeldmodelle

McKenna und sein Team verwendeten die Simulationsplattform COMSOL Multiphysics® mit dem AC/DC Module, um Potentialfeldmodelle zu erstellen. Diese Modelle können die Wechselwirkungen zwischen magnetischen, gravitativen oder thermischen Feldern und

Objekten darstellen und sind daher für die Quantifizierung der Signaturen des Meeresbodens und der darauf befindlichen Objekte unerlässlich.

Zunächst definierte McKenna die physikalischen Eigenschaften des Zielobjekts und erzeugte eine Reihe von Zielen, um mithilfe des integrierten Interfaces Magnetic Fields, No Current der Software eine Testumgebung zu erstellen. Anschließend führte er die räumliche Konfiguration mit niedrigen (30,5 cm), mittleren (70 cm) und hohen (91,4 cm) magnetischen Zielen im Simulationsraum ein (Abbildung 4). Schließlich berechnete er die Wechselwirkungen der Ziele mit dem umgebenden Medium. Die Schwerkraft- und Magnetanomalien (die Ziele) wurden anschließend aus verschiedenen UUV-Simulationen aufgezeichnet, wodurch ein großer Datensatz entstand, der die Nuancen der Potentialfeldschwankungen in verschiedenen Szenarien erfasste. Um diese UUV-Simulationen zu untermauern, verwendete das Forschungsteam UQ-Analysen.

Bestimmung von Variablen mit Unsicherheitsquantifizierung

UQ-Studien wurden in den Prozess des Teams integriert, um die Rolle der Unsicherheit bei der Modellierung des Betriebs eines UUV zu untersuchen und Lücken bei Parametern zu schließen, die in einem realen Experiment nicht repliziert werden konnten. Insbesondere führte McKenna eine Screening- und Sensitivitätsanalyse mit dem Uncertainty Quantification Module durch, einem weiteren Add-On

zu COMSOL Multiphysics. Das Modul dient als allgemeines Interface zur Charakterisierung von Unsicherheiten und zur Propagierung von Input-Unsicherheiten in Modellen sowie zur statistischen Analyse der relevanten Output-Größen.

„Innerhalb von wenigen Minuten bis zu einer Stunde können wir einen umfangreichen und robusten Trainingssatz für die ML-Algorithmen aufbauen.“

— DR. JASON MCKENNA,
FORSCHER AN DER USM

„Die Quantifizierung der Modellunsicherheit war relativ intuitiv“, sagt McKenna. „Wir wollten eine Screening-Analyse durchführen, die derjenigen ähnelt, die wir mit einer Hauptkomponentenanalyse durchgeführt hätten. Dies ist eine elegante Methode, um die Abhängigkeit vieler Variablen zu untersuchen.“

McKenna und sein Team konnten die erwarteten Parameterbereiche der ferromagnetischen Strukturen oder Geräte identifizieren, die sie mit den Scans messen würden. Sie konnten die Ziele anhand ihrer Länge, Wandstärke und magnetischen Suszeptibilität parametrisieren und anschließend die

Auswirkungen der Erdmagnetfelder (die hauptsächlich für die Induzierung der Signatur in den von den UUVs gescannten metallischen Objekten verantwortlich sind) einbeziehen. Die Erkenntnisse über den nutzbaren Bereich dieser Parameter ermöglichten eine einfache Neukalibrierung und Lösung der Potentialfeldmodelle, sodass verschiedene UUV-Läufe repliziert werden konnten, die das Team normalerweise Tage auf dem Wasser gekostet und enorme Rechenkosten verursacht hätten.

Durch Variation der magnetischen Breite, Länge und Stärke des Kraftfeldes um plus oder minus x Prozent konnte das Team die Auswirkungen der Veränderungen messen. „Auf diese Weise kann man eine Sensitivitätsanalyse durchführen. Mithilfe der Unsicherheitsquantifizierung lassen sich diese Wertebereiche ermitteln, um ein gewisses Verständnis zu entwickeln und festzustellen, ob die Messungen den Erwartungen entsprechen“, erklärt McKenna. „Innerhalb von wenigen Minuten bis zu einer Stunde können wir einen umfangreichen und robusten Trainingssatz für die ML-Algorithmen aufbauen.“

Von validierten Modellen zu ML-Trainings-Apps

Nach Abschluss der Unsicherheitsquantifizierungsstudien und der Erstellung der Potentialfeldmodelle konnte McKenna die Simulationsergebnisse mit seinen realen Experimenten vergleichen (Abbildung 5). Er erstellte mehrere vereinfachte Modelle für den Vergleich und erhielt viele aussagekräftige Ergebnisse, die weitgehend übereinstimmten.

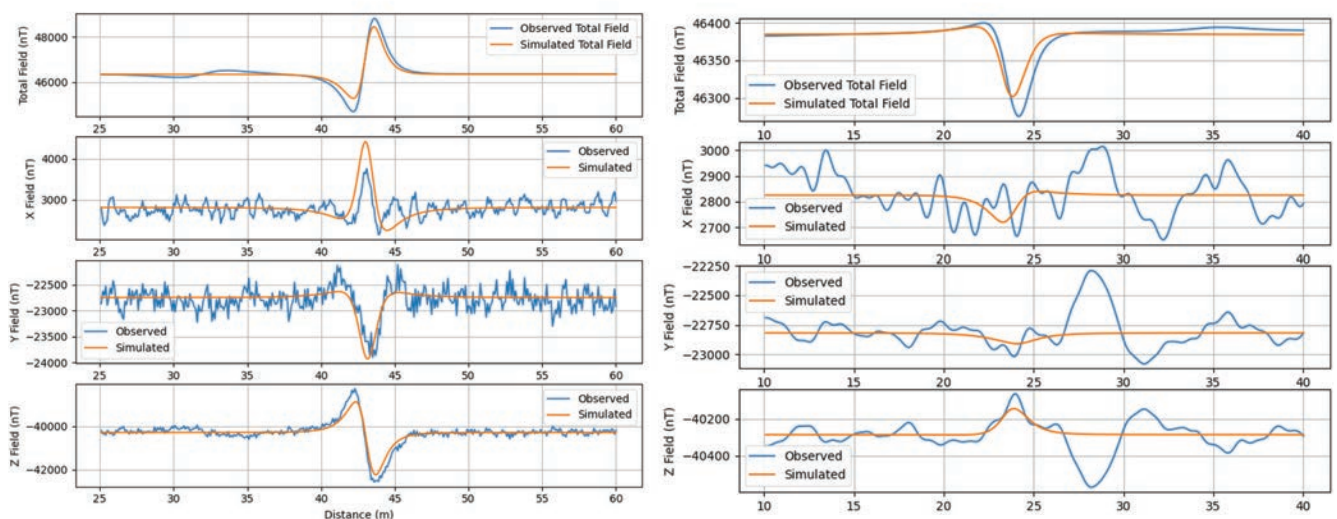


ABBILDUNG 5 Vergleichsergebnisse des Scannens und Simulierens des Stahlrohrs (links) und des zylindrischen Magneten (rechts).

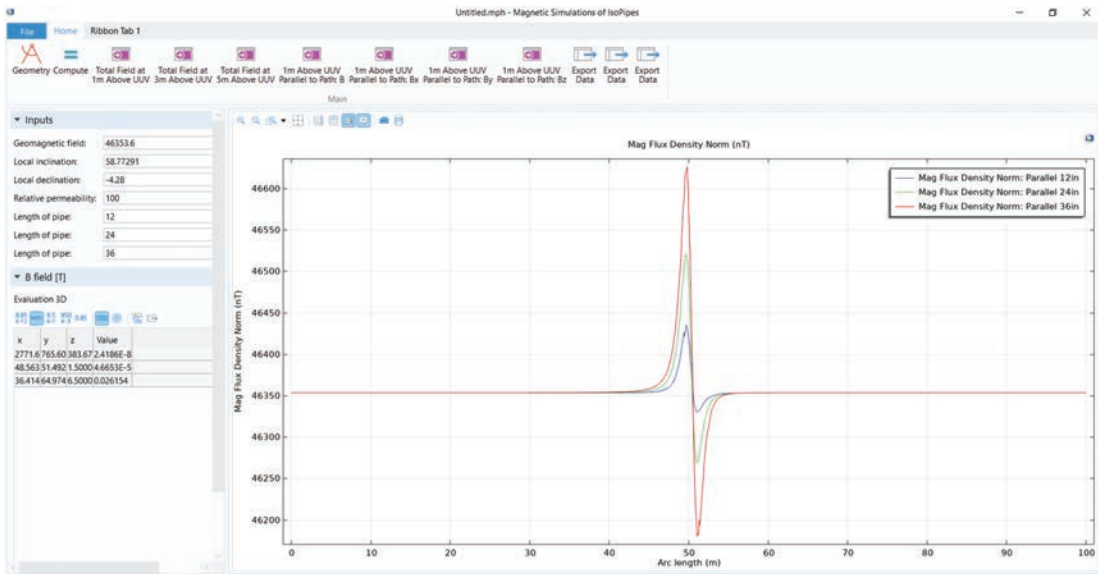


ABBILDUNG 6 Die Benutzeroberfläche der Simulations-App der USM mit Eingabefeldern auf der linken Seite und Ergebnissen auf der rechten Seite.

» EIN AUSBLICK AUF INTELLIGENTE UUVs

Auf dem Grund von Flüssen, Seen und Wasserstraßen befinden sich ferromagnetische Strukturen und Vorrichtungen, die aus Sicherheits- und Navigationsgründen erfasst werden sollten. UUVs spielen eine wichtige Rolle bei der Verbesserung von Seekarten, auf denen diese potenziellen Gefahren markiert werden können, und tragen so zur

Verbesserung der Navigierbarkeit von Häfen bei. Wenn beispielsweise eine Naturkatastrophe Schiffe versenken und Trümmer an unerwarteten Stellen zurücklassen würde, könnten intelligente UUVs den Meeresboden schnell scannen und Aufschluss darüber geben, was sich unter der Wasseroberfläche befindet.

Das Forschungsteam der USM arbeitet an der Schnittstelle von Simulation und maschinellem Lernen, um die Vorhersagefähigkeiten von UUVs zu verbessern. Dieses Projekt, das McKenna als „Blaupause für die Integration simulationsgesteuerter ML in verschiedene geophysikalische und technische Gebiete“ betrachtet, ist jedoch nur ein Schritt. Sein Ziel für die Zukunft ist es, seine Modelle komplexer zu gestalten und Phänomene hervorzuheben, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Dazu gehören die Selbstentmagnetisierung größerer ferromagnetischer Objekte und die Einbeziehung physikalischer Phänomene wie Akustik und Wärmetransport. McKenna möchte seine Apps auch intern für Schulungen zu maschinellem Lernen über das App-Management-Produkt COMSOL Server™ einsetzen, realistischere Meeresbodenmodelle entwickeln und die Verwendung der Unsicherheitsquantifizierungsoptimierung an der USM vorantreiben. ☺

DANKSAGUNG

Diese Forschungsarbeit wurde durch eine Zuwendung des Office of Naval Research an die USM unterstützt.

Die positiven Ergebnisse veranlassten McKenna, die validierten Modelle zur Erstellung von Simulations-Apps (Abbildung 6) für das Data-Science-Team zu verwenden, das für ML-Algorithmen Zugriff auf eine große Menge an Trainingsdaten benötigt. McKenna nutzte den Application Builder in COMSOL Multiphysics, um die intuitiven Apps zu erstellen, die es den Wissenschaftlern ermöglichen, ML-Trainingsdaten zu generieren.

„Ich konnte die Apps anhand einiger Beispiele erstellen und innerhalb von ein bis zwei Stunden zum Laufen bringen“, so McKenna. „Man kann verschiedene Parameter eingeben, und wenn man diese ändert, ändern sich die Feldlinien, was genau unseren Anforderungen entspricht.“

Das Data-Science-Team muss sicherstellen, dass die Modelle diese Datenpunkte erfassen können. Mit COMSOL® ist dies möglich, ohne das Modell ständig überwachen zu müssen. Das Data-Science-Team kann die Parameter variieren und eine Vielzahl von Signaturen entwickeln, die die UUVs voraussichtlich erkennen und scannen müssen. Die Simulations-Apps liefern der USM die Daten in der für das Training der Algorithmen erforderlichen Qualität und Quantität.

Mithilfe der Apps konnte die USM die Forschungsarbeit so aufteilen, dass jedes Team sein Fachwissen optimal einbringen konnte. „Jeder konnte in seinem Wissensbereich produktiv arbeiten“, so McKenna. „Für so ein Vorhaben braucht man ein Team.“

» MASCHINELLES LERNEN

Die vom Team verwendeten ML-Techniken umfassten Long Short-Term Memory (LSTM) Network, Regression, Tree Boosting und Deep Neural Network (DNN).

Die LSTM-Modelle wurden verwendet, um zu bewerten, wie sich die Vorhersagefähigkeiten bei der Ausführung auf simulierten Sensorsequenzdaten veränderten. Diese Bewertung konnte weiterverwendet werden, um zu bestimmen, ob die Simulation effektiv zur Datenvergrößerung für Beobachtungsdaten eingesetzt werden kann. Die Regressions-, Tree-Boosting- und DNN-Modelle wurden zur Bestätigung der Simulationsdatenmuster ausgewählt.

Diese Modelle wurden ausschließlich mit simulierten Daten ausgeführt, wobei die LSTM-Modelle mit einer Embedding-Sequenz von 10 Datenpunkten aus insgesamt mehr als 500.000 Datenpunkten betrieben wurden. Die Modelle sind mit Sequenzdaten kompatibel, einschließlich Zeitreihenanalysen, was sie besonders nützlich für die Interpretation von integrierten UUV-Sensordaten macht.

Wie in McKennas Beitrag für die COMSOL Conference (Ref. 1) erläutert, „bieten die aus unseren COMSOL-Modellen generierten synthetischen Datensätze vielfältige Trainingsbeispiele, anhand derer ML-Modelle die komplexen zeitlichen Beziehungen und Signaturmuster verschiedener Zieltypen erlernen können.“

iBMB Srls, Italien

PERSONALISIERTE ONKOLOGISCHE BEHANDLUNGEN DANK EINER SIMULATIONS-APP

von DIXITA PATEL

Um die Tumorprogression bei Brustkrebs vorherzusagen, hat ein Unternehmen namens Initiatives for Bio-Materials Behavior (iBMB Srls) in Potenza, Italien, eine Simulations-App entwickelt, die es Ärzten ermöglicht, das Volumen von Tumorerläsionen und die Wirksamkeit der Behandlung vor einer neoadjuvanten Chemotherapie besser zu beurteilen.



ABBILDUNG 1 Ein traditioneller Ansatz zur Beurteilung von Patientenscans.

Brustkrebs ist eine der weltweit häufigsten Krebsarten bei Frauen. Obwohl die derzeit verfügbaren Krebsbehandlungen ständig verbessert werden, ist es nach wie vor schwierig, eine genaue Prognose für Brustkrebs zu erstellen. Ein Ansatz, der zur Verbesserung der Patientenversorgung beitragen könnte, ist die prädiktive Onkologie. Dieser Ansatz stellt eine Abkehr von den traditionellen Krebsbehandlungen dar (Abbildung 1), da stattdessen patientenspezifische Daten auf präzisere und individuellere Weise berücksichtigt werden, sodass Onkologen besser verstehen können, wie Tumore auf bestimmte Behandlungen ansprechen werden.

In Kombination mit Computermodellen (Abbildung 2) kann die prädiktive Onkologie mithilfe von Algorithmen und Machine-

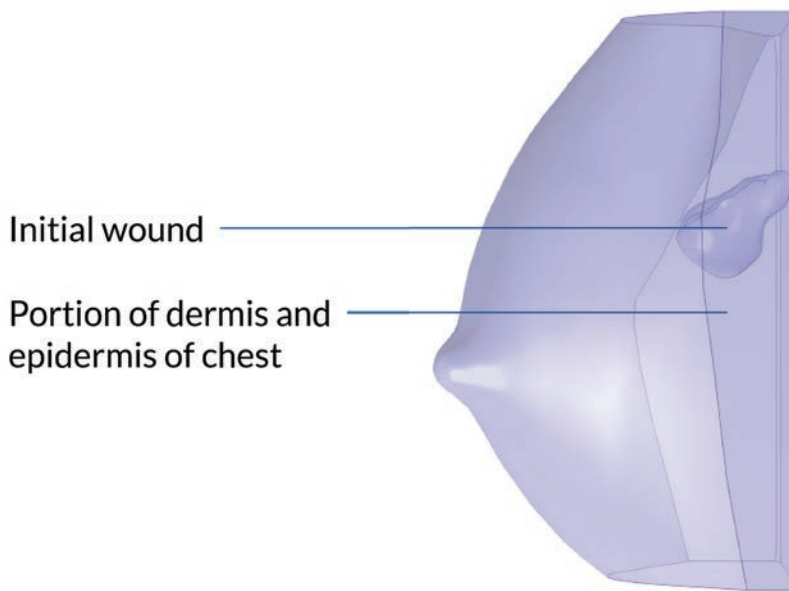


ABBILDUNG 2 3D-Darstellung der Brust einer Frau, erstellt aus einem klinischen DICOM-Bildstapel (Digital Imaging and Communications in Medicine).

Learning-Methoden zur Vorhersage von Behandlungsergebnissen für Patienten eingesetzt werden. So können beispielsweise mathematische Gleichungen, die die biologischen und physikalischen Mechanismen hinter dem Krebswachstum sowie das Ansprechen auf die Behandlung beschreiben, zur Erstellung deterministischer Modelle der Tumورprogression verwendet werden (Ref. 1). Ein Unternehmen, das mathematische Gleichungen auf diese Weise verwendet, ist Initiatives for Bio-Materials Behavior (iBMB Srls), ein Spin-off der Universität Basilicata. iBMB Srls nutze die Software COMSOL Multiphysics®, um CancerMate zu erstellen, eine Simulations-App, die auf einem mathematischen Modell basiert, welches das Tumorverhalten beschreibt. Onkologen können die App verwenden, um das Fortschreiten fester Tumore bei Brustkrebs, insbesondere bei nicht-metastasierendem triple-negativem Brustkrebs, der mit einer neoadjuvanten LYNPARZA®-Therapie behandelt wird, besser zu überwachen und zu beurteilen. Mit den Ergebnissen der App können Onkologen die therapeutischen Strategien entsprechend anpassen, um die Wirksamkeit der Therapie zu optimieren und Nebenwirkungen zu minimieren.

„Den aktuellen Behandlungsmethoden auf dem Markt fehlt es an Personalisierung und Präzision“, sagte Gianpaolo Ruocco, CEO von iBMB Srls. „Mit CancerMate können Ärzte virtuelle Szenarien durchspielen und so die Belastung für den Patienten und die Behandlungskosten senken.“

» BESTIMMUNG DES TUMORVOLUMENS MIT VIRTUELLEN BIOMARKERN

Der beabsichtigte Schwerpunkt der CancerMate-App liegt auf der Quantifizierung von Läsionsvolumina, bevor sich eine Patientin einer neoadjuvanten Chemotherapie zur Verringerung der Tumorgroße unterzieht. Die Mark-1-Version von CancerMate wurde anhand klinischer Daten von Patientinnen mit nicht-metastasiertem triple-negativem Brustkrebs validiert, die mit dem Medikament LYNPARZA® (Olaparib) behandelt wurden (Ref. 2). Das klinische Experiment umfasste eine retrospektive Kohorte von 17 Patientinnen, und die Daten aus dem Experiment wurden verwendet, um ein Reaktions-diffusionsmodell (basierend auf partiellen Differentialgleichungen) zu testen, um die metabolische Reaktion von Brustkrebs vorherzusagen, die Tumورprogression

zu virtualisieren und die Tumordynamik als Reaktion auf die Therapie für einzelne Patientinnen vorherzusagen.

Das klinische Experiment half dem Team, wichtige Biomarker für Brustkrebs zu identifizieren, die für die Vorhersage, wie ein Tumor auf eine Behandlung ansprechen wird, notwendig sind. Im klinischen Kontext sind Biomarker Indikatoren für die Gesundheit eines Patienten, die anhand von Körperflüssigkeiten wie Blut- und Gewebeproben gemessen werden. Während der Studie wurden tumorinfiltrierende Lymphozyten (TILs), die die Immunantwort beschreiben, und das Protein Ki67, das die Aggressivität des Tumors beschreibt, über einen längeren Zeitraum genau beobachtet. In der CancerMate-App werden virtuelle Biomarker als digitale oder rechnerische Indikatoren in Modelle integriert, die biologische Prozesse oder Krankheitsmerkmale darstellen und die traditionellen klinischen Biomarker ergänzen oder vorhersagen sollen (Ref. 2).

Für das klinische Experiment wurden in das mathematische Modell die Biomarker für die personalisierte Malignität (r_c) und die personalisierte pharmakodynamische Effizienz (ϵ_{pd}) integriert, die mit den traditionellen Biomarkern Ki67 und TILs korrelieren. Die Biomarker halfen dabei, die Wirksamkeit von Olaparib während des Experiments zu quantifizieren. Wie in einem Forschungsbericht zu dem klinischen Experiment erläutert, „zeigte das Modell ohne jegliche Vorannahmen,

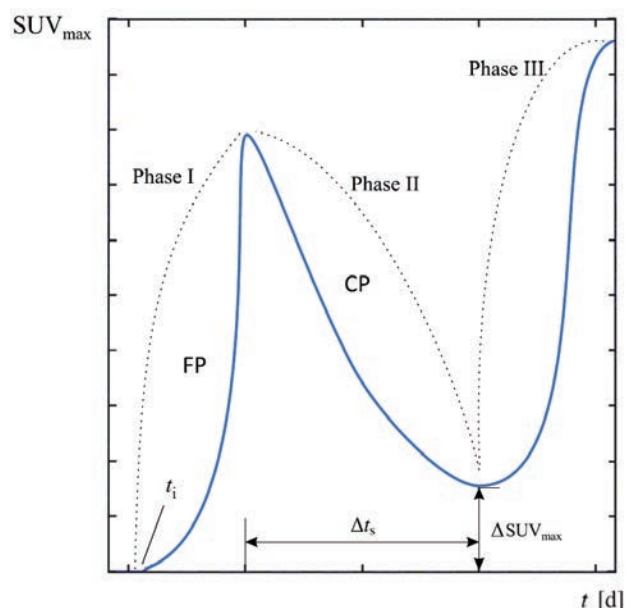


ABBILDUNG 3 Darstellung des Wachstums eines Tumors im Körper. Dargestellt sind die Proliferationsphasen I bis III mit dem metabolischen Tumorumfang (SUV_{max}) über die Zeit (t).



ABBILDUNG 4 Startbildschirm, der beim Öffnen der kompilierten CancerMate-App angezeigt wird.

dass die effektive pharmakodynamische Effizienz von Olaparib stark vom basalen TIL-Spiegel und der Wachstumsrate des metrischen Tumolvolumens V oder des metabolischen Tumolvolumens SUV_{max} abhängt. V oder SUV_{max} wurden durch einen mathematischen Parameter dargestellt, der in unserem Fall direkt von der Ki67-Expression und der TIL-Anzahl abhing.“ (Ref. 3)

Um das mathematische Modell zu veranschaulichen und die vorhergesagten und beobachteten Werte aus dem Experiment visuell zu vergleichen, verwendete das Team von iBMB eine Gompertz-Kurve, um das Tumorwachstum zu modellieren, insbesondere in den Phasen vor und nach der Verabreichung von Olaparib (Abbildung 3). Die Kurve stellt das metrische Tumolvolumen V über die Zeit (t) in drei verschiedenen Wachstumsphasen dar. Diese drei Phasen sind die freie Proliferation, die gehemmte Proliferation und das unkontrollierte Wachstum (in Abbildung 3 als Phase I, Phase II bzw. Phase III bezeichnet).

Phase I (freie Proliferation) beginnt an einem unbekannten Startpunkt (t_0) und dauert bis zur Diagnose des Tumors ($t = 0$). Zu diesem Zeitpunkt wird ein diagnostisches Bild erstellt und ein Onkologe bestimmt, welche Therapie der Patient benötigt. Darauf folgt Phase II (gehemmte Proliferation), die den Beginn der Therapie und die teilweise

Rückbildung des Tumors aufgrund der therapeutischen Intervention darstellt. Schließlich ist Phase III (unkontrolliertes Wachstum) eine Beobachtungsphase, um festzustellen, ob es nach Beendigung der Behandlung zu weiterem Tumorwachstum oder einer Zunahme der Stoffwechselaktivität kommt oder ob sich eine Resistenz entwickelt. Diese Phase hilft dabei, festzustellen, ob eine weitere Überwachung und zusätzliche Behandlungen erforderlich sind. Das validierte mathematische Modell wurde in CancerMate integriert, wobei r_c und ϵ_{pd} die beiden primären virtuellen Biomarker sind.

» CANCERMATE: EIN SCHRITT IN RICHTUNG PERSONALISIERTE ONKOLOGIE

Ruocco und sein Team entwickelten CancerMate mithilfe der gleichungsbasierten Modellierungsfunktionalität in COMSOL Multiphysics. Sie integrierten die partiellen Differentialgleichungen (basierend auf Transportphänomenen), die das Tumorwachstum und die Therapieantworten darstellen und somit zur Simulation der Proliferation von Krebszellen und der Auswirkungen einer neoadjuvanten Chemotherapie verwendet werden können. Die App wurde mit dem Application Builder in COMSOL Multiphysics erstellt und mit COMSOL Compiler™, einem Add-On zum Kompilieren von Apps mit nur

einem Klick, in eine eigenständige App umgewandelt (Abbildung 4). Durch die Umwandlung von CancerMate in eine eigenständige App kann Ruocco Ärzten die App einfach zur Verfügung stellen, sodass diese virtuelle Szenarien testen und detaillierte Informationen über das Fortschreiten von Krebserkrankungen direkt an ihrem Schreibtisch erhalten können.

Die Benutzeroberfläche der App bietet die Möglichkeit, Patientendaten einzugeben, numerische Ergebnisse anzuzeigen und den grafischen Verlauf des vorhergesagten Läsionsvolumens und der integrierten Wirkstoffkonzentration über die Zeit zu visualisieren (Abbildung 5). Die Eingabefelder für die patientenspezifischen Biomarker sind die Startpunkte für die onkologische Vorhersage, wobei das erste Eingabefeld eine Schätzung des Startzeitpunkts der Tumoraläsion ist. Die weiteren Eingabefelder umfassen den gesamten Beobachtungszeitraum (der von der angewandten Therapie abhängt), das Körpergewicht des Patienten, die Körperoberfläche sowie die Ausgangswerte für Ki67 und TILs. Darüber hinaus sind Eingabefelder für die Dosierung und die Ausgangswerte für Kreatinin enthalten, die in direktem Zusammenhang mit der Pharmakodynamik (wie das Medikament den Tumor bekämpft) und der Pharmakokinetik (wie der Körper das Medikament aufnimmt, verteilt, abbaut und ausscheidet) stehen.

Die App verwendet das mathematische Modell, um klinische Daten zu integrieren, die Basismessungen wie SUV_{max} , TILs und Ki67 umfassen. Die virtuellen Biomarker r_c und ϵ_{pd} fließen in die Vorhersagen des Modells ein, und dann wendet die App diese Biomarker auf eine Reihe von Gleichungen an, die das Tumorwachstum und das Ansprechen auf die Behandlung im Laufe der Zeit beschreiben. Nach der Berechnung werden die numerischen Ergebnisse für den vorhergesagten klinischen Läsionswert bei $t = 0$ und $t = \Delta t$ s angezeigt und eine Grafik zeigt den Fortschritt des vorhergesagten Krebsläsionsvolumens und der integrierten Wirkstoffkonzentration. Durch die Nutzung der in COMSOL Multiphysics integrierten Funktionalität zur Lösung komplexer partieller Differentialgleichungen bietet CancerMate Ärzten eine effiziente Möglichkeit, das Ansprechen eines Patienten auf die Therapie zu überwachen.

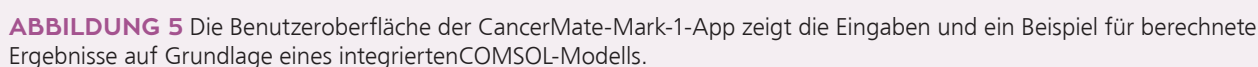
» DIE ZUKUNFT VON CANCER MATE UND VIRTUELLE MENSCHLICHE ZWILLINGE IN DER ONKOLOGIE

Therapien abgedeckt werden können. Außerdem konzentriert sich die App derzeit zwar auf Brustkrebs, doch das Team von iMBB plant, die zugrunde liegende Technologie der App auch auf andere Krebsarten und Medikamente auszuweiten.

über ein am Kopf befestigtes Display zu projizieren, das Chirurgen tragen könnten. Mit einem solchen Headset würde der Chirurg in eine virtuelle Realität eintauchen, in der er beispielsweise sehen könnte, ob eine Läsion in einer Brust zu nah am Knochen liegt, um je nach Ergebnis die Behandlungspläne bei Bedarf anzupassen. „[VHTs sind] eine Möglichkeit, die Medizin auf eine personalisierte und präzise Weise anzugehen, was einen Paradigmenwechsel darstellt“, sagte Ruocco.

Mit der Weiterentwicklung der prädiktiven Onkologie können Tools wie CancerMate die personalisierte Medizin prägen, indem sie Ärzten bei der Beurteilung und Überwachung des Volumens von Tumorerkrankungen helfen. Ruocco erklärt: „Patienten werden oft länger behandelt als nötig, aber das kann mit In-Silico-Tools geändert werden.“ ☺

1. F. Schettini et al., "Computational Reactive-Diffusive Modeling for Stratification and Prognosis Determination of Patients with Breast Cancer Receiving Olaparib," *Scientific Reports*, July 2023; <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38760-z>





Wood Thilsted, Dänemark

BESSERE BOOTSANLEGER- DESIGNS FÜR OFFSHORE- WINDKRAFT- ANLAGEN

Die Strukturanalyse hilft einem Offshore-Ingenieurbüro bei der Konstruktion von Bootsanlegern, die dem rauen Seegang und 200-Tonnen-Schiffen standhalten.

von JOSEPH CAREW

Das Meer ist aufgewühlt und ein Schiff wird hin und her gewuchtet, während sich das Wartungspersonal einer Offshore-Windkraftanlage nähert. Das Schiff wird gegen die speziell konstruierte Bootsanlegestelle der Anlage gedrückt, und die Besatzung geht von Bord. Während sie auf dem Weg zur Windkraftanlage sind, rollt eine Welle das Schiff weg und dann zurück zu den Besatzungsmitgliedern, die sich noch immer auf dem unteren Teil des Anlegers befinden. Glücklicherweise wird die Katastrophe abgewendet, da die Stahlfender den Aufprall abfangen, und der Transfer verläuft sicher.

Aufgrund der unerbittlichen Kraft des Meeres, der Verletzlichkeit der zu transportierenden Personen und der häufigen Interaktion mit gewichtigen Schiffen ist es selbstverständlich, dass Bootsanleger stabil sein müssen. Um die Stabilität zu erhöhen, könnte mehr Stahl eingesetzt werden, aber ohne die richtigen Informationen könnten die Konstrukteure am Ende Material an Stellen hinzufügen, wo dies eigentlich nicht sinnvoll ist, was die Kosten unnötig in die Höhe treibt. Daher ist es für den Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen von entscheidender Bedeutung, dass bei der Konstruktion von Bootsanlegern nicht nur auf Sicherheit und Stabilität geachtet wird, sondern auch auf einen effizienten Materialeinsatz.

Um diese Herausforderungen zu meistern, hat Wood Thilsted, ein führendes Unternehmen im Bereich Offshore Engineering, eine Methode entwickelt, um Bootsanleger kostengünstig und effizient zu entwerfen, zu testen und zu validieren – und dabei das Meer und die Sicherheit immer im Blick zu haben. Das Team nutzt die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics®, um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, potenzielle Fehler zu minimieren und viele seiner Designprozesse zu automatisieren.

ABBILDUNG 1 Ein Schiff, das an einem Terminal einer Windkraftanlage anlegt.

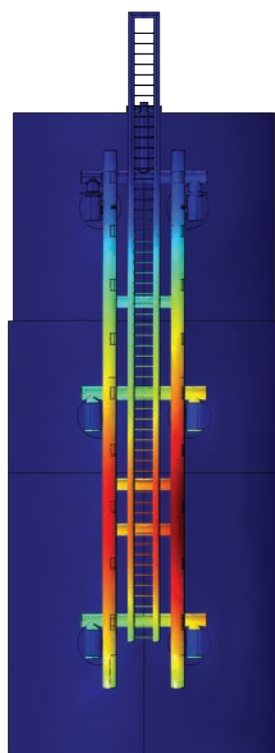
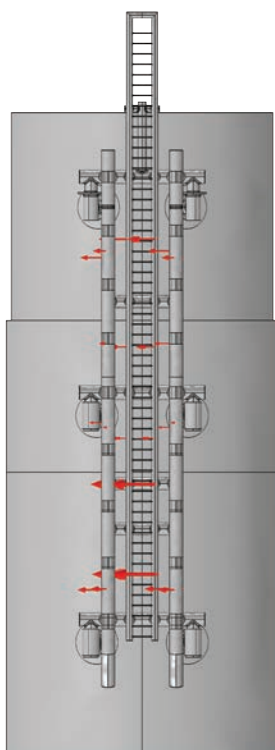


ABBILDUNG 2 Modelle zur Veranschaulichung der Kräfte, die auf die Bootsanleger auf See wirken. Links: Rote Pfeile zeigen die seitlichen Kräfte. Rechts: Ein Oberflächendiagramm hebt wichtige Belastungspunkte des Designs hervor.

» DIE HERAUSFORDERUNGEN BEIM ANLEGEN

Bei einem typischen Projekt verbringt das Team von Wood Thilsted nur ein bis zwei Monate damit, eine neue Bootsanlegestelle zu entwerfen, die 30 Jahre lang der rauen See und 200-Tonnen-Schiffen standhält. Louise Bendtsen, leitende Bauingenieurin bei Wood Thilsted, sagt, dass diese Anlegestellen, wenn man sie auf ihr grundlegendes Konzept reduziert, irreführend einfach erscheinen können. Bendtsen erinnert sich: „Jemand sagte mal: „Das sind doch nur Rohre! Das ist nicht so schwer.“ Aber es ist eine echte Herausforderung.“ Die anspruchsvollen realen Anforderungen machen Offshore-Anlegestellen zu einer einschüchternden Designperspektive.

„Die Herausforderung bei der Konstruktion besteht darin, dass wir eine Reihe von Anforderungen mit unterschiedlichen Lastfällen haben, die sich widersprechen. Man kann viel Zeit damit verbringen, einen Aspekt des Designs zu optimieren und dann feststellen, dass er für einen anderen Fall nicht funktioniert“, so Bendtsen. „[Für Konstrukteure bedeutet das,] dass sie eine breitere Perspektive auf das Design als Ganzes haben müssen und sich nicht zu sehr auf ein kleines Detail konzentrieren können, weil es einfach nicht funktionieren wird.“

Die Notwendigkeit, dass das Wartungspersonal mithilfe des Bootsanlegers sicher von seinem Schiff zur Windkraftanlage wechseln kann, macht das Design noch komplexer. Während dieses Vorgangs wird der Bug eines 200-Tonnen-Schiffs gegen die Fender des Bootsanlegers gedrückt, während das Personal auf die Leiter an der Struktur steigt und sich in Sicherheit bringt. Eine

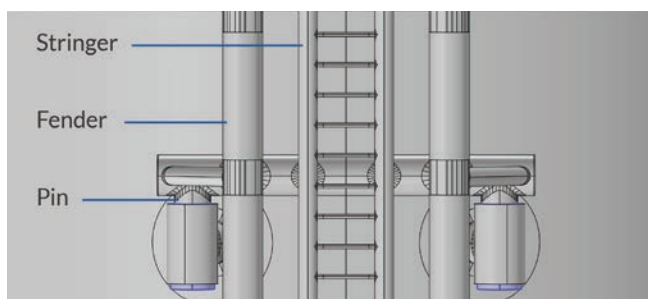


ABBILDUNG 3 Die relevanten Designkomponenten für einen Bootsanleger.

Bootsanlegestelle muss in der Lage sein, diesen Stößen sowie allen anderen Kräften standzuhalten, denen sie im Laufe der voraussichtlichen 30-jährigen Lebensdauer ausgesetzt sein wird. Zusätzlich zu den Lastfallanforderungen müssen Ingenieure auch für Unfälle wie unbeabsichtigte Kollisionen planen.

Ermitteln des Ultimate Limit State und Fatigue Limit State

Um die Möglichkeiten der verschiedenen Designs zu verstehen, benötigt das Team von Wood Thilsted eine Simulationssoftwareplattform, die in der Lage ist, sowohl eine ULS-Welle (Ultimate Limit State) als auch eine FLS-Welle (Fatigue Limit State) zu modellieren, und setzt dazu die Software COMSOL Multiphysics® ein. Die ULS-Welle stellt die maximalen Kräfte dar, die ein Bootsanleger während seiner voraussichtlichen Lebensdauer erfahren wird, während die FLS-Welle für die kumulativen Auswirkungen von 30 Jahren Wellengang und Transfers auf die Struktur steht. Die ULS- und FLS-Wellen sind die maßgeblichen Lastfälle für jede potenzielle Designlösung für einen sicheren Zugang zu Offshore-Windkraftanlagen.

Da Bootsanleger aus Leitern, Fendern, Stiften und vielen anderen Komponenten bestehen, muss das Team von Wood Thilsted auch in der Lage sein, eine Vielzahl von verschiedenen Designs zu testen, um die Sicherheit der Nutzer zu gewährleisten. Allerdings ist es zeitaufwändig, jedes Teil einzeln zu ändern und die gesamte Geometrie neu zu bauen. Mit der COMSOL® Software kann das Team die wichtigsten Maße schnell anpassen, testen und optimieren, wie beispielsweise den Abstand zwischen den Sprossen, die Breite der Leiter, den Abstand zwischen den Fendern und den Überstiegsabstand.

» PUNKTLANDUNG BEI EINEM DESIGN

Die Designs von Wood Thilsted für Bootsanlegestellen bestehen aus Stahl und umfassen drei Sets von horizontalen Leiterstützen, die an das Übergangsstück der Windturbine geschweißt werden, wo die Turbine auf das Wasser trifft. Die obere Stütze ist ein an einen Flansch geschweißter Bolzen, der als vertikale Stütze für die Bootsanlegestelle dient. Die beiden unteren Stützen sind mit vulkanisiertem Neopren ummantelte Stifte in Halterungen. Das Neopren sorgt dafür, dass die Beschichtung des Stützsystems nicht beschädigt wird. Außerdem ermöglicht dieser Konstruktionsansatz ein einfaches Entfernen des Bootsstegs für den unwahrscheinlichen Fall, dass ein Austausch vor dem Ende der erwarteten Lebensdauer erforderlich wird.

Automatisierung mit Simulationssoftware

Um die zeit- und ressourcenintensive Durchführung sich wiederholender Analysen zu vermeiden, entschied sich das Team von Wood Thilsted für die Automatisierung der Simulationen.

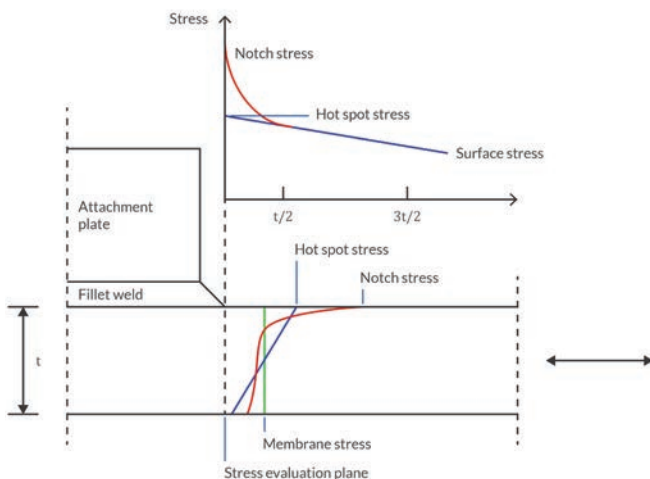


ABBILDUNG 4 Links: Während des Einsatzes ist die Struktur mit spannungsspezifischen Hotspots konfrontiert. Rechts: Das vernetzte Modell.

„Wir verwenden COMSOL, um die Spannungs-konzentrationsfaktoren unserer Bootsanleger schnell und einfach zu berechnen und diese während des gesamten Projekts zu verfolgen“, so Bendtsen. Um potenzielle Designs weiter zu validieren, arbeitet ihr Team mit dem Primary Steel Team von Wood Thilsted zusammen, um Feedback zu den Spannungs-konzentrationsfaktoren und den Grenzen der verwendeten Materialien zu erhalten.

Das Team von Wood Thilsted verwendet LiveLink™ for MATLAB®, ein Add-On-Produkt zu COMSOL Multiphysics®, um Prozesse wie die Anwendung von Lasten, die Einstellung von Materialeigenschaften und die Auswahl des Analysetyps zu automatisieren und so Konsistenz und hohe Qualität zu gewährleisten.

„Mit COMSOL Multiphysics® erhalten wir die Spannungen automatisch und verbinden diese Daten dann mit LiveLink™ for MATLAB®,“ sagt Bendtsen. „So können wir unsere eigenen Skripte schreiben, die Spannungen und Dehnungen extrahieren und alle Ergebnisauswertungen für die verschiedenen Lastfälle durchführen. Dadurch gewinnen wir Zeit, um das Design zu verbessern und uns auf die schwierigen Aspekte zu konzentrieren.“

Diese Lastfälle umfassen die Simulation normaler Wellenlasten sowie unerwarteter Schiffsstöße. All dies kann in COMSOL® optimiert und automatisiert werden, indem man Informationen über bestimmte Bauteile sammelt und speichert. „Es gibt viele Möglichkeiten zur Automatisierung in der Software, und das ist für uns wirklich von Vorteil, weil wir all diese Lastfälle haben, die ähnlich, aber unterschiedlich sind“, sagt Bendtsen.

Bauteilbibliothek und Parameter

Ein Teil des effizienten Designansatzes von Wood Thilsted ist seine Geometriebibliothek. Innerhalb von COMSOL Multiphysics® können Nutzer Designs erstellen und speichern sowie ihre komplexen Geometrien

reproduzieren und parametrisieren. Mithilfe dieser Funktion bauen Bendtsen und das Team ihre Bootsanlegerdesigns Stück für Stück auf, indem sie jede Komponente einzeln abbilden und ihre Parameter speichern, so dass sie einen Teil des Designs gegen einen anderen austauschen können. Auf diese Weise können sie mehrere ähnliche Teile gleichzeitig ändern, indem sie den entsprechenden globalen Geometrieparameter anpassen. So können sie ein Design leicht mit früheren Iterationen vergleichen.

Konkret hat Wood Thilsted alle Komponenten, einschließlich der Fenderstützen, der Halterungsstützen, der Fender und der Leitern in seiner Geometriebibliothek und kann die Teile je nach Bedarf in ein Modell einfügen. „Das bedeutet, dass ich diese verschiedenen Geometrie-teile kombinieren kann, um mein Gesamtdesign für den Bootsanleger zu erstellen“, so Bendtsen. „Wir haben auch mehrere Konfigurationen in unseren Teilen, so dass ich die Verbindungsarten und -winkel ändern kann, um verschiedene Konfigurationen zu testen.“ Bendtsen findet dies besonders nützlich für den Austausch mit Herstellern, nachdem ihre Designs modelliert und simuliert wurden. Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Herstellern führt zu individuellen Präferenzen für den tatsächlichen Bau eines Anlegers. „Wir haben viele unterschiedliche Konfigurationen. Deshalb haben wir eine Komponentenbibliothek erstellt, die es uns ermöglicht, unsere Anlegestelle auf verschiedene Weise zu konfigurieren und leicht anzupassen“, sagt Bendtsen.

Darüber hinaus kann der Konstrukteur mit dem 3D-COMSOL-Modell von Wood Thilsted auf einfache Weise eine visuelle Überprüfung eines potenziellen Designs durchführen. Mit Hilfe der Strukturmechanik-Simulation kann das Team von Wood Thilsted seine Anlegestellen genau modellieren und die dramatischen Auswirkungen simulieren, die die Umwelt und die Schiffe auf sie haben können.

» DIE VORAUSSETZUNGEN FÜR BESSERE BOOTSANLANDUNGEN SCHAFFEN

Anlegestellen sind mehr als nur eine Ansammlung von Rohren, sie müssen effizient und sicher gestaltet werden. Da sowohl Kosten als auch Risiken auf dem Spiel stehen, haben Modellierung und Simulation zu mehr Gewissheit beigetragen. Darüber hinaus konnte Wood Thilsted Teile seiner Prozesse automatisieren und seine Designs verbessern. „Unsere Kunden kommen immer wieder zu uns, um Bootsstege zu entwerfen, weil sich unsere Designs bewährt haben“, sagt Bendtsen. Dieses Gefühl geht Hand in Hand mit dem Motto von Wood Thilsted, Designs schnell und flexibel umzusetzen, wie Bendtsen erklärt: „Unsere Projektteams sind agil und schnell. Wir können Änderungen innerhalb von Stunden anstatt von Wochen umsetzen und so die stahleffizientesten Designs mit hoher Geschwindigkeit realisieren.“ ☺

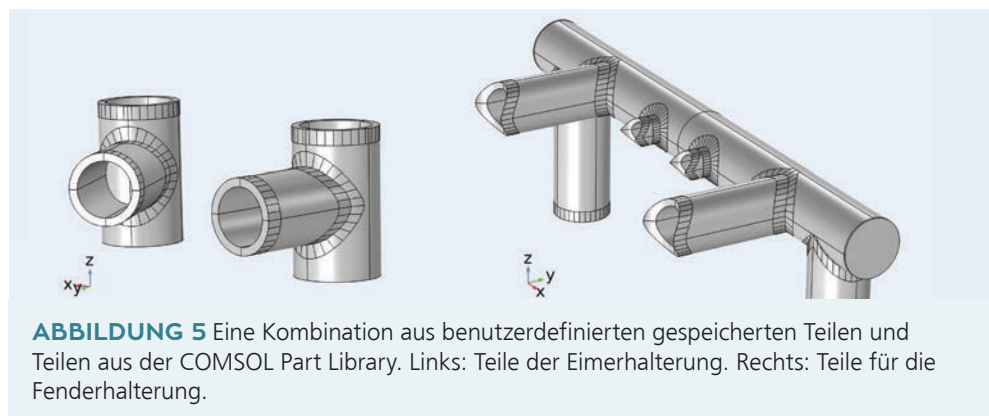


ABBILDUNG 5 Eine Kombination aus benutzerdefinierten gespeicherten Teilen und Teilen aus der COMSOL Part Library. Links: Teile der Eimerhalterung. Rechts: Teile für die Fenderhalterung.

Sonion, Niederlande

EIN OFFENES OHR FÜR DIE WELT DANK HÖRGERÄTETECHNOLOGIE

Sonion verwendet vibroakustische Modellierung und experimentelle Tests, um Komponenten für Hörgeräte und professionelle Audiogeräte zu entwickeln. Michele Colloca von Sonion sprach mit COMSOL über die Arbeit seines Teams und die Zukunft der Hörgerätetechnologie.

von JOSEPH CAREW

Audiomonitore, Ohrhörer, Kopfhörer, Hörgeräte und andere bekannte Audiotechnologien tragen in der Regel die Namen bestimmter Marken, aber die meisten dieser Produkte enthalten Teile, die von einer Vielzahl von Unternehmen entworfen und hergestellt wurden. Beispielsweise verwenden fünf der sechs größten Hörgerätehersteller der Welt Wandlerkomponenten, die von Sonion entwickelt wurden. Sonion ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das fortschrittliche Miniaturkomponenten – wie Balanced-Armature-Empfänger, High-End-Mikrofone, Sprachaufnahmesensoren und andere

elektromechanische Komponenten – für Hersteller von Hörgeräten und professioneller Audiotechnik entwickelt und herstellt. Die Ingenieure von Sonion unterstützen ihre Kunden in jeder Phase der Produktentwicklung, vom ersten Konzept über die Designverfeinerung bis hin zur Serienproduktion. „Unser Ziel ist es, Partner unserer Kunden zu werden und mit ihnen gemeinsam zu entwickeln, anstatt nur ihre Lieferanten zu sein“, sagt Michele Colloca, Leiter der Empfänger- und RIC-Entwicklung bei Sonion.

Colloca leitet Teams von Simulationsingenieuren in den Niederlanden und Vietnam und unterstützt verschiedene Forschungs- und Entwicklungsabteilungen bei Sonion und deren Kunden bei der Modellierung bestehender Produkte und neuer Konzepte, bei der Validierung von Modellen durch Experimente und bei der Erklärung der Mechanismen hinter den Sonion-Wandlern. „Wir betrachten die Modellierung als einen Raum der gegenseitigen Bereicherung, in dem wir Informationen austauschen und Probleme lösen können. Unsere Modelle sind ein Ort, an dem wir und unsere Kunden zusammenkommen können, um die Erfahrung der Endnutzer zu verbessern“, so Colloca.

Wie in dem folgenden Interview festgehalten, haben wir uns mit Colloca in Verbindung gesetzt, um mehr über die größten Herausforderungen bei

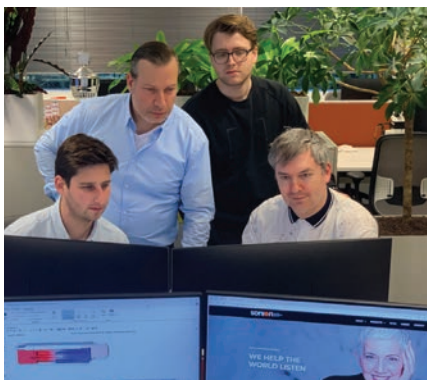
der Entwicklung von Hörgeräten zu erfahren, wie Modellierung und Simulation die Forschung und Entwicklung beschleunigen und wie Sonion die Hörgerätetechnologie vorantreibt.

Welche Trends und Verbraucherbedürfnisse beeinflussen die Entwicklung neuer Hörgerätetechnologien?

MC: Die Hauptaufgabe von Hörgeräten ist es, Menschen dabei zu helfen, in jeder Umgebung besser zu hören. Dazu gehört die Verbesserung der Audioqualität dieser Geräte, insbesondere für das Sprachverstehen in lauten Umgebungen. Es geht auch darum, die Robustheit der Hörgeräte zu erhöhen und ihr optisches Erscheinungsbild zu verbessern, indem sie kleiner und weniger sichtbar gemacht werden, damit die Menschen sie tragen wollen. Schließlich geht es darum, die Hörgeräteversorgung zugänglicher und erschwinglicher zu machen, damit mehr Menschen Hörgeräte nutzen können.

Was sind die größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Komponenten für Hörgeräte?

MC: Bei Sonion entwerfen und entwickeln wir Balanced-Armature-Empfänger für eine Vielzahl von Leistungsstufen und Anwendungen,



Das Modellierungs- und Simulations-Team von Sonion. Im Uhrzeigersinn von oben links: Michele Colloca, Justin den Heijer, Oleg Antoniuk und Bas Haayen.

sowohl in Einzel- als auch in Doppelkonfigurationen; Hybrid- und elektrostatische Empfänger für spezialisierte und professionelle Anwendungsfälle; vorgefertigte RIC-Systeme (Receiver-in-Canal) aus Stahl oder Kunststoff für Hörgeräte; sowie Miniaturelektret- und MEMS-Mikrofone für leistungsstarke und stromsparende Hörgeräte (Abbildung 1). Daher müssen wir einige wichtige Kompromisse eingehen. Zum Beispiel müssen unsere Wandler klein genug sein, um in ein Hörgerät zu passen, und dabei einen geringen Stromverbrauch, minimale Verzerrungen, und im Fall von Balanced-Armature-Empfängern, geringere Interferenzen durch mechanische Vibrationen, magnetische Rückkopplung und akustische Rückkopplung aufweisen. Darüber hinaus müssen unsere MEMS-Mikrofone sehr empfindlich gegenüber Schall, aber unempfindlich gegenüber Vibrationen sein. Außerdem müssen

unsere Komponenten zuverlässig und robust gegenüber Temperatur, Feuchtigkeit und Verunreinigungen durch Ohrschmalz und Staub sein.

Aus Sicht der Modellierung sind unsere Geräte von Natur aus multiphysikalisch und durch starke Nichtlinearitäten gekennzeichnet. So kann beispielsweise die Optimierung des elektrischen Bereichs eines Modells negative Auswirkungen auf den akustischen Bereich haben und umgekehrt. Das richtige Gleichgewicht zu finden, ist immer eine herausfordernde, aber auch faszinierende Aufgabe.

Wenn man bedenkt, was bei dieser Arbeit auf dem Spiel steht, welche Folgen hat ein suboptimales Design?

MC: Wenn kein optimales Design erreicht wird, kann dies dazu führen, dass mehrere Design-Iterationen erforderlich sind, was zu langen Entwicklungszeiten und höheren F&E-Kosten, Verzögerungen bei der Markteinführung und Produkteinführung für OEMs und zum Verpassen von Design-Win-Chancen in Angebotsphasen führt.

Warum setzt Sonion bei der Entwicklung von Hörgerätekomponenten auf Modellierung und Simulation?

MC: Unsere Modellierungs- und Simulationsarbeit ermöglicht es uns, Zeit und Ressourcen effizienter einzusetzen, bevor wir mit der Prototypenphase beginnen. Durch die Erstellung virtueller Prototypen mit der Software COMSOL Multiphysics® können wir auch schnellere Iterationen von Designkonzepten erreichen. Darüber hinaus ermöglicht uns die Finite-Elemente-Analyse (FEA), die in der Software enthalten ist, eine gründliche Untersuchung des Verhaltens unserer Produkte, das im Labor nur schwer zu messen oder eindeutig zu beobachten wäre.

Können Sie ein Beispiel nennen, bei dem Sie Modellierung und Simulation als besonders wichtig empfunden haben?

MC: Bei vielen Anwendungen kann ein Balanced-Armature-Empfänger (BA) in die Nähe eines starken externen Magneten kommen. Dies kann beispielsweise passieren, wenn ein Hörgerät in seine Ladeschale eingesetzt wird. Die Ladeschale kann Magnete enthalten, die das eingelegte Gerät positionieren. Dies kann negative Folgen haben, da das Feld des

externen Magneten in hochpermeable Komponenten des BA-Empfängers eindringen und dessen magnetische Funktion stören kann. Dies kann zu Fehlfunktionen des Hörgerätes führen, da die Wechselwirkung zwischen den externen und internen Magnetfeldern – der Ladeschale und des Hörgeräts – die Fähigkeit des Hörgeräts beeinträchtigt, Töne zu erzeugen oder den Ton stark verzerren kann.“ (Abbildung 2)

Um diese Wechselwirkung zu analysieren, haben wir in COMSOL® ein Modell erstellt, um die Interferenz des magnetischen Flusses durch die externen Magnete mit dem vom BA-Empfänger erzeugten magnetischen Fluss zu verstehen. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass der zusätzliche magnetische Fluss, den ein externer Magnet in den magnetischen Pfad eines Empfängers einspeist, die magnetischen Widerstände im gesamten Magnetkreis verändert und zur Entmagnetisierung der Empfänger magnete führt. (Abbildung 3)

Können Sie ein zweites Beispiel nennen, bei dem Sie den Einsatz von Modellierung und Simulation als nützlich empfunden haben?

MC: In der professionellen Audio- und Hörgerätetechnik werden häufig Lumped-Element-Modelle als schnelles und praktisches Werkzeug zur Vorhersage des Verhaltens von Audio-Wandlern, wie beispielsweise MEMS-Mikrofonen, verwendet. Um die Genauigkeit dieser Modelle zu erhöhen, müssen Endkorrekturen für Auslassöffnungen oder Schalleinlässe in die Länge des akustischen Kanals einbezogen werden. Diese Endkorrekturen beschreiben, wie ein akustischer Kanal zur Außenumgebung hin geöffnet ist – etwa durch ein offenes Ende oder durch eine Öffnung in eine unendliche Ebene, die als Schallwand bezeichnet wird. Die Koeffizienten, die die Endkorrektur der akustischen Masse am Ein- oder Auslass beschreiben, sind bekannt. Der Endkorrekturkoeffizient für den Realteil der akustischen Impedanz, also dem akustischen Widerstand des Kanals, wird üblicherweise als gleich angenommen wie der für die akustische Masse. In unserer Studie haben wir die thermoviskose Akustik in COMSOL verwendet, um die Endkorrektur des akustischen Widerstands zu berücksichtigen und zu quantifizieren. Dabei haben wir festgestellt, dass sich die Endkorrektur für die akustische Masse von der für den akustischen Widerstand unterscheiden kann. (Abbildung 4)



ABBILDUNG 1 Balanced-Armature-Empfänger (oben), RIC-System aus Stahl (Mitte) und Miniaturelektret- und MEMS-Mikrofone (unten) von Sonion.

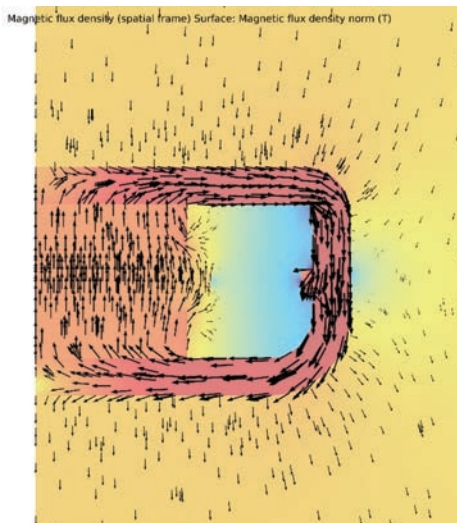


ABBILDUNG 2 Magnetische Flussdichte, die sowohl durch die externen Magnete in der Ladeschale als auch durch die internen Magnete im Balanced-Armature-Empfänger erzeugt wird.

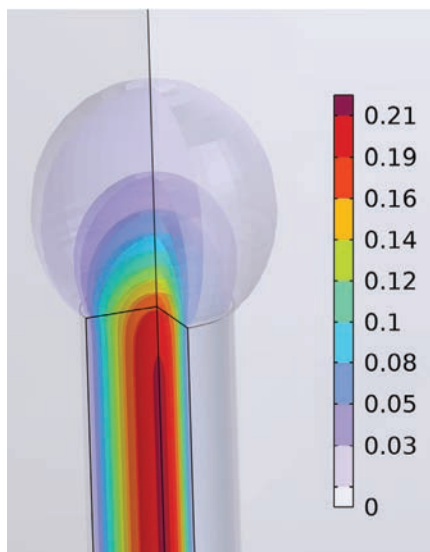


ABBILDUNG 3 Eine Simulation des Geschwindigkeitsprofils der Partikel in Z-Richtung des nach außen offenen akustischen Kanals mit thermoviskosen Effekten. Diese Simulation ermöglichte es Sonion, die Endkorrektur aufgrund der Schallabstrahlung in die offene Umgebung genau zu quantifizieren.

Warum sind Lumped-Element-Modelle wichtig für die Forschung und Entwicklung im Bereich Audio- und Hörtechnologie?

MC: Die wichtigsten Leistungsindikatoren von Empfängern, wie elektrische Impedanz, Schalldruckpegel und

Vibrationen, hängen stark vom Design des Wandlers selbst und von der daran angeschlossenen akustischen Last ab. In diesem Fall stellt die akustische Last das menschliche Ohr und den damit verbundenen Schallkanal dar. Das typische Gerät zur Modellierung des durchschnittlichen menschlichen Ohrs ist der auch als 711-Koppler bekannte Ohrsimulator. Wenn wir jedoch das gesamte Volumen und die speziellen Merkmale dieses Ohrsimulators, sowie die Struktur des zur Verbindung des Empfängers mit dem Ohrsimulator benötigten akustischen Schlauchs berücksichtigt, erhalten wir ein sehr großes, vollständig gekoppeltes FEA-Modell, das sehr rechenintensiv ist.

Wir haben einen Ansatz gewählt, bei dem die akustische Leitung und der 711-Koppler als Zwei-Port-Netzwerk anstelle eines vollständig gekoppelten FEA-Modells simuliert werden. Ein solcher Ansatz kann die Rechenzeit erheblich verkürzen. Wir haben die Transfermatrix-Methode mit der Software COMSOL Multiphysics anhand einer vollständigen FEA eines Wandlers, eines Rohrs und eines Kopplers validiert. Durch die Erstellung einer Lumped-Darstellung des Rohres und des Kopplers mithilfe einer Transfermatrix-Implementierung konnte die Modellkomplexität und die Rechenzeit drastisch reduziert werden. Schließlich konnten wir verschiedene Konzepte testen und schnell den virtuellen Prototyp auswählen, der zu einem physischen Prototyp für Labortests weiterentwickelt werden sollte.

Wie hat die Simulation die Produktentwicklung bei Sonion verbessert?

MC: Ein virtueller Prototyp kann einen realen Prototyp nicht ersetzen. Wir müssen immer einen physischen Prototyp bauen, das Modell messen und validieren. Sobald das Modell jedoch validiert ist, ist der virtuelle Prototyp robust genug, um für die Auswahl des richtigen Designkonzepts verwendet zu werden. Um diesen Punkt weiter zu veranschaulichen, betrachten wir ein Beispiel für einen Prototyping-Prozess: Wenn Sie ein einzelnes Designkonzept testen, benötigen Sie einen virtuellen Prototyp, dessen Erstellung etwa sieben Stunden dauert. Ohne einen virtuellen Prototyp müssten Sie jedoch mindestens fünf Muster für jedes Konzept erstellen, testen und messen, was durchschnittlich 40 Stunden in Anspruch nimmt. Die Simulation kann also den Zeitaufwand für das Testen eines Designkonzepts um

mindestens den Faktor 5,7 reduzieren. In diesem Szenario hat sich die Anzahl der Lernprozesse pro investiertem Euro durch die Einführung des virtuellen Prototyping exponentiell erhöht.

Wie tragen Ihre Produkte dazu bei, die Hörgerätetechnologie weiterzuentwickeln?

MC: Die Produkte von Sonion entsprechen den wichtigsten Trends auf dem Hörgerätemarkt. Wir streben danach, die Leistung unserer Produkte zu verbessern und ihre Audioqualität zu optimieren. Neue Produkte müssen strenge Qualitätsstandards erfüllen, und wir erweitern ständig die Grenzen der Zuverlässigkeit unserer Produkte, um bessere und robustere Hörgeräte zu entwickeln. Unsere Produktdesigns berücksichtigen wir das gesamte Hörgerät und ermöglichen es den Herstellern, noch kleinere Hörgeräte herzustellen. Schließlich entwickeln wir immer kostengünstige Lösungen, um die Versorgung mit Hörgeräten erschwinglich zu machen.

Für die Zukunft planen wir, unsere Multiphysik-Modelle weiterzuentwickeln, die Genauigkeit unserer virtuellen Prototypen durch Hinzufügen von Variationen der Komponentengröße zu erhöhen, unsere Rechenzeiten drastisch zu verkürzen und die Parametervektoren für auf Lumped-Element-Modellen basierenden Schaltungen durch FEA-Studien zu verbessern.

Welche Rolle spielt die Simulation in der Zukunft der Hörgerätetechnologie?

MC: Virtuelle Prototypen werden präziser und die Unterschiede zu physischen Prototypen werden minimiert. Und dank der höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit von Computern wird der Übergang vom Design zum Testen und vom Testen zur Produkteinführung schnell erfolgen.

Was die Zukunft der Hörgerätetechnologie im Allgemeinen betrifft, glaube ich, dass sie fortschrittliche Signalverarbeitungsfunktionen enthalten wird, die die Sprachverständlichkeit in verschiedenen Umgebungen, die Konnektivität, die Klangqualität, die Robustheit und die Miniaturisierung verbessern. Neue Hörgeräteplattformen werden immer mehr KI zur Verbesserung der Spracherkennung bei Lärm enthalten, was jedoch zu Lasten des Stromverbrauchs gehen wird. ☺

NASA, USA

NEUE CO₂-ENTFERNUNGS-TECHNOLOGIEN FÜR BESSERES LEBEN IM WELTRAUM

Die NASA kombiniert thermische Modellierung und experimentelle Tests, um das beste Kompressor-Design für das Luftversorgungssystem der Internationalen Raumstation ISS zu finden.

von FANNY GRIESMER

Die Internationale Raumstation (ISS) ist zu einem großen Teil erst dadurch bewohnbar, dass ein spezielles System Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft entfernt. Das Herzstück dieses Systems ist ein Kompressor, der seine Aufgabe der CO₂-Abtrennung erfüllt, allerdings zu einem hohen Preis: Er ist laut und muss häufig gewartet werden. Die Ingenieure der NASA nutzten Modellierung und Simulation zusammen mit experimentellen Tests, um die nächste Generation von Kompressor-Designs zu analysieren, die ihre Aufgabe leiser, mit weniger Wartungsaufwand und zu geringeren Herstellungskosten bewältigen.

» TECHNOLOGIE ZUR ENTFERNUNG VON SCHADSTOFFEN

Astronauten, die auf der ISS leben und arbeiten, setzen großes Vertrauen in die Ingenieure hinter der Technologie, die die Kabine CO₂-frei macht (Abbildung 1). „Derzeit gibt es ein System namens Carbon Dioxide Removal Assembly (CDRA)“, erklärt Dr. Hannah Alpert, Ingenieurin für Raumfahrtssysteme am NASA Ames Research Center.

„Der CDRA absorbiert Kohlendioxid, um es aus der Kabine zu entfernen. Dann wird dieses Kohlendioxid in einen Sabatier-Reaktor geleitet, wo es mit Wasserstoff aus dem Sauerstoff-erzeugungssystem kombiniert

wird, um Wasser zu erzeugen“, fährt sie fort. Dieses Wasser steht den Astronauten als Trinkwasser zur Verfügung. Das System erzeugt auch Methan, das in den Weltraum abgelassen wird. (Siehe Abbildung 2) „Wir haben dieses geschlossene System, um die Astronauten am Leben zu erhalten, aber damit das Kohlendioxid im Sabatier-Reaktor reagieren kann, muss es unter einem höheren Druck stehen, als es absorbiert wird; also haben wir einen

Kompressor zwischen dem CDRA und dem Sabatier-Reaktor“, sagt Dr. Alpert. Der CDRA wird derzeit zu einem neuen Vier-Bett-Molekulardampfsystem aufgerüstet: dem Four-Bed-CO₂-Scrubber, oder kurz 4BCO₂.

Dr. Alpert erklärt, dass das neue System die Zuverlässigkeit und Leistung gegenüber dem CDRA verbessern soll, wofür verschiedene Änderungen vorgenommen werden. Zunächst einmal ist das Sorptionsmittel, das für die CO₂-



ABBILDUNG 1 Astronauten bei der Arbeit am CDRA. Das Bild stammt von der NASA und ist über Wikimedia Commons öffentlich verfügbar.

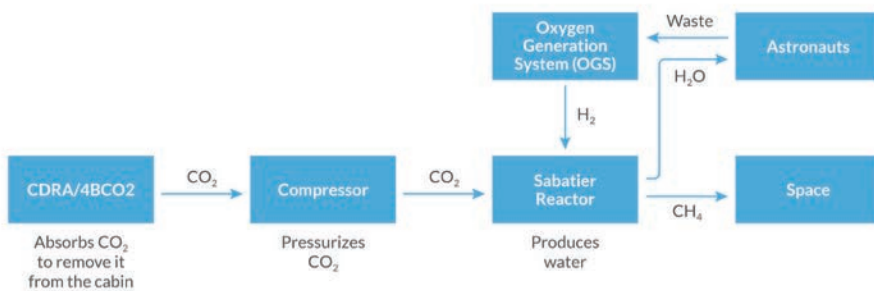


ABBILDUNG 2 Der Prozess des Schadstoffentfernungssystems.

Abtrennung verwendet wurde, veraltet und muss ersetzt werden. Außerdem wurden einige der Komponenten neu entworfen. „Sie sind von einem rechteckigen auf ein zylindrisches Bett umgestiegen, haben den Heizkern umgestaltet, um das Sorptionsmittel besser zu verteilen und die Leerräume zu beseitigen, und sie fügen einen Filter zum Abfangen von Staub und neue Ventile für eine längere Betriebsdauer hinzu“, erläutert Dr. Alpert. Allerdings ist die grundlegende Funktionalität des 4BCO2 in Verbindung mit dem Kompressor, an dem das Team von Dr. Alpert arbeitet, im Wesentlichen dieselbe wie bei dem aktuellen System.

» NEUGESTALTUNG DES KOMPRESSORS

Das derzeitige System verfügt über einen massiven mechanischen Kompressor mit hoher Leistung, der viel Lärm verursacht. Die vielen mechanischen rotierenden Teile müssen häufig gewartet werden, und alles in allem ist das System sowohl in der Herstellung als auch im Betrieb teuer. „Wir untersuchen daher einige alternative Technologien und eine unserer führenden Optionen ist ein luftgekühlter Temperaturwechsel-Adsorptionskompressor oder AC-TSAC“, so Dr. Alpert.

„Der AC-TSAC hat eine geringere Masse und verbraucht weniger Energie; er ist leiser; es gibt keine rotierenden Teile hoffentlich seltener, so dass Teile ausgetauscht werden müssen; und er ist billiger in der Herstellung und einfacher zu produzieren.“

» THERMISCHE MODELLIERUNG UNTERSTÜTZT DESIGNENTSCHEIDUNGEN

Dr. Alpert nutzte die Simulationsplattform COMSOL Multiphysics® ein, um Modelle für das aktuelle AC-TSAC-Design zu erstellen. „COMSOL® hat sich in den letzten Jahren als äußerst nützlich erwiesen. Eines der ersten Projekte, an denen ich gearbeitet habe, als ich bei der NASA anfang, war die Modellierung eines Wärmestrommessers, der auf dem Hitzeschild von Mars 2020 flog, und vor kurzem habe ich das Optimization Module verwendet, um den Oberflächenwärmestrom auf einem Hitzeschild anhand der eingebetteten Thermoelementtemperaturen zu rekonstruieren“, sagt Dr. Alpert.

Für das Kompressorprojekt erstellte sie sowohl eine 3D- als auch eine 2D-Version des Modells. Nachdem sie

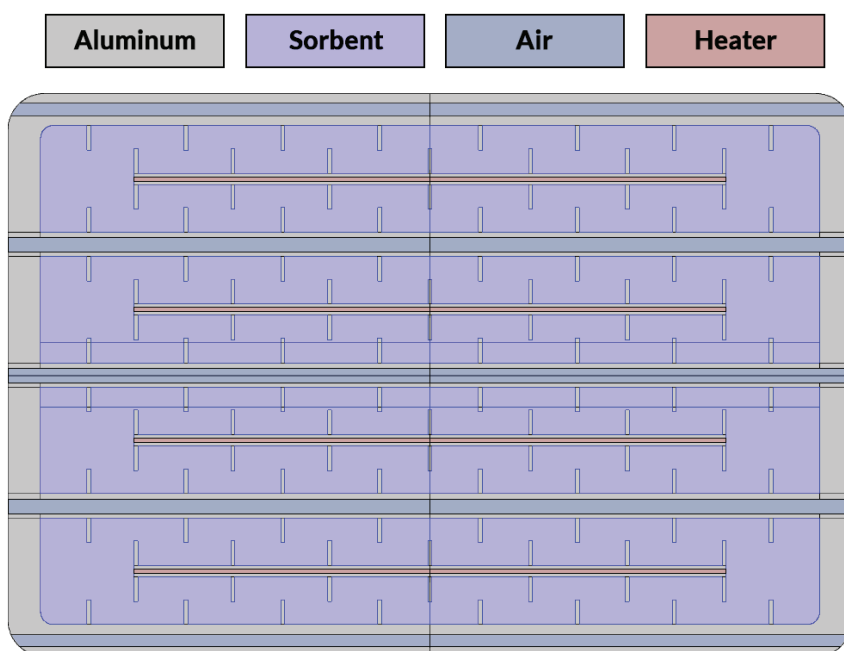
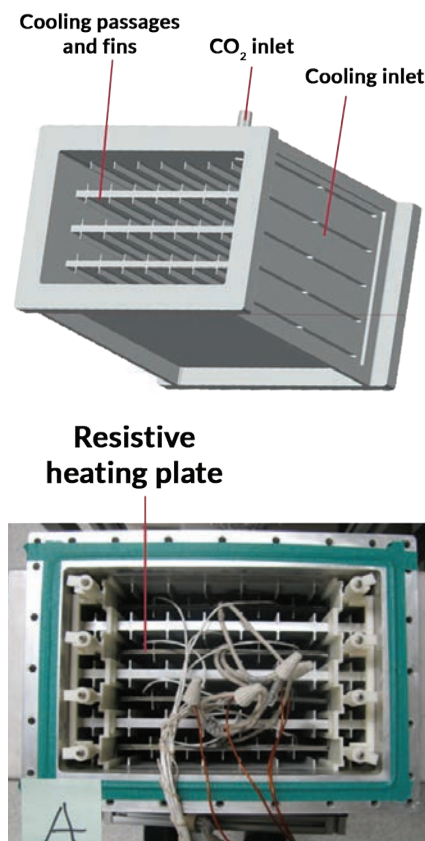


ABBILDUNG 3 Der tatsächliche Kompressor und Modelle, die ihn darstellen.

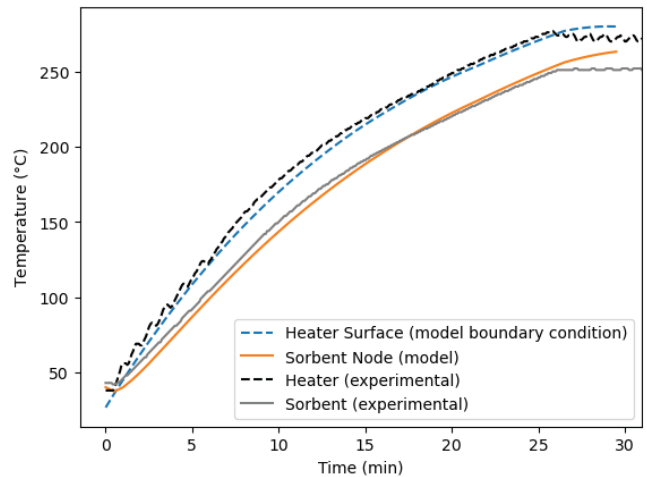
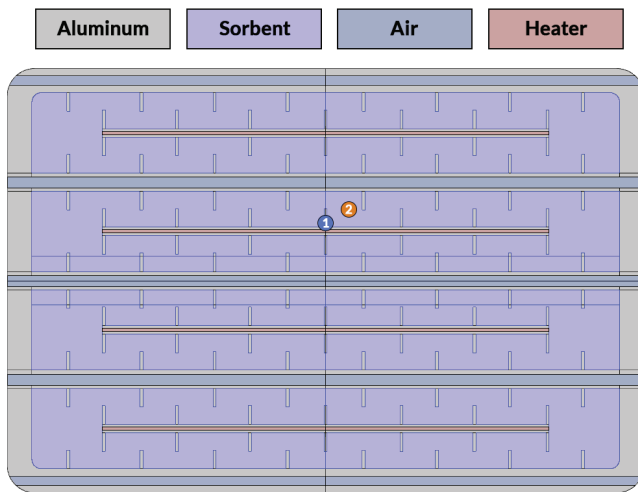


ABBILDUNG 4 Die experimentellen Ergebnisse des Zwei-Bett-Tests und die Modellergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung.

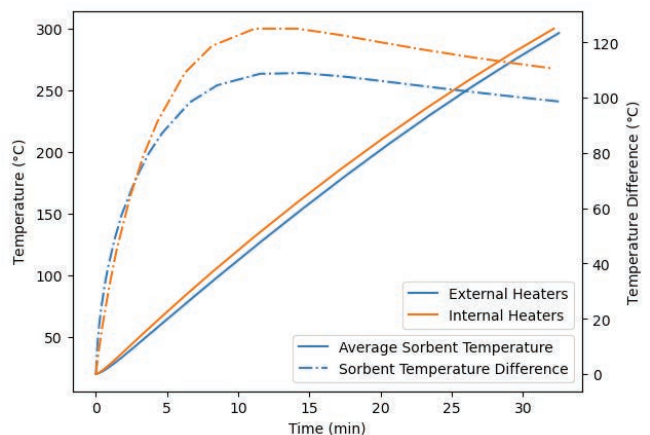
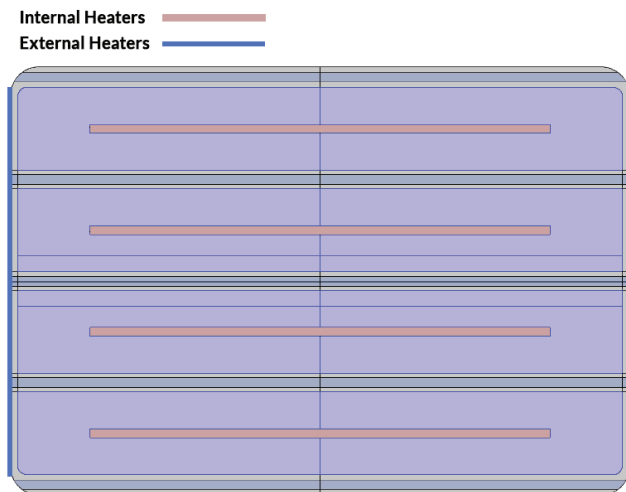


ABBILDUNG 5 Die thermische Modellierung zeigt, dass externe Heizelemente (blau) ähnlich performen wie interne Heizelemente (orange).

festgestellt hatte, dass die Ergebnisse vergleichbar waren, entschied sie sich aus Effizienzgründen für das 2D-Modell. AC-TSAC befinden sich drei Kammern in der Mitte und Zeolithpellets in den offenen Bereichen (Abbildung 3). Zwischen den Kammern befinden sich Widerstandsheizplatten, die das Bett erwärmen. Die Kühlkanäle ermöglichen eine Durchströmung von Luft während der Kühlphase.

» VALIDIERUNG DES MODELLS

Um das Modell zu validieren, nutzte das Team Temperatur- und Leistungsmessungen aus zwei Testkampagnen, die mit dem AC-TSAC durchgeführt wurden. „Der erste

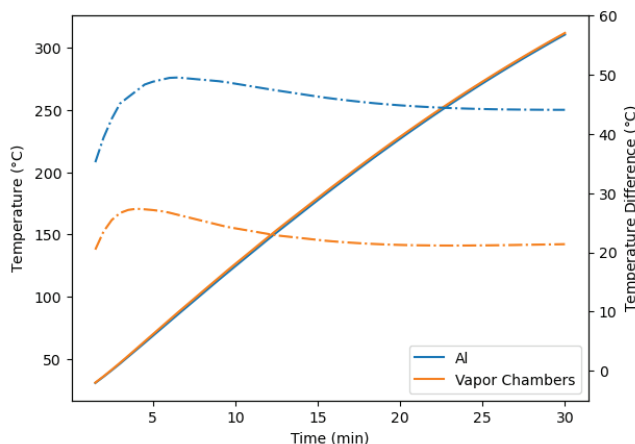
Test war ein Zwei-Bett-Test für die Funktionalität bei NASA Marshall. Dann haben wir eine gezieltere Testkampagne bei NASA Ames durchgeführt, bei der wir nur ein Bett verwendet haben, um die genauen Eigenschaften besser zu isolieren,“ sagt Dr. Alpert.

Während des NASA Marshall-Tests platzierten sie Widerstandstemperaturdetektoren an bestimmten Stellen auf der Oberfläche der Heizelemente, um die Temperatur zu messen. Anschließend verwendeten sie die gemessene Temperatur als eine der Randbedingungen des Modells und führten das Modell aus, um zu prüfen, ob die modellierte Temperatur mit den experimentellen Daten übereinstimmte (Abbildung 4).

Daraufhin führte das Team den fokussierten Test bei NASA Ames durch, bei dem nur ein einziges Bett getestet und experimentelle Daten von der Heizfläche und dem Sorptionsknoten gesammelt wurden. In diesem Fall verwendeten sie die gemessene Leistung als Eingabe für ihr Modell und maßen dann die Temperaturen am Heizungsknoten und am Sorptionsknoten im Modell. Als sie das Modell mit den Testergebnissen verglichen, konnten sie eine gute Übereinstimmung zwischen den Daten feststellen.

Mit dem validierten Modell konnten Dr. Alpert und ihr Team nun analysieren, wie sich verschiedene Designänderungen auf die Aufheizung und die Aufheizrate des Kompressors auswirken würden.

Rectangular Bed



Cylindrical Bed

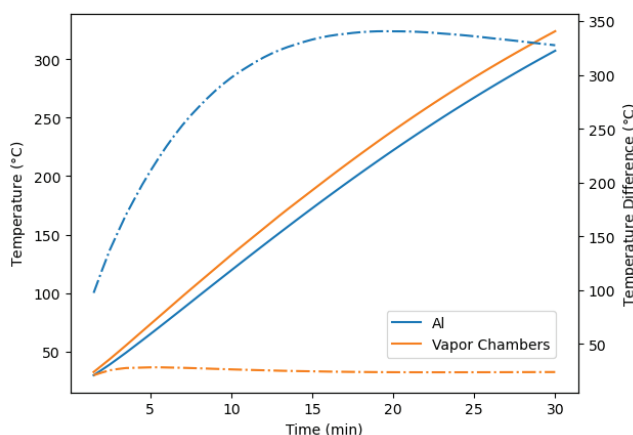


ABBILDUNG 6 Die durchschnittliche Temperatur des Sorptionsmittels (durchgezogene Linien) ist weitgehend unverändert, aber Gleichmäßigkeit (gestrichelte Linien) ist viel besser für die Dampfkammern.

» STUDIEN FÜR DAS BESTE DESIGN

Auf der Suche nach dem besten neuen Design führte das Team verschiedene Design Studien durch, die unter anderem Vergleiche zwischen internen vs. externen Heizelementen, sowie Aluminiumbett vs. Dampfkammern beinhalteten. Das übergeordnete Ziel war es, schnell eine hohe Temperatur zu erreichen und die Temperatur während des Hochfahrens im gesamten Bett gleichmäßig zu halten.

„Der erste Designaspekt, den wir uns angeschaut haben, war der Wechsel von internen Heizelementen. Derzeit befinden sich die internen Heizelemente in der Mitte der Betten, und stellen eine potenzielle Fehlerquelle dar. Eine Menge Drähte führen in das Bett es ist einfach ein komplexes, unordentliches Bündel von Drähten und Heizkörpern“, sagt Dr. Alpert. Das Team fragte sich daher, ob es möglich wäre, diese Heizelemente an die Außenseite des Bettes zu verlegen und das Sorptionsmittel trotzdem schnell und gleichmäßig zu erwärmen. Anhand des Modells von Dr. Alpert wurden die internen und externen Heizelemente mit Energie versorgt, um die Heizrate und die Gleichmäßigkeit zu vergleichen (Abbildung 5).

„Der Wechsel von internen zu externen Heizelementen hatte keine großen Auswirkungen. Das bedeutet, dass die Verwendung externer Heizelemente das Potenzial hat, die Temperaturgleichmäßigkeit des Sorptionsmittels zu verbessern oder zumindest auf dem gleichen Niveau zu halten und gleichzeitig die Komplexität des Systems zu verringern“, erklärt Dr. Alpert.

In einer weiteren Studie wollte das Team untersuchen, wie sich der Wechsel von einem Aluminiumbett zu Dampfkammern auswirkt (Abbildung 6).

Die NASA arbeitet mit externen Partnern zusammen, die die Dampfkammern herstellen und testen und eine realitätsnahe Modellierung durchführen. Für diese Analyse hat das Team die Dampfkammern jedoch mit den Materialeigenschaften von Aluminium modelliert, allerdings mit einer viel höheren Wärmeleitfähigkeit, um eine Vorstellung von den Auswirkungen zu bekommen. Dr. Alpert merkt an, dass „die wichtigste Erkenntnis ist, dass die Verwendung von Dampfkammern die Temperaturgleichmäßigkeit des Sorptionsmittels verbessern kann, wenn wir zu einem Dampfkammerbett anstelle eines Aluminiumbettes wechseln, während die durchschnittliche Temperatur des Sorptionsmittels größtenteils gleichbleibt“.

» LEISTUNGS-SENSITIVITÄTSANALYSE

Zusätzlich zu den Designstudien versuchte das NASA-Team auch, die Wärmeleitfähigkeit des Sorptionsmittels selbst zu erhöhen. Anhand des thermischen Modells des ursprünglichen AC-TSAC-Designs stellte das Team fest, dass die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Sorptionsmittels keine große Auswirkung auf die durchschnittliche Temperatur des Sorptionsmittels hatte, aber die Temperaturgleichmäßigkeit in hohem Maße verbesserte. „Das zeigt uns, dass wir auf jeden Fall in die richtige Richtung gehen, und wir konzentrieren einen Großteil unserer Entwicklungsarbeit darauf“, so Dr. Alpert.

Als das Team die Wärmeleitfähigkeit in ihrem Modell eines zylindrischen Bettes mit Dampfkammer erhöhte, zeigten die Simulationsergebnisse eine große Verbesserung der Temperaturgleichmäßigkeit des Sorptionsmittels im gesamten Bett.

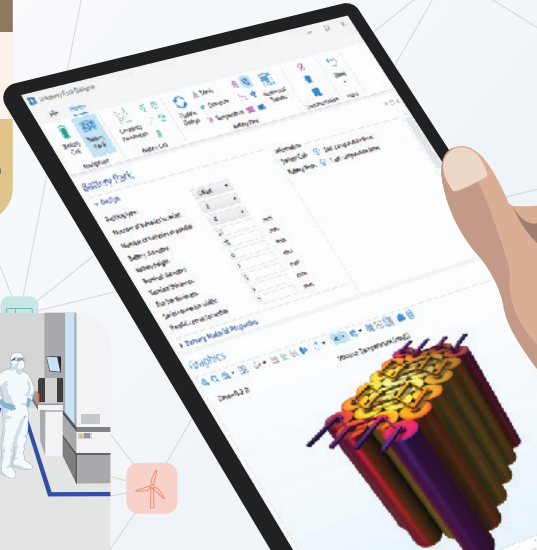
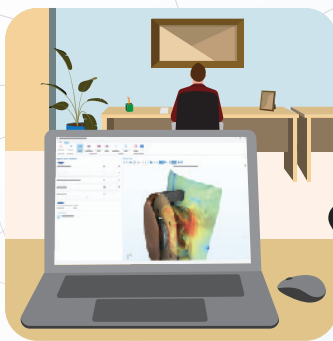
» KOMBINATION VON SIMULATION UND EXPERIMENT FÜR BESSERE DESIGNS

Dr. Alpert und ihrem Team ist es gelungen, ein thermisches Modell des bestehenden AC-TSAC zu erstellen und mit Testdaten zu validieren. Anhand des validierten Modells konnten sie dann bestimmen, welche Designparameter geändert werden mussten, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Durch die Simulation erfuhr das Team, dass externe Heizelemente die Systemkomplexität und das Fehlerpotenzial verringern, dass Dampfkammern eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben und dadurch die Temperaturgleichmäßigkeit des Sorptionsmittels verbessern und dass sie sich weiterhin auf die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Sorptionsmittels konzentrieren sollten.

Das Team wird auch weiterhin das thermische Modell mit experimentellen Daten validieren und Mechanismen wie Wärmeverluste berücksichtigen. ☺

This is an abridged version of the article published at <https://www.comsol.com/story/designing-next-generation-co2-removal-technology-for-better-life-in-space-131721>

Originalbilder mit freundlicher Genehmigung der NASA, modifiziert von COMSOL.



Beschleunigen Sie die Entwicklung mit Simulations-Apps

von FANNY GRIESMER

Immer wieder zeigen Ingenieure aus den unterschiedlichsten Branchen, dass sie mithilfe von Modellierung und Simulation Designs wesentlich schneller iterieren, ihr Verständnis verbessern und F&E-Projekte effektiver planen können. Eine Auswahl solcher Erfolgsgeschichten finden Sie in dieser Ausgabe. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass der Einsatz von Simulation im traditionelleren Sinne spezifisches Fachwissen und Schulungen zur Verwendung der ausgewählten Software erfordert. Daher sind Modellierung und Simulation vor allem für Ingenieure von Nutzen, die die erforderlichen Erfahrungen zum Erstellen von Berechnungsmodellen gesammelt haben, und die Vorteile für das Unternehmen sind geringer als sie sein könnten. Was wäre, wenn der Einsatz von Simulationen über die Forschungs- und Entwicklungsabteilung hinausgehen würde? Simulationsbasierte Entscheidungen könnten Kollegen und Kunden in Außendienst, Fertigung und Labor von großem Nutzen sein und damit weitreichende Auswirkungen auf das gesamte Unternehmen haben.

Beispielsweise könnten Techniker, Vertriebsmitarbeiter und Kunden vor Ort simulationsgestützte Entscheidungen treffen, indem sie Echtzeit-Eingaben wie Wetterdaten, Kundendaten und andere Situationsinformationen nutzen. Kollegen in der Fertigung könnten Produktionsprozesse auf Basis der Anlagenbedingungen optimieren und Designänderungen sofort validieren, was letztlich zu besseren Fertigungsergebnissen für das Unternehmen führt. Forscher im Labor könnten experimentelle Tests sofort mit Simulationen kombinieren, um ihr Verständnis der Ergebnisse zu verbessern und auf der Grundlage ihrer Erkenntnisse schnellere Vorhersagen zu treffen.

Wir wissen bereits, dass Modellierung und Simulation eine effektive Methode sind, um vor der Festlegung eines Projektplans oder Designs einen Einblick in die realen Ergebnisse zu erhalten. In Verbindung mit experimentellen Daten ermöglichen sie ein umfassenderes Verständnis der Ergebnisse. Ein Hindernis für die Ausweitung ihres Einsatzes besteht darin, dass Kollegen und Kunden vor Ort, in der Fabrik und im Labor sofort Antworten benötigen und sich keinen Austausch mit dem Simulationsingenieur an einem völlig anderen Standort leisten können. Wie geht es also weiter?

Anstatt zu akzeptieren, dass es Bereiche gibt, in denen Simulationen nicht eingesetzt werden können, sollten Sie in

Erwägung ziehen, eigene Apps zu entwickeln, die auf Ihren Modellen basieren, aber mit ausgewählten Eingabefeldern und schnelleren Ergebnissen. Die Entwicklung und Verteilung eigener Simulations-Apps ist wie ein persönlicher Simulationsexperte in der Tasche Ihrer Mitarbeiter und Kollegen, den diese genau dann konsultieren können, wenn sie Antworten benötigen, unabhängig davon, wo sie sich befinden. Die über die Apps gesammelten Daten aus der Praxis können auch an die Konstruktions- und Simulationsingenieure im Büro zurückgesendet werden, damit diese ihre Modelle validieren und verbessern können.

Die Werkzeuge zum Erstellen und Bearbeiten von Simulations-Apps aus Ihren Modellen sind in der COMSOL Multiphysics Software enthalten. Es gibt integrierte Funktionen zum schnellen Anpassen der Benutzeroberfläche Ihrer App, aber Sie können auch Ihren eigenen Code schreiben, wenn Sie dies bevorzugen. Für Apps, die Ergebnisse blitzschnell anzeigen, können Sie die Vorteile des maschinellen Lernens nutzen. Um Ihre Simulations-Apps denjenigen zur Verfügung zu stellen, die sie benötigen, gibt es zwei Möglichkeiten: Sie können sie zu eigenständigen Dateien kompilieren, die jeder weltweit ausführen kann, oder sie in Ihrer eigenen COMSOL Server Umgebung hosten und den Zugriff über einen Webbrowser verwalten. Jede Methode hat ihre Vorteile – Sie haben die Wahl.

Simulations-Apps erfüllen natürlich auch innerhalb des allgemeinen F&E-Workflows einen Zweck, indem sie Produktivitätssteigerungen ermöglichen, da Ingenieure Designiterationen sehr schnell testen können und das kollektive Wissen innerhalb des gesamten Unternehmens verbessert wird. Manchmal ist der Autor der App auch der Nutzer der App. Durch die Erstellung einer optimierten Benutzeroberfläche für ein Modell können Sie ebenfalls Zeit sparen. Die Möglichkeiten sind endlos und anpassbar – von Ihnen! – und lassen sich auf nahezu jeden Kontext übertragen. COMSOL entwickelt oder kontrolliert die Apps nicht für Sie, sondern überlässt Ihnen diese Freiheit.

Unternehmen, die eigene Apps entwickeln und vertreiben, können die Vorteile simulationsbasierter Entscheidungsfindung auf mehr Mitarbeiter im F&E-Workflow und sogar auf weit entfernte Kollegen und Kunden ausweiten. Das Ergebnis ist eine effektive Zusammenarbeit und beschleunigte Innovation. ©