



## Schlussbericht

Verbund: 05M2013 - KINOPT

Zuwendungsempfänger: Universität Mannheim  
 Projektleitung: Prof. Dr. Simone Göttlich  
 E-Mail: goettlich@uni-mannheim.de  
 Förderkennzeichen: 05M13VMA  
 Förderzeitraum: 01.07.2013 - 30.06.2016  
 Zuwendung: 231.480,69 €  
 Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: braak@uni-mannheim.de  
 Zusätzlicher Name: Sabine Braak

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	3		
Habilitationen:	0		
Publikationen:	23		
Konferenzbeiträge:	0		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	4		
Masterarbeiten:	2		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 30.12.2016 16:50 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Universität Mannheim (Prof. Göttlich) / RWTH Aachen (Prof. Herty)

Projektleitung: Prof. Dr. Simone Göttlich (Universität Mannheim)

Thema: **Verbundprojekt KinOpt**: Kinetische Modelle und diskret-kontinuierliche Optimierung in der Produktionsplanung der Automobilindustrie (Förderkennzeichen 05M2013)

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat sich die Produktionsplanung in der Automobilindustrie zu einem in zunehmendem Maße komplexen Prozess entwickelt. Maßgeblich für die Komplexität der Produktionsplanung ist die Betrachtung zusätzlicher Bedingungen unter denen heute aus Wettbewerbsgründen produziert werden muss. Es besteht somit eine Dichotomie zwischen der hohen Variabilität kundenspezifischer Produktoptionen und der effizienten Zuteilung der Ressourcen an der Montagelinie. In der Planung muss die stark gestiegene Produktvielfalt mit der damit einhergehenden komplexen Fabrikstruktur, die aus dem Kostendruck entstehenden minimalen Lagerbestände bei gleichzeitiger maximaler Auslastung der bestehenden Standorte und der hohe Wettbewerbsdruck, der insbesondere eine effiziente Zuteilung der Personalkapazitäten impliziert, berücksichtigt werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die kurzfristige Produktionsplanung, die aus der mathematischen Modellierung und Optimierung einer Produktionslinie unter Berücksichtigung vorhandener Arbeitszeitmodelle erfolgt. Um eine gleichmäßige Linienauslastung zu gewährleisten werden daher neue mathematische Lösungsansätze benötigt, die das übergeordnete Unternehmensziel der robusten und zeitauflösenden Identifikation kapazitiver Engpässe erfüllen können. Insbesondere umfasst das die Ressourcen Personal, Maschinenkapazität und Lagerverlauf einzelner Produktionsstationen. Eine verbesserte Produktionsplanung soll die Qualität der Produktionsprogramme steigern, die vorhandenen Kapazitäten besser auslasten und den Planungsprozess hinsichtlich der Vielzahl kurzfristiger, unbekannter Änderungen effizienter und flexibler gestalten. Mit den bisherigen statischen und diskreten Modellen ist die formulierte Zielsetzung aufgrund der Komplexität der zu verbauenden Teile sowie der Restriktionen bestehender Arbeitszeitmodelle des Personals nicht realisierbar. Jedoch erlauben die vergleichsweise hohen PKW Stückzahlen (ca. 300 Fahrzeuge eines Fahrzeugtyps pro Tag im Werk der Daimler AG in Sindelfingen) über den betrachteten Planungshorizont neue Zugänge basierend auf kontinuumsmechanischen Modellen und deren kontinuierlich–diskrete Optimierung. Hier werden die aus der kurzfristigen Planung bekannten Daten zur Erstellung eines zeitdynamischen und aggregierten mathematischen Modells für die Produktionskenngößen, Maschinenauslastung und Pufferstrecken auf Basis von Differentialgleichungen benutzt, um in Kombination mit diskreten Arbeitszeit und Schichtmodellen der Personalkapazitäten, eine dynamische Optimierung der vorhandenen Ressourcen zu ermöglichen. Abschließend lässt sich sagen, dass zu Projektbeginn im Jahr 2013 die fehlende Funktionalität zu suboptimalen Produktionsprogrammen, Inkonsistenzen in der Planung und daraus resultierenden, erhöhten Personalaufwandes führte. Mit der bisherigen Bearbeitung des Forschungsprojekts konnte ein erster Schritt in die Richtung gemacht werden, den bisher hohen manuellen Arbeitsaufwand abzubauen, die Planungsqualität durch Betrachtung flexibler Arbeitszeitmodelle und großer Produktionsstrecken zu erhöhen und Strategien entwickelt werden, insbesondere auf kurzfristige Änderungen im Programm- und Kapazitätsvorgaben effizient reagieren zu können. Langfristig sollen diese Erkenntnisse in den kurzfristigen Planungsprozess des sogenannten gewerkeorientierten Tagesproduktionsprogrammes einfließen und damit direkt zur Planung eingesetzt werden können.

Die bisherigen Studien sind immer für Daten aus der Vergangenheit durchgeführt worden, um eine Abschätzung der möglichen Verbesserung darzustellen und das Tagesgeschäft nicht durch mögliche Fehlplanungen und ungenaue Datenlage zu gefährden. Im nächsten Schritt muss die Anknüpfung der Modelle an die Echtzeitdaten vorgenommen werden, um einen gesicherten, täglichen Ablauf zu gewährleisten. Aufgrund der Vertraulichkeit der Echtzeitdaten ist dieser Schritt schwierig mit universitären Partnern umzusetzen und wird voraussichtlich in-house durchgeführt werden.

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit einer Gesamtproduktion von 5,71 Mio. Personenkraftwagen (Pkw) hatte Deutschland einen Anteil von 7,3% an der weltweiten Produktion im Jahr 2015. Der Praxispartner Daimler AG zählt weltweit zu den größten und führenden Produzenten und produzierte allein im Jahr 2014 etwa 1,8 Mio. Pkw an deutschen Standorten. Dies entspricht einem Anteil von 32% der deutschlandweiten Produktion in diesem Jahr. Abhängig von der Größe des Produktionsstandortes werden täglich zwischen 1000 bis 2000 Pkw fertiggestellt, wobei bis zu 10.000 verschiedene Teile pro Pkw verarbeitet werden müssen. Die stark gestiegene Produktvielfalt führt aber auch zu einer zunehmenden Komplexität der Produktionsplanung. So müssen minimale Lagerbestände bei gleichzeitiger maximaler Auslastung der bestehenden Standorte und der hohe Kostendruck, der insbesondere eine effiziente Planung der Personalkapazitäten impliziert, bereits in der Planung berücksichtigt werden. Ziel des Projektes war es daher, geeignete Werkzeuge und Methoden zur konkreten Planung der Kapazitäten und des Personals unter den genannten Restriktionen zur Verfügung zu stellen. Insbesondere umfasst das Ziel die wichtigen Ressourcen Personal, Maschinenkapazität und Pufferverlauf einzelner Produktionsstationen innerhalb verschiedener Standorte. Eine verbesserte Produktionsplanung soll die Qualität der Produktionsprogramme steigern, die vorhandenen Kapazitäten besser auslasten und den Planungsprozess hinsichtlich der Vielzahl kurzfristiger, unbekannter Änderungen effizienter und flexibler gestalten.



**Abbildung 1:** Daimler Pressebild: Beispiel einer Produktionslinie in der PKW-Fertigung. Die zu verbauenden Teile pro Pkw (ca. 4.000-10.000) müssen rechtzeitig an den 20 Bearbeitungsstationen in der Montage bereitgestellt werden. Im Zweischichtbetrieb arbeiten meist drei Werker in einem Team pro Station und können bei Bedarf durch sogenannte Springer unterstützt werden. ©Daimler AG.

Mit den bisherigen zeitunabhängigen Modellen ist die formulierte Zielsetzung aufgrund der Vielzahl der zu verbauenden Teile sowie der Restriktionen bestehender Arbeitszeitmodelle des Personals nicht realisierbar. Jedoch erlauben die vergleichsweise hohen Stückzahlen über den betrachteten Planungshorizont neue Zugänge basierend auf kontinuumsmechanischen Modellen und deren Kopplung

an bekannte Optimierungsprobleme aus der Produktionsplanung.

Die aus der kurzfristigen Planung bekannten Daten werden zur Erstellung eines zeitdynamischen und aggregierten mathematischen Modells benutzt, um in Kombination mit diskreten Arbeitszeit und Schichtmodellen der Personalkapazitäten, eine Optimierung der vorhandenen Ressourcen zu ermöglichen. Die Produktionsdynamik wird hierbei mit Differentialgleichungen beschrieben und erlaubt somit eine Reduktion der Komplexität sowie die zeitabhängige Quantifizierung der Produktionskenngrößen, Maschinenauslastung und Pufferstrecken. Diese werden anschließend in einem Optimierungsproblem zusammen mit den bestehenden und modifizierbaren, jedoch diskreten Schicht- und Arbeitszeitmodellen zur Vorhersage und Anzeige möglicher Engpässe kombiniert.

Das gesamte Vorhaben wurde in zwei wissenschaftliche Teilprojekte (TP) untergliedert, die von den Partnern im Rahmen der dreijährigen Laufzeit untersucht wurden.

- TP 1: Diskret-kontinuierliche Optimierungsprobleme (Prof. Göttlich, Universität Mannheim)
- TP 2: Kinetische Gleichungen (Prof. Herty, RWTH Aachen University)

Um eine erfolgreiche Verzahnung der Teilprojekte mit dem Praxispartner, der Daimler AG, zu gewährleisten, wurde Frau Prof. Göttlich als Koordinatorin eingesetzt und die Universität Mannheim als die koordinierende Stelle bestimmt. Die beantragten Stellen wurden an der Universität Mannheim und an der RWTH Aachen angesiedelt.

Im Rahmen des Projektes gab es eine enge Kooperation mit der Forschungs- und Entwicklungsabteilung *Prognose und Optimierungsmethoden* der Daimler AG, die intern für die Montageplanung und Entwicklung innovativer Methoden in der industriellen Fertigung im Bereich Personenwagen zuständig ist. In regelmäßigen Treffen wurden die erzielten Ergebnisse besprochen und an aktuellen Realdaten getestet. Es existierten darüber hinaus historische Datensätze, die zu Beginn des Projekts zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten umfassten eine räumlich aufgelöste Darstellung verschiedener Verbaustationen in der Endmontage der Produktionslinie sowie zeitlich und räumlich aufgelöste Verbauezeiten von Teilen innerhalb jeder Produktionseinheit.

Neue wissenschaftliche Ergebnisse konnten außerdem auf verschiedenen Fachtagungen vorgestellt werden. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die Organisation einer Session auf der Tagung Operations Research in Aachen 2014. Hier konnte eine Session zum Thema *Optimierung in Produktionsprozessen* platziert werden.

## 2 **Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Bereits im Projektantrag wurde betont, dass in Deutschland die Automobilbranche neben der Informations- und Kommunikationstechnik einer der Sektoren mit den größten technischen Innovationen ist. Dabei gilt insbesondere die deutsche Automobilbranche als Vorreiter für technische Innovationen, die einige Zeit später erst von anderen Firmen im Ausland übernommen werden können.

Die verzahnte Betrachtung und effiziente Optimierung von Produktionsplanungsproblemen in der Automobilbranche und die damit verbundene Aufgabenstellung des Praxispartners im Projekt KinOpt ist bis zum Start des Vorhabens ein offenes Problem. Nachfolgend wird über Stand der Forschung und Technik der mathematischen Aspekte berichtet.

Der von den Verbundpartnern gewählte Modellierungsansatz basierend auf Differentialgleichungen war bisher für Anwendungen in der Kontinuumsmechanik bekannt und etabliert, wurde aber nicht zur Beschreibung von Produktionslinien in der Automobilbranche verwendet. Im Unterschied zur Kontinuumsmechanik sind in zeitdynamischen Anwendungen im Bereich der Modellierung von Produktionslinien weitere interessante Effekte (wie z.B. lastabhängige Maschinenausfälle, prioritätenabhängige

Produktion) beobachtbar. Bisher gibt es nur wenige Modellierungsansätze, die diese produktionsspezifischen Aspekte berücksichtigen. Die Modellierung, Simulation und die mathematischen Eigenschaften allgemeiner, abstrakter Produktionsabläufe mittels Differentialgleichungen ist vor allem in den letzten Jahren intensiv untersucht worden. Im Detail beruhen diese makroskopischen Modelle auf Erhaltungsgleichungen zur Beschreibung der meist nichtlinearen Dynamik. Makroskopische Modelle entstehen aus kinetischen Gleichungen durch Einführung gemittelter Größen und sind ebenfalls gekoppelte Systeme partieller Differentialgleichungen in einem niedrigdimensionaleren Phasenraum. Sie sind daher numerisch zu untersuchen und können als Nebenbedingungen im übergeordneten Optimierungsproblem dienen. Mit makroskopischen Modellen können Probleme realistischer Größe effizient gelöst und zudem für einfache Modelle analytische Ergebnisse formuliert werden. Die formulierten diskret-kontinuierlichen Optimierungsprobleme resultieren aus der Diskretisierung von Differentialgleichungsmodellen und der Kombination mit diskreten Entscheidungen wie z.B. der Zuteilung der Personalkapazitäten.

Die mathematische Theorie in der Produktionsplanung mit den obengenannten Ansätzen steht erst am Anfang. Durch das Verbundprojekt KinOpt konnte allerdings ein wichtiger Beitrag zur Untersuchung makroskopischer (hyperbolischer) Gleichungen, dem Abgleich mit realen Daten sowie deren mathematische Optimierung geleistet werden. Da die betrachteten Optimierungsprobleme aufgrund ihrer nichtlinearen Dynamik in der Regel eine sehr große Komplexität hinsichtlich ihrer Lösbarkeit aufweisen, sind sie in der Regel nicht mit kommerziellen Standard-Optimierungssoftware-Paketen (wie z.B. CPLEX, Gurobi) lösbar. Erste heuristische Ansätze zur Lösbarkeit bzw. Beschleunigung existieren nun durch problemangepasste Preprocessing Methoden und Heuristiken auf Differentialgleichungsbasis.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

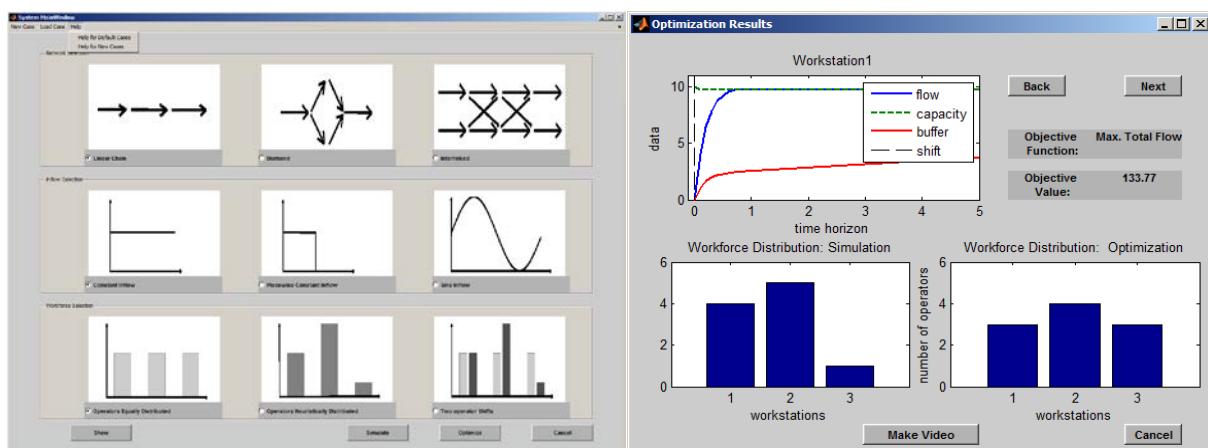
Der Aufgabenbereich des TP 1 umfasste die Entwicklung geeigneter Optimierungsmodelle, die abhängig von der aktuellen Auslastung und Nachfrage flexibel reagieren können und zugleich eine kostenoptimale Lösung darstellen. Das Teilprojekt wurde jeweils in vier Meilensteine (MS) aufgeteilt, die zeitlich aufeinander aufbauend zu bearbeiten waren:

- *TP 1 – MS 1: Mathematische Formulierung der Arbeitszeitmodelle*  
Es wurden verschiedene Ansätze zur Modellierung von Arbeitszeit- und Schichtmodellen untersucht und analysiert. Klassische Scheduling Ansätze, Zuteilungsprobleme und graphentheoretische Ansätze haben hierbei die mathematische Grundlage gebildet.  
Da die vorhandenen Methoden, meist in Form von ganzzahligen Optimierungsproblemen, oftmals keine zeitabhängige Komponente aufwiesen, wurden neben diskreten Entscheidungen auch zeitliche Variationen der Arbeitszuteilung in der Modellierung berücksichtigt.
- *TP 1 – MS 2: Kombination der Arbeitszeitmodelle mit makroskopischen Gleichungen*  
Nachdem alle Restriktionen im diskreten Entscheidungsfindungsprozess erfasst wurden, erfolgte eine Anpassung dieser an die zeitliche Dynamik des neu entwickelten makroskopischen Modells. Diese in der Regel nichtlineare Dynamik resultiert aus den Differentialgleichungen, die in TP 2 untersucht wurden. Diese neuartige Modellkopplung ermöglichte eine genauere Planung der benötigten, diskreten Entscheidungsgrößen an den verschiedenen Stellen der Produktionslinie in Form eines diskret-kontinuierlichen Optimierungsproblems.
- *TP 1 – MS 3: Entwicklung von Heuristiken*  
Das numerische Lösen der diskretisierten Optimierungsprobleme ist sehr aufwendig, denn Probleme dieser Art sind durch eine große Komplexität gekennzeichnet. Diese ist bestimmt

durch die Anzahl der Nebenbedingungen und die räumlich und zeitlich abhängigen reellen bzw. ganzzahligen Variablen. Kommerzielle Löser, die vom Praxispartner eingesetzt werden, sind nicht in der Lage, das Problem in akzeptabler Zeit zu lösen. Es wurden daher verschiedene Ansätze verfolgt, um den Lösungsprozess zu beschleunigen. Es hat sich herausgestellt, dass sich aufgrund analytischer Zusammenhänge, einzelne Zweige innerhalb des Branch&Bound-Lösungsverfahrens abschneiden lassen. Die Implementierung der Heuristiken und die anschließende Kopplung an einen Optimierungslöser wurden zu einer zuverlässigen Lösungsmethode des gesamten Planungsproblems ausgebaut.

- *TP 1 – MS 4: Verifikation*

Abschließend wurden die berechneten Ergebnisse mit der Praxis verglichen. Es wurde außerdem getestet, inwiefern die berechneten Lösungen auch für den Praxispartner eine bestmögliche Lösung darstellt. Die Entwicklung eines interaktiven Programms mit Benutzeroberfläche ermöglichte es den Praxispartnern, verschiedene Planungsprobleme eigenständig zu testen.



**Abbildung 2:** *Interaktive Simulations- und Optimierungssoftware, die abhängig von den vorgegebenen Daten aus der Produktion (linkes Bild), die eine ausbalancierte Produktionslinie unter Berücksichtigung einer optimalen Personalzuteilung berechnet (rechtes Bild).*

Der Aufgabenbereich des TP 2 umfasste die Herleitung neuer makroskopischer Modelle, deren Analyse und numerische Umsetzung. Zur Bearbeitung wurden ebenfalls vier aufeinander aufbauende Meilensteine (MS) angesetzt.

- *TP 2 - MS 1: Stochastisches Partikelspiel zur zeitabhängigen Beschreibung der Produktionsdynamik*

Für die bisher nur in großen Datenmengen gegebene Produktionsdynamik des Industriepartners Daimler AG wurde eine mathematische Beschreibung als stochastisches Partikelspiel formuliert. Eingangsgrößen waren die Verbauezeiten, die Kapazität und die Geometrie der Fabrik. Es wurde sich auf die Endmontage konzentriert, da diese später für die Arbeitszeitmodelle interessante Vernetzung mit TP 1 ergaben und hier nach Aussagen des Industriepartners das wirtschaftlich größte Potential liegt. Erwartet wurde durch die vorgegebene fixe Taktung des Förderbandes ein lineares Modell. Allerdings konnten nichtlineare Effekte beobachtet werden, da zum Beispiel Produktionsstopps bei Überschreiten bestimmter Kapazitäten auftreten oder Stationen miteinander dynamisch vermischt wurden. Diese Effekte wurden durch Einführung einer im Fahrzeug mitlaufenden Zeit aufgefangen, führten allerdings zu einem hochdimensionalen Phasenraum.

- *TP 2 - MS 2: Mastergleichung und Martingale*

Die Mastergleichung für den erweiterten Phasenraum wurde aufgestellt und mit mathematischen Methoden untersucht. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Fragestellung, ob der Phasenraum sinnvoll reduziert werden kann, und z.B. die mitlaufende Zeit wieder aus der Darstellung durch Momentenabschlüsse oder andere Approximationen wieder eliminiert werden kann. Ziel war es eine Darstellung zu finden, der prädiktive Größen auch beobachtbar in der Fabrik sind, damit später eine Anpassung und Verifikation erfolgen kann. In diesem Zusammenhang wurden auch allgemeinere Techniken entwickelt, die für Produktionsprozesse zum Beispiel im Stahlwalzen relevant sind. Der Phasenraum der kinetischen Gleichungen ist zu groß, um direkt in den Optimierungsproblemen des TP 1 benutzt werden zu können. Daher erfolgte in MS 3 der Übergang zu approximativen Modellen.

- *TP 2 - MS 3: Approximative Modelle*

Der Übergang zu approximativen Modellen stellt eine Anforderung an das Verständnis stationärer Lösungen und/oder Gleichgewichtszuständen der kinetischen Gleichung. Für das in MS 1 und MS 2 untersuchte Modell konnten diese Zustände charakterisiert werden und Aussagen zu dem Verlauf der Produktionsdichte abgeleitet werden. Aufgrund der auftretenden Nichtlinearitäten konnten leider keine allgemeinen Existenzresultate für das Produktionsmodell abgeleitet werden, allerdings gelang dies im Fall des Stahlwalzens. Die Frage nach rigorosen Resultaten im Fall der Produktionsnetze wird aktuell mit neuen Ansätzen weiter untersucht. Die approximativen Modelle konnten als Nebenbedingungen in der Optimierung in TP 1 eingesetzt werden.

- *TP 2 - MS 4: Numerik*

Für die Modelle wurden verschiedene numerische Verfahren entwickelt und mit den vorhandenen Daten verglichen. Es konnten für die approximativen Modelle qualitativ ähnliche Aussagen erhalten werden, wie für die sehr viel aufwendigere und im realen Umfeld nicht möglich durchzuführenden Partikelsimulationen erhalten werden. Dies deutet daraufhin, dass die Kontinuumsbeschreibung des Produktionsprozesses insbesondere für die Planung sehr gut einsetzbar sind. Auch hier gab es eine enge Verzahnung mit TP 1, da die Diskretisierungen direkt als nichtlineare Nebenbedingungen in der Optimierung genutzt werden konnten.

Im Rahmen des Projektes wurde mit verschiedenen Institutionen erfolgreich kooperiert. Insbesondere gab es enge Kooperationen mit der Area Operations Management der Universität Mannheim, im Speziellen mit dem Lehrstuhl für Production Management. An der RWTH Aachen stehen mit dem Institut für Werkzeugmaschinen (WZL) und dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) zwei Partner zur Verfügung, die auch Interesse an den Ergebnissen des Antrags haben. Konkret hat sich ein DFG-gefördertes Anschlussprojekt mit dem WZL ergeben, dass 2016 gefördert wurde. Unter dem Titel *Optimierung des mechatronischen Entwurfs von mehrachsigen Antriebssystemen* (HE5683/14-1) werden gemeinsam mit dem WZL Optimierungsfragestellungen in der Produktionsplanung mehrachsiger Antriebssysteme untersucht. Mathematisch besteht die Herausforderung in der Modellierung und nachgelagerten Optimierung der Produktionsmodelle und knüpft damit an die Arbeiten aus dem BMBF Projekt KinOpt an. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH Aachen wurden die entwickelten Methoden eingesetzt, um ein Modell für das Walzen von Flachstahl zu erarbeiten. Auch hier stellte sich die Darstellung des Prozesses durch ein stochastisches Partikelsystem, sowie die Untersuchung der zugehörigen kinetischen Gleichung als tragfähiges Konzept dar. Aus diesen Erkenntnissen ist eine gemeinsame Publikation mit dem IBF entstanden.

#### 4 **Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z.B. Investitionen, Personalmittel)**

Zu den wichtigsten Positionen des zahlungsmäßigen Nachweises in den beiden Teilprojekten TP 1 und TP 2 zählen die Personal- und Reisekosten. Die detaillierte Verwendung der Zuwendungen ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

#### 5 **Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

Zu Projektbeginn im Jahr 2013 führte die fehlende Funktionalität der damaligen Modelle zu suboptimalen Produktionsprogrammen, Inkonsistenzen in der Planung und erhöhtem Personalaufwand. Mit den bisher erzielten neuen Ergebnissen des Forschungsprojekts konnte ein erster Schritt in die Richtung gemacht werden, den bisher hohen manuellen Arbeitsaufwand abzubauen, die Planungsqualität durch Betrachtung flexibler Arbeitszeitmodelle und großer Produktionsstrecken zu erhöhen und insbesondere auf kurzfristige Änderungen im Programm- und Kapazitätsvorgaben effizient reagieren zu können. Langfristig sollen diese Erkenntnisse in den kurzfristigen Planungsprozess des sogenannten gewerkeorientierten Tagesproduktionsprogrammes einfließen.

Den mathematischen Fortschritt dokumentieren die in der Zeit entstandenen 23 Publikationen des Projekts. Durch diese Arbeiten wurde zum einen einer breiten mathematischen Gemeinschaft die wissenschaftlichen Errungenschaften des Projekts nähergebracht und zum anderen dokumentiert, dass neue Konzepte und Ideen mit wissenschaftlichem Anspruch entwickelt wurden.

Die theoretischen Ergebnisse sind auf Anwendungsseite in die Entwicklung der Verfahren eingeflossen, die dem Industriepartner zugänglich gemacht wurden und die dieser weiterentwickeln und an seine realen Daten anpassen kann.

Aufgrund der Vielzahl der erreichten Ergebnisse auch außerhalb des ursprünglich angesetzten Forschungsziels, werden wir exemplarisch einige Publikationen auswählen und an Hand der dortigen Ergebnisse, den Zusammenhang zum im Projekt versprochenen Ziel darstellen.

**S. Göttlich, S. Kühn, J. Schwarz, S. Stolletz, *Approximations of time-dependent unreliable flow lines with finite buffers*, Mathematical Methods in Operation Research (MMOR), Vol. 83(3), pp. 295-323, 2016.**

Gemeinsam mit Wirtschaftswissenschaftlern der Universität Mannheim wurde untersucht, inwiefern die neuen makroskopischen Gleichungen aus TP 1 und 2 mit den bereits in der Praxis relevanten Modellen korrelieren. Es stellte sich heraus, dass die neu entwickelten makroskopischen Modelle und deren Diskretisierungen mit den in der Praxis weit verbreiteten Discrete-Event Simulationen und deren gemischt-ganzzahliger Formulierung zusammenfallen. Anhand intensiver numerischer Fallstudien wurden die Gemeinsamkeiten der beiden Ansätze herausgearbeitet und miteinander verglichen. Somit konnte eine große Lücke in der Literatur sowie in der praktischen Umsetzung geschlossen werden.

**S. Göttlich, U. Ziegler, *An efficient optimization algorithm for workforce allocation in time-dependent production processes*, preprint, 2016.**

**S. Göttlich, M. Herty, U. Ziegler, *Modeling and optimizing traffic light settings on road networks*, Computers & Operations Research, Vol. 55, pp. 36-51, 2015.**

Die entwickelten gekoppelten Modelle aus TP 1 wurden hinsichtlich der numerischen Lösbarkeit und Performance in MS 3 bis MS 4 untersucht. Es stellte sich heraus, dass Standardlöser, wie sie von der Daimler AG benutzt werden, keine zufriedenstellenden Ergebnisse hinsichtlich der Effizienz liefern. D.h. es dauerte unter Umständen mehrere Tage, bis eine global optimale



Lösung gefunden werden konnte. Daher wurden primale Heuristiken entwickelt, sogenannte Callbacks, die den vom Praxispartner eingesetzten Löser beschleunigen ohne den eigentlichen Black-Box Branch&Bound Lösungsalgorithmus zu verändern. Eine ähnliche Idee wurde auch für ein anderes Anwendungsbeispiel, der Ampelsteuerung im Falle makroskopischer Gleichungen, erfolgreich implementiert und veröffentlicht.

**M. Herty**, L. Michalidis, **M. Ziegler**, *Kinetic part-feeding models for assembly lines in automotive industries*, Mathematical Models and Methods in the Applied Sciences (M3AS), Vol. 25(2), pp. 282-308, 2015.

Diese Arbeit ist gemeinsam mit dem Partner M. Ziegler der Daimler AG entstanden und stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Teilprojekts 2, insbesondere der Punkte MS 1 und MS 2 und MS 4, dar. Auf Basis realer Prozesse wurde eine Produktionslinie mittels des stochastischen Partikelspiels modelliert. Dieses Modell wurde anschließend in eine kinetische partielle Differentialgleichung überführt, wie in MS 2 angesetzt. Auf dieser Basis wurden schließlich numerische Simulationen durchgeführt. Die nötigen Gleichgewichtslösungen wurden ebenfalls hergeleitet, allerdings wurde kein approximatives Modell untersucht. Die prinzipielle Methodik ist analog zu dem vorgeschlagenen Verfahren im Projekt und zeigt die Realisierbarkeit. Numerisch wurden verschiedene Szenarien simuliert, die aus der Industrie motiviert sind. Eine direkte Anbindung an Daten erfolgte in dieser Arbeit nicht, allerdings konnte Frau Michailidis für Herrn Ziegler auch Simulationen für den Daimler-internen Gebrauch durchführen, um die Validität der Ergebnisse zu zeigen.

**M. Herty**, C. Ringhofer, *Large-time behavior of averaged kinetic models on networks*, Mathematical Models and Methods in the Applied Sciences (M3AS), Vol. 25(5), pp. 875-904, 2015.

In der obigen Arbeit war der Übergang zu approximativen Modellen nicht vollzogen worden. In weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Frage der Herleitung approximativer Modelle aus stochastischen Partikelsystemen allgemeiner untersucht werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurden die Produktionsplanung erweiternde Partikelspiele auf komplexen Netzwerken untersucht. Ziel war die Herleitung geeigneter approximativer Modelle insbesondere unter der Voraussetzung langer Zeithorizonte und großer Netzwerke. Die Herleitung wurde wie in MS 3 angedacht vollzogen und es konnten tatsächlich kontinuierliche Modelle abgeleitet werden, die in TP 1 verwendet werden können. Eine numerische Simulation dieser Gleichungen ist ebenfalls in der Arbeit enthalten. Eine Anwendung in der Industrie findet diese Arbeit bisher noch nicht, da bisher noch keine Kapazitätsbeschränkungen in dem Modell berücksichtigt sind. Dieser nächste Schritt fügt eine neue Nichtlinearität in den Prozess ein, für die die vorgestellte Herleitung adaptiert werden muss. Trotzdem ist das vorgestellte Modell für einige Produktionslinien, die weniger restriktiven Kapazitätsbeschränkungen unterliegen, einsetzbar.

M. Bambach, **M. Herty**, A. Haack, *Modeling steel rolling processes by fluid-like differential equations*, Applied Mathematical Modelling, Vol. 43, pp. 155–169, 2017.

Die in TP 2 - MS 1 bis MS 4 entwickelte Methode wurde zusammen mit dem Kollegen M. Bambach auf einen weiteren industriellen Prozess angewendet. Hierbei wurde der Walzprozess für Industriestahl betrachtet. Die Produktionslinie besteht aus mehrfachen Walzvorgängen, die zu produzierenden Objekte sind die Stahlplatten. Dieser Prozess ist mathematisch durch ein gegenüber der Automobilproduktion nur leicht zu änderndes stochastisches Partikelspiel beschrieben und die Übergänge zu kinetischen Gleichungen (MS 2), kontinuierlichen Gleichungen (MS 3) und der Numerik (MS 4) können ebenfalls durchgeführt werden. Statt der Optimierung der Arbeitszeitmodelle (TP 1 - MS 1) stellt sich hier die Frage optimaler Pro-

zessparameter. Dies ist strukturell ähnlich zu dem Problem aus TP 1 - MS 2. Die dort entwickelten Techniken konnten daher eingesetzt werden und das Problem effizient gelöst werden.

Zusammenfassend sind sowohl in TP1 als auch in TP2 alle MS erfolgreich umgesetzt worden.

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das Voranschreiten der einzelnen Meilensteine in den beiden Teilprojekten konnten entsprechend der formulierten Planung realisiert werden. Alle Meilensteine des Teilprojekts wurden erfolgreich bearbeitet, es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

An Hand der zur Verfügung stehenden Daten konnten für die konkret betrachteten Produktionslinien neue Modelle und zugehörige makroskopische Gleichungen abgeleitet werden. Diese neuen Modelle haben gegenüber den bisher verwendeten Modellen auf mikroskopischer Ebene den Vorteil, dass sie unabhängig von den Produktionsstückzahlen berechnet werden können und trotzdem unterschiedliche Verbauezeiten einzelner Teile berücksichtigen. Durch die Kopplung mit diskreten Arbeitszeitmodellen ergibt sich daraus, dass nun auch langfristige Planungshorizonte für die Produktion realisiert werden können. Folglich eignet sich das neu entwickelte, gekoppelte Modell besonders für die operative Planung. Die Entwicklung effizienterer Planungsszenarien ermöglicht es dem Praxispartner flexibler auf die aktuelle Marktsituation zu reagieren. Durch die erzielten Ergebnisse kann bereits in der Planungsphase der manuelle Arbeitsaufwand langfristig reduziert und gleichzeitig durch eine robustere Planung der Personalaufwand in der Produktion gesenkt werden. Dies stärkt nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit aller Produktionsstandorte der Daimler AG in Deutschland, sondern auch dessen Vorreiterrolle in der deutschen Automobilindustrie.

Weiterhin lässt sich festhalten, dass diskret-kontinuierliche Aufgabenstellungen in der Praxis an vielen Stellen auftreten. Ein weiteres Beispiel ist der kontinuierliche Verkehrsfluss gekoppelt mit der diskreten Schaltung von Verkehrsleitsystemen oder Gas - und Wasserversorgungsnetze mit einer stufenweise schaltbaren Pumpanlage. Für Standortplanungsprobleme unter Berücksichtigung zeitdynamischer Flüsse liefern die in TP 1 entwickelten Methoden ebenfalls relevante Beiträge. Es ist zu erwarten, dass die entwickelten Methoden in der Industrie auch an anderer Stelle eingesetzt werden können. Insbesondere die Lösungstechniken und Heuristiken, die in diesem Projekt für einen speziellen Produktionsfall entwickelt wurden, sind leicht auf weitere Anwendungsfälle übertragbar.

In Bezug auf die Modellierung in TP 2 sind die Industriepartner nach Abschluss des Projekts über die Anwendung neuer Methoden und Modelle und deren Mehrwert in der langfristigen Planung für Prozesse mit großer Stückzahl auf das aktuelle Forschungsniveau geführt worden. Die neuen Modelle zeigen in einigen Bereichen, die vorher nicht darstellbar waren, Möglichkeiten zur Prädiktion, Auslegung und Steuerung der Fabriken auf. Inwieweit sich das zusätzliche Wissen auch wirtschaftlich umsetzen lässt, ist zu dem aktuellen Zeitpunkt nur schwer zu beurteilen, da zunächst noch an der Kopplung zu Echtzeitdaten gearbeitet werden muss. Dieser technische Schritt ermöglicht dann eine rigorose Verifikation und eine tatsächliche Umsetzung der Methoden in ein industriell-verwertbares Tool.

## **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Für die Verwertung der Erkenntnisse aus dem Verbundprojekt wird stetig nach weiteren Anwendungsfeldern Ausschau gehalten. Aus der Perspektive der Verbundpartner gibt es neben der klassischen Produktionsplanung weitere Anwendungsgebiete, die sich primär anbieten, um die entwickelten Mo-

delle und Methoden weiter zu übertragen und zu testen. Zum einen sind das Verkehrsflussprobleme, zum anderen die Untersuchung von Versorgungsnetzen wie zum Beispiel Gas- und Wasserversorgungsnetze. Für diese Anwendungen ist es jedoch notwendig, neben der Modellierung diskret-kontinuierlichen Optimierungsprobleme weiterhin an zuverlässigen Lösungsmethoden und deren Softwareimplementierungen zu arbeiten. Zudem ist die Methodik wie oben beschrieben auch im Falle des Walzens des Industriestahls eingesetzt worden. Allgemeinere Ergebnisse zu Netzwerken, die ähnlichen Charakter, wie Automobilproduktion haben, sind ebenfalls erzielt worden und entsprechend publiziert. Die Publikationsliste zeigt deutlich die möglichen und untersuchten über den Antrag reichenden wissenschaftlichen Gewinn des Projektes. Zudem konnten über zehn StudentInnen an die Thematik im Rahmen von BSc, MSc und Promotionsarbeiten herangeführt werden. Es ist zu erwarten, dass die Studierenden die Ergebnisse auch in ihr späteres Umfeld einbringen werden und hier entsprechende Beiträge liefern können.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 9.1 Referierte Publikationen (z.B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenz-proceedings)

Teilprojekt 1 (Prof. Göttlich, Universität Mannheim):

1. **S. Göttlich, U. Ziegler**, *Traffic Light Control: A Case Study*, Discrete and Continuous Dynamical Systems Series S (DCDS-S), Vol. 7(3), pp. 483-501, 2014.
2. **S. Göttlich**, O. Kolb, S. Kühn, *Optimization for a special class of traffic flow models: combinatorial and continuous approaches*, Networks and Heterogeneous Media (NHM), Vol. 9(2), pp. 315-334, 2014.
3. O. Kolb, **S. Göttlich**, *A Continuous Buffer Allocation Model Using Stochastic Processes*, European Journal of Operations Research (EJOR), Vol. 242(3), pp. 865-874, 2015.
4. **S. Göttlich**, P. Schindler, *Optimal inflow control of production systems with finite buffers*, Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B (DCDS-B), Vol. 20(1), pp. 107-127, 2015.
5. **S. Göttlich**, A. Klar, S. Tiwari, *Complex material flow problems: a multi-scale model hierarchy and particle methods*, Journal of Engineering Mathematics, Vol. 92(1), pp. 15-29, 2015.
6. **S. Göttlich**, S. Kühn, *Routing strategies in production networks with random breakdowns*, Communications in Mathematical Sciences (CMS), Vol.14(7), pp. 1799-1820, 2016.
7. **S. Göttlich**, S. Kühn, J. Schwarz, S. Stolletz, *Approximations of time-dependent unreliable flow lines with finite buffers*, Mathematical Methods in Operation Research (MMOR), Vol. 83(3), pp. 295-323, 2016.
8. J. Che, L. Chen, **S. Göttlich**, L. Wang, *Existence of a classical solution to complex material flow problems*, Mathematical Methods in the Applied Sciences (MMAS), Vol. 39(14), pp. 4069-4081, 2016.
9. **S. Göttlich, C. Teuber**, *Space mapping techniques for the optimal inflow control of transmission lines*, akzeptiert bei Optimization Methods and Software (OMS), Dez. 2016.
10. **S. Göttlich**, P. Schillen, *Numerical Discretization of Boundary Control Problems for Systems of Balance Laws*, eingereicht bei European Journal of Control (EJCON), Dez. 2016.

Gemeinsame Publikationen mit Teilprojekt 2 (Prof. Herty, RWTH Aachen):

1. **S. Göttlich, M. Herty, U. Ziegler**, *Modeling and optimizing traffic light settings on road networks*, Computers & Operations Research, Vol. 55, pp. 36-51, 2015.
2. **L. Forestier-Coste, S. Göttlich, M. Herty**, *Data-fitted second-order macroscopic production models*, SIAM J. on Applied Mathematics (SIAP), Vol. 75(3), pp. 999-1014, 2015.

3. **S. Göttlich, M. Herty**, P. Schillen, *Electric transmission lines: Control and numerical discretization*, Optimal Control Applications and Methods (OCAM), Vol. 37(5), pp. 980-995, 2016.
4. **S. Göttlich, M. Herty**, M. Luckert, *Modeling of material flow problems*, akzeptiert bei L. Ghezzi, D. Hömberg, C. Landry (Eds.): *Math for the Digital Factory*, Springer-Verlag, 2016.

#### Teilprojekt 2 (Prof. Herty, RWTH Aachen University)

1. A. Bressan, S. Canic, M. Garavello, **M. Herty**, B. Piccoli, *Flows on networks: recent results and perspectives*, Vol. 1(1), EMS Surveys in Mathematical Sciences, pp. 47-111, 2014.
2. **M. Herty**, C. Ringhofer, *Large-time behavior of averaged kinetic models on networks*, Mathematical Models and Methods in the Applied Sciences (M3AS), Vol. 25(5), pp. 875-904, 2015.
3. D. Armbruster, **M. Herty**, X. Wang, L. Zhao, *Integrating release and dispatch policies in production models based on clearing functions*, Networks and Heterogenous Media (NHM), Vol. 10(3), pp. 511-526, 2015.
4. F. He, D. Armbruster, **M. Herty**, M. Dong, *Feedback control for priority rules in re-entrant semiconductor manufacturing*, Applied Mathematical Modeling, Vol. 39, pp. 4655-4664, 2015.
5. **M. Herty**, L. Michalidis, **M. Ziegler**, *Kinetic part-feeding models for assembly lines in automotive industries*, Mathematical Models and Methods in the Applied Sciences (M3AS), Vol. 25(2), pp. 282-308, 2015.
6. **M. Herty**, L. Pareschi, S. Steffensen, *Meanfield control and Riccati equations*, Networks and Heterogenous Media, Vol. 10(3), pp. 699-715, 2015.
7. **M. Herty**, **H. Yu**, *Feedback boundary control of linear hyperbolic equations with stiff source term*, Automatica, Vol. 69, pp. 12-17, 2016.
8. M.K.Banda, A. Haeck, **M. Herty**, *Numerical discretization of coupling conditions by high-order schemes*, Journal of Scientific Computing, Vol. 69(1), pp. 122-145, 2016.
9. M. Bambach, **M. Herty**, A. Haeck, *Modeling steel rolling processes by fluid-like differential equations*, Applied Mathematical Modelling, Vol. 43, pp. 155-169, 2017.

#### 9.2 Andere Veröffentlichungen (z.B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

##### Geimeinsame Konferenzbeiträge (Teilprojekt 1 und Teilprojekt 2)

- Workshop *Math for the Digital Factory*, WIAS Berlin, Mai 2014
- Mathematisches Kolloquium, KIT Karlsruhe, Mai 2014
- Mathematisches Kolloquium, Imperial College, London, Juni 2014
- AIMS Konferenz *Differential Equations and Applications*, Madrid, Juli 2014
- GOR Tagung *Business Analytics and Optimization*, Aachen, September 2014
- Symposium *Frontiers of Science and Technology*, Brasilien, September 2014
- Mathematisches Kolloquium, Universität Konstanz, November 2014
- Workshop *Women in Optimization*, Heidelberg, März 2015
- Organisation des Minisymposiums *Partial Differential Equations in the Modeling of Collective Phenomena*, IFIP, Nizza, August 2015
- Mathematisches Kolloquium, TU Kaiserslautern, Juni 2015
- Mathematisches Kolloquium, RWTH Aachen, Oktober 2015
- Mathematisches Kolloquium, Universität Düsseldorf, März 2016
- GAMM/DMV Konferenz, Universität Braunschweig, März 2016
- ECCO Konferenz, Budapest, Juni 2016

##### Summer Schools:

- *MINO/COST Training School*, Tilburg, März 2015

- *Combinatorial Optimization at Work*, Berlin, Oktober 2015
- *Control Interfaces in Logistics: Data and Algorithms*, Bremen, Februar 2016

### 9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

- M. Degner, Bachelorarbeit, *Dynamische Optimierung*, April 2014
- H.-P. Truong, Bachelorarbeit, *Warteschlangentheorie*, April 2014
- S. Kühn, Promotion, *Continuous traffic flow models and their applications*, Dezember 2014
- K. Hameister, Masterarbeit, *Service Operator Allocation for the Automotive Industry*, Dezember 2014
- P. Schindler, Promotion, *Continuous modeling and optimization approaches for manufacturing systems*, April 2015
- L. Michailidis, Promotion, *Data driven Mathematical Models for Assembly Lines in Automotive Industries*, April 2015
- L.M. Hach, Bachelorarbeit, *Optimierung von Bestellpolitiken in Supply Chains*, Mai 2015
- M. Jost, Masterarbeit, *Feedback Laws for Production Systems*, Juni 2015
- C. Dörr, Bachelorarbeit, *Produktionssysteme mit beschränkter Reparaturkapazität*, Mai 2016