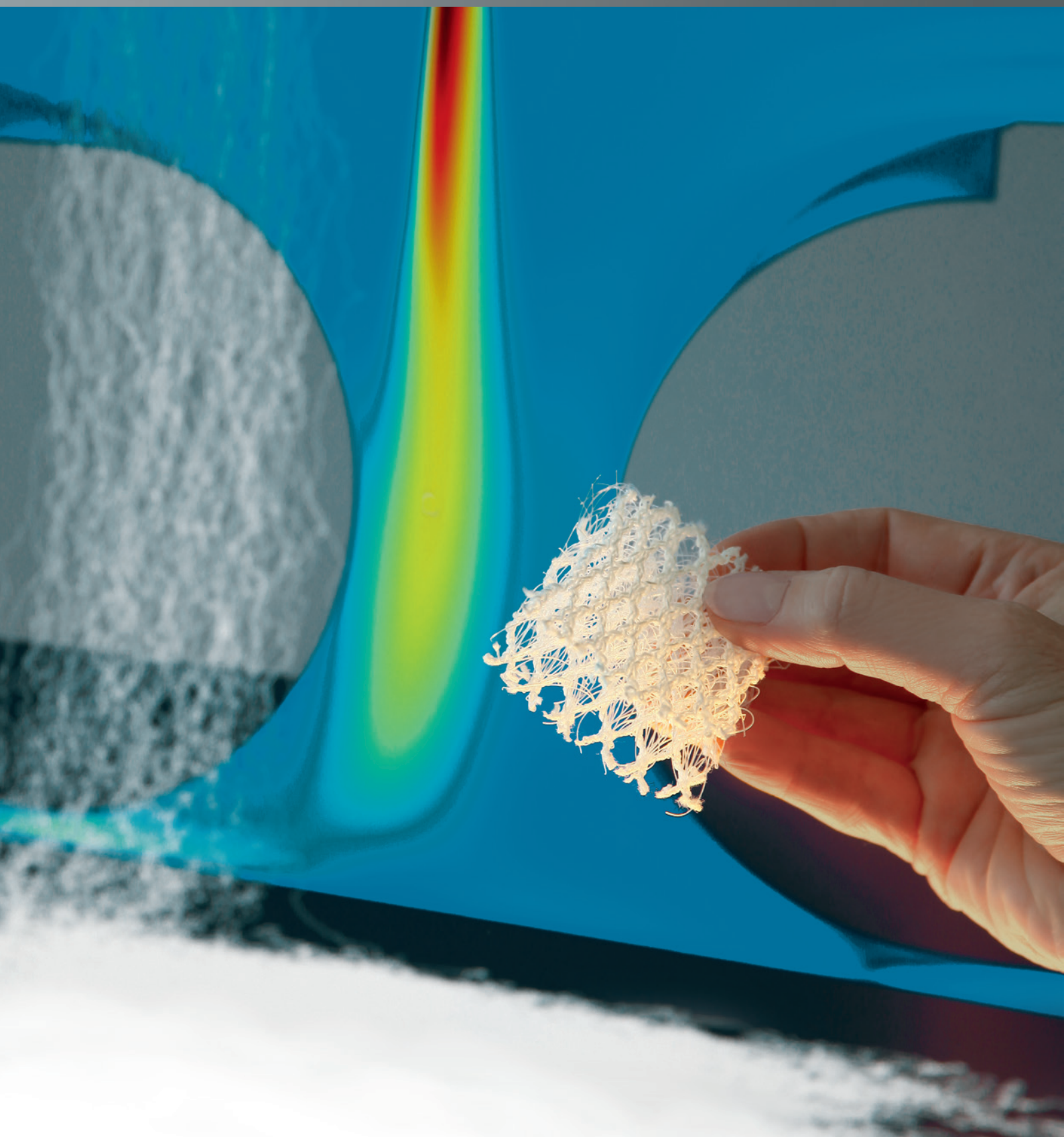




# TRANSPORTVORGÄNGE



DR. DIETMAR HIETEL  
DR. RAIMUND WEGENER  
ABTEILUNGSLEITER



## MATHEMATISCHE MODELLIERUNG, SIMULATION UND OPTIMIERUNG VON TRANSPORTVORGÄNGEN

Unsere Abteilung Transportvorgänge modelliert komplexe industrielle Fragestellungen und entwickelt effiziente Algorithmen zur numerischen Simulation und Optimierung dieser Probleme. Die Aufgabenstellungen liegen im technisch-naturwissenschaftlichen Kontext (Strömungsdynamik, Strukturmechanik, Strahlungstransport, Optik etc.) und führen in der Modellierung auf partielle Differentialgleichungen, die meist als Transportgleichungen zu charakterisieren sind.

Aus Sicht der industriellen Kunden geht es typischerweise um die Auslegung von Produktionsprozessen und die Optimierung von Produkten. Unser Angebotsspektrum erstreckt sich von Kooperationsprojekten mit den ingenieurwissenschaftlich ausgerichteten FuE-Abteilungen der Partnerfirmen über Studien mit Auslegungs- und Optimierungsvorschlägen bis hin zu Softwarelösungen – vom Baustein bis zum kompletten Tool.

Im Jahr 2018 waren wir ähnlich wie in den Vorjahren mit einem ausgeglichenen Haushalt wirtschaftlich erfolgreich. Wissenschaftlich hat unsere Abteilung ihre Aufstellung nochmals verbessert, was sich u. a. in einer verstärkten Publikationsaktivität dokumentiert. Daraus resultierend konnten wir neue öffentliche Mittel für längerfristige Forschungsvorhaben einwerben.

### Kontakt

dietmar.hietel@itwm.fraunhofer.de  
raimund.wegener@itwm.fraunhofer.de  
www.itwm.fraunhofer.de/tv

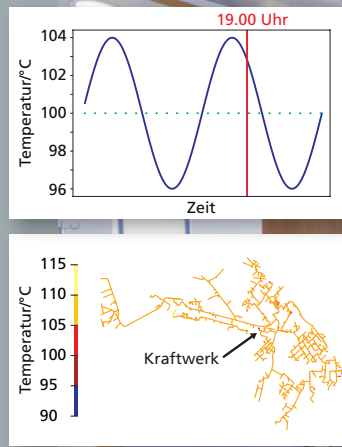
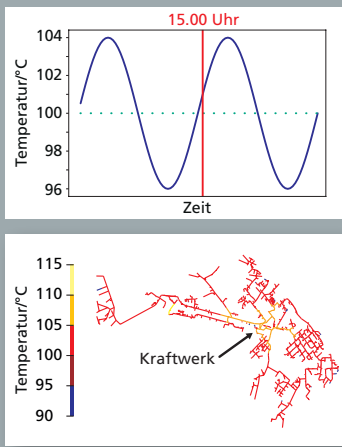


---

## SCHWERPUNKTE

- Flexible Strukturen
  - Strömungsdynamische Prozessauslegung
  - Gitterfreie Methoden
  - Energienetze und Modellreduktion
- 





© Technische Werke Ludwigshafen

1

## MIT DYNAMISCHER SIMULATION EFFIZIENZ VON FERNWÄRMENETZEN STEIGERN

1 *Dynamische Simulation des Teilnetzes in Ludwigshafen: Einspeisetemperatur im Kraftwerk (oben), Temperatur im Fernwärmenetz (unten)*

Im BMWi geförderten Projekt DYNEEF arbeiten wir gemeinsam mit der GEF Ingenieur AG und den Technischen Werken Ludwigshafen (TWL) an der »Dynamischen Netzsimulation zur Effizienzsteigerung in der Fernwärmeerzeugung«. In diesem Rahmen wurde ein Softwaretool zur Netzwerksimulation entwickelt, getestet und für die Betriebsoptimierung der TWL bereitgestellt.

Fernwärmenetze dienen der Versorgung mit Wärme und Warmwasser. Die Betreiber von Fernheizkraftwerken (FHKW) erwirtschaften einen Teil ihres Erlöses durch den Verkauf von Strom, der durch Kraft-Wärme-Kopplung parallel zur Wärmeerzeugung anfällt. Die Einbeziehung und dynamische Regelung des Fernwärmenetzes als Energiespeicher hilft, Turbinen effizient zu betreiben und vorhandene Speicherkessel optimal einzusetzen.

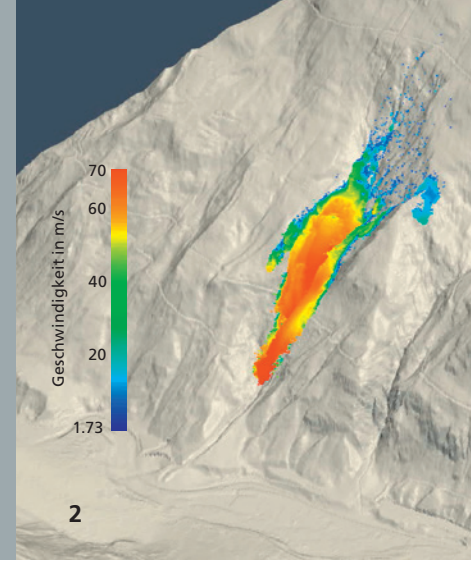
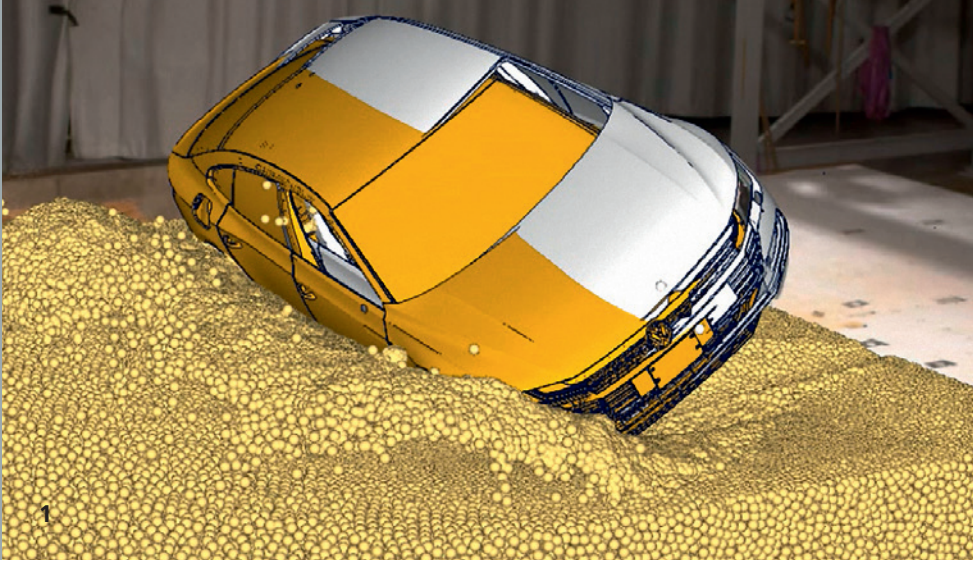
### Software simuliert und optimiert Betrieb von Fernheizkraftwerken und Wärmenetzen

Gegenwärtige Software zur Betriebsunterstützung von FHKW beschäftigt sich entweder mit dem optimalen Einsatz der lokalen Betriebsmittel – wobei das Fernwärmenetz nur als strukturlose Senke behandelt wird – oder die Software betrachtet fein orts aufgelöste hydro-thermische Modelle des Leitungsnetzes, um die Versorgung aller Kunden zu garantieren. Dies geschieht meist jedoch, ohne die Simulation in ein Gesamtbild mit schwankenden Betriebsbedingungen einzubinden.

Die dynamische Simulation des Fernwärmenetzes hat enorme Vorteile: Der Netzbetreiber kann mithilfe der Software zu jeder Zeit sowohl die Temperatur als auch die Strömungsverhältnisse an jedem Ort im Fernwärmenetz auslesen. Damit regelt er die am Kraftwerk bereitgestellte Vorlauf-temperatur und den in das Netz gepumpten Massenfluss und verhindert so beispielsweise, dass Gasturbinen zur Wärmeproduktion teuer zugeschaltet werden müssen.

### Mathematik hinter der Software schafft digitalen Zwilling

Klassische Methoden zur Lösung der schwankenden thermohydraulischen Gleichungen sind zu ungenau bzw. aufwändig, um im Betrieb des Fernwärmenetzes Regelungsvorschläge zu liefern. Deshalb haben wir im Projekt ein eigenes numerisches Verfahren entwickelt, bei dem die Leitungen nicht zusätzlich unterteilt werden. Per modellprädiktiver Regelung und automatischem Differenzieren lassen sich so Optimierungshorizonte von einigen Tagen bewältigen. Auf Basis der Software schaffen wir ein digitales Abbild real existierender Fernwärmenetze und einer automatischen Leitstandregelung, denn das wird im Zuge der Dezentralisierung von Einspeisepunkten notwendiger denn je.



## MIT MESHFREE NICHT-NEWSTONSCHER FLÜSSIGKEITEN SIMULIEREN

Mit MESHFREE stellen wir in Kooperation mit dem Fraunhofer SCAI seit 2018 ein Softwareprodukt zur gitterfreien Simulation physikalischer Prozesse bereit. Die Software bündelt die Expertise beider Institute im Bereich des gitterfreien wissenschaftlichen Rechnens und hat ein breites Anwendungsspektrum.

### Die Finite-Pointset-Methode als Entwicklung unseres Instituts

Mit gitterfreien Simulationen erweitern wir den Anwendungshorizont von numerischer Modellierung. Die Finite-Pointset-Methode (FPM) ist eine originäre Entwicklung des ITWM und wird seit 2000 in Projekten mit internationalen Partnern eingesetzt. Die Methode haben wir zuerst für die Modellierung von Airbagentfaltung eingesetzt.

Die Abwesenheit von Rechengittern spart Vorbereitungszeiten von Simulationen. Wie modelliert man Regenwasserströme, wie die Wasserdurchfahrt eines Autos? Wie legt man schwimmende Pontonbrücken aus? Wie optimiert man Freistrahlturbinen (Pelton-turbinen) in Wasserkraftwerken? Die Anwendungsbeispiele sind vielfältig und FPM ist im Bereich der Strömungen mit freien Oberflächen und Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) gegenüber gitterbasierten Methoden klar im Vorteil.

### Simulation von granularen Medien ganz ohne Gitter

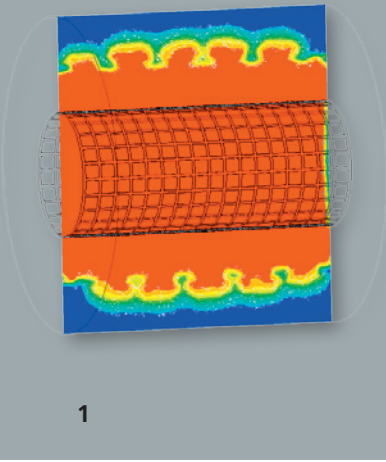
Wir erweitern deutlich den Fokus gitterfreier Simulationen. Denn zum einen setzen wir auf völlig neue Applikationen, z. B. Beispiel Prozesse in der Lebensmittelindustrie oder in der Verfahrenstechnik. Zum anderen haben wir eine größere Bandbreite an Materialien im Blick. Wir fokussieren neben numerischer Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) auch Nicht-Newton'sche Fluide – beispielsweise Schäume, Teig oder Polymerschmelzen.

Auch die Dynamik von granularen Medien wie Sand, Kies, Schnee, Getreide etc. modellieren wir mit MESHFREE. Dies ist z. B. Teil eines DFG-Projektes mit der Uni Innsbruck (Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau). Neben dem einfachen Drucker-Prager-Modell verankern wir hypoplastische Beschreibungen bzw. Barodäsie (komplexe, nichtlineare, dafür sehr präzise Formulierungen von Bodenverhalten) in MESHFREE. Zudem setzen wir mit dem Automobilhersteller VW die Anbindung an das Softwarepaket VPS (Virtual Performance Solution) der ESI Group um, zum Beispiel um Rollover-Vorgänge – also das Überschlagen von Fahrzeugen – auf sandartigen Untergründen zu simulieren. MESHFREE übernimmt die granulare Phase, VPS die Deformation des Fahrzeugs.

1 Seitliches Überschlagen eines Fahrzeugs im Sand: Vergleich Experiment und Simulation.

2 Simulation der Wolfsgruben-Lawine (13. März 1988), Geodaten: mit freundlicher Unterstützung der BFW Österreich.





1

1 CFD-Simulation einer virtuellen Garnspule im Färbebad



2

2 Gefärbte Garnspulen in der Textilproduktion

## MACHINE LEARNING IN DER TEXTILINDUSTRIE

Die Anforderungen an die Textilindustrie ändern sich dramatisch. Der Trend geht in vielen Bereichen zur Individualisierung, ähnlich wie beispielsweise beim Autokauf. Verbraucher fordern vermehrt maßgeschneiderte Produkte. Dieser Umbruch im Konsumentenverhalten ist für europäische Textilunternehmen lukrativ, da die kundenspezifische Herstellung von Produkten mit kleinen Losgrößen zu einer Rückverlagerung der Produktion nach Europa führt. Dafür notwendig ist jedoch die Digitalisierung der Produktion, die wir mit hybriden simulationsbasierten Machine Learning (ML)-Methoden unterstützen.

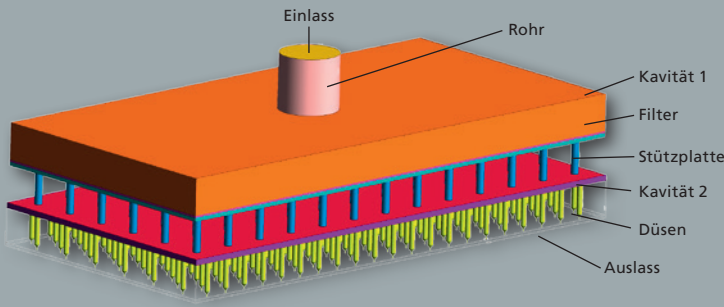
### Datenbasiertes Machine Learning allein reicht nicht aus

Beim datenbasierten Machine Learning entwickeln wir statistische Lernalgorithmen, die Muster und Gesetzmäßigkeiten in vorgegebenen Daten erkennen. Die Güte der ML-Algorithmen hängt dabei entscheidend von der Qualität und Quantität der vorhandenen Daten ab. Für die Qualitätskontrolle werden in der Textilindustrie in der Regel genügend Messdaten erhoben. Jedoch liegen in den seltensten Fällen ausreichend verwertbare Daten vor, die die Prozessparameter mit der Produktqualität verknüpfen. Damit können wir ein rein datengetriebenes Machine Learning – vor allem in der Anlagen- und Prozessoptimierung für kundenindividuelle Produktionsverfahren – nicht einsetzen.

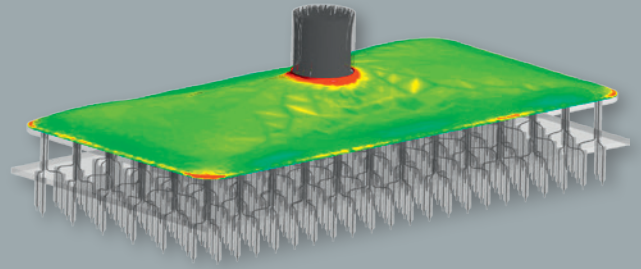
### Hybrides simulationsbasiertes Machine Learning

Um Produktionsprozesse in der Textilindustrie mit ML-Methoden auszulegen und zu optimieren, entwickeln und verwenden wir daher einen hybriden Ansatz. Für das Design von Prozessen und Produkten ist in der Textilindustrie umfangreiches Erfahrungswissen vorhanden. Dieses Expertenwissen formalisieren wir, indem wir die Prozesse durch physikalische Modelle beschreiben und anschließend numerisch umsetzen. Simulationen liefern dann die fehlenden Daten, um geeignete ML-Algorithmen zu entwickeln und mit vorhandenen Messdaten zu verzahnen. ML schließt in diesem Konzept die Lücke zwischen physikalisch basierter Simulation der Produktionsprozesse und dem – in vielen Fällen einem physikalischen Modell nicht zugänglichen – Qualitätsmaß der Endprodukte.

Das neuartige hybride ML-Verfahren demonstrieren wir exemplarisch an der Optimierung von Kreuzspulmaschinen bzgl. einer besseren Durchfärbung der gewickelten Garnspulen im Rahmen des AiF-Projektes DensiSpul.



1



2

## POLYMER-SPINNPAKETE STRÖMUNGSDYNAMISCH AUSLEGEN

Das Schmelzspinnen ist das gängigste Verfahren, um aus Kunststoff Fasern zu produzieren. Wir nutzen Simulations- und Optimierungsmethoden, um unsere Kunden bei der Entwicklung, Auslegung und Verbesserung von Spinnpaketen zu unterstützen.

Spinnpakete sind bei der Herstellung von synthetischen Fasern und Vliesstoffen im Einsatz. Das Spinnpaket ist ein Metallblock und besteht im Inneren aus Hohlräumen und feinen Kanälen, durch die Polymerschmelze – also geschmolzener Kunststoff – strömt. Die Schmelze wird durch ein Rohr in das Spinnpaket geleitet. In einer ersten Kavität (einem Hohlraum) verteilt sich die Schmelze auf die gesamte Breite des Spinnpaketes. Sie passiert mehrere Lagen von Filtern, die von einer Stützplatte gehalten werden, bevor sie durch feine Kapillaren in der Düsenplatte versponnen wird. So entstehen Fasern, die entweder zu einem Garn aufgewickelt oder zu einem Vliesstoff abgelegt werden.

### Analysis und Simulation liefert Blick ins Innere des Spinnpakets

Am Anfang unserer Arbeit steht immer eine strömungsdynamische Analyse des Ist-Zustandes. Die Strömung im Spinnpaket simulieren wir unter Berücksichtigung des besonderen Verformungs- und Fließverhaltens von Polymeren. Mithilfe spezieller Werkzeuge werten wir dann Verweilzeiten und Druckverläufe aus.

Die Analyse liefert gezielt Hinweise, welche Komponenten des Spinnpaketes verbessert werden müssen. Häufig treten in Hohlräumen deutlich erhöhte Verweilzeiten auf. Dies ist schädlich, da das Polymer nach einiger Zeit unter der Temperaturbelastung zerfällt. Um dies zu verhindern, nutzen wir Formoptimierung für die Auslegung von Bauteilen mit sehr geringer und gleichmäßiger Verweilzeitverteilung. Genauso werden durch die Analyse starke Druckerzeuger sichtbar und die entsprechenden Komponenten können angepasst werden.

Diese simulationsgestützte Analyse ermöglicht einen Blick in das Spinnpaket, der sonst verborgen bleibt. Das ist der entscheidende Vorteil bei der Auslegung, denn alle strömungsdynamischen Größen sind direkt quantifizierbar. Problematische Komponenten lassen sich identifizieren und Modifikationen unmittelbar validieren. Entwicklungszeiten werden kürzer und Unternehmen vermeiden teure Fehlkonstruktionen.

1 Geometrie eines typischen Spinnpaketes

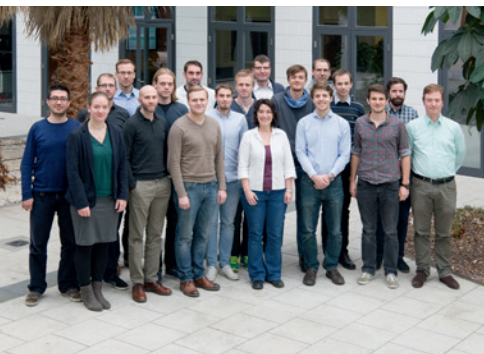
2 Spinnpaket mit optimierter Verteilkavität





## NEWS AUS DER ABTEILUNG

### SEMINAR »MACHINE LEARNING IN DER VERFAHRENS-TECHNIK«



Im November 2018 veranstaltete unsere Abteilung einen Workshop unter dem Titel »Einführung in Machine Learning (ML) in der Verfahrenstechnik«. Das Seminar bot den Teilnehmenden einen gezielten Einstieg in die Welt des Maschinellen Lernens. Im Fokus des Workshops stand die Einordnung der wichtigsten Begriffe – wie Supervised und Unsupervised Learning – sowie ein Überblick, welche ML-Algorithmen typischerweise für Regressions- oder Klassifikationsprobleme eingesetzt werden. Ein Abriss über Deep Learning rundete den theoretischen Hintergrund ab. Dr. Simone Gramsch und Dr. Andre Schmeißer standen mit ihrer Expertise nicht nur in ihren Vorträgen Rede und Antwort, sondern auch in der anregenden Abschlussdiskussion. Die Veranstaltung organisierten wir gemeinsam mit dem langjährigen Partner KOMPETENZ-NETZ VERFAHRENSTECHNIK PRO3 e. V.

### NEUE WEBPRÄSENZ MESHFREE.EU

Mit MESHFREE stellen wir gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI seit 2018 ein innovatives Softwareprodukt zur gitterfreien Simulation physikalischer Prozesse bereit. Auf der englischsprachigen Website meshfree.eu bündeln wir die Expertise der beiden mathematischen Institute im Bereich des gitterfreien wissenschaftlichen Rechnens. Damit sind alle Entwicklungen rund um das Produkt schnell und übersichtlich für Industrie sowie Forschung greifbar. Die Website ist ein Element, die Software auf den Weg zur fixen Größe am Markt zu bringen. Mehr dazu auf Seite 25.



### SYMPOSIUM »WERKZEUGE FÜR EINE FLEXIBLE UND EFFIZIENTE FERNWÄRMEVERSORGUNG«

Das Symposium im März 2018 beleuchtete den aktuellen Wandel in der Fernwärmebranche und zeigte den Teilnehmenden Wege auf, den Betrieb von Fernwärmenetzen zu flexibilisieren und zu optimieren. Der AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. war Veranstalter und das Fraunhofer-Zentrum Kaiserslautern diente als Veranstaltungsort. Das Forschungsprojekt DYNEEF (siehe Seite 24) war Impulsgeber des Events. Darin werden neue Methoden für eine bedarfsorientierte Betriebssteuerung von Fernwärme-Heizkraftwerken entwickelt.



Von vorne, links nach rechts: Dr. Andre Schmeißer, Dr. Tobias Seifarth, Dr. Almut Eisenträger, Dr. Isabel Michel, Sergey Antonov, Dominik Linn, Dr. Norbert Siedow, Dr. Pratik Suchde, Dr. Jaroslaw Wlazlo, Sebastian Blauth, Niklas Lehne, Dr. Raimund Wegener, Dr. Dietmar Hietel, Dr. Jörg Kuhnert, Johannes Schnebele, Markus Rein, Manuel Wieland, Jens Bender, Dr. Robert Feßler, Matthias Eimer, Dr. Jan Mohring, Dr. Christian Leithäuser