



# OPTIMIERUNG



**PROF. DR. KARL-HEINZ KÜFER**  
**BEREICHSLIETTER**

**PD DR. MICHAEL BORTZ**  
**ABTEILUNGSLEITER**



## **INTERAKTIVE ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG AUF BASIS VON MODELL UND DATEN**

Zentrale Aufgabe des Bereichs 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 unsere Arbeit durch ein Zusammenspiel von Simulation, Optimierung und Entscheidungsunterstützung geprägt. Unter Simulation verstehen wir dabei die Bildung mathematischer Modelle unter Einbeziehung von Design-Parametern, Restriktionen und zu optimierenden Qualitätsmaßen sowie Kosten.

Die Kernkompetenzen unseres Bereichs sind die Entwicklung und Implementierung von anwendungs- und kundenspezifischen Optimierungsmethoden. Diese berechnen bestmögliche Lösungen für das Design von Prozessen und Produkten. Alleinstellungsmerkmale sind die Integration von Simulations- und Optimierungsalgorithmen, die spezielle Berücksichtigung mehrkriterieller Ansätze sowie die Entwicklung und Implementierung interaktiver Werkzeuge für die Entscheidungsunterstützung.

Insgesamt wird Optimierung weniger als mathematische Aufgabenstellung verstanden, sondern vielmehr als kontinuierlicher Prozess, welchen wir durch die Entwicklung passender Tools unterstützen. Besonderes Augenmerk liegt auf der adäquaten Wahl des Modells hinsichtlich Menge und Qualität der verfügbaren Daten. Wir ziehen Methoden des Machine Learning zur Aufbereitung der Daten und zur Kalibrierung von Modellen heran, aber auch zur Modellergänzung und Erklärung nicht explizit modellierbarer Phänomene.

### **Kontakt**

[karl-heinz.kuefer@itwm.fraunhofer.de](mailto:karl-heinz.kuefer@itwm.fraunhofer.de)

[michael.bortz@itwm.fraunhofer.de](mailto:michael.bortz@itwm.fraunhofer.de)

[www.itwm.fraunhofer.de/opt](http://www.itwm.fraunhofer.de/opt)



---

## **SCHWERPUNKTE**

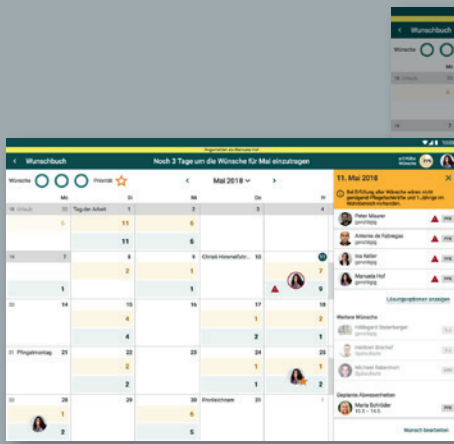
### **Operations Research**

- Produktions- und Ablaufplanung
- Anordnungs- und Zerlegeprobleme
- Versorgungsnetzwerke

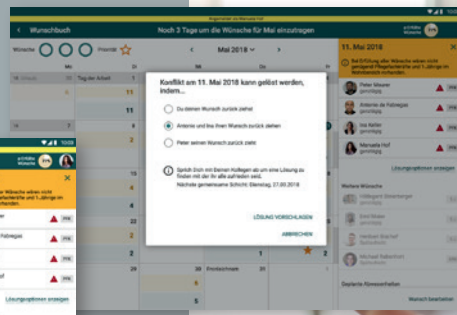
### **Technische Prozesse**

- Verfahrens- und Prozesstechnik
- Planung in der Medizin
- Maschinelles Lernen und hybride Modelle





1



2



© istockphoto/alvarez



## GAMOR – KOLLABORATIVE DIENSTPLANUNG IN DER PFLEGEBRANCHE

- 1 *Digitales Wunschbuch*
- 2 *Lösungsoptionen für Konflikte*

Im Forschungsprojekt GamOR (GameOfRoster) entwickeln wir gemeinsam mit Projektpartnern eine Softwareplattform, die Pflegekräfte bei der Planung ihrer Dienstpläne unterstützt. Dabei sind die Beschäftigten in die Gestaltung der Prozesse einbezogen und bewerten ihre Arbeitssituation in der Folge besser.

GamOR ermöglicht eine kollaborative und digital unterstützte Dienstplanung. Die erlebnisorientierte Gestaltung erhöht die Motivation, baut Hemmungen vor der Digitalisierung ab und macht die Erfahrung mit der Software im Berufsalltag attraktiver.

### Wünsche erkennen und Minimalkonflikte auflösen

Aus Sicht der Mitarbeitenden ist ein Qualitätsmerkmal für einen »gelungenen« Dienstplan die Berücksichtigung von Terminwünschen, d. h. die Einhaltung von gewünschten freien Tagen. Wunschmengen, die nicht gleichzeitig erfüllbar sind, nennen wir im Projekt »Konflikte«. Konflikte, die aufgelöst werden können, indem ein Mitarbeitender einen Wunsch zurücknimmt, heißen »Minimalkonflikte«. Diese werden unabhängig von später hinzugefügten Wünschen gelöst. In GamOR entwickeln wir Algorithmen zur Bestimmung solcher Minimalkonflikte sowie spieltheoretische Modelle zu deren (teil-)automatisierter Auflösung. Darüber hinaus verwenden wir Constraint-basierte Modelle zur Berechnung optimierter Dienstplanalternativen. Das heißt, es werden Randbedingungen mitberechnet – neben Wünschen und Besetzungsanforderungen sind das zum Beispiel gesetzliche oder auch ergonomische Regelungen.

### Umsetzung durch eine digitale Dienste-Plattform

Die Umsetzung in der Praxis sichert die Protestantische Altenhilfe Westpfalz als zentraler Anwendungspartner. Dort werden die Konzepte zur kollaborativen Dienstplanung und die Algorithmen zur Planungsunterstützung prototypisch umgesetzt. Die Mitarbeitenden bedienen die entwickelte Dienste-Plattform über Tablets, perspektivisch auch vom eigenen Smartphone. Im eigenen Mitarbeiterbereich der Software gibt es eine Darstellung des Planungsmonats mit allen eingegebenen Wünschen. Neue Wünsche werden dort hinzugefügt oder bestehende Wünsche zurückgenommen. »Konflikte« sind für den User direkt ersichtlich und ihm werden Lösungen angeboten. Die Planungsverantwortlichen nutzen für die Datenpflege unmittelbar eine Webschnittstelle.

*Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird im Rahmen des Programms »Zukunft der Arbeit« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.*







## SPURENSTOFFE ELIMINIEREN DURCH NACHHALTIGE ADSORBENZEN

Die Verunreinigung durch Medikamente, Biozide oder Industriechemikalien im Abwasser nimmt zu, unter anderem da Kläranlagen viele dieser Substanzen nicht abbauen und sie so wieder in die Umwelt gelangen. Im dreijährigen Projekt BioSorb entwickeln wir gemeinsam mit dem Fraunhofer UMSICHT neue Adsorptionsmittel für die Eliminierung von Spurenstoffen in kommunalen Abwässern.

Diese sollen auf nachwachsenden Rohstoffen basieren und dabei deutlich ressourcenschonender und selektiver als herkömmliche Aktivkohle vorgehen. Besonders proteinbasierte Materialien sind vielversprechende Biosorbenzien, da diese weltweit endlos und günstig vorhanden sind.

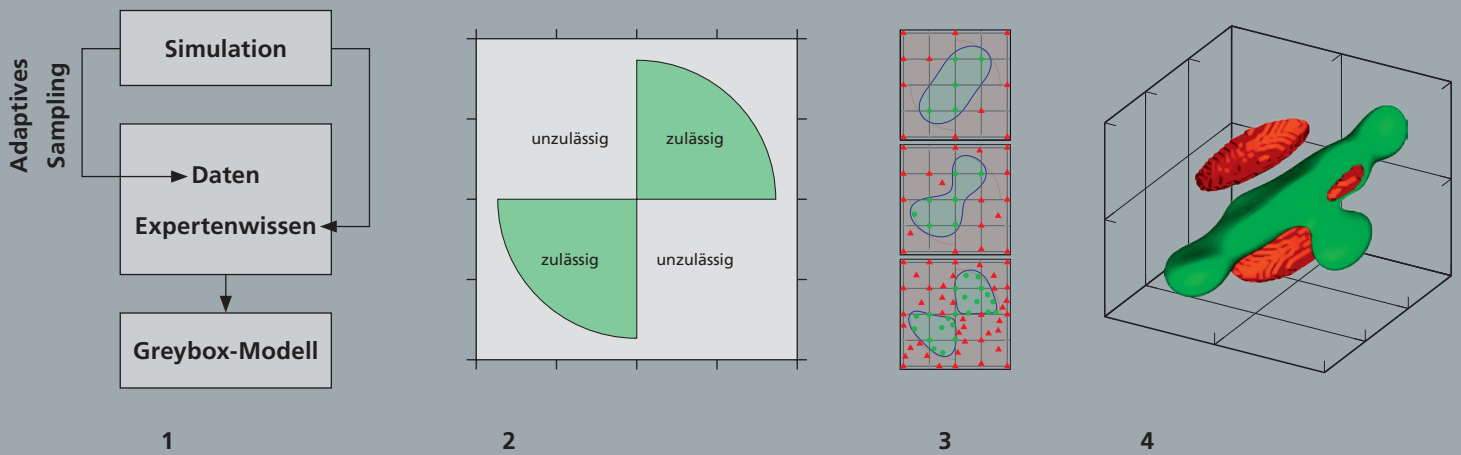
### Schritt für Schritt zu sauberem Wasser

Dazu starten wir zunächst mit einem Screening verschiedener proteinhaltiger Materialien. Dabei untersuchen wir natürlich nachwachsende Ausgangsstoffe genauer und es werden diese in ersten Adsorptionsversuchen in kleinem Maßstab getestet. Vielversprechende Materialien analysieren wir im nächsten Schritt. Oftmals verbessert eine chemische Behandlung – wie eine Kombination aus Säure- und Wärmebehandlung – die Adsorptionsfähigkeit. Bei einer groß angelegten Versuchsreihe werden anschließend die ausgewählten Biosorbenzien mit Diclofenac (Schmerzmittel) und Metoprolol (Betablocker) getestet und auf ihre Wirksamkeit geprüft. Diese beiden Medikamente eignen sich besonders gut als Testsubstanzen, da sie häufig in Grund- und Oberflächenwassern vorkommen und bisher kaum in Kläranlagen abgebaut werden. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es vielversprechend, wenn das Adsorptionsmittel wiederverwendet werden kann. Deshalb wird die Regenerierbarkeit des Systems durch verschiedene Lösungsmittel überprüft und die gewählten Materialien genauer analysiert und charakterisiert.

### ITWM liefert Simulationsexpertise

Parallel dazu wird ein numerisches Adsorptionsmodell entwickelt. Insbesondere hier ist die Expertise unseres Instituts gefragt, bereits im EU-Projekt zur Trinkwasseraufbereitung Nanopor haben wir Simulationstools zur Wasserver- und -entsorgung entwickelt. Auf diese Erkenntnisse baut BioSorb nun auf. Durch unsere hohe Rechnerkapazität und Erfahrung mit Simulationsstudien liefern wir das Fachwissen zur notwendigen Multiskalensimulation, welche die Adsorbenzien bewertet. Die Ergebnisse werden im letzten Schritt validiert und verifiziert. Dies geschieht zunächst in dotierten Wässern, da wir dort die Wirkung des Adsorbens ohne überlagernde Messungen überprüfen können. Anschließend werden die Adsorptionsmittel in praxisrelevanten Gewässern eingesetzt, u. a. im Wasser des Kläranlagenablaufs aus Wuppertal-Buchenhofen.

**1** *Protein-basierte Biosorbenzien werden untersucht zur Verbesserung der Adsorption von Medikamenten aus Abwässern, um in Kläranlagen die Belastung für Mensch und Umwelt zu reduzieren.*



## MASCHINELLES LERNEN MIT EXPERTENWISSEN

- 1 *Workflow für die Entwicklung von Greybox-Ersatzmodellen aus Daten und Expertenwissen; das adaptive Sampling ermöglicht eine effiziente Datengewinnung.*
- 2 *Zweidimensionaler Parameterraum eines Spielzeugbeispiels mit einem wohldefinierten zulässigen Bereich (grün); anhand dieses Beispiels lässt sich die Effizienz des adaptiven Samplings zur Vorhersage von Betriebsfenstern demonstrieren.*
- 3 *Die sequentielle Erschließung des Parameter-raums aus Abb. 2 führt zu zulässigen (grün) und unzulässigen (rot) Simulationsergebnissen und einer entsprechenden Modellvorhersage für das Betriebsfenster (blau), die sich mit jeder Iteration verbessert.*
- 4 *Visualisierung des vorhergesagten Betriebsfensters einer chemischen Anlage*

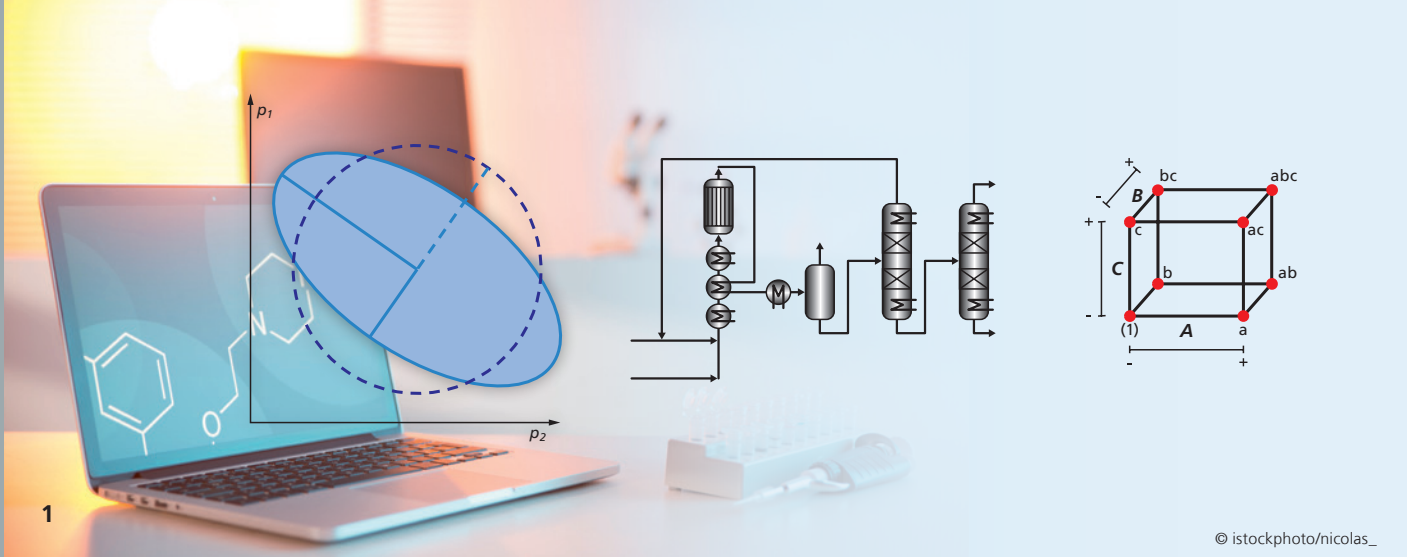
Maschinelle Lernverfahren erlauben es, Muster und Gesetzmäßigkeiten aus Daten abzuleiten. Die dabei entstehenden Modelle verallgemeinern die in den Daten enthaltene Information, um dadurch unbekannte Ergebnisse vorherzusagen. Eine solche Modellbildung kann allein auf Grundlage der Datenstatistik erfolgen. Von entscheidendem Vorteil ist es jedoch, den Kontext der Daten zu berücksichtigen und domänenspezifisches Expertenwissen einfließen zu lassen. Auf diese Weise werden auch Zusammenhänge miteinbezogen, die sich gar nicht oder nur unzureichend in der Statistik widerspiegeln. In verschiedenen Forschungsprojekten und in Kooperation mit Industriepartnern entwickeln wir Methoden, um maschinelle Lernverfahren durch Domänenkenntnisse zu verbessern. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die chemische Verfahrenstechnik.

### Greybox-Ansatz als hybrides Gesamtmodell

In der industriellen Praxis werden Daten oft aus Simulationen gewonnen, da diese kostengünstiger sind als Experimente und frei von Messunsicherheiten. Für die Lösung von Optimierungsproblemen benötigt man in der Regel jedoch sehr viele Daten. Ersatzmodelle, die sich schneller auswerten lassen als die ursprüngliche Simulation, bringen also einen Geschwindigkeitsvorteil. Die verwendeten Simulationen basieren auf physikalischen Gesetzen – Expertenwissen, das also bereits explizit vorliegt. Die Herausforderung besteht darin, es auf geeignete Weise in ein maschinelles Lernverfahren zu integrieren. In diesem auch als »Greybox« bezeichneten Ansatz werden wissensbasierte Modelle mit datengetriebenen Modellen zu einem hybriden Gesamtmodell verbunden.

### Exploration von Betriebsfenstern in der chemischen Verfahrenstechnik

Entscheidend ist eine effiziente Datengewinnung. Nicht-dynamische Simulationen chemischer Anlagen lassen sich nur für solche Prozessparameter auswerten, für die sich die Anlage stationär betreiben lässt. In einem Projekt mit der BASF SE entwickeln wir gemeinsam eine Methode, um diese stationären Betriebsfenster mithilfe von maschinellen Lernverfahren zu bestimmen. Mit einem adaptiven Sampling erschließen wir den Parameterraum auf möglichst effiziente Weise sequentiell, wobei ein Kompromiss zwischen dem Simulationsaufwand und dem dadurch zu erwartenden Informationsgewinn gefunden werden muss. Das Wissen über das Betriebsfenster vereinfacht wiederum eine mögliche Optimierung von Parametern, da der zu durchsuchende Parameterraum eingeschränkt werden kann.



## MODELLBASIERTE VERSUCHSPLANUNG IN DER CHEMISCHEN VERFAHRENSTECHNIK

In der chemischen Verfahrenstechnik werden in Versuchen Daten erhoben, um physikalisch motivierte Modelle zu kalibrieren. Diese Versuche sind immer mit Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Daher geht es in ihrer Planung darum, aus möglichst wenigen Experimenten möglichst verlässliche Modelle abzuleiten. In einem Kooperationsprojekt mit der BASF entwickeln und implementieren wir Methoden, die dabei unterstützen.

Die Verlässlichkeit von Modellkalibrierungen wird auf zweierlei Art beeinflusst: Einerseits sind die Fehlerbalken der geschätzten Parameter, aber auch die Vorhersagefehler des Modells direkt proportional zur Messgenauigkeit in den Versuchen. Mit anderen Worten: Umso genauer die Sensorik, umso verlässlicher die Modellvorhersage.

Um erfolgreich zu kalibrieren ist es andererseits entscheidend, Korrelationen in der Sensitivität der Modelle zu berücksichtigen – besonders bezüglich der Modellparameter an den Messpunkten. Dies wird im Folgenden anhand eines Beispiels anschaulich gemacht.

### Katalysator: Alter versus Temperatur

Chemische Reaktionen laufen im Allgemeinen bei höheren Temperaturen schneller ab als bei tieferen – das ist der Grund, warum Lebensmittel zur Verlängerung ihrer Haltbarkeit gekühlt werden. In chemischen Reaktoren werden häufig Katalysatoren eingesetzt, die Reaktionen beschleunigen. Diese Katalysatoren altern, ihre Wirkung nimmt also mit der Zeit ab. Daher erhöht man mit zunehmendem Katalysatoralter die Reaktionstemperatur, um eine gleichbleibende Qualität des Reaktionsprodukts zu gewährleisten. Katalysatoralter und Reaktionstemperatur stehen auf diese Weise in enger Beziehung zueinander. Es ist nicht möglich, die Effekte von Temperatur und Katalysatoralter auf das Endprodukt separat zu berechnen. Die Versuchsplanung schlägt vor, den Reaktor einmal bei tiefen Temperaturen und hohem Katalysatoralter und einmal bei hoher Temperatur und geringem Katalysatoralter zu fahren. Mit diesen zwei zusätzlichen Betriebsbedingungen können die Effekte separiert und unabhängig quantifiziert werden.

Im Kooperationsprojekt mit der BASF geht es darum, die beschriebenen Konzepte auf komplexe Modelle von Pilotanlagen zu übertragen. Diese werden dann anhand ihrer Sensitivitäten auf Modellparameter kalibriert, Unsicherheiten abgeschätzt und die entsprechenden Versuche geplant. Dazu lösen wir große nichtlineare Optimierungsprobleme und machen deren Ergebnisse auf interaktiven Nutzeroberflächen nutzbar.

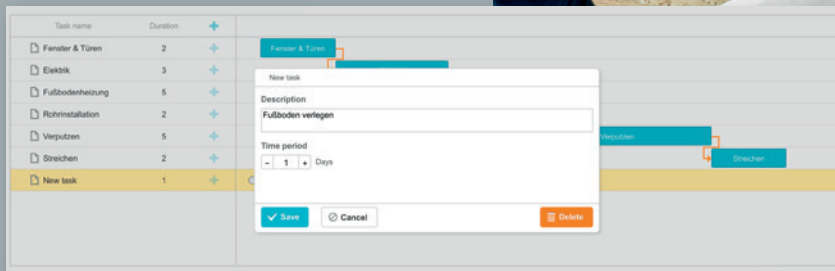
1 Links: Schema eines Kovarianzellipsoiden zur Visualisierung von Konfidenzbereichen von angepassten Modellparametern

Mitte: Schema einer Miniplant mit einem Rohrreaktor und zwei Destillationskolonnen

Rechts: Statistischer Versuchsplan für ein lineares Modell mit drei Einflussgrößen

© istockphoto/nicolas\_





1



## 1 Planungssassistent für Baustellen

# CONWEARDI – SMARTE PROZESSE IM BAUWESEN

Im Projekt ConWearDi (Construction Wearables Digitization) entwickeln wir gemeinsam mit Forschungspartnern und Handwerkern eine Plattform, um die Digitalisierung von Dienstleistungen im Bauwesen mit Industrie 4.0 Technologien zu ermöglichen. Ein Werkzeug zur Ablaufplanung steht dabei im Fokus.

Das Thema Digitalisierung ist überall präsent. Gerade Bauunternehmen, die eher klein- oder mittelständisch organisiert sind, haben im digitalen Wandel noch viel aufzuholen. Hier setzt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt ConWearDi an: Ziel ist es, eine Web-Plattform zu entwickeln, die den digitalen Informationsaustausch zwischen allen am Bau Beteiligten ermöglicht. Darauf basierend entwickeln die Projektteilnehmenden Dienstleistungen, um die Planung und Durchführung von Baustellenprozessen zu unterstützen.

### Web-Plattform digitalisiert Baustellenprozesse

Die Plattform vernetzt (Software-)Werkzeuge unterschiedlicher Art – seien es ERP-Systeme, Planungswerkzeuge oder mit Sensoren versehene Maschinen und Materialien. Zum Einsatz kommen auch Wearables, das heißt, tragbare Computer wie z. B. Smart Glasses oder Watches. Diese erfassen Informationen in Echtzeit und verarbeiten sie weiter. Im Rahmen des Projekts entwickeln wir eine Anwendung zur Ablaufplanung, diese ist speziell auf Baustellenprozesse angepasst und an die Plattform angebunden.

### Unterstützung bei Baustellenplanung unter Unsicherheiten

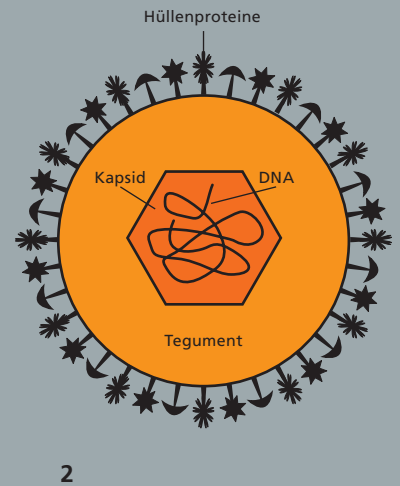
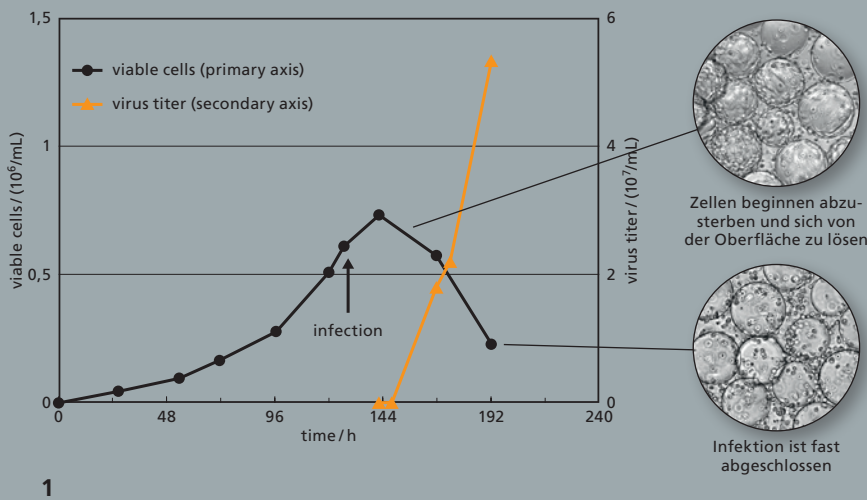
Die Einhaltung von Terminen über mehrere Bauprojekte hinweg gelingt nur, wenn die Verantwortlichen die Arbeitspakete passgenau einteilen und die zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal nutzen. Änderungen im Projektablauf (z. B. der Ausfall eines Mitarbeitenden) machen es für den Planenden schwer, den Überblick zu behalten. In ConWearDi entwickeln wir Modelle und Algorithmen, die den Baustellenplanenden bei seinen Aufgaben unterstützt. Dabei spielt eine adäquate Berücksichtigung der Unsicherheit von planungsrelevanten Informationen eine wichtige Rolle. So ist z. B. das Ausführen von vielen Arbeiten abhängig vom Wetter. Simulationen helfen in diesen Fällen, geeignete Ausweichstrategien zu entwickeln.

GEFÖRDERT VOM



Mit der Software werden Arbeitspakete automatisch terminiert und hinsichtlich verschiedener Ziele optimiert. Dies dient lediglich als Entscheidungsunterstützung, denn trotz Digitalisierung bleibt die finale Entscheidung beim Planenden. Er passt die erstellten Pläne interaktiv an (z. B. per Drag & Drop) und wird über Konsequenzen seiner Entscheidungen direkt informiert.





## VIREN ZUR TUMORTHERAPIE: WIE THERAPEUTISCHE VIREN AM BESTEN WACHSEN

Klinische Studien mit der ersten Generation onkolytischer (krebszerstörender) Viren sind sehr vielversprechend. Um diese neue Methode für alle Patienten verfügbar zu machen, entwickeln wir skalierbare und robuste Verfahren zur Herstellung dieser Viren. Im Rahmen des von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Projektes TheraVision haben unsere Experten diese Fragestellung mit mathematischen Methoden erforscht.

### Wann infizieren und wann ernten?

Der Prozess zur Gewinnung der Viren unterteilt sich in einen Upstream- und einen Downstream-Prozess. Während des Upstream-Prozesses werden zunächst spezielle Wirtszellen gezüchtet. Diese werden zu einem bestimmten Zeitpunkt mit Viren infiziert. Ab diesem Moment vermehren sich die Viren in den Wirtszellen, bis die Zellen zerstört werden und die erzeugten Viren in die umgebende Nährlösung gelangen. Nach einer bestimmten Zeit wird die Nährlösung geerntet und dem Downstream-Prozess zugeführt, in dem die Viren herausgefiltert werden.

Unser Projektziel ist die modellbasierte Optimierung des Upstream-Prozesses auf Basis von experimentellen Daten. Dazu haben wir ein Modell erstellt, welches das Zell- und Virenwachstum in Abhängigkeit steuerbarer Größen abbildet. Auf der Basis dieses Modells wurden diese Größen – zunächst Infektions- und Erntezeitpunkt – anschließend optimiert.

### Parameterschätzung und Kompromissfindung

Als Modell dient ein parametrisiertes System gewöhnlicher Differentialgleichungen. Die Parameter (z. B. Wachstums- und Sterberaten) haben wir mithilfe statistischer Verfahren (Parameterschätzung) so identifiziert, dass das Modell den am Fraunhofer ITEM durchgeführten Experimenten möglichst gut entspricht.

Ist das Modell auf diese Weise konstruiert, werden der optimale Infektions- und der Erntezeitpunkt mit einem speziellen Optimierungsverfahren (Multiple Shooting) bestimmt. Im Fokus stehen dabei mehrere Zielaspekte: die maximal erreichbare Anzahl an Viren, die Wirksamkeit und die Reinheit der geernteten Lösung. Diese werden entweder einzeln optimiert, oder es wird ein optimal ausgewogener Kompromiss zwischen den Zielen angestrebt (multikriterielle Optimierung).

1 *Zellenwachstum (schwarz) und Virenwachstum (orange). Auf den Mikroskopaufnahmen erkennt man die sogenannten Microcarrier – kleine Kugeln, auf denen die Wirtszellen siedeln – und die Zellen selbst.*

2 *Schematische Darstellung des Herpes-simplex-Virus*

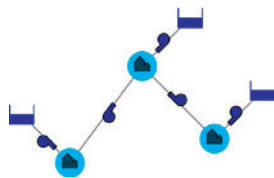






## NEWS AUS DEM BEREICH

### COpt2 – ENERGIE SPAREN IN DER TRINKWASSERWIRTSCHAFT



*Komplexe Netzwerke in der Trinkwasserversorgung*

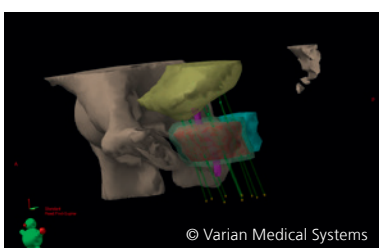
Im vergangenen BMBF-Projekt H2Opt haben wir eine prototypische Software entwickelt, die Wasserversorgungsunternehmen in energieeffizientem Betrieb und Auslegung ihrer Anlagen unterstützt. Sie spart im Betrieb und bei der Planung der Trinkwasserversorgung Energie und Kosten. Heute ist sie im Energieunternehmen EWR in Worms täglich im Einsatz. 2019 startet ein Anschlussprojekt, um den Prototyp für die Wasserversorgung in Landau und Jockgrim auf komplexere Netzwerke zu erweitern. Wir vereinfachen und verbessern ihren Arbeitsablauf und entwickeln neue Ideen, einem Trinkwasserausfall vorzubeugen. Das Vorhaben wird vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Im Vordergrund steht die Untersuchung des Pumpenbetriebs, weil sich dort im Mittel 30 Prozent Energie sparen lassen.

### COGNAC – ROBUSTES PLANEN VON ERNTEKAMPAGNEN



Im Leitprojekt COGNitive AgriCulture (COGNAC) steht die Konzeption einer landwirtschaftlichen Plattform im Vordergrund. Das Projekt soll daher in den drei Bereichen »Vernetztes Ökosystem«, »Sensorik« und »Autonome Feldrobotik« entscheidende Innovationen liefern. Dazu werden verschiedene Anwendungen als Demonstration umgesetzt. Eine dieser Fallstudien ist die robuste Erntekampagnenplanung. Wir betrachten laufend aktualisierte Abreifedaten und Wetterprognosen der zu erntenden Felder. So können wir vorausschauend entsprechend Maschinen und Personal planen. Außerdem können Lohnunternehmer ihre Kundentermine mit hoher Wahrscheinlichkeit einhalten. Durch robuste Modelle und Algorithmen reduzieren wir Trocknungs- und Treibstoffkosten. Gleichzeitig wird die Nahrungsmittelqualität und Kundenzufriedenheit erhöht.

### ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG FÜR DIE BRACHYTHERAPIE



Unsere multikriterielle Entscheidungsunterstützung ist durch die Kooperation mit Varian Medical Systems in die weltweit führende Software zur Planung von Krebsbehandlungen mittels Strahlentherapie einbettet. Nun wollen wir diese interaktive Art der Planung nicht nur für externe Strahlentherapie (IMRT, VMAT), sondern auch für die Brachytherapie ermöglichen. Dabei liegt die Strahlenquelle entweder in unmittelbarer Nähe zum Tumor oder sie wird direkt in ihn eingebracht. Es ergeben sich neue Fragestellungen, z. B. hinsichtlich der optimalen Positionierung der Katheder zur Einbringung der Strahlenquellen und deren Verweildauer in den Kanälen.





---

Von vorne, links nach rechts: Johanna Schneider, Till Heller, Esther Bonacker, Dr. Katrin Teichert, Dr. Neele Leithäuser, Dr. Neil Jami, Dr.-Ing. Tino Fleuren, Dr. Cristina Collicott, Jasmin Kirchner, Dr. Sandy Heydrich, Dr. Elisabeth Finhold, Dr. Christian Weiß, Dr. Heiner Ackermann, Dr. Volker Maag, Dr. Michael Bortz, Prof. Dr. Karl-Heinz Küfer, Dr. Peter Klein, Dr. Gregor Foltin, Dr. Dimitri Nowak, Dr. Jan Schwientek, Dr. Tobias Fischer, Rasmus Schroeder, Dr. Dennis Heim, Dr. techn. Johannes Höller, Melanie Heidgen, Helene Krieg, Dr. Patricia Bickert, Dr. Martin von Kurnatowski, Dr. Raoul Heese, Andreas Dinges, Dr. Michal Walczak, Pascal Wortel, Dr. Sebastian Velten, Dr. Michael Helmling, Patrick Schwartz

---