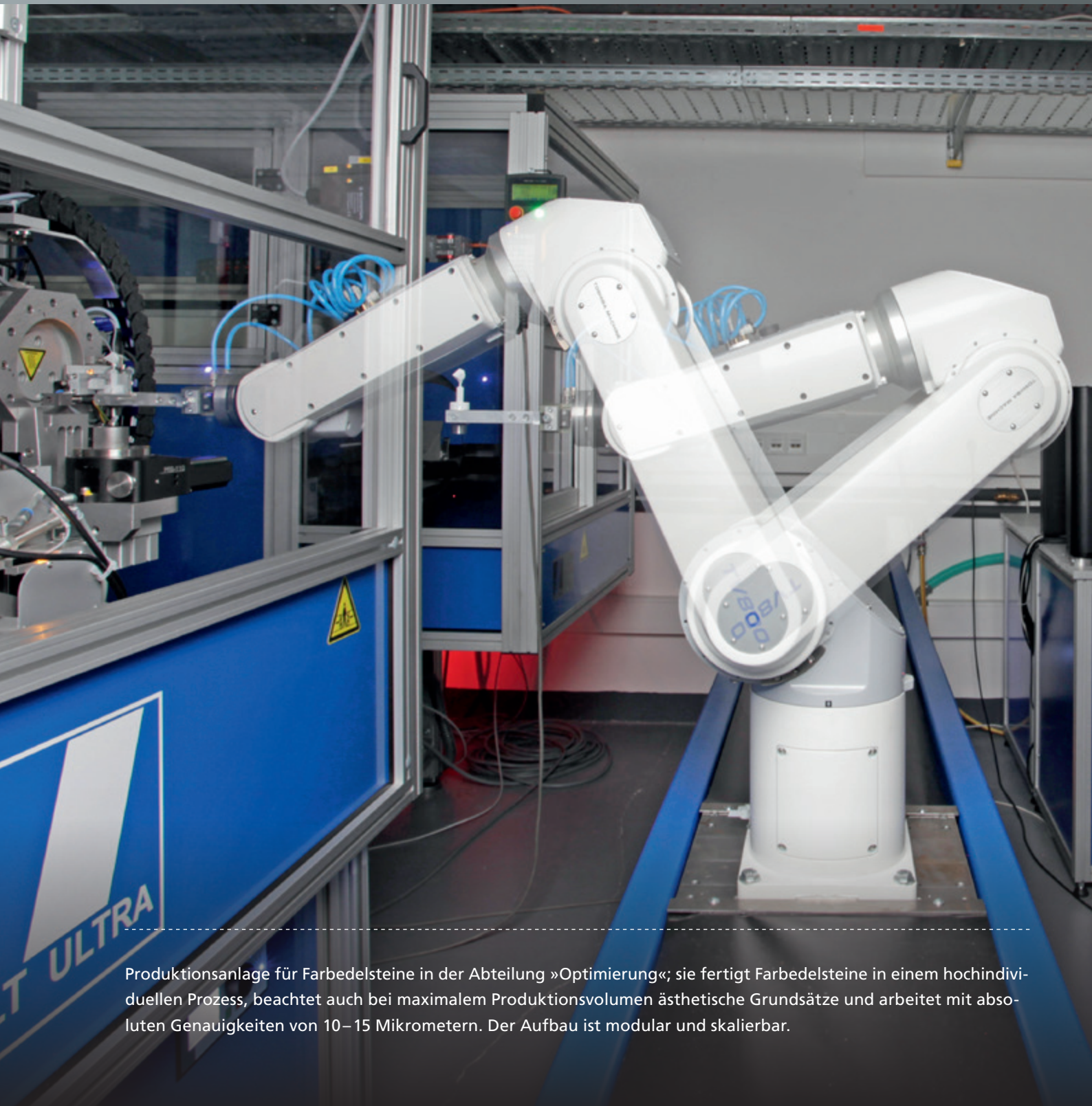




# OPTIMIERUNG



Produktionsanlage für Farbedelsteine in der Abteilung »Optimierung«; sie fertigt Farbedelsteine in einem hochindividuellen Prozess, beachtet auch bei maximalem Produktionsvolumen ästhetische Grundsätze und arbeitet mit absoluten Genauigkeiten von 10–15 Mikrometern. Der Aufbau ist modular und skalierbar.



---

Zentrale Aufgabe der Abteilung Optimierung ist die Entwicklung individueller Lösungen für Planungs- und Entscheidungsprobleme in Logistik, Ingenieur- und Lebenswissenschaften in enger Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie. Methodisch ist die Arbeit durch ein Zusammenspiel von Datenanalyse, Simulation, Optimierung und Entscheidungsunterstützung geprägt. Unter Simulation wird dabei die Bildung mathematischer Modelle unter Einbeziehung von Design-Parametern, Restriktionen und zu optimierenden Qualitätsmaßen und Kosten verstanden. Die Entwicklung und Implementierung von anwendungs- und kundenspezifischen Optimierungsmethoden zur Berechnung bestmöglicher Lösungen für das Design von Prozessen und Produkten sind Kernkompetenzen der Abteilung. Alleinstellungsmerkmal ist die Integration von Simulations- und Optimierungsalgorithmen unter spezieller Berücksichtigung mehrkriterieller Ansätze sowie die Entwicklung und Implementierung interaktiver Entscheidungsunterstützungswerkzeuge. Insgesamt wird Optimierung weniger als mathematische Aufgabenstellung verstanden, sondern vielmehr als kontinuierlicher Prozess, welchen die Abteilung durch die Entwicklung adäquater Werkzeuge unterstützt. Die Zusammenarbeit mit Industriekunden aus unterschiedlichen Branchen reicht von einfachen Beratungsprojekten zur Strukturierung von Entscheidungsprozessen, über die Entwicklung von kundenindividuellen Softwarelösungen für Optimierung komplexer Prozesse bis zur Kreation von Alleinstellungsmerkmalen in Kooperation mit den Auftraggebern.

## **SCHWERPUNKTE**

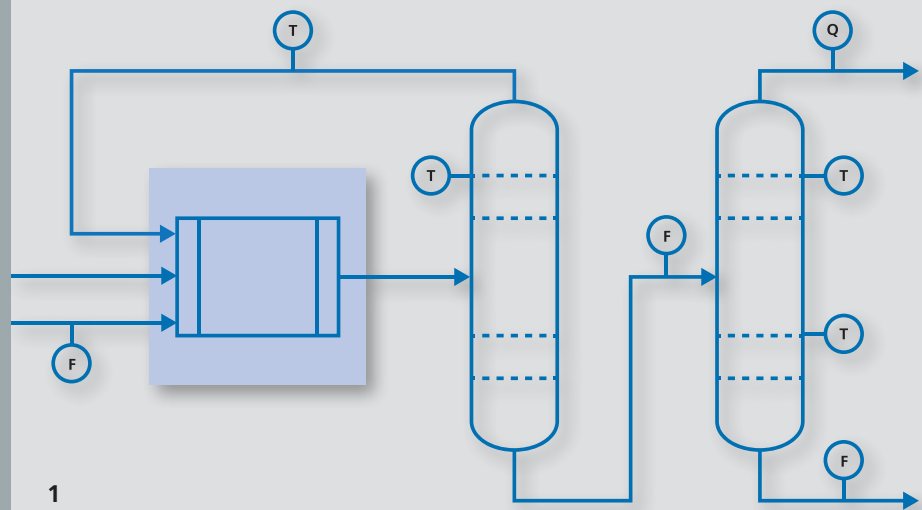
- Medizinische Therapieplanung
- Anordnungs- und Zerlegeprobleme
- Produktionsplanung und ressourceneffiziente Produktion
- Verfahrens- und Prozesstechnik
- Model Learning und Smart Data
- Supply Chain Netzwerke

---

### **Kontakt**

karl-heinz.kuefer@itwm.fraunhofer.de  
www.itwm.fraunhofer.de/opt



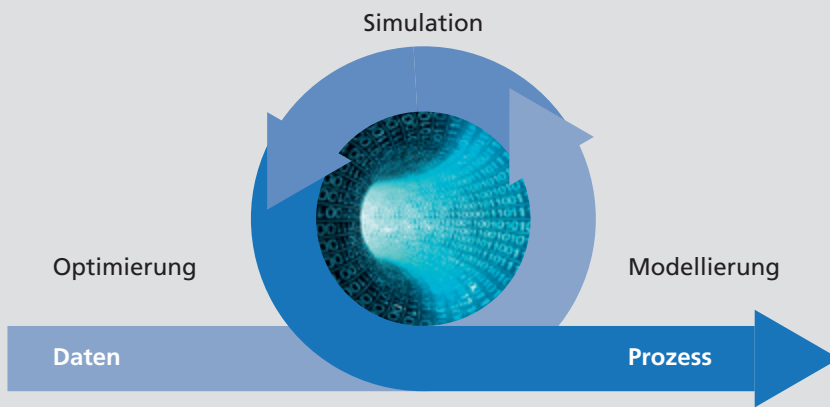


## GREYBOX-MODELLE ZUR OPTIMIERUNG VON GESAMTVERFAHREN

1 Schema eines Fließbilds mit einer Reaktionseinheit zur Stoffumwandlung und zwei Destillationskolonnen zur Aufreinigung; die Kreise symbolisieren Messstellen (T: Temperaturmessung, F: Strommessung, Q: Messung der Kühlleistung)

Die Virtualisierung chemischer Produktionsanlagen in einem Modell und die sich daran anschließende modellbasierte Optimierung sind wichtige Schritte zu Innovation sowie Effizienz- und Qualitätssteigerung. Der Erfolg dieses Vorgehens hängt entscheidend von der Zuverlässigkeit der vorhandenen Modelle ab. In einem bilateralen Kooperationsprojekt entwickelt das ITWM mit der BASF SE Methoden zur hybriden Modellierung, in der physikalisch-chemisches Wissen (»white«) mit datengetriebenen Ansätzen (»black«) in einem Gesamtmodell integriert werden. Diese Methoden werden in einem BASF-eigenen Fließbildsimulator eingesetzt, so dass sie den Prozessingenieuren dort für ihre tägliche Arbeit zur Verfügung stehen.

Ein typischer chemischer Produktionsprozess enthält einen chemischen Reaktor zur Stoffumwandlung. Die Edukte des Reaktors werden einer Aufreinigung zugeführt, die beispielsweise destillativ erfolgen kann. Soll dieser Prozess in einem Fließbildsimulator modelliert werden, sind einerseits Kenntnisse über die chemischen Reaktionen nötig, andererseits muss die Thermodynamik der Auftrennung bekannt sein. In der industriellen Praxis typisch ist die Situation unvollständig bekannter Stöchiometrien und Reaktionskonstanten, wohingegen die destillativen Prozesse eher bekannt sind. Neben diesem physikalischen White-Box-Wissen liegen historische Prozessdaten von verschiedenen Messstellen vor. Die Aufgabe des Projekts besteht darin, Informationen aus den Prozessdaten zu generieren, mit denen die Lücken des physikalischen Modells geschlossen werden können. Dazu wird in einem ersten Schritt der Reaktor durch ein vereinfachtes Short-Cut-Modell ersetzt, das – zusammen mit dem Modell der Aufreinigung – alle vorhandenen physikalischen Gleichungen enthält. Mit diesem Modell werden Ausgleichsrechnungen durchgeführt, mit denen die Vorhersagen des Modells für die Größen, die an der echten Anlage gemessen werden, möglichst gut angepasst werden. Eine Ausgleichsrechnung besteht hier in der Minimierung einer Fehlerquadratsumme, wobei die quadrierten Differenzen zwischen Modellvorhersagen und Messstellen möglichst klein sein sollen. Jeder Term ist mit der inversen Varianz der Messstelle gewichtet. Da Varianzen oft nur vage bekannt sind und die Anpassungen an verschiedene Messgrößen miteinander im Konflikt stehen, enthält dieser Schritt nicht nur eine, sondern einen Satz von Ausgleichsrechnungen, die automatisiert mit optionaler Nutzerinteraktion durchlaufen. Ergebnis dieses Schritts sind verlässliche Softsensordaten an den Ein- und Ausgängen des Reaktors. Der zweite Schritt besteht aus der Modellidentifikation für den ungenügend modellierten Apparat – hier der Reaktor – auf Grundlage der Softsensordaten. Dafür stehen verschiedenste Verfahren zur Verfügung, beispielsweise Regressionsverfahren mit vordefinierten Funktionen, aber auch künstliche neuronale Netze mit Backpropagation-Training. Mit statistischen Methoden sind quantitative Aussagen über Konfidenzintervalle und Vorhersagefehler möglich. Darüber hinaus erlauben diese, Parameter, die nur unzuverlässig geschätzt werden



können, zu trennen von solchen, die mit hoher Genauigkeit identifizierbar sind. Im dritten Schritt wird das datengetriebene Modell aus Schritt zwei in das Fließbild eingefügt und so ein Gesamtmodell für den Prozess generiert. Dieser Schritt ist aus verschiedenen Gründen nicht trivial: Nicht nur die Lösbarkeit des Gesamtsystems muss sichergestellt sein, sondern auch die Extrapolierbarkeit für eine Gesamtprozessoptimierung. Diese wird mit Optimierungsverfahren durchgeführt, die nicht nur der mehrkriteriellen Natur des Problems Rechnung tragen, sondern auch mit Unsicherheiten umgehen können. Hierzu gehören die robuste und die stochastische Optimierung.

Die im Allgemeinen kontinuierliche Unsicherheitsmenge von Modellparametern wird durch eine diskrete Auswahl von Szenarien beschrieben. Die Auswahl der Szenarien geschieht so, dass die Unsicherheitsmenge möglichst repräsentativ abgedeckt wird; dazu stehen Strategien der statistischen Versuchsplanung ebenso zur Verfügung wie randomisierte Verfahren. Die Auswirkung dieser Szenarien auf die Zielfunktion wird berechnet und mittels Sensitivitätsmaßen quantifiziert. Die robuste Optimierung zielt auf eine bestmögliche Gestaltung des schlechtmöglichen Szenarios. Diese Optimierungsstrategie wird mehrkriteriell durchgeführt, unter Einbeziehung konkurrierender Ziele. Darüber hinaus können die oben erwähnten Sensitivitätsmaße als Zielfunktion definiert werden, die ihrerseits – zusätzlich zu den bereits vorhandenen Zielen – minimiert (für möglichst wenig Sensitivität auf die Unsicherheiten) oder maximiert (für eine möglichst große Sensitivität, wie sie beispielsweise für die Versuchsplanung von Interesse ist) werden soll. Auf diese Weise ist es möglich, die Kosten für ein mehr oder weniger sensitives Prozessdesign im Verhältnis zu den übrigen betriebsrelevanten Zielen zu untersuchen. Die Praxiserfahrung zeigt, dass oft schon verhältnismäßig kleine Anpassungen im Prozessdesign ausreichen, um einen erheblichen Gewinn an Robustheit zu erlangen. Für den Fall, dass nach dieser Erstellung des Greybox-Modells die Unsicherheiten in den Modellvorhersagen dennoch zu groß sind, wurde eine modellbasierte mehrkriterielle Versuchsplanung entwickelt, womit einerseits der Informationsgewinn aus Experimenten maximiert wird, andererseits andere betriebsrelevante Ziele bestmöglich erfüllt werden. Ein wesentlicher nächster Schritt besteht im Finetuning der datenbasierten Methoden, so dass Randbedingungen wie Erhaltungsgleichungen leichter integrierbar sind. Dies betrifft beispielsweise die Topologie der hier eingesetzten künstlichen neuronalen Netze. Ferner ist von Interesse, inwieweit die White-Box-Umgebung dafür sorgt, dass die Konfidenzintervalle, die aus der datengetriebenen Modellidentifikation resultieren, verkleinert werden. Dies ist insbesondere für die Gesamtprozessoptimierung unter unsicheren Modellparametern wichtig.

**2** *Aus Daten lernen: Typischer Workflow mit Modellierung, Simulation, Optimierung, in den Daten für realitätsnahe Modelle einfließen*



Termin zusammenstellen		Optimale Terminkombination wählen					
Datum	Uhrzeit	OP-Raum	Chirurgen Endo	Assistenten Endo	Pfleger	Reinigungskräfte	Kommentar
Di., 14.03.2017	17:30	OP-Raum 3-(14.0)	Chirurg Endo 3-(1)	Assistent Endo 1, Assi Krankenträger 1-		Reinigung 1, Rein	
Mi., 15.03.2017	08:00	OP-Raum 3-(15.0)	Chirurg Endo 3-(1)	Assistent Endo 1, Assi Krankenträger 1-		Reinigung 1, Rein	
Mi., 15.03.2017	17:30	OP-Raum 3-(15.0)	Chirurg Endo 3	Assistent Endo 1	Krankenträger	Reinigung 1	
Do., 16.03.2017	08:00	OP-Raum 3-(16.0)	Chirurg Endo 2	Assistent Endo 1, Assi Krankenträger 1-		Reinigung 1, Rein	
Do., 16.03.2017	17:30	OP-Raum 3-(16.0)	Chirurg Endo 3-(1)	Assistent Endo 1, Assi Krankenträger 1-		Reinigung 1, Rein	

1

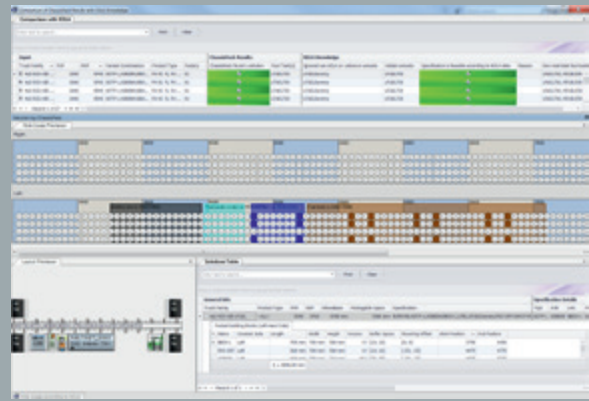
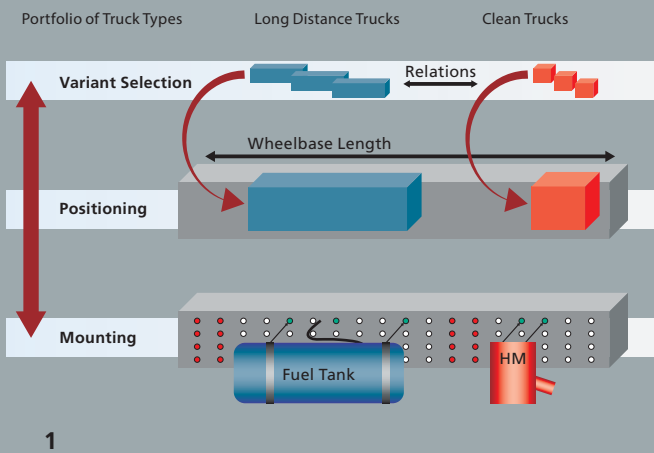
## INTERAKTIVE OP-PLANUNGSASSISTENZ

### 1 Optimierte Terminvorschläge mit der Möglichkeit zur Nachjustierung

Moderne Operationssäle sind wegen immer teurerer technischer Geräte heute zentraler, oft sogar der größte Faktor in der Kostenzusammensetzung operativer Eingriffe. Um ein Krankenhaus oder eine Belegklinik mit eigener OP-Ausstattung wirtschaftlich betreiben zu können, strebt man deshalb eine möglichst hohe Auslastung der OP-Räume an; aus diesem Blickwinkel würde man den Plan am liebsten mit den anstehenden OPs so auffüllen, dass diese den ganzen Tag über ohne Unterbrechung aufeinanderfolgen.

Andererseits treten bei der OP-Planung Bedingungen und Abhängigkeiten auf, welche die Planung erheblich verkomplizieren: Eingriffe benötigen Spezialgerät, das nicht in allen OP-Sälen oder nur in begrenzter Stückzahl verfügbar ist; Chirurgen, Pflegepersonal und die Patienten selbst sind wegen anderer Termine, Urlaub oder Schichtplanung unterschiedlich verfügbar, medizinische Gründe können die Tageszeit der OP einschränken, und nach der OP muss auch Bettenplatz für den Patienten vorhanden sein. Eine besondere Herausforderung liegt darüber hinaus in der Schwankung der OP-Dauer: Auch wenn eine Blinddarm-Operation normalerweise in 10 Minuten erledigt ist, kann sie bei unverhofft auftretenden Komplikationen deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen. Bei einer Planung auf Basis von einfachen Mittelwerten können so erhebliche Wartezeiten entstehen, schlimmstenfalls müssen OPs sogar auf den nächsten Tag verschoben werden.

In einem vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung geförderten Projekt mit der Berliner Softwarefirma Imilia GmbH, die mit Timerbee eine Terminverwaltungssoftware für das Gesundheitswesen im Portfolio hat, entwickelt die Abteilung Optimierung eine interaktive Assistenzkomponente für die OP-Planung. Sowohl in der langfristigen Planung, also bei der Vergabe einzelner Termine an die Patienten, als auch bei der Feinplanung des nächsten Tages werden dem OP-Planner intelligente Planungsvorschläge unterbreitet, die sämtliche oben beschriebenen Abhängigkeiten berücksichtigen und zudem das Verspätungsrisiko durch optimierte Reihenfolgen und geschickte Aufteilung riskanter OPs auf verschiedene OP-Säle minimieren. Eine seitens OP-Planner an die Software gestellte Terminanfrage wird direkt an die im ITWM entwickelte Planungskomponente übertragen, die daraus unter Zuhilfenahme der von Timerbee bereitgestellten Stammdaten ein mathematisches Modell des Planungsproblems erstellt. Mittels Constraint Programming wird dessen Lösungsraum exploriert und daraus eine überschaubare Anzahl optimierter und strukturell verschiedener Vorschläge ausgewählt, die dann dem Nutzer zur Auswahl und interaktiven Anpassung präsentiert werden. Schnelle Datenverbindungen und eine effiziente Implementierung der Constraint-Suche sorgen für eine flüssige Interaktion ohne merkliche Verzögerungen in der Software.



## VOLVO GTT CHASSISPACK: KOMPLEXITÄTSREDUZIERUNG BEIM LKW-CHASSIS-DESIGN

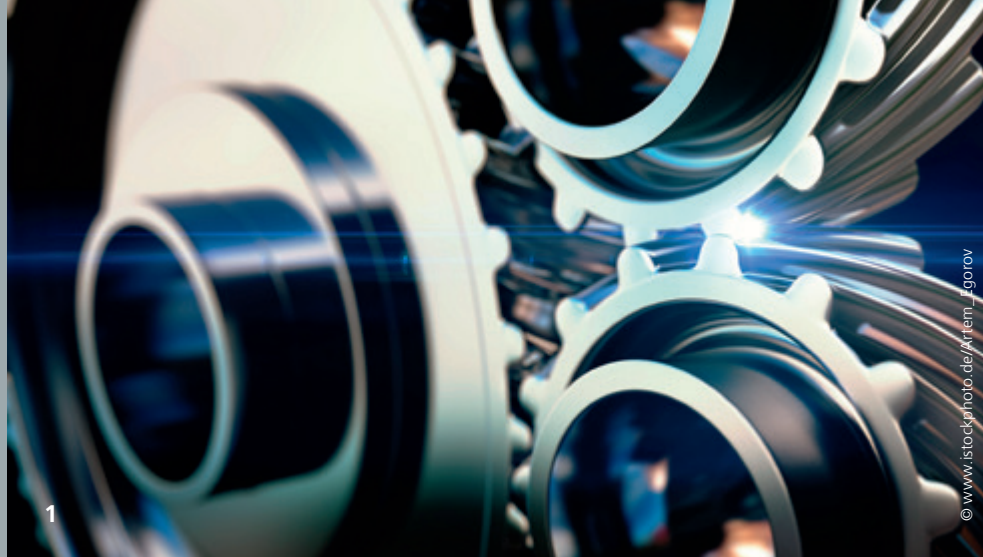
Volvo Group Trucks Technology (GTT) bietet jedem Kunden seinen Wunsch-Lastkraftwagen an, den sich der Käufer selbst aus zahlreichen Lkw-Design-Features (Varianten) zusammenstellen kann. Alle möglichen Produktkonfigurationen sind potenziell wählbar, es sei denn, es liegt ein dokumentierter Grund vor, der Variantenkombinationen explizit verbietet. Dies ermöglicht es Volvo GTT, Lastkraftwagen für unterschiedliche Kundenbedürfnisse anzubieten, erfordert jedoch die Verwaltung einer sehr großen Anzahl potenzieller Lkw-Konfigurationen.

Dazu werden Variantenkombinationen, die nicht erlaubt sind, explizit mit sogenannten Restriktionen in einer Wissensdatenbank dokumentiert. Da dieses implizite Wissen nicht direkt aus den Daten ablesbar ist, sind Design-Aufgaben häufig hochgradig komplex. Werden zum Beispiel neue Lkw-Bauteile eingeführt, müssen die Ingenieure dafür sorgen, dass alle unzulässigen Lkw-Spezifikationen dokumentiert sind. Dies erfordert viele Absprachen und Meetings zwischen Ingenieuren der involvierten Abteilungen. In der langjährigen Zusammenarbeit zwischen Volvo GTT und der Abteilung Optimierung des Fraunhofer ITWM wurden viele Fallstudien durchgeführt, die eine Reihe von Algorithmen und Software-Tools zur Unterstützung der Ingenieure hervorgebracht haben. In der aktuellen Projektphase werden einige der Algorithmen als Webservices bereitgestellt, die in zahlreichen von Ingenieuren routinemäßig eingesetzten Volvo-Tools integriert werden sollen.

Das Ergebnis einer solchen Fallstudie ist beispielsweise ein Algorithmus, der aus dem explizit dokumentierten Wissen implizite Regeln ableitet. Dieser Algorithmus ist die Grundlage der Software »ChassisPack Hole Explorer«, die die Ingenieure bei ihrer Analyse, welche Montagelöcher auf dem Chassis durch welche Bauteile blockiert sind, nutzen können. In einer konkreten Fallstudie konnte die Software helfen, Erdungspunkte für neue elektrische Einheiten zu finden, die auf allen Lkw-Layouts verwendet werden können. Weitere Fallstudien haben zu einem Tool namens »ChassisPack Analyzer« geführt, das für What-If-Studien genutzt wird – beispielsweise für die Suche nach einer reduzierten Variantenwahl, die sich der Pareto-Front von Lkw-Layouts annähert. Das Anbringen von Bauteilen (engl. Packaging) im Bereich des Chassis wird hier als ein 1.5D-Packungsproblem modelliert, das einen Constraint-Programming-Solver verwendet, um Positionen für Lkw-Bauteile zu erzeugen und das Kraftstoffvolumen zu maximieren, indem der größtmögliche Tank bestimmt wird.

1 Parametrierung des Lkw-Chassis auf den verschiedenen Leveln

2 Analyse des Lkw-Layouts mithilfe des Chassis-Pack Analyzers



## TRIDeff: SIMULATION TRIBOLOGISCHER EIGENSCHAFTEN VON VERBUNDWERKSTOFFEN

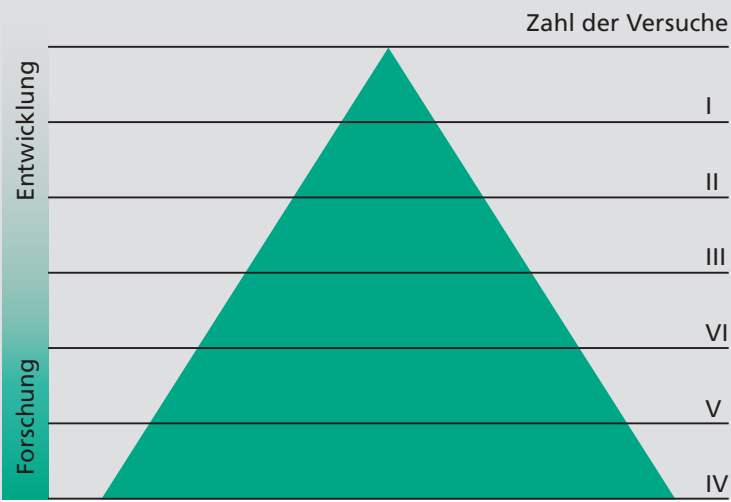
**1** *Getriebebauteile: Die an den Reibflächen erzeugte Wärme, zusammen mit stark temperaturabhängigen Eigenschaften von dünnen tribologisch aktiven Filmen auf diesen Flächen, führt zu einem komplexen Zusammenspiel von Belastungskollektiven und Materialeigenschaften, das mit rein experimentellen Methoden kaum zu analysieren ist.*

Die Energiewende sowie die stetig steigenden Rohstoffpreise führen dazu, dass Energie- und Rohstoffeffizienz ein immer größeres Gewicht bei den Kriterien für eine nachhaltige Forschung und Entwicklung in der Industrie einnehmen. Dies gilt insbesondere für Bauteile, die durch Reibung beansprucht werden. Beispielsweise entsteht in einem typischen Pkw der Energieverlust zu 35 Prozent durch Reibung. Der wissenschaftliche Zweig, der sich mit solchen Systemen auseinandersetzt, wird Tribologie genannt.

Tribologische Eigenschaften sind generell Systemeigenschaften, da Belastungskollektive und Wärmehaushalt von entscheidender Bedeutung sind. Generell gibt es daher eine Vielzahl von Parametern, die das Verhalten tribologischer Systeme beeinflussen. Das macht es in der Material- und Bauteilentwicklung umso schwieriger, von einer tribologischen Labor-Prüfung mit einer Standard-Bauteilgeometrie auf das tatsächliche Verhalten in realen tribologischen Systemen zu schließen.

In der Praxis wird heutzutage anhand von einfachen Prüfanordnungen wie Pin-on-Disc oder Block-on-Ring eine Materialauswahl oder -vorauswahl getroffen und im weiteren Verlauf der Entwicklung die Prüfanordnung in sechs Kategorien bis zum Feld immer praxisnäher gestaltet. Im gleichen Zuge wird die Materialauswahl weiter eingegrenzt und somit die Anzahl der notwendigen Experimente Kategorie für Kategorie reduziert.

Im DFG-Projekt TriDeff, welches in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe an der TU Kaiserslautern bearbeitet wird, entwickelt das ITWM neue Optimierungs-Methoden zur zielgerichteten und damit schnelleren Materialvorauswahl von reibmindernden Verbundwerkstoffen, die in dünnen Schichten auf Bauteiloberflächen aufgetragen werden. Die zu untersuchende Materialklasse basiert auf einem polymeren Matrixmaterial (PEEK), das als dünne Schicht auf Bauteiloberflächen aufgebracht wird. In solche Matrixmaterialien werden Fasern (z. B. Kohle- oder Glasfasern) sowie Mikro- und Nanopartikel dispergiert. Da diese Einschlüsse sehr klein sind, hat das Gesamtmaterial nach außen hin homogene Eigenschaften, die jedoch stark abhängen von deren Verteilung und Ausrichtung im Film und damit auch vom Beschichtungsprozess. Zunächst wird deshalb eine Modellbeschreibung der Eigenschaften der neuen Verbundwerkstoffe konstruiert, um diese dann schneller zu charakterisieren und deren Verhalten unter tribologischer Belastung aus ihrer Zusammensetzung vorherzusagen. Das Hauptaugenmerk liegt zunächst auf den mechanischen (Festigkeit), thermischen (Wärmeleitfähigkeit und -ausdehnung) sowie tribologischen Eigenschaften.



Die hohe Flexibilität in Zusammensetzung und Eigenschaften von Verbundwerkstoffen ermöglicht in vielen Fällen eine gezielte Optimierung von Materialeigenschaften für spezifische Anwendungsszenarien. Das Heben dieser Optimierungspotenziale ist aufgrund dieser großen Flexibilität mit rein experimentellen Methoden aber kaum zu leisten. Das gilt umso mehr, je komplizierter die Eingangsmaterialien selbst sind. So weist der in diesem Projekt als Basismaterial verwendete Kunststoff (PEEK) stark temperaturabhängige Eigenschaften auf, sodass der Temperaturhaushalt im Gesamtsystem – als eine wichtige Systemeigenschaft – sehr genau beschrieben werden muss.

Ein wesentliches Ziel der laufenden Entwicklungen am ITWM in TriDeff ist es, die Auswahl der Zusammensetzung des Verbundmaterials durch Anwendung der mathematischen Theorie der Homogenisierung zu »virtualisieren«, indem aus der Zusammensetzung und einfachen Eigenschaften der Einzelmaterialien, die zu einem Verbund aggregiert werden, das komplexere Verhalten möglicher Varianten des Verbundmaterials vorhergesagt und anwendungsspezifisch optimiert wird. Das übergeordnete wissenschaftliche Ziel ist die Beschreibung von Korrelationsparametern zwischen unterschiedlichen Kategorien tribologischer Prüfungen unter besonderer Berücksichtigung des Wärmehaushalts. Konkret soll der Zusammenhang zwischen Kategorie VI und V (Abb. 2) vollständig beschrieben werden. Daraus wird dann ein FE-Modell als eine Art digitaler Demonstrator für Kategorie V entwickelt und im Experiment an der TU Kaiserslautern validiert.

**2** *Reduktion der möglichen Varianten eines Tribosystems nach Kategorien der tribologischen Prüfung: In Kategorie I werden Feldversuche in realen Systemen durchgeführt, z. B. Langzeitstudien in der Automobilindustrie. In Kategorien II, III und IV (Prüfstand mit Komplettsystem, Baugruppe, Bauteil) werden Anforderungen an die zu prüfenden Teile systematisch an Kategorie I herangeführt. Die eigentliche Materialentwicklung erfolgt in Kategorien IV, V und VI im Labor mit nachgestellten Bauteiloberflächen oder einfachsten Probekörpern.*