

Nachhaltige Produktionsregelung

M. Vorderwinkler, H. Heiß

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

40/2011

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Nachhaltige Produktionsregelung

Dr. Markus Vorderwinkler, Helga Heiß
PROFACTOR GmbH

Steyr-Gleink, Mai 2011

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangssituation.....	11
1.2 Zielsetzung des Projektes.....	13
1.3 Stand der Technik.....	16
1.3.1 Automatisierte Verfahren der Produktionsfeinplanung und Produktionsregelung.....	16
1.3.2 Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit in der Produktionsregelung.....	17
1.4 Vorarbeiten.....	19
1.4.1 Vorarbeiten zum Thema ganzheitliche Simulation.....	19
1.4.2 Vorarbeiten zum Thema Produktionsregelung und Optimierung.....	20
2 Hintergrundinformation zum Projektinhalt	22
2.1 Prinzipielle Vorgangsweise.....	22
2.2 Methoden & Daten.....	22
2.3 Stand der Technik & Innovationsgehalt.....	23
2.4 Vorgehensweise.....	24
2.4.1 Entwicklung eines Schemas zur ganzheitlichen Produktionsregelung.....	24
2.4.1.1 Zielsetzung.....	24
2.4.1.2 Ergebnisse.....	24
2.4.1.3 Herausforderungen.....	26
2.4.1.4 Highlights.....	26
2.4.2 Anforderungsanalyse bei den beteiligten Anwendungspartnern.....	27
2.4.2.1 Zielsetzung.....	27
2.4.2.2 Ergebnisse.....	27
2.4.2.3 Herausforderungen.....	30
2.4.2.4 Highlights.....	31
2.4.3 Erstellung der Simulationsmodelle und Zielfunktionen.....	31
2.4.3.1 Zielsetzung.....	31
2.4.3.2 Ergebnisse.....	31
2.4.3.3 Herausforderungen.....	38
2.4.3.4 Highlights.....	38
2.4.4 Entwicklung der automatisierten Planungs- und Optimierungsverfahren.....	38
2.4.4.1 Zielsetzung.....	38
2.4.4.2 Ergebnisse.....	39
2.4.4.3 Optimierungsansatz I - Scheduling.....	39
2.4.4.4 Optimierungsansatz II - Regelbasiertes Dispatching.....	42

2.4.4.5	Herausforderungen.....	53
2.4.4.6	Highlights.....	54
2.4.5	Evaluierungs- und Tuning-Phase	54
2.4.5.1	Zielsetzung	54
2.4.5.2	Ergebnisse.....	54
2.4.5.3	Herausforderungen.....	57
2.4.5.4	Highlights.....	58
3	Ergebnisse des Projektes.....	59
4	Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie.....	62
4.1	Einpassung in die Programmlinie	62
4.2	Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie sowie zu den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung.....	62
4.3	Einbeziehung von Zielgruppen	64
4.4	Verbreitungs- und Umsetzungspotentiale.....	64
4.5	Potential für Demonstrationsvorhaben	65
5	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen.....	66
5.1	Erkenntnisse	66
5.2	Schlussfolgerungen zum Thema ganzheitliche Bewertung.....	68
5.3	Schlussfolgerungen zum Thema regelbasiertes Dispatching.....	70
6	Ausblick und Empfehlungen.....	71
6.1	Weiterführende Zusammenarbeit des Projektteams	71
6.2	Relevanz der Ergebnisse für andere Zielgruppen	71
7	Literatur- / Abbildungs- / Tabellenverzeichnis	73
7.1	Literatur	73
7.2	Abbildungsverzeichnis	75

Kurzfassung

Ausgangssituation und Motivation

Das Führen von Produktionsprozessen erfolgt heute fast ausschließlich nach klassischen betriebswirtschaftlichen Kriterien. Typische Fragestellungen sind dabei das Bewerten und Gegenüberstellen logistischer Betriebskennzahlen wie Ressourcenauslastung versus Bestände, Durchlaufzeiten und Termintreue. Die Kriterien Energieeinsatz, Betriebsmittelverbrauch, Abfall- und Schadstoffemissionen, Stressbelastung der MitarbeiterInnen, Arbeitsmonotonie etc. werden bei der Auftragsreihenfolgeplanung (Produktionssteuerung, rollierende Produktionsplanung) selten und vor allem kaum systematisch berücksichtigt. Sowohl Auftragsreihenfolge als auch Losgröße haben jedoch einen wesentlichen Einfluss auf nachhaltigkeitsrelevante Betriebskennzahlen. So erfordern ungünstige Reihenfolgen zusätzliche Umrüst-, Reinigungs- und Einstellvorgänge, welche sich in zusätzlichem Energieverbrauch (z. B. für die Werkzeugvorwärmung) wie auch in vermehrter Schadstoffemission durch Reinigungsmittel oder Restmaterial (z. B. bei Farb- oder Materialwechsel) widerspiegeln. Darüber hinaus beeinflusst die Reihenfolgeplanung die Arbeitsergonomie. Manuelle Tätigkeiten können bei gleichem Auslastungsmittelwert so eingeplant werden, dass jeweils kurze Belastungen sich mit gleich kurzen Pausen abwechseln, aber auch derart, dass einer längeren Belastung jeweils eine längere Pause folgt. Dieser Tatsache kann eine entsprechend ausgelegte Produktionssteuerung Rechnung tragen, indem nicht nur der Mittelwert der Pausenzeiten, sondern deren Verteilung und Länge in die ganzheitliche Bewertung eines Produktionsplanes einfließen und somit psychischer Ermüdung, Stressreaktionen, Fehlerhäufigkeit und unsicherem Verhalten vorgebeugt werden. Weiters lassen sich mit einer gezielten Abstimmung aufeinander folgender Aufträge manuelle Tätigkeiten abwechslungsreicher gestalten, was ebenfalls einer mentalen Ermüdung entgegenwirkt und damit die Produktionsqualität steigert.

Inhalte und Zielsetzungen

Zielsetzung des Projektes war die Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Automatisierung der operativen Produktionssteuerung (rollierende Produktionsfeinplanung, Produktionsregelung) unter Berücksichtigung von Gesichtspunkten des nachhaltigen Wirtschaftens. Das entwickelte Lösungskonzept berücksichtigt dazu Kriterien der Nachhaltigkeit wie Arbeitsergonomie, Energie- und Betriebsmittelverbrauch oder Abfallmenge in der Planung und führt eine Produktion automatisiert an einem aus ganzheitlicher Sicht optimalen Betriebspunkt. Die entwickelten Methoden wurden am Beispiel des Kunststoffgießens, einer flexiblen, werkstatorientierten Produktion evaluiert.

Methodische Vorgehensweise

Als Lösungskonzept für das geplante Entscheidungsunterstützungssystem wurde ein simulationsgestützter Ansatz gewählt: Dabei erstellen die eingesetzten Planungs- und Optimierungsverfahren Szenarien, welche zunächst von einem ereignisdiskreten Prozessmodell simuliert und anschließend in einem nachgeschalteten Bewertungsmodell evaluiert werden. Das Bewertungsmodell liefert dem Optimierungsverfahren (Scheduler, Regelsynthese) eine Rückmeldung über die Güte eines gewählten Szenarios, sodass ein iterativer Verbesserungsvorgang angestoßen werden kann. Die Ergebnisse der Planungs- bzw. Optimierungsläufe werden in Form von Gantt Charts oder als Strategie-Dialog visualisiert und in dieser Form den MitarbeiterInnen kommuniziert.

Aufgrund der hohen stochastischen Einflüsse durch alltägliche Störungen wurde die Idee verfolgt, parallel zu den Ablaufplänen auch Prioritätsregeln zu entwickeln, und im Falle einer Störung von der Ablaufplanung (Scheduling) auf eine situationsbasierte Planung (Dispatching) umzuschalten.

Für die Erstellung der Ablaufpläne wurde das Konzept des Resource Constraint Project Scheduling (RCPS) herangezogen und als Adaptive Large Neighborhood Search, einer nachbarschaftsbasierte Metaheuristik implementiert.

Für das regebasierte Dispatching wurde das Prozessmodell um Regelinterpretierer an den einzelnen Entscheidungspunkten erweitert, welche bei Bedarf die eingestellten Prioritätsregeln ausführen und situativ Entscheidungen fällen. Die Prioritätsregeln wurden automatisch mittels Genetic Programming synthetisiert und optimiert.

Zur ganzheitlichen Bewertung der generierten Szenarien wurden die vom Prozessmodell beobachteten Kennzahlen in einem nachgeschalteten Bewertungsmodell gewichtet und zu einem gemeinsamen Fitnesswert zusammengeführt. Zentrales Element des Bewertungsmodells sind Übertragungsfunktionen zur Umrechnung der in unterschiedlichen Einheiten beobachteten Größen in Kennzahlen gleicher Einheit.

Ergebnisse

Im Zuge des Projektes wurde das entwickelte Konzept prototypisch unter .NET implementiert. Als Basis für die Erstellung der Prozess- und Bewertungsmodelle wurde die von Profactor entwickelte Simulationsbibliothek SiRO für die Abbildung ereignisdiskreter Systeme gewählt, für die Synthese und Optimierung der Dispatching-Regeln das am HEAL entwickelte HeuristicLab. Das Adaptive Large Neighborhood Search Verfahren wurde unter C++ implementiert. Die für die Initialisierung der Prozessmodelle erforderlichen Stammdaten sowie die zu verplanenden Auftragsdaten werden über eine Datenbankschnittstelle aus dem ERP-System APplus übernommen. Das Prozessmodell umfasst alle relevanten Produktionsschritte von der Kernvorbereitung bis zur mechanischen Nachbearbeitung der gegossenen Teile. Das individuelle Bewertungsmodell berücksichtigt ökonomische (Durchsatz, Termintreue, Durchlaufzeit), ökologische (Rüstvorgänge mit Materialverbrauch, Nachbearbeitungszyklen) und arbeitsergonomische Aspekte (Einhaltung Pausenzeiten, Regeneration von Überstunden, Arbeitsmonotonie, Hitze und Kälte). Neben den Einzelkennzahlen und dem zusammengeführten Fitnesswert wird die Qualität der Planungslösung bzw. der Dispatching-Regeln mit Hilfe eines Gantt-Charts der Produktionsabläufe visualisiert.

Die im Projekt durchgeführten Experimente bestätigen den gewählten Lösungsansatz: Mit beiden implementierten Verfahren konnten die Auftragsreihenfolgen optimiert werden. Eine Aussage über die Qualität der gewählten Algorithmen und deren Parametrierung konnte jedoch noch nicht gemacht werden.

Für eine tiefergehende, wissenschaftliche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Konfigurationen und Parametrierungen von Optimierungsverfahren, Bewertungsmodell und Simulationsmodell wurde ein Nachfolgeprojekt initiiert. Speziell sollen in diesem Projekt die Algorithmen und Modelle noch weiter auf ihre Robustheit und Performance untersucht werden. So gilt es u. a. zu klären, wie sich die Algorithmen, bzw. synthetisierten komplexen Prioritätsregeln bei Datenfehlern, Veränderung von Prozess- und Auftragsparametern oder bei einer Änderung der Produktionsstrategie (Anpassung des Bewertungsmodells) verhalten. Ein weiterer, wissenschaftlich noch zu untersuchender Punkt ergibt sich aus der Interpretation der mit genetischer Programmierung optimierten Modelle (komplexe Prioritätsregeln).

Abstract

Initial Situation and Motivation

Today's production processes are more or less controlled by classical economical criteria. Typical key performance indicators are resource utilisation, stock volumes, throughput times and due dates. Criteria like energy and operating resources consumption, waste and pollutant emissions, stress charges, work monotony are rarely and especially not yet systematically considered in sequence planning and scheduling. Both order sequences as well as lot sizes show an essential impact on sustainability indicators. Inappropriate sequences require additional set-up, cleaning and adjusting procedures, that yield in additional energy consumption (e.g. for tool preheating) as well as an increased pollutant emission caused by detergents or residual material (e.g. caused by material or colour change). Further, the order sequence also influences work ergonomics. Giving the same mean value, manual tasks may be planned in a manner that short charges are followed by breaks of the same lengths, or in such a way that longer charges are followed by longer breaks. A sensitised production control system may consider this fact by analysing not only the mean time of breaks but also their distribution and individual durations. Considering these aspects in a holistic evaluation of schedules can prevent mental exhaustion, stress reactions, failure rates and unconfident behaviour. Further, a balanced coordination of following production orders will make manual tasks more diversified, which in turn work against fatigue and increases production quality.

Contents and Objectives

Aim of the project was to develop methods and procedures to automate the operative production control (rolling detailed production planning) considering sustainable economics. The envisaged solution considers criteria of sustainability like work ergonomics, energy and resources consumption, amount of waste etc. and holds a production automatically at an – from a holistic point of view – optimal point of operation. The aimed automation of the planning tasks ensures a stable planning quality at a high optimisation level as well as an increased transparency and a full documentation of planning decisions. The results were evaluated in a casting production which is characterised by a high level of manual tasks as well as many chronologically overlapping operations.

Methodological Approach

A simulation-based method was selected as the basis of the intended decision support system: Different scenarios are created within the discrete event process model by the use of the optimization methods, which are being evaluated by the rating model. The rating model gives feedback to the optimization method (scheduler, dispatcher) about the quality of the generated solution, so that a continuous process of improvement can take place. The results of the planning/optimization runs are being visualized as Gantt charts or as strategy dialog and are being communicated to the employees in that way.

Due to the vast stochastic influences by everyday disruptions the idea arose to develop both schedules and priority rules at the same time, and to switch from scheduling to dispatching in case of a disruption.

For the creation of schedules the concept of Resource Constraint Project Scheduling (RCPS) was chosen and implemented as Adaptive Large Neighbourhood Search (a neighbourhood heuristic).

For the rule based dispatching the process model was enhanced with rule interpreters, which evaluate the priority rules at the decision points and therefore make decisions based on the actual situation. The rules were synthesized and optimized automatically with Genetic Programming.

For the holistic rating of the generated scenarios the indicators which were observed within the process model are being weighted and merged into a single fitness value within the subsequent rating model. The most important elements of the rating models are the transfer functions, which transform the different values which are represented in different measurement units into one and the same unit.

Results

In the course of the project, the methodological approach has been implemented prototypically in .NET as a testing and evaluation environment using the example of a plastics casting process. SiRO, a discrete event simulation library implemented by Profactor, has served as a foundation of the implementation of the simulation and rating models. HeuristicLab, an optimization framework developed by HEAL, was used for the synthesis and the optimization of dispatching rules. It was also combined with the process and rating models to form an optimization system. The Adaptive Large Neighbourhood Search algorithm was implemented in C++. The reference data necessary for the initialization of the process models as well as the order data were drawn from the database of the existing ERP system APplus. The process model involves all the relevant worksteps from the core preparation to the finishing process of the moulded parts. The individual rating model takes into consideration economical criteria (throughput, timeliness, pass-through time), ecological criteria (material consumig setup tasks, reworking tasks) and work ergonomic aspects (regular pauses, regeneration before extra hours, monotony, heat and cold). Additionally to the single indicators and the merged fitness value the solution quality of either schedules or dispatching rules is visualized by a Gantt-Chart.

The experiments which were conducted during the project confirmed the chosen approaches: Both implemented methods can be used to optimize order sequences, although this does not yet state anything about the quality of both the chosen algorithms and their parameterization.

Due to the high complexity of the real processes, especially of the manual tasks, more effort than initially planned had to be put into the creation of the process and rating models. In spite of the high level of detail, a few aspects of the real production environment (constraints) could not yet have been completely modelled. Also the rating model requires further research, which could not be implemented and tested completely during the project runtime.

For a deeper scientific study of the interdependencies between different configurations and parameter settings of optimization algorithms, rating model and simulation model a follow-up project was initiated. In this project, especially the algorithms and models should be explored in terms of robustness and performance. The goal is to clarify how the algorithms and the synthesized complex priority rules react to data flaws, change of process parameters, different order data or changes in the production strategy (changes in the rating model). Another point to be examined scientifically is the interpretation of the dispatching rules synthesized by the genetic programming (complex priority rules).

1 Einleitung

Das gegenständliche Projekt beschäftigt sich mit der Optimierung der operativen Produktionssteuerung auf Werkstätten-Ebene, speziell mit der Reihenfolgeplanung und der Feinterminierung von Produktions- oder Fertigungsaufträgen [Schuh06, Zäpfel82, Wiendahl08]. Im Zuge der Produktionssteuerung wird festgelegt, wie die zur Abarbeitung anstehenden Aufträge durch die Produktion gelenkt wird und welche MitarbeiterInnen bzw. Maschinen bestimmten Aufträgen zugeordnet werden. Kurzfristige Aufgaben der Produktionssteuerung sind vor allem in Zusammenhang mit kurzfristigen Änderungen in der Auftrags- oder Kapazitätsrealität zu sehen. Die bewusste Einplanung von etwaigen Ausfällen von Maschinen oder Anlagen bzw. von MitarbeiterInnen oder von unerwarteten Kundenaufträgen mit hoher Priorität soll zu einem verlässlicheren, nachhaltigeren Prozess und zu einem insgesamt schonenderen Umgang mit Ressourcen führen.

Da die Zusammenhänge mehrdimensional sind, werden die Aufgaben der Produktionssteuerung vermehrt mit entsprechenden Softwaresystemen durchgeführt. Diese erlauben nicht nur, die genannten Aufgaben und Randbedingungen effizient und komfortabel auszuführen, sie ermöglichen zudem eine hohe Flexibilität des Planers und eine hohe Transparenz über den aktuellen Belegungs- und Terminzustand in der Produktion. Während viele Systeme noch die traditionellen Methoden des Operations Research zur Optimierung der Ergebnisse verwenden, zeichnen sich praxisorientierte Systeme vor allem durch den Einsatz heuristischer Methoden für die Erstellung von Ablaufplänen oder arbeitsvorgangbezogener Prioritätsregeln aus, die dem Verständnis und der Anschauung des Produktionsplaners weitgehend entsprechen.

Praxisorientierte Systeme unterstützen den Planer bei seiner täglichen Arbeit, und nehmen ihm das mühselige, sehr stark auf Erfahrung basierende "Ausknobeln" von guten Lösungen ab. In früheren Projekten konnten durch die Einführung eines solchen Planungssystems etwa zwei Drittel der Planungskosten eingespart werden, so dass der Planer sich besser mit seiner eigentlichen Aufgabe, nämlich dem Behandeln von Ausnahmefällen und dem Qualitätsmanagement, auseinandersetzen konnte bzw. kann.

Diese Herangehensweise rückt die langfristigen Auswirkungen der Planungsstrategien ins Bewusstsein und schafft Transparenz. Auf diesem Hintergrund entsteht Nachhaltigkeit in der Planung (langfristige, aktive Planung statt kurzfristige, reaktive Planung). Weiters konnten in Vorgängerprojekten die Rüstkosten bis auf die Hälfte reduziert werden. Die Optimierung (hier: Minimierung) von Rüstvorgängen ist wichtig und erstrebenswert, da sie im gegenständlichen Projekt das Nachhaltigkeitsbestreben im ökologischen Kontext erfüllt. (Gerade im Kunststoffsektor wird bei Rüstvorgängen viel Material vergeudet.) Nachhaltigkeit bezieht sich im Kontext von Procomposite aber auch auf den langfristigen Aufbau und die Erhaltung von menschlicher Leistungsfähigkeit. Sie soll mit Hilfe einer Planung erzielt werden, die auf menschliche Verhaltensweisen und Bedürfnisse eingeht. Durch die Abstimmung der Auftragsreihenfolge sollen Parameter wie Monotoniebelastung oder Lernkurven gezielt zum Positiven beeinflusst werden.

Die aus dem Zusammenspiel so vieler unterschiedlicher Faktoren entstehende Komplexität kann nicht alleine von mathematischen Modellen abgedeckt werden. Deshalb wird als Grundlage für die Studien bzw. für die Optimierungsaufgaben ein Simulationsmodell entwickelt, das die zu regelnde Produktionsstätte abbildet. Dadurch eröffnen sich zahlreiche zusätzliche Möglichkeiten, wie etwa der Einsatz des Simulationsmodells für Sensitivitätsanalyse; d. h. auftretende Probleme können durch Umstrukturierung des Modells (und in späterer Folge der Realität) gelöst werden. Gerade das Thema Flexibilität, die Fähigkeit zur schnellen, effizienten Umstrukturierung ist ein großes Unterscheidungsmerkmal, das gerade Europa mit seinen kleinen Strukturen hilft, im weltweiten Wettbewerb fortan bestehen zu können.

1.1 Ausgangssituation

Die Erfahrung aus zahlreichen durchgeführten Projekten und Studien zur Prozessplanung und Produktionsoptimierung in der Stückgutproduktion wie auch Veröffentlichungen auf relevanten Fachkonferenzen (z. B. zu den Themenbereichen Digitale Fabrik, Fabrikplanung, Operations Research und Simulation) zeigen, dass in der industriellen Praxis das Auslegen und Führen von Produktionsprozessen heute fast ausschließlich nach klassischen betriebswirtschaftlichen Kriterien erfolgt, die vor allem technologisch und ökonomisch orientiert sind.

Typische Fragestellungen sind dabei das Bewerten und Gegenüberstellen technischer Betriebskennzahlen wie Ressourcenauslastung versus Bestände und Durchlaufzeiten oder die Losgrößenbestimmung bzw. das Lossplitting im Hinblick auf Termintreue. Die Kriterien Energieeinsatz, Betriebsmittelverbrauch, Abfall- und Schadstoffemissionen, Stressbelastung der MitarbeiterInnen, Arbeitsmonotonie etc. werden zwar vereinzelt in der Auslegung von Einzelprozessen und Prozessschritten (z. B. in der Maschinendimensionierung oder der Arbeitsplatzgestaltung) berücksichtigt. Bei der Planung und Auslegung von Gesamtsystemen, speziell bei der Dimensionierung und Abwicklung der technischen Logistik, spielen diese Bewertungskriterien jedoch eine bisher untergeordnete, zumeist sogar gar keine Rolle. Den Antragstellern sind keine Industrieprojekte aus dem Bereich der Fabrik- und Logistikplanung sowie der Produktionsregelung bekannt, in denen ökologische und arbeitsergonomische Aspekte der Nachhaltigkeit eine wesentliche Rolle bei der Auslegung und vor allem bei der Produktionsplanung gespielt haben. Auch in der relevanten Literatur zu den Themen Digitale Fabrik, Simulationsgestützte Fabrik- und Logistikplanung sowie der Produktionsplanung ist bisher keine signifikante Behandlung dieses Themas erkennbar.

Ein erster Ansatz in Richtung einer konkreten Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten wurde im EU Projekt NANOWOOD - Multifunctional timber facade system made from Nanosol finished Thermowood for sustainable building facades aufgegriffen. Zentrales Thema dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung eines umweltfreundlichen, multifunktionellen Fassadensystems auf Basis von Thermoholz unter Verwendung einer neuartigen Holzveredelung. Im Zuge des Projektes wurde parallel zur Produktentwicklung eine spezifische Produktionsstätte geplant, welche mit Hilfe von Simulation abgesichert und dimensioniert wurde. In diese Simulationsmodelle wurden als Ergänzung zu klassischen Bewertungsfaktoren erstmals Kennzahlen zur gesamtökologischen Bewertung der Produktionslogistik wie der zustandsabhängige Energieverbrauch, die auftragsspezifische Abfallmenge, der auftrags- und situationsabhängige Klebstoffverbrauch etc. aufgenommen. Somit konnte der Einfluss unterschiedlicher Produktionslayouts und Produktionsszenarien auf den dynamischen Verlauf dieser „neuen“ Faktoren beobachtet und in eine ganzheitliche (bzw. in eine erweiterte) Bewertung eingepflegt werden.

Die Einbindung umfassender Prozessbewertungen in die Produktionsplanung bietet neues Optimierungspotential

Mit der Aufnahme zusätzlicher Kriterien aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit ergeben sich in der Regel Verschiebungen des optimalen Betriebspunktes eines Produktionssystems. Während z. B. kleine Losgrößen eine kurze Durchlaufzeit und damit in der Regel eine höhere Termintreue gewährleisten, verursachen die dafür erforderlichen zusätzlichen Rüstvorgänge z. B. vermehrte Energieverluste durch Temperaturanpassungen von Material, Maschinen und Werkzeugen. Besonders deutlich wird dies z. B. in der Stahlindustrie, wo die Auftragsreihenfolge eine wesentliche Rolle spielt, ob eine Bramme im Walzwerk heiß eingesetzt werden kann, oder nach einer Liegezeit erneut und damit umweltbelastend aufgeheizt

werden muss. Gleiches gilt aber auch für die Kunststoffverarbeitung, wo z. B. Werkzeuge energieintensiv vorgewärmt werden müssen.

Durch eine gezielte Losgrößenbildung und Steuerung der Auftragsreihenfolge werden aber auch Rüst- und Einstellvorgänge verringert, was sich in einer Einsparung von Material, Energie und Betriebsmittel widerspiegelt. Beim Kunststoffspritzguss ist nach einem Werkzeugwechsel eine Einstellphase notwendig, in der die Prozessparameter justiert und optimiert werden. Während dieser Phase wird zumeist Ausschuss produziert. Je nach Material kann dieser im günstigsten Fall erneut granuliert und wiederverwertet werden, im ungünstigen Fall (z. B. Duroplaste, Silikon, Polyurethan) muss der Ausschuss jedoch entsorgt werden. Eine Reduzierung der Rüst- und damit der Einstellvorgänge wirkt sich daher direkt auf die Abfallmenge aus.

Proportional zur Anzahl der Umrüstvorgänge ist auch der Reinigungsaufwand und damit der Verbrauch von Reinigungsmittel. Eine gezielte Auftragsreihenfolge verringert deren Verbrauch und damit Schadstoffemissionen. Typische Beispiele sind Farb- und Materialwechsel, zwischen denen eine Reinigung von Werkzeugen und Materialzuführung erfolgen muss. So müssen beispielsweise beim Kunststoffgießen die Abfüllschläuche gewechselt und entsorgt sowie die Mischköpfe gereinigt werden. In der chemischen Prozessindustrie ist es vielfach sogar notwendig, zwischen unterschiedlichen Chargen Spülvorgänge einzuplanen, in denen Spülflüssigkeiten als Abfall anfallen.

Weiters beeinflussen sowohl die Prozessauslegung wie auch die Prozesssteuerung die Arbeitsergonomie eines Produktionsprozesses. Manuelle Tätigkeiten können bei gleichem Auslastungsmittelwert so eingeplant werden, dass jeweils kurze Belastungen sich mit gleich kurzen Pausen abwechseln, aber auch derart, dass einer längeren Belastung jeweils eine längere Pause folgt. Es ist bekannt, dass je nach Tätigkeit, eine längere Pause weniger erholsam ist als mehrere kurze Regenerationszeiten („Arbeits-Erholungs-Zyklus“ nach Wieland-Eckelmann, R. & Baggen, R. [1994]: Beanspruchung und Erholung im Arbeits- und Erholungs-Zyklus. In: Wieland-Eckelmann et al.: Erholungsforschung. Weinheim, Psychologie Verlags Union. S. 103-155). Dieser Tatsache kann eine entsprechend ausgelegte Produktionssteuerung Rechnung tragen, in dem nicht nur der Mittelwert der Pausenzeit, sondern deren Verteilung und Länge in die ganzheitliche Bewertung eines Produktionsplanes einfließen und somit psychischer Ermüdung, Stressreaktionen, Fehlerhäufigkeit und unsicherem Verhalten vorgebeugt werden. Als Beispiel erscheint es sinnvoll, den zeitlichen Abstand zwischen kritischen Umrüst- und Einstellvorgänge möglichst groß zu halten und mit einfacheren Tätigkeiten, die eine Regeneration erlauben, gezielt zu verschachteln.

Ein weiterer Aspekt der Arbeitsergonomie, der durch die Produktionssteuerung beeinflusst werden kann, ist die Arbeitsmonotonie. Mit einer gezielten Abstimmung aufeinander folgender Aufträge lassen sich manuelle Tätigkeiten abwechslungsreicher gestalten, was ebenfalls einer mentalen Ermüdung entgegenwirkt und damit die Produktionsqualität steigert.

Im Sinne einer nachhaltigen Bewertung müssen diese Aspekte entsprechend bewertet und gemeinsam mit technologischen, betriebswirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen in ein gemeinsames Zielfunktional einfließen. Die Produktionssteuerung legt weiter fest, in welchem Ausmaß Aufgaben z. B. arbeitsteilig oder ganzheitlich und damit z. B. lernförderlich und mit Handlungsspielräumen in der Aufgabenabwicklung ausgestattet sind. Diese ergonomischen Bewertungskriterien „menschengerechter Arbeitsgestaltung“ (vgl. Hacker, W. & Richter, P. [1980]: Psychische Fehlbeanspruchung. Psychische Ermüdung, Monotonie, Sättigung und Stress. Berlin, Verlag der Wissenschaften) tragen zur Prävention von Leistungseinbrüchen, Befindensbeeinträchtigungen und arbeitsbedingten Erkrankungen bei und stellen einen Beitrag zur

arbeitsimmanenten Erhaltung der Arbeitsfähigkeit (Stichwort: längere Berufsdauer durch späteres reguläres Pensionseintrittsalter) dar.

Ganzheitlich optimierte Produktionsregelung als Chance für europäische Standorte

Die langjährige Erfahrung mit der Durchführung von Planungs- und Optimierungsstudien zeigt deutlich, dass der Bedarf an neuen Methoden und Schemata für eine ganzheitliche Bewertung unter Berücksichtigung neuer, über die klassischen technologischen und betriebswirtschaftlichen Kennzahlen hinausgehender Aspekte in der Zukunft weiter steigen wird. Insbesondere in Anbetracht eines steigenden globalen Wettbewerbes bei gleichzeitiger Verschärfung der Umweltsituation ist es unumgänglich, eine nachhaltige Betrachtung auch in Zielfunktionale und Algorithmen der Produktionsplanung einfließen zu lassen. Eine Aufnahme dieser für die klassische Produktionsplanung neuen Aspekte in die Planung erhöht zwar die Komplexität der Planungsalgorithmen und stellt damit die wesentliche Herausforderung dar, rechnet sich aber durch die Tatsache, dass unterschiedliche Aspekte verursachungsgerecht bewertet und zu einem Gesamtoptimum zusammengeführt werden. Ergonomische und arbeitspsychologische Aspekte spiegeln sich u. a. in Leistung und Qualität, ökologische Aspekte z. B. in Betriebsmittel- und Energieverbrauch, klassische prozessspezifische Aspekte in ökonomischen Auswirkungen wie Bestände und Ressourcenauslastung wider.

Insbesondere eine hohe Produkt- und Prozessqualität, durch den sich der Standort Europa auszeichnet, ist angewiesen auf hochqualifizierte und hochmotivierte MitarbeiterInnen. Eine gleichbleibend hohe Arbeitsergonomie unterstützt nicht nur die Arbeitsmotivation und damit die Arbeitsqualität, sondern ist eine wesentliche Grundlage dafür, dass auch ältere MitarbeiterInnen in beanspruchenden Arbeitsprozessen gehalten werden können. Neue Verfahren der Produktionsplanung, die arbeitsergonomischen Anforderungen Rechnung tragen, werden einer alternden europäischen Gesellschaft gerecht und sichern damit bestehende Arbeitsplätze bzw. eröffnen neue Perspektiven für die zu erwartende Verlängerung der Lebensarbeitszeit.

Der Standort Europa ist durch eine große Zahl an bestehenden Produktionsstätten geprägt. Hier bietet sich die einmalige Chance, durch eine verbesserte Betriebsführung und Produktionsregelung entsprechend den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit bereits vorhandene Investitionen und verfügbares Know-how in Form von hochqualifizierten MitarbeiterInnen weiterhin effizient zu nutzen, langfristig zu erhalten und auf diese Weise Investitionen auf der „Grünen Wiese“ in sogenannten Billiglohnländern Paroli zu bieten.

1.2 Zielsetzung des Projektes

Generelles Ziel der im Rahmen des EUREKA-Projektes E!3571 durchgeführten österreichischen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit war es, das Thema Nachhaltigkeit in der operative Produktionsregelung (Produktionssteuerung, -planung und -führung) in der Kunststoffverarbeitung (Spritzguss, Gießen) zu etablieren.

Konkrete Zielsetzung und visionärer Schwerpunkt war die Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Automatisierung der operativen Produktionssteuerung (rollierende Produktionsfeinplanung bzw.

Produktionsregelung¹ unter Berücksichtigung von Gesichtspunkten des Nachhaltigen Wirtschaftens. Dazu wurden Kriterien zur Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten mit modernen Optimierungsverfahren und Computersimulation verbunden. Herausforderung war die Beherrschung der zusätzlichen Dimensionen, welche sich durch die Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsaspekte in den Zielfunktionen ergeben, in Kombination mit einer generellen Zunahme der Systemdynamik durch volatile wirtschaftliche Randbedingungen, wie Auftragsänderungen oder geänderte Marktsituationen.

Die entwickelten Methoden und Verfahren sollen eine Produktion automatisiert an einem optimalen Betriebspunkt² führen, der den Anforderungen eines Nachhaltigen Wirtschaftens gerecht wird. Durch Automatisierung der Planungsvorgänge werden eine gleich bleibende Planungsqualität auf einem hohem Optimierungsniveau sichergestellt sowie eine erhöhte Transparenz und eine vollständige Dokumentation der Planungsentscheidungen erzielt.

Die entwickelten Methoden und Verfahren sollen Firmen zukünftig in die Lage versetzen, Ihre Produktion langfristig auf hohem Niveau zu betreiben und bestehende Potentiale unter Berücksichtigung eines nachhaltigen Wirtschaftens auszuschöpfen. Damit steigt nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit sondern es können bestehende Standorte aufgewertet und Arbeitsplätze zu generiert werden.

Die Methoden und Verfahren wurden für den Einsatz in Assistenzsystemen konzipiert, die Planungsvorgänge prinzipiell automatisiert durchführen, bei Bedarf aber manuelle Eingriffe und Korrekturen zulassen. Zentrale Eingriffsmöglichkeit für den Bediener ist die Vorgabe von Planungs- und Optimierungsstrategien, von denen das System automatisierte Entscheidungen ableitet.

Darüber hinaus wurden die F&E-Tätigkeiten des spanischen EUREKA-Projektes durch die Evaluierung eines neuen faserbasierten Werkstoffes unterstützt.

Aus dieser globalen Zielsetzung wurden folgende Teilziele abgeleitet:

- **Entwicklung eines Schemas zur ganzheitlichen³ Produktionsregelung** welches technologische, betriebswirtschaftliche, ökologische und soziale / arbeitsergonomische Aspekte zusammenführt und in der rollierenden Produktionsfeinplanung berücksichtigt. Das Schema aus Prozessmodellen, Bewertungs- und Zielfunktionen sowie Optimierungsalgorithmen wird hinsichtlich der Dynamik domänenunabhängig, hinsichtlich der Vielfältigkeit konkret für den Bereich des Kunststoffgießens inklusive der zugehörigen Werkzeugaufbereitung entwickelt.
- **Erstellen von mathematischen Zielfunktionen zur Abbildung und Zusammenführung der betrachteten Nachhaltigkeitsaspekte.** Die Zielfunktionen liefern den Optimierungsalgorithmen eine Aussage über die Güte eines Planungsszenarios in Form eines Fitnesswerts. Die

¹ Die Begriffe Produktionsplanung, Produktionssteuerung und Produktionsregelung werden im deutschsprachigen Bereich vielfach synonym bzw. unscharf verwendet. Im vorliegenden Projekt wird in Anlehnung an den englischen Begriff Production Control immer von einer Produktionsregelung ausgegangen, welche mit einer Rückkopplung der IST-Situation situativ auf Störungen oder geänderte Anforderungen und Zielvorgaben reagieren kann

² Man beachte, dass der jeweilige Betriebspunkt zeitabhängig ist und es sich genau genommen um Produktionskennlinien handelt.

³ Der Begriff „ganzheitlich“ wurde gewählt, um herauszustreichen, dass neben Nachhaltigkeitsaspekten auch die technologischen Anforderungen und Randbedingungen von der zu entwickelnden Produktionsregelung berücksichtigt werden.

Zielfunktionen kommen dabei sowohl in der Planung (Auslegung und Dimensionierung) wie auch im operativen Produktionsbetrieb zur Produktionsfeinplanung und Produktionsregelung zum Einsatz.

- **Entwicklung von logistischen Prozessmodellen sowie Kopplung dieser Modelle mit den ganzheitlichen Zielfunktionen.** Die Ablaufmodelle stellen den Zielfunktionen simulierte Betriebsdaten zur Verfügung, aus denen die Zielfunktion die Güte eines Szenarios ableitet und dem übergeordneten Regelungs- und Optimierungssystem als Bewertung bereitstellt.
- **Entwicklung von automatisierten Verfahren zur Produktionsregelung (Produktionsfeinplanung und Produktionssteuerung)** unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in den Zielfunktionen. Zu diesem Zweck werden verschiedene Ansätze moderner Optimierungsverfahren auf ihre Anwendbarkeit sowie hinsichtlich Ihrer Effizienz untersucht.
- **Durchführen von Materialevaluierungen und Spritzversuchen** sowie Bereitstellung von entsprechenden Rückmeldungen zur Verbesserung des Materials an den spanischen Hersteller.

Berücksichtigung folgender Nachhaltigkeitsfaktoren

Die Entwicklung der unter Zielsetzung angeführten Verfahren und Methoden erfolgt unter der Berücksichtigung nachfolgender Aspekte der Nachhaltigkeit.

- **Gesamtwirtschaftlicher Betrieb des Produktionssystems:** Ressourcenauslastung, Terminqualität, Bestands- und Durchlaufzeitenminimierung, ...
- **Minimaler Energieeinsatz:** Vermeidung von unnötigen Heiz-/Kühlzyklen, Maschinenleerläufen, Minimierung von Transport- und Umlagervorgängen, ...
- **Minimierung von Schadstoffemissionen:** Vermeidung von Reinigungsvorgängen und Reduzierung von Ausschuss und Betriebsmittelverbrauch durch gezielte Auftragsreihenfolgeplanung, ...
- **Sicherstellung einer hohen und gleich bleibenden Arbeitsergonomie:** Vermeidung von Stressspitzen, Sicherstellung von ausreichenden Erholungsphasen, Vermeidung von monotonen Tätigkeiten, Abnahme von Routinetätigkeiten durch das Planungssystem mit beanspruchungsoptimalen Arbeitsanforderungen, ...
- **Transparenz und Eingriffsmöglichkeiten für die Bediener:** Auslegung des Systems als Assistenzsystem, das jederzeit den Bediener über die automatisiert gefällten Entscheidungen informiert und ihm die Möglichkeit bietet, (Produktions-)Strategien vorzugeben oder einzelnen Entscheidungen zu modifizieren. Die entwickelten Verfahren müssen vom Bediener als Unterstützung und Arbeitserleichterung empfunden werden und keine Bevormundung oder Entmündigung verursachen.

1.3 Stand der Technik

1.3.1 Automatisierte Verfahren der Produktionsfeinplanung und Produktionsregelung

Die Ablaufplanung von Arbeitsvorgängen stellt eine wichtige Teilaufgabe im Bereich der Produktionsfeinplanung und Produktionssteuerung dar. Bei diesem in der Fachliteratur als *Scheduling* bezeichneten Planungsschritt werden sowohl die Ausführungsreihenfolgen als auch die Startzeitpunkte für die einzelnen Produktionsvorgänge auf den Arbeitssystemen festgelegt [DomschkeScholl..97, Pinedo01, Zäpfel96]. Mit steigender Komplexität der Produktstrukturen und Arbeitspläne, sowie durch Hinzukommen technologischer und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen und Einschränkungen wird eine manuelle Durchführung der Feinplanung immer schwieriger und zeitaufwändiger. Durch den Einsatz automatisierter Planungsverfahren besteht hingegen die Möglichkeit, nicht nur Ablaufpläne zu erzeugen, die den vorgegebenen Rahmenbedingungen genügen, sondern zusätzlich bereits hinsichtlich bestimmter Zielvorgaben optimierte Planungsergebnisse zu verkörpern.

In der Praxis werden für die Produktionsfeinplanung und -steuerung häufig einfache heuristische Verfahren angewandt, welche rasch auszuführen sind (z. B. Eröffnungsverfahren wie Prioritätsregelverfahren, Verbesserungsverfahren wie Austauschverfahren). Jedoch liefern diese einfachen Heuristiken nur selten gute Lösungen. Andererseits existieren für viele Probleme gute exakte Optimierungsalgorithmen (z. B. MIP), deren meist sehr aufwendige und zeitintensive Anwendung einen Praxiseinsatz verhindert. Doch in den letzten Jahren sind aufgrund von steigender Rechnerleistung und Weiterentwicklung der Algorithmen zunehmend auch praxisrelevante Probleme lösbar geworden.

Sowohl in der Literatur als auch in der Praxis der Produktionsfeinplanung haben in den letzten beiden Jahrzehnten insbesondere heuristische Verfahren an Bedeutung gewonnen. Diese Methoden sind auf einer abstrakteren Ebene definiert, sodass sie auf viele verschiedene Probleme angewendet werden können. Zumeist liefern sie deutlich besser Ergebnisse als einfache Heuristiken und sind auch bei großen Problemen mit vernünftigem Aufwand einsetzbar.

Aufgrund der hohen benötigten Rechenzeit können exakte Planungsverfahren nur für sehr kleine akademische Probleme eingesetzt werden. Heuristische Methoden haben den Vorteil, dass sie auch für Planungsprobleme in praxisrelevanter Dimension mit vertretbarem Zeitaufwand anwendbar sind. Der Hauptteil der benötigten Rechenzeit entfällt hierbei auf die Optimierung des erzeugten Ablaufplanes hinsichtlich bestimmter Kriterien, wie etwa Minimierung der Durchlaufzeiten oder Maximierung der Termintreue. Die Motivation heuristischer Verfahren besteht darin, mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand ein möglichst hochwertiges Resultat zu erhalten, von dem allerdings nicht bekannt ist, ob es sich dabei bereits um das tatsächliche Optimum handelt bzw. wie weit es noch von diesem entfernt ist. Dies ist jedoch für Praxisanwendungen üblicherweise ausreichend, da die auf diese Weise erzielten Planungsergebnisse in den meisten Fällen deutliche Verbesserungen gegenüber den manuell erzeugten Plänen darstellen und es hier primär auf die schnelle Verfügbarkeit von Ergebnissen ankommt.

Zu den prominentesten Vertretern heuristischer Methoden zählen Genetische Algorithmen [Holland75], Tabu Suche [GloverLaguna97], Simulated Annealing [KirkpatrickGelatt..83], Ant Colony Optimization [DorigoStützle04] oder Variable Neighborhood Search [HansenMladenovic01]. Die Grundkonzepte dieser auch als *Metaheuristiken* [GloverKochenberger03] bekannten Verfahren sind problemunabhängig entworfen. Dies bedeutet, dass sie auf unterschiedlichste Optimierungsprobleme anwendbar sind, eine geeignete

Modellierung des jeweiligen Problems vorausgesetzt. Für akademische Probleme der Produktionsplanung sind diese Techniken bereits seit vielen Jahren als effektive Lösungsalgorithmen etabliert [BlazewiczDomschke..96, VaessensAarts..96]. Darüber hinaus sind auch für Szenarien aus der industriellen Praxis viele Beispiele erfolgreicher Anwendungen bekannt, z.B. [RoachNagi96, OddiCesta97, WangFu02].

1.3.2 Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit in der Produktionsregelung

Energie- und Materialeinsatz spielen derzeit in der Beplanung von Kunststoffverarbeitungen eine untergeordnete Rolle. Vielmehr werden in erster Linie Durchsatz, Termintreue und Qualitätskonstanz in den Vordergrund gestellt. So werden z. B. bei Schichtbeginn alle Maschinen gleichzeitig hochgefahren, was zu unnötig hohen Leistungsspitzen bei der Stromaufnahme führt. Selbst aus rein betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist hier ein hohes Optimierungspotenzial zu erwarten.

Generell konzentrieren sich bekannte Lösungsansätze vor allem auf die Einhaltung klassischer Zielgrößen. Dies spiegelt sich sowohl in der Prozessmodellierung wie auch in der Entwicklung der entsprechenden Bewertungsmodellen und Zielfunktionen wieder [vgl. Tagungsbände relevanter Simulationskonferenzen wie ASIM, ESM/ECMS, ESS/ESMS, Konferenzen aus dem Bereich des Operations Research wie die Operations Research 2008 oder EMCSR - European Meeting an Cybernetics and Systems Research, Konferenzen zu den Themen Metaheuristiken und Optimierung wie die EvoCOP - European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, GECCO - Genetic and Evolutionary Computation Conference oder die Metaheuristics Intl. Conf.].

Auch Hersteller von Spritzgussmaschinen besitzen kaum Informationen über den konkreten Energiebedarf ihrer Maschinen im täglichen Einsatz. Erste Ansätze für das Ecodesign von Spritzgussmaschinen werden z. B. im derzeit laufenden Fabrik-der-Zukunft Projekt „ECODESIGN-Toolbox for Green Product Concepts“ (Proj. Nr. 810 777) entwickelt. Die Wärmedämmung der beheizten Maschinenteile erfolgt optional auf Wunsch des Kunden; über deren Wirksamkeit bestehen keine gesicherten Informationen.

Arbeitsergonomische und soziale Aspekte

Arbeitsergonomische Aspekte werden vor allem in der System- und Strukturplanung, d. h. in der Planung von Arbeitsplätzen und Arbeitsvorgängen berücksichtigt. Eine Beachtung und Bewertung dieser Aspekte in der operativen Produktionsplanung als Teil eines PPS oder ERP-Systems ist nicht bekannt.

Ziel einer Integration arbeitsergonomischer Aspekte: Berücksichtigung der physisch-psychischen Leistungsfähigkeit in der Prozessentwicklung und –steuerung durch Einführung arbeitswissenschaftlicher und insbesondere arbeitspsychologischer Kriterien zur Prävention, zur gesundheitsgerechten Arbeitsbewältigung und arbeitsimmanenten Erhaltung der Arbeitsfähigkeit.

Ansatz: Zur Bewertung wird das arbeitswissenschaftliche Modell „menschengerechter Arbeit“ (vgl. Hacker, W. & Richter, P. [1980]: Psychische Fehlbeanspruchung. Psychische Ermüdung, Monotonie, Sättigung und Stress. Berlin, Verlag der Wissenschaften) herangezogen. Dieses formuliert folgende Gestaltungsebenen:

Ausführbarkeit der Arbeit

- bezogen auf die Ebene der Operationen mit Werkzeugen, Maschinen, Prozesse
- im Mittelpunkt stehen ergonomische Normen und Regeln der

- a) Anthropometrie in Bezug auf die Integration der Körpermaße in der Arbeitsplatzgestaltung (Körperhaltungen, Bewegungs- und Sehraum, Signal- und Informationsverarbeitung, ...),
 - b) der energetischen Arbeitsgestaltung in Bezug auf Energieumsatz, Arbeits-Erholungs-Zyklus, Einflussfaktoren des Alters etc. und
 - c) der informatorischen Arbeitsgestaltung (Mensch-Maschine-Interaktion, ...).
- die Berücksichtigung der verfahrensspezifischen Standards soll die zuverlässige Ausführung der Arbeit (physisch und psychisch) gewährleisten
 - *Grundlage:* Martin, H. (1994): Grundlagen der menschengerechten Arbeitsgestaltung. Handbuch für die betriebliche Praxis. Kempten, Bund Verlag.

Schädigungslosigkeit der Arbeit

- bezogen auf die Ebene der verwendeten Arbeitsmittel, der Operationen und der Prozesse
- im Mittelpunkt stehen Erkenntnisse zu physischen und psychischen Dauerleistungsgrenzen in Bezug auf die Quantität und Qualität der Arbeitszeit und der Stressbewältigung
- die Berücksichtigung dieser verfahrensspezifischen Standards soll die Vermeidung von arbeitsbedingten Gesundheitsschäden (physisch und psychisch) gewährleisten
- *Grundlage:* Richter, P. & Hacker, W. (1998): Belastung und Beanspruchung: Stress Ermüdung und Burnout im Arbeitsleben. Heidelberg, Asanger Verlag.

Beeinträchtigungsfreiheit der Arbeit

- bezogen auf die Gestaltung der Arbeitsaufgaben und der Arbeitsorganisation
- im Mittelpunkt stehen Handlungs- und Tätigkeitsspielraum bei der Arbeitsausführung
- die Berücksichtigung dieser verfahrensspezifischen Standards soll beanspruchungsoptimale Anforderungen zur Vermeidung sowohl von inhaltlich-organisatorischer Über- als auch Unterforderung gewährleisten, kurz Wohlbefinden bei der Arbeit ermöglichen
- *Grundlage:* Ulich, Eberhard: Arbeitspsychologie. Zürich und Stuttgart, 2005 (5. Aufl.)

Persönlichkeitsförderlichkeit der Arbeit

- bezogen auf die Gestaltung der Arbeitsaufgaben und -inhalte
- im Mittelpunkt stehen die Lern- und Gestaltungsmöglichkeiten der Arbeit
- die Berücksichtigung dieser verfahrensspezifischen Standards soll die Möglichkeiten der Übereinstimmung von Person und Arbeit fördern und die nachhaltige Beschäftigungsfähigkeit der Beschäftigten unterstützen
- *Grundlage:* Ulich, Eberhard: Arbeitspsychologie. Zürich und Stuttgart, 2005 (5. Aufl.)

Das besondere Augenmerk liegt auf der technischen und prozessbezogenen Vermeidung von Auslösern und Konstellationen, die kurzfristige Fehlbeanspruchungen wie Stress, psychische Ermüdung, psychische Sättigung und Monotoniereaktionen bei Beschäftigten bewirken.

1.4 Vorarbeiten

1.4.1 Vorarbeiten zum Thema ganzheitliche Simulation

Folgende Projekte beschäftigen sich mit der Aufnahme von Aspekten der Nachhaltigkeit in Simulations- und Bewertungsmodelle der technischen Produktionslogistik, die über eine klassische, technische und betriebswirtschaftliche Bewertung hinausgehen:

- Im Projekt *NANOWOOD [FP5-Growth G1ST-CT-2002-502749 - „Multifunctional timber facade system made from Nanosol finished Thermowood for sustainable building facades Nanowood“* wurden die klassischen Simulationsmodelle der technischen Produktionslogistik einer Thermoholzfertigung um Aspekte des Energie- und Betriebsmittelverbrauches sowie des Abfall- und Schadstoffanfalls erweitert.
- Im Projekt *HOLIWOOD [FP6-NMP IP 011799-2, www.holiwood.org] - “Holistic implementation of European thermal treated hard wood in the sector of construction industry and noise protection by sustainable, knowledge-based and value added products”* wird das Thema einer umfassenden Modellierung und Analyse von Fertigungsprozesse weitergeführt und auf die Herstellung von Fertigteilbauelementen aus Thermoholz angewendet. Neben klassischen technischen Betriebsdaten wurde der belastungsabhängige Energie- und Betriebsmittelverbrauch, der Abfall- und Schadstoffanfall sowie die Belastungen der MitarbeiterInnen in ihrem dynamischen Verhalten beobachtet und in eine ganzheitliche Bewertung eingebunden.

Zum Thema Arbeitsergonomie konnten folgende Forschungsprojekte Input zum durchgeführten Projekt liefern:

- *Partizipative Entwicklung alter(n)sgerechter Berufsverläufe und Karriere-Modelle in Unternehmen („Alternsgerechte Arbeitskarrieren“)*. Endbericht des EQUAL I, Entwicklungspartnerschaft AEIOU-Submoduls; gefördert vom Bundessozialamt (ESF) und AUVA. 2005
- *Partizipation und interaktive Interdisziplinarität für eine zukunftsfähige Arbeitsforschung (PIZA)*. Gefördert vom Deutschen BMBF (FKZ 01HN0150; 2002-2005).
- *Gesundheitliche Belastungen, Anforderungen und Ressourcen der Arbeit im E-Business*. Forschungsprojekts „[e-@rbeit](#) , [menschengerechte Arbeit im E-Business](#)“ der Universität Kassel, Institut für Arbeitswissenschaft. 2004
- *„Learning from near accidents“*. Projekt der Agentur für Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz im Rahmen des Förderprogramms „SME Accident Prevention Funding Scheme 2001-2002“ - Project n° 5325/AT.
- *IMPULS: Betriebliche Analyse der Arbeitsbedingungen*. Agentur für Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz im Rahmen der Europäischen Woche „Stress lass nach“ und den Österreichischen SozialpartnerInnen.

1.4.2 Vorarbeiten zum Thema Produktionsregelung und Optimierung

Das Thema Optimierung und Produktionsregelung wurde von den beteiligten Forschungspartnern bereits in mehreren, teilweise gemeinsamen Projekten behandelt, auf deren Grundlage aufgebaut werden konnte.

- Im Rahmen eines industriellen Forschungsprojektes wurde von PROFACTOR ein neuartiger Algorithmus für die Disposition von Beton-Fahrmischern auf Grundlage der Meta-Heuristik Simulated Annealing entwickelt und gemeinsam mit einem mathematischen Prozessmodell industrietauglich implementiert. Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Diplomarbeit die Anwendbarkeit einer Kombination von exakten Methoden und Metaheuristiken auf die Problemstellung untersucht.
- In zwei weiteren industriellen Forschungsprojekten für die Halbleiterindustrie wurde von PROFACTOR die Methodik einer regelbasierten Produktionsregelung für die Beherrschung volatiler Produktionsprozesse entwickelt und implementiert. Zum Thema der automatisierten Regelsynthese auf Basis von Metaheuristiken wurde dazu eine Diplomarbeit durchgeführt. Der regelbasierte Ansatz erfüllt die Anforderungen nach manuellen Eingriffsmöglichkeiten und globaler Strategievorgabe.
- Forschungspartner HEAL entwickelt eine Softwareumgebung für heuristische Optimierung. Bei der Entwicklung dieses Frameworks wurde und wird insbesondere darauf Rücksicht genommen, gravierende Mängel bestehender Bibliotheken und Softwaresysteme zu beheben. Im Speziellen wären dabei Paradigmenabhängigkeit und mangelnde Benutzerfreundlichkeit als die beiden großen Probleme hervorzuheben, die den Einsatz bestehender Optimierungssysteme wie GALib [Wall96], Open Beagle [GagneParizeau02] oder EO [KeijzerMerelo..01] in Forschungs- und Entwicklungsprojekten sehr erschweren bzw. unmöglich machen.
- Im Rahmen eines Projekts für einen Produktionsbetrieb im Bereich Feuerwehrfahrzeuge wurde vom Forschungspartner HEAL ein Prototyp einer Optimierungssoftware für die Produktionsplanung entwickelt, bei der mit Hilfe heuristischer Verfahren, insbesondere Genetische Algorithmen eine Reihenfolgeoptimierung (Feinplanung) der Arbeitsvorgänge auf den einzelnen Arbeitsplätzen des Fertigungssystems vorgenommen wurde.
- In einem aktuellen Forschungsprojekt des Partners HEAL mit vier Unternehmen aus der Fertigungsindustrie bildet ebenfalls die Optimierung für Problemstellungen aus dem Bereich der Produktionsplanung den Schwerpunkt. Wesentliche Ziele des Projektes sind die firmenunabhängige Gestaltung des zugrunde liegenden Datenmodells, die Flexibilität hinsichtlich der Zielvorgaben für die Optimierung sowie die Effizienzsteigerung und Weiterentwicklung der eingesetzten Verfahren.
- Forschungspartner POM hat im Bereich der Produktionsplanung neue Algorithmen zur Losgrößenbestimmung sowohl im kapazitierten als auch im unkapazitierten Fall entwickelt. Diese Algorithmen sind Kombinationen aus Metaheuristiken (Ant Based System) und exakten Verfahren sowie evolutionären Ansätzen. Zurzeit zählen diese Algorithmen zu den besten publizierten Verfahren. Im Bereich der Reihenfolgeplanung wurden Metaheuristiken entwickelt, um Flowshop-Probleme mit 2 unterschiedlichen Zielen zu lösen. Zum Thema Simulation und Optimierung wird an neuen Konzepten zur Verknüpfung von simulationsgestützter Planung und exakter Optimierung anhand von Supply Chain Netzwerken gearbeitet. Diese Kompetenz über die Verbindung von Simulation und Optimierung kann auch im vorliegenden Problem genutzt werden.

- Die Forschungspartner PROFACTOR und HEAL untersuchen derzeit gemeinsam mit einem MES-Hersteller im Rahmen eines Bridge-II-Projektes die Kombinationsmöglichkeiten von Scheduling und Dispatching in der Produktionsfeinplanung für Anwendungen im Kunststoffspritzguss.
- In einem weiteren Bridge-II-Projekt widmen sich die Forschungspartner PROFACTOR, HEAL und dPOM sowie der Firmenpartner ABF dem Feld des Stochastic Scheduling für Anwendungen in der metallherzeugenden bzw. -verarbeitenden Industrie mit Schwerpunkt auf Walz- und Presswerke.

2 Hintergrundinformation zum Projektinhalt

2.1 Prinzipielle Vorgangsweise

Für die Implementierung der angestrebten simulationsgestützten Produktionsregelung wurde die Firma ASMA mit ihrem kunststoffverarbeitenden Produktionsbetrieb in Weitra als Referenzszenario gefunden. Dieser Betrieb sollte als Simulationsmodell abgebildet werden, das als Grundlage für Simulationsexperimente und für Optimierungszwecke dienen sollte. Da zu Beginn der Projektlaufzeit die Anforderungen an dieses Simulationsmodell nicht zur Gänze klar waren, wurde für die Software-Entwicklung ein agiles Prozessmodell gewählt, da dieses es ermöglicht, schnell auf Änderungen zu reagieren. Parallel zur Modellentwicklung fanden Workshops mit dem Geschäftsführer, Produktionsleiter, mit potentiellen Anwendern und mit Arbeitspsychologinnen, die Zeit mit den MitarbeiterInnen verbracht hatten, statt. Im Rahmen dieser Workshops wurden die Anforderungen schrittweise geklärt und präzisiert. Parallel zum Simulationsmodell wurden unterschiedliche Bewertungsschemata entwickelt. Ein Bewertungsschema/Bewertungsmodell dient dazu, die unterschiedlichen Kennzahlen, die aus einem Simulationslauf hervorgehen, zu einem einzigen Wert zusammenzuführen, der im Rahmen einer Optimierung maximiert bzw. minimiert werden soll.

2.2 Methoden & Daten

Als Grundlage für alle Arbeiten dienten zahlreiche von der Firma ASMA zur Verfügung gestellten Informationen über die Abläufe im eigenen Produktionsbetrieb. Dazu zählten etwa ein Zugang zu einer Test-Datenbank des ERP-Systems (hier: APplus), zahlreiche Erläuterungen zu den Datenstrukturen durch die Datenbankexpertin, das Wissen des Produktionsleiters und der in der Arbeitsvorbereitung/Planung tätigen Personen sowie viele weitere „weiche“ Informationen aus den Köpfen der MitarbeiterInnen. Wir möchten an dieser Stelle festhalten, dass die überdurchschnittliche Offenheit und Transparenz und die Kooperationsbereitschaft des Projektpartners ASMA eine große Motivation, Bereicherung und Bestätigung für alle Beteiligten war und sehr wesentlich zum Projekterfolg beigetragen hat.

Als methodische Grundlage für die Umsetzung einer Produktionsregelung diente die Simulation auf zweierlei Weise: Zum einen wurde Simulation im klassischen Sinn als eigenständiges Werkzeug verwendet, um das menschliche Vorstellungsvermögen zu erweitern, Beobachtungen machen zu können und Fragen zu stellen, die letztlich zu einem tieferen Prozessverständnis führen sollten. Zum anderen wurde die Simulation als Teilkomponente eines großen Ganzen, in einem so genannten simulationsgestützten Optimierungskreislauf eingesetzt. In diesen beiden Formen zählt die Simulation bzw. das dafür notwendige Modellieren und Abbilden von Prozessen zu den Kernkompetenzen von Profactor-PSI. Daher standen in diesem Feld bereits zu Projektbeginn Vorarbeiten zur Verfügung. Zu diesen Vorarbeiten zählt eine in der Programmiersprache C# eigens entwickelte Simulationsbibliothek (SiRO), die aufgrund ihrer Echtzeitfähigkeit typischerweise für Optimierungsaufgaben genutzt wird. Aufbauend auf diese Simulationsbibliothek wurde ein Simulationsmodell des Produktionsbereiches der Firma ASMA geschaffen.

Zur Erstellung des Simulationsmodells trugen nicht nur die Prozessexperten bei, sondern auch ein Team aus Arbeitspsychologinnen, mit den MitarbeiterInnen in der Firma ASMA einen Zeitraum von ca. 2 Wochen verbrachten und Interviews und Analysen durchführten.

An dem Simulationsmodell wurden zwei unterschiedliche Planungsverfahren getestet. Die erste Herangehensweise nennt sich Scheduling und basiert auf der Erstellung von Ablaufplänen. Die zweite Herangehensweise nennt sich Dispatching und basiert auf der Erstellung von Prioritätsregeln. Grundsätzlich sind diese beiden Verfahren gleichwertig und können gleich gute Ergebnisse erzielen. Dennoch ist nicht jede der beiden Herangehensweisen für jedes Szenario gleich gut geeignet. Die Erfahrung zeigt, dass in einem Umfeld, in dem viele Störungen auftreten, das Dispatching-Verfahren eine größere Robustheit aufweist und auch über einen längeren Zeitraum seine Gültigkeit bewahrt. Währenddessen kann in einem Umfeld, in dem kaum Störungen auftreten, sehr genau optimiert werden, wodurch sich die Ablaufplanung als das praktischere Werkzeug herausstellt.

Um Ablaufpläne zu optimieren, wurde der Adaptive Large Neighborhood Search Algorithmus als Methode gewählt. Die Implementierung des Algorithmus bzw. seiner Varianten erfolgte in der Programmiersprache C++. Da in dem Produktionsumfeld der Firma ASMA (Werkstättenfertigung) jedoch Störungen zum Alltag gehören, wurde der Lösungsansatz auf Basis von Prioritätsregeln deutlich weiter ausgebaut. Die Prozesssimulation wurde zu einem Client des Optimierungswerkzeuges HeuristicLab ausgebaut. HeuristicLab wird seit 2002 entwickelt, ist quelloffen und besonders geeignet für die schnelle Erstellung und Konfiguration von heuristischen und insbesondere von genetischen Algorithmen. Eben solche genetischen Algorithmen sind aufgrund ihrer inhärenten Struktur und Datenrepräsentation sehr gut für den Aufbau und für die evolutionäre Entwicklung von Prioritätsregeln geeignet.

2.3 Stand der Technik & Innovationsgehalt

Die gängigen ERP-Systeme, die in heimischen Unternehmen im Einsatz sind, stellen im Allgemeinen nur Grobplanungsmechanismen (Vorwärts-, Rückwärts- und Engpassterminierung) zur Verfügung. Sie unterstützen typischerweise keine Feinplanung bis auf die Ebene von einzelnen Arbeitsgängen, und somit auch keine Optimierung auf dieser Ebene. In der ERP-Landschaft gibt es zwar Feinplanungslösungen, diese sind aber für KMUs kaum leistbar und daher uninteressant. Weiters sind Standardlösungen für die Feinplanung meist auf relativ simple Fertigungstypen (Produktionslinie) ausgelegt. Die Stärke der produzierenden heimischen KMUs besteht jedoch in ihrer großen Flexibilität, was sich auch in der Auslegung der Fertigungen widerspiegelt (Werkstättenfertigungen, Fertigungsinseln). Daher liegt ein Teil des Innovationsgehalts dieses Projektes auch darin, dass das Simulationsmodell bzw. dessen Grundkomponenten so generisch ausgelegt sind, dass sie in Zukunft als Grundlage für eine kostengünstige Standardlösung dienen könnten.

Im Rahmen dieser standardartigen Entwicklung wurde auch die Modellierung von "weichen", schwer greifbaren, schwer quantifizierbaren Größen vorgesehen. Viele Vertreter solcher "weichen" Größen kommen aus dem Bereich der Arbeitsergonomie, wie etwa Monotonie-, Sättigungs-, Hitze- oder Kälte-Levels. Aber auch ganz triviale, alltägliche Vertreter wie Prozesszeit-Schwankungen oder Ausfälle sind mit Unschärfe bzw. mit Stochastik behaftet. Je mehr solche Größen unbeachtet bleiben (d. h. nicht modelliert werden), umso unzuverlässiger ist das Simulationsergebnis. Werden Störungen hingegen modelliert ("weiche" Größen sind rein rechnerisch nichts anderes als Störungen) können diese frühzeitig

eingepflegt und abgepuffert werden. In klassischen Planungssystemen ist eben dies nicht der Fall, daher sind diese sehr anfällig gegen Störungen. Im gegenständlichen Projekt wurden jedoch aktiv eben solche Komponenten in die Simulations- und Bewertungsmodelle eingebunden. Durch die Einbindung von zuvor „verborgenen“ Größen ergibt sich eine neue Betrachtungsweise und es lassen sich bessere, präzisere Rückschlüsse über die Nachhaltigkeit von Strategien ziehen.

2.4 Vorgehensweise

2.4.1 Entwicklung eines Schemas zur ganzheitlichen Produktionsregelung

2.4.1.1 Zielsetzung

Aufbauend auf den Erfahrungen der ProjektpartnerInnen, dem Stand der Technik, sowie den bereits definierten Anforderungen von potentiellen AnwenderInnen sollte von den ForschungspartnerInnen und dem beteiligten Systemintegrator zunächst ein Vorgehens- und Umsetzungsmodell für die angestrebte Lösung einer ganzheitlichen Produktionsregelung entworfen werden. Dieses Umsetzungsmodell sollte mit den Ergebnissen der überlappenden Anforderungsanalyse (AP2) konkretisiert und praxistauglich ausgearbeitet werden. Dazu sollten die in der betrachteten Domäne der Kunststoffverarbeitung (mit Schwerpunkt auf dem Kunststoffgießen) anfallenden Prozesse hinsichtlich ihrer Beeinflussbarkeit durch die Produktionsregelung untersucht werden. Speziell galt es zu erforschen, welche Nachhaltigkeitsaspekte sich durch Eingriffe in die rollierende Produktionsfeinplanung in welchem Ausmaß beeinflussen lassen. Ergebnisse sind Richtlinien für die Erstellung und Integration der Ablaufmodelle, der Zielfunktionen, der Planungs- und Optimierungsalgorithmen bzw. Regelungsalgorithmen sowie die Integration dieser Komponenten in die innerbetriebliche IT.

2.4.1.2 Ergebnisse

Umsetzungsmodell

Ausgehend von einer Analyse der Produktionsprozesse beim Projektpartner ASMA, einem Kunststoffgießer sowie den Erfahrungen den Erfahrungen des Partners ABF, dem beteiligten Automatisierungstechniker, wurde das Bild 1 dargestellte Schema als Grundlage für das angestrebte, simulationsbasierte Planungs- bzw. Entscheidungsunterstützungssystem gewählt.

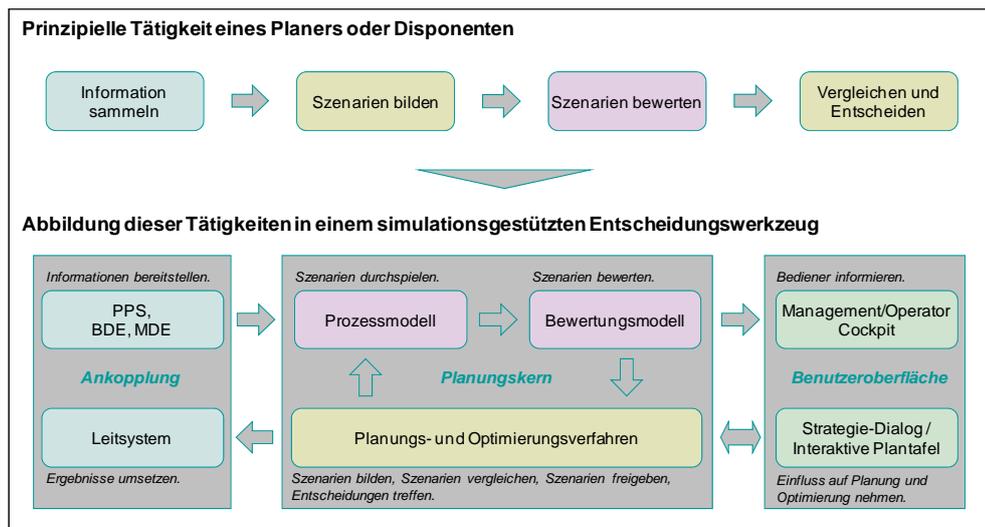


Bild 1: Unterstützung der Planungstätigkeiten durch ein simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem.

Die Grundidee ist hierbei, die Produktionsfeinplanung auf das bereits existierende ERP-System aufzusetzen, und dadurch den Disponenten bzw. die MitarbeiterInnen beim Treffen aktueller Entscheidungen zu unterstützen.

Im Prinzip übernimmt die Produktionsfeinplanung die im Zuge der Tagesplanung vom ERP-System bereitgestellte Auftragsliste und verplant die Aufträge unter Berücksichtigung diverser Randbedingungen, wie Ressourcenbedarf (Personal, Maschinen, Werkzeuge,...), Abhängigkeiten (Farb- und Materialfolgen) und Wechselwirkungen. Die Planungs- und Optimierungsverfahren erstellen dabei Szenarien, welche zunächst von einem Prozessmodell simuliert und anschließend in einem nachgeschalteten Bewertungsmodell evaluiert werden. Das Bewertungsmodell liefert dem Optimierungsverfahren eine Rückmeldung über die Güte eines gewählten Szenarios, sodass ein iterativer Verbesserungsvorgang angestoßen werden kann. Die Ergebnisse der Planungs- bzw. Optimierungsläufe werden in Form von Gantt Charts oder als Strategie-Dialog visualisiert und in dieser Form den MitarbeiterInnen kommuniziert.

Je nach Anwendung können unterschiedliche Planungs- und Optimierungsstrategien eingesetzt werden, wobei das Prinzip der simulationsbasierten Szenarienbewertung immer aufrecht bleibt.

Das entwickelte Schema ist im Prinzip unabhängig von der aktuellen Domäne leicht auf andere Produktionen übertragen werden. Dabei werden die Modelle sowie die Optimierungsstrategien spezifisch an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst.

Konkretisierung des Umsetzungsmodells

Während der Prozessanalyse im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurde festgestellt, dass für eine Werkstättenfertigung, wie ASMA sie verkörpert, eine auf Scheduling basierende Produktionsfeinplanung nicht effizient angewendet werden kann. Ein aufwändig berechneter Ablaufplan (Schedule) verliert im Falle von Störungen und Unregelmäßigkeiten schon nach kurzer Zeit seine Gültigkeit; aufgrund der weitgehend kurzen und/oder schwankenden Prozesszeiten, vielen Einzelanfertigungen, vielen unbekanntem Größen und alltäglichen Störungen müsste andauernd ein neuer Ablaufplan berechnet werden. Dies ist zwar grundsätzlich möglich, mit der gegenwärtig verfügbaren Rechenleistung aber nicht ratsam, da die

gewünschte Lösungsqualität in so kurzer Zeit (binnen Sekunden während des operativen Betriebs) nicht erreicht werden kann.

Aus dieser Problematik heraus wurde die Idee verfolgt, parallel zu den Ablaufplänen auch Prioritätsregeln zu entwickeln, und im Falle einer Störung von der Ablaufplanung (Scheduling) auf eine situationsbasierte Planung (Dispatching) umzuschalten. Die Prioritätsregeln werden nach dem Schema in Bild 1 entwickelt.

Beeinflussungsmöglichkeiten durch die Produktionsregelung

Die ersten Simulationsexperimente wurden mit einer Reihe so genannter SPR's (Simple Priority Rules) durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass bereits beim Einsatz einfachster Prioritätsregeln eine erhebliche Reduktion der Anzahl der Rüstvorgänge (und somit der dabei anfallenden Abfälle) erzielt werden kann. Weiters lassen sich im vorliegenden Szenario die Termintreue und auch arbeitsergonomische Kriterien wie Monotonie sehr leicht beeinflussen. Dennoch wurde die Entscheidung getroffen, einige arbeitsergonomische Kriterien als Vorschrift zu behandeln, und diese, statt sie zu bewerten, als "Hard Constraints" bereits in das Simulationsmodell aufzunehmen. Beispiele für solche Kriterien sind etwa die Einhaltung von (gesetzlichen und ungesetzlichen) Pausenzeiten oder Vorbereitungszeiten für das Anlegen von Schutzkleidung. Dadurch wird sichergestellt, dass keine Simulationsläufe erstellt werden, die diese Kriterien nicht erfüllen, womit Rechenzeit eingespart werden kann.

2.4.1.3 Herausforderungen

Die Tatsache, dass sich die Produktionsabläufe beim Projektpartner als wesentlich breiter und flexibler herausgestellt hatten als dies dem Projektteam bei der Antragsstellung bewusst war, unterstützte das Ziel, ein möglichst breit anwendbares Konzept zu entwickeln. So mussten neben dem eigentlichen Hauptprozess des Kunststoffgießens noch weitere Vorbereitungs- und Nachbearbeitungs-Prozesse im Feinplanungssystem abgedeckt werden. Daher wurde das vorhandene Software-Framework um Komponenten erweitert, die das Grundgerüst des Simulationsmodells alleine aus den ERP-Daten aufbauen. Diese Komponenten sind offen für die schrittweise Ergänzung durch prozessspezifische Zusatzmodule, welche die unterschiedlichen Bearbeitungsabläufe an den unterschiedlichen Arbeitsplätzen detailliert abbilden. Typischerweise sind diese zusätzlichen Abläufe nicht im ERP-System abgebildet, sondern die Informationen müssen aus der Prozessanalyse (Arbeitspaket 2) gewonnen werden.

2.4.1.4 Highlights

Es konnten für die schwierige Modellierungsaufgabe als auch für den Optimierungsablauf Lösungsschemata gefunden werden, die sich inzwischen als effizient und ausbaufähig erwiesen haben. Das "hybride" Optimierungsschema (Kombination aus zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen; siehe auch AP4) weist zusätzlich einen hohen Innovationscharakter auf. Für die Erstellung von Simulationsmodellen wurden neue Software-Bausteine und Richtlinien geschaffen, um das Gleichgewicht zwischen Modellgenauigkeit und Performance besser in den Griff zu bekommen. Die Software-Bausteine sind größtenteils so allgemein gehalten, dass sie als Forschungsergebnisse auch in anderen Domänen zur Verfügung stehen (siehe auch AP3). Weiters konnten Richtlinien für die Parameterisierung und Auswahl von Optimierungsverfahren gefunden werden (siehe auch Arbeitspaket 4).

2.4.2 Anforderungsanalyse bei den beteiligten Anwendungspartnern

2.4.2.1 Zielsetzung

Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit und Akzeptanz der entwickelten Verfahren sollten unter der Federführung des beteiligten Systemintegrators ABF sowie des Forschungspartners PROFACTOR die involvierten Produzenten ASMA und Schneegans mit den in AP1 erarbeiteten Konzepten und Visionen konfrontiert und nach ihren Wünschen und Anforderungen für eine zukünftige Produktionsfeinplanung befragt werden. Die Ergebnisse werden in einem Anforderungskatalog festgehalten und dienen den weiteren Arbeitspaketen als Grundlage. Zur Bewertung und Evaluierung der entwickelten Verfahren sollten gemeinsam mit dem teilnehmenden Anwender ASMA einige typische Referenzszenarien definiert und entsprechende Realdaten erfasst werden. Die Daten dienen auch dazu, die entwickelten Simulations- und Bewertungsmodelle zu validieren.

2.4.2.2 Ergebnisse

Referenzszenario

Als Referenzszenario für das Evaluieren des entwickelten Lösungskonzeptes wurde die Produktion des Projektpartners ASMA gewählt. ASMA stellt am Standort Weitra ein breites Produktspektrum an Polyurethanteilen mittels Kalt- und Warmgießverfahren her. Knapp 100 MitarbeiterInnen verarbeiten dabei 89 verschiedenen Rezepturen zu mehr als 20.000 Produktvarianten. Pro Tag werden etwa 40 bis 50 neue Kundenaufträge abgewickelt, wobei sich die Auftragsumfänge von einzelnen Unikaten bis mehreren 10.000 Stück erstrecken. In gleicher Weise spannen sich die Abmessungen der Produkte von kleinsten Transportrollen für Magnetkartenleser bis zu Farbauftragswalzen mit mehreren Metern Länge.

Die Produktion gliedert sich in vier operative Bereiche, welche durch Zwischenlager voneinander entkoppelt sind (**Bild 2**): Kernvorbereitung, Gießen, Finish sowie in eine mechanische Bearbeitung der gegossenen Teile. Darüber hinaus verfügt ASMA noch über ein Warenausgangslager, eine Qualitätssicherung sowie eine Werkzeugfertigung, welche u. a. auf die Maschinen der mechanischen Bearbeitung zugreift. Ergänzt werden diese durch den Bereich der Logistik und Services.

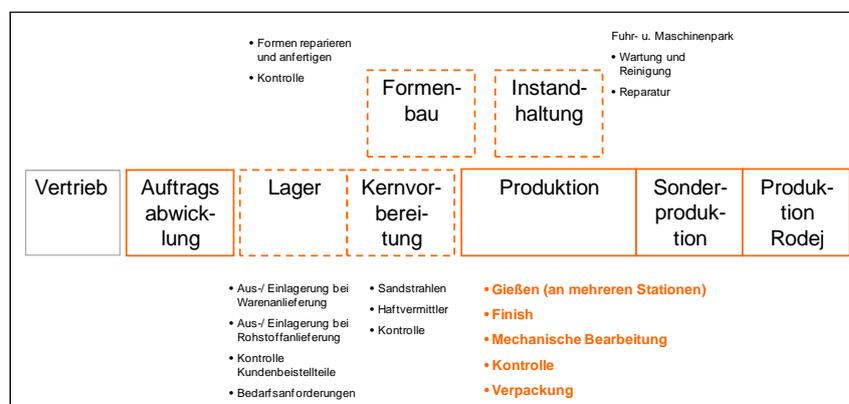


Bild 2: Darstellung der betrachteten Produktionsbereiche.

Die einzelnen Prozesse sind durch eine Reihe von spezifischen Anforderungen und Abhängigkeiten gekennzeichnet, welche in der Produktionsfeinplanung berücksichtigt werden müssen: Abhängigkeit der Produktqualität von der Luftfeuchte; Abhängigkeit der Losgröße von der maximalen Menge an Material, das gemischt und in einer vorgegebenen Verarbeitungszeit gegossen werden kann; idealen Farb- und Materialreihenfolgen zur Minimierung der Rüstvorgänge; Zusammenhalten von Material mit gleichen Härtegraden; Zusammenhalten von Rezepturen.

Eine weitere Herausforderung für die Planungsprozesse ist der hohe Anteil an manuellen Tätigkeiten, speziell in der Kernvorbereitung sowie beim Kunststoffgießen und die sich daraus ergebende Flexibilität. So ist es an der Regel, dass sich Arbeitsfolgen überlappen und ein/e MitarbeiterIn mehrere Aufträge parallel bedient. Beispielsweise kann ein/e MitarbeiterIn eine Form gießen, während die nächste bereits zum Aufwärmen auf einem Heiztisch liegt oder zum Aushärten in einem Wärmeofen. In gleicher Weise kann ein/e MitarbeiterIn eine Form aufbauen, während Material parallel dazu in einem Vakuumrührer aufbereitet wird. Der hohe Grad an möglichen parallelen und sich überlappenden Arbeitsgängen stellt eine besondere Herausforderung an eine Planungsstrategie dar.

Prozessanalyse

Die Produktionsabläufe wurden von den Projektpartnern analysiert, zentral dokumentiert und für die Erstellung und Verfeinerung des Simulationsmodells herangezogen. Es konnte festgestellt werden, dass die Prozesse, die vor dem Gießen stattfinden, stark vereinfacht (d. h. als Blackbox betrachtet) werden können, und nur mit Hilfe der Prozesszeit abgebildet werden müssen. Der Gießprozess selbst gliedert sich in eine deutlich komplexere Abfolge von bis zu 8 Arbeitsschritten pro Arbeitsgang, in denen die MitarbeiterInnen zeitweilig Wartezeiten überbrücken müssen und zusätzliche Aufgaben übernehmen können. In der Nachbearbeitung gibt es wiederum weniger komplexe Arbeitsgänge, aber dafür zeitweilige maschinelle Engpässe. Daher sollte es nicht nur möglich sein, gleichwertige Maschinen (nämlich über eine vielfache Kapazität) abzubilden, sondern auch nur teilweise gleichwertige Maschinen (über die Zuordnung zu Gruppen) abzubilden, um der Optimierung die Möglichkeit zu geben, Aufträge möglichst effizient zu verteilen.

Arbeitspsychologische und -ergonomische Analysen

Im Zuge der System- und Anforderungsanalyse wurde eine arbeitspsychologische Analyse der betrachteten Produktionsbereiche durchgeführt. Teil dieser Analyse waren eine MitarbeiterInnen-Befragung (subjektive Arbeitsanalyse und Ermittlung einer Grundlage zur späteren Evaluation/Wirkungsüberprüfung) sowie Arbeitsanalysen zur Anpassung der Arbeitsergonomie-Themen an die Produktionsrealität und -erfordernisse des Kooperationsbetriebes. Aus der Prozessanalyse sowie der arbeitspsychologischen Arbeitsanalyse wurden schließlich die Anforderungen an die Bewertung des Produktionssystems abgeleitet, welche dem Bewertungsmodell als Spezifikation dienen. Weiters lieferten die Analysen zahlreiche Empfehlungen für Prozessverbesserungen aus arbeitspsychologischer/ergonomischer Sicht. Die Ergebnisse wurden in einem Arbeitsanalyse-Bericht sowie in einem Grundlagen- und Diskussionspapier zu Arbeitsergonomie und Bewertungsmodell.

Empirie-Design zur Ermittlung der praktischen Arbeitsergonomie-Themen, -Erfordernisse und –Parameter für den Zielgegenstand

Es wurde in diesem Zusammenhang ein arbeitspsychologisches Vorgehen mittels Arbeitsanalyse (RHIA nach Leitner, Volpert, Greiner, Weber, Hennes; Analyse psychischer Belastungen in der Arbeit. Das RHIA-Verfahren, Handbuch, 1987) vorgeschlagen. Das dahinterliegende Konzept geht davon aus, dass Belastungen, die sich in Hindernissen in der Arbeit zeigen, primär zu Folgen erster Ordnung in Form von Zusatzaufwand und riskantem Handeln führen, und sich sekundär vermittelt durch die Folgen 1.Ordnung, in betrieblichen und individuellen Kosten niederschlagen (**Bild 3**). Es gilt daher die potenziellen Fehlbelastungsfaktoren und Bewältigungsressourcen für den Optimierungsprozess praktisch zu ermitteln.

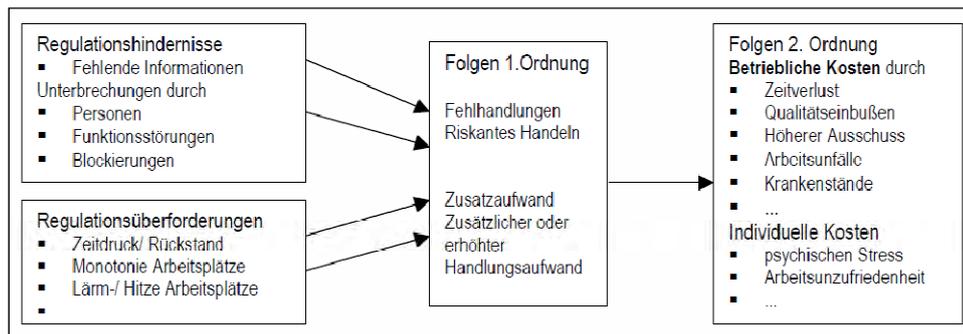


Bild 3: Vermittlungsmodell von Regulationsbehinderungen und ihren Folgen (in Anlehnung an Büssing und Glasner, 2002).

Es wurde ein *Arbeitsanalyse-Bericht von 18 Arbeitsplätzen* der Produktionskette im Kooperationsbetrieb zum Überblick der – für den Zielgegenstand relevanten – Handlungsregulationshindernisse und Bewältigungsressourcen erstellt.

Weiters wurden *Subjektive Arbeitsanalyse-Werte aus Sicht der MitarbeiterInnen* zu Beginn des Optimierungsprozesses für nachhaltiges Wirtschaften & Arbeiten festgehalten. Der standardisierte arbeitspsychologische Fragebogen IMPULS (Molnar, M., Geissler-Gruber, B. & Haiden, C. Impuls-Test adaptiert nach KFZA - Kurz-Fragebogen zur Arbeitsanalyse - ein arbeitspsychologisches Verfahren von J. Prümper, K. Hartmannsgruber und M. Frese. Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie (1995) 39 (N.F. 13) 3. Göttingen) ging im Rahmen der routinemäßigen MitarbeiterInnenbefragung an 100 Beschäftigte. Der Rücklauf betrug 71%. Damit wurde die Arbeitsqualitäts-Güte zum Zeitpunkt t0 der Prozessoptimierung ermittelt und kann zu einem späteren Zeitpunkt zur Evaluation/Wirkungsüberprüfung herangezogen werden.

Vorschlag für ein arbeitsergonomischen Gütekriterien-System (Bild 4) basierend auf den Humangütekriterien nach W. Hacker (Ausführbarkeit, Schädigungslosigkeit, Beeinträchtigungsfreiheit, Persönlichkeitsförderlichkeit). Das System enthält erste Überlegungen zu „Gute-Arbeit“-Parametern und ihren Bewertungsindikatoren bei Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein dieser Parameter.

Human- / Güte-Kriterien „Guter Arbeit“	Erläuterungen	Ausgewählte Beispiele für arbeitsergonomische Parameter („Gute-Arbeit-Standards“) im Prozess- Optimierungs-Tool	Be-Wertung
1. Ausführbarkeit	Eine Tätigkeit ist dann ausführbar, wenn die Voraussetzungen für eine zuverlässige und forderungsgerechte Tätigkeitsausführung gegeben sind. Diese bestehen in der Einhaltung von Grenzwerten menschlicher Leistungsfähigkeit auf sensorischem (bezogen auf die Wahrnehmbarkeit von tätigkeitsleitenden Informationen) und motorischem (bezogen auf die anthropometrischen Maße der Arbeitsplätze, -gegenstände und – mittel) Gebiet, unabhängig von der Dauer der Tätigkeit.	Zeitpuffer für Arbeitsschritte mit manueller Handhabung von Lasten (wie z.B. beim AP 2.6.4 ² Vulkollan-Gießen / Schi-Raupen-Guß), um die erforderlichen Hilfsmittel und –personen (z.B. im Falle von AP 2.6.4 Hubstapler und zweite Arbeitskraft verfügbar zu haben) Ziel: Verringerung der Lastgewichte und Optimierung der Handhabungsbedingungen zur Verhütung von Muskel-Skelett-Erkrankungen	Vorschlag Bewertung der (nicht) vorhandenen: Zeit: 1 MA pro Stück Schi-Raupe (8 pro Tag); mind. 50,00 Euro <u>Erläuterung dazu:</u> Fehlende Zeiteinheit für ergonomische Handhabung der Last erhöht das Risiko für Muskel-Skelett-Erkrankungen. MSD produzieren 20,7% der Krankenstandstage (Stand 2004; betriebl.Kosten f. MSD: 164,7 Mio € bei 3.266.491 unselbständig Erwerbstätigen)

Bild 4: Auszug aus dem Gütekriterien-System.

Anhand des *Arbeitsanalyse-Berichtes* wurde in einem Workshop ein Maßnahmenkatalog erstellt, der für die einzelnen Arbeitsbereiche konkrete Änderungen vorschlägt, sowie konkrete Anforderungen an das Simulationsmodell und an das Bewertungsmodell gestellt.

Anforderungsanalyse

Aus den Gesprächen mit ASMA ergab sich für die Feinplanung ein sinnvoller Simulationshorizont der Zeitraum von einem Tag bzw. 2-3 Schichten. Es sollte immer ein Tag vorausgeplant und danach rekapituliert werden, da ein längerer Zeitraum aufgrund der relativen Häufigkeit von Ausschuss und Nachbearbeitungszyklen nicht sinnvoll ist.

Parallel zur Anforderungsanalyse wurde seitens des Projektpartners ASMA mit einer Bereitstellung der erforderlichen Primärdaten begonnen. Dazu wurde den Entwicklern bei PROFACOR ein Zugriff auf eine Testdatenbank des ERP-Systems eingerichtet, sodass dem Projektteam jederzeit eine Einsicht in die Struktur der Produktions- und Stammdaten möglich ist. Damit konnte das Entwicklerteam Schnittstellen zu dem ERP-System konzipieren und darin die entsprechenden Datenstrukturen abbilden.

Es stellte sich als Anforderung heraus, dass ausschließlich die zur Verarbeitung freigegebenen Aufträge aus der Datenbank ausgelesen und für die Feinplanung verwendet werden sollen. Zu Beginn der Projektlaufzeit war das Aufholen von Rückständen (weitgehend ohne Rücksicht auf Termintreue) ein wichtiges Ziel für die Firma ASMA, dieses Ziel wurde jedoch aufgrund saisonaler Schwankungen neu definiert bzw. erweitert. In Worten lautete die Zielfunktion zuletzt: Möglichst hoher Durchsatz bei möglichst guter Termintreue, Qualität, MitarbeiterInnenzufriedenheit, Arbeitssicherheit und geringstmöglichem Materialverschleiß.

2.4.2.3 Herausforderungen

Die betrachteten Prozesse beim Projektpartner ASMA haben sich als komplexer erwiesen, als dies bei der Antragerstellung erwartet wurde. Speziell die hohe Arbeitsflexibilität und die große Produkt- bzw. Variantenvielfalt erweisen sich als Herausforderung. Der Prozessanalyse musste daher etwas mehr Aufwand gewidmet werden als ursprünglich eingeplant. Im Gegenzug konnte die arbeitspsychologische/ergonomische Analyse nicht nur eine Grundlage für das Bewertungsmodell liefern, sondern darüber hinaus bereits konkrete Rückmeldung und Verbesserungsvorschläge an den Projektpartner ASMA geben.

Auf die Einbindung von personenspezifischen Ergonomiegrößen in das Bewertungsmodell wurde verzichtet, da diese eine personalisierte (und somit nicht mehr anonyme) Abbildung der MitarbeiterInnen im Simulationsmodell erfordern würden. Ein realitätsnahes Bewertungsmodell, das auf die personell individuelle

Ausprägung der entsprechenden Bewertungsfunktionen eingeht, würde nicht nur eine datentechnische Herausforderung darstellen, sondern auch eine Verarbeitung persönlicher Daten erfordern und sich in einer moralisch-rechtlichen Grauzone bewegen. MitarbeiterInnen wurden daher nur aufgrund ihrer fachlichen Qualifikation und ihrer Aufgabe im Team abgebildet. Es wurde davon ausgegangen, dass jedem/jeder MitarbeiterIn, unabhängig von Alter, Familiensituation oder gesundheitlicher Konstitution individuelle Bewältigungsressourcen (physische/psychische Stärke, Fachwissen, Erfahrung, gutes Verhältnis zu Kollegen,...) zur Verfügung stehen, die ihm bei der Erledigung seiner Arbeit helfen und zu einem gleichwertigen Mitglied des Teams machen. Aus der Simulation sind daher nur Einzelpersonen aufgrund ihrer Team-Zugehörigkeit erkennbar.

2.4.2.4 Highlights

Die Ergebnisse der arbeitspsychologischen Analysen stimmten von Beginn an mit den Simulationsergebnissen überein und bestätigten sich somit gegenseitig. Arbeitsbereiche, bei denen Handlungsbedarf festgestellt wurde, stachen auch in der Simulation (Visualisierung durch Gantt-Charts und Bestandskurven) aufgrund der hohen Rückstände heraus. Diese Feststellung war aufgrund der Aufgeschlossenheit des Industriepartners möglich, der bereitwillig einen ständigen Zugang sowie inhaltliche Erklärungen zu aktuellen Auftragsdaten und Vergangenheitsdaten zur Verfügung stellte.

2.4.3 Erstellung der Simulationsmodelle und Zielfunktionen

2.4.3.1 Zielsetzung

Auf Grundlage des entwickelten Schemas sowie mit Kenntnis der Anforderungen sollte die Implementierung der Ablauf- und Bewertungsmodelle erfolgen. Die Modelle sollten den Projektpartnern in weiterer Folge als Experimentierfelder für die Erprobung, den Vergleich und die Optimierung der automatisierten Planungsverfahren dienen.

2.4.3.2 Ergebnisse

Anforderungen

Das Simulationsmodell der Prozessabläufe wurde mit Hilfe des bestehenden, auf .NET basierenden Simulationsframeworks SiRO (Akronym für Simulation – Rating – Optimization) des Projektpartners PROFACTOR aufgesetzt. Das Modell basiert auf den Analysen und der Spezifikation aus AP2 sowie auf der Datenstruktur des vorhandenen ERP-Systems. Herausforderung für das Software-Engineering war dabei die kontinuierliche Integration von Performance in der Implementierung, da die Ausführungszeiten der Experimentläufe ausschlaggebend für die Qualität des Gesamtsystems sind. In den konzipierten Planungs- und Lösungsansätzen wird die Simulation (Prozess- und Bewertungsmodell) so oft wie möglich von den Planungs- und Optimierungsalgorithmen ausgeführt, um Rückmeldung über die Lösungsqualität zu erhalten. Die Reduktion der Ausführungsdauer eines einzelnen Simulationslaufs führt daher dazu, dass bessere Lösungen in dem zur Verfügung stehenden Entscheidungszeitraum gefunden werden können.

Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wurde in C# für den Simulator SiRO implementiert. Ein solches SiRO-Modell ist typischerweise sehr schlank und setzt unmittelbar auf einen Simulationskernel auf, wodurch sehr hohe Ausführungsgeschwindigkeiten erzielt werden können. Der blau hinterlegte Bereich in Bild 5 zeigt das "Innenleben" des Simulationsmodells.

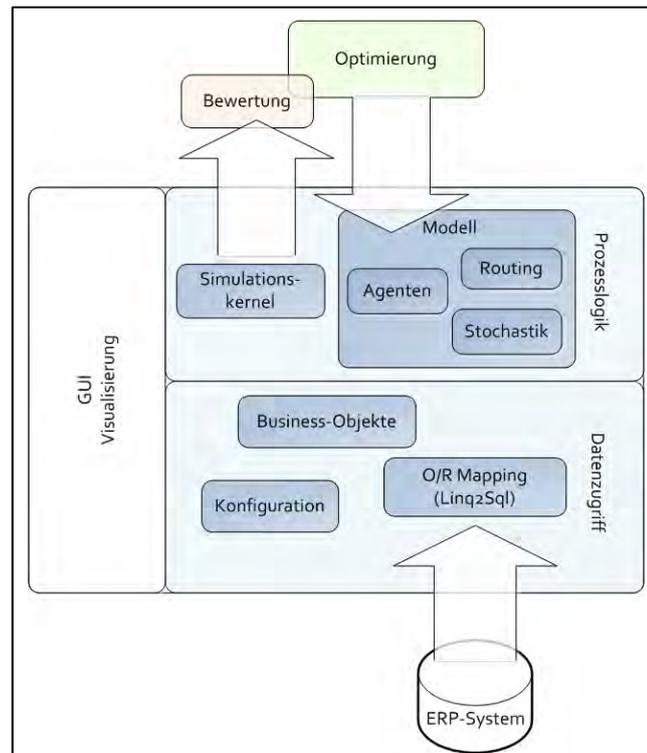


Bild 5: Architektur des Simulationsmodells und Beziehungen zu anderen Komponenten

Agentenbasierte Simulation

Aufgrund der hohen Flexibilität und Entscheidungsfreiheit der MitarbeiterInnen wurde in der Design-Phase die Entscheidung gefällt, die MitarbeiterInnen als Agenten zu modellieren. Das heißt, dass die Modellelemente, welche die MitarbeiterInnen repräsentieren, über folgende besondere Eigenschaften verfügen und sich dadurch von den anderen Modellelementen abheben:

- **Autonomie:** Agenten haben Kontrolle über ihre Handlungen und über ihren eigenen Zustand; sie handeln autonom, unabhängig von äußerem Eingreifen.
- **Soziale Fähigkeiten:** Agenten können über eine Agenten-Sprache miteinander kommunizieren.
- **Reaktionsvermögen:** Agenten nehmen ihre Umwelt wahr und reagieren auf Änderungen in dieser Umwelt.
- **Proaktivität:** Agenten reagieren nicht nur, sondern ergreifen selbst die Initiative und zeigen zielgerichtetes Verhalten.

Das Eintreffen der MitarbeiterInnen am Arbeitsplatz im Rahmen ihrer Gleitzeit ist daher das einzige Ereignis, das von außen ausgelöst wird. Dementsprechend mächtig ist die Prozesslogik, die quasi "in den Köpfen" der MitarbeiterInnen verankert ist und die Handlung in der Simulationswelt vorantreibt.

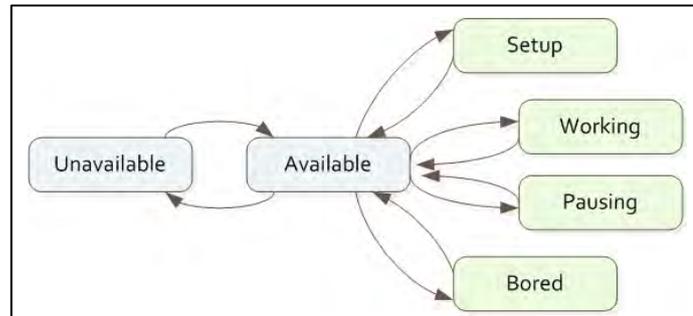


Bild 6: Zustandsautomat, der die Zustände und Zustandsübergänge der MitarbeiterInnen abbildet.

Grundlage für dieses Verhalten sind die in Bild 6 dargestellten Zustände. Es handelt sich hierbei um einen Zustandsautomaten, dessen Zustandsübergänge von den Ereignissen der Simulationswelt in Abhängigkeit von den inhärenten Eigenschaften der Agenten ausgelöst werden. Solche Eigenschaften sind z. B. die Menge der bisher konsumierten Pausenzeiten. Auch andere arbeitsergonomische Kriterien wie etwa Monotonie werden auf diese Weise abgebildet, und beeinflussen somit die Entscheidungen der Agenten.

Routing und Ressourcenbelegung

Als generische Grundlage für die Abbildung des Auftrags-/Materialflusses wurde eine Routing-Strategie entwickelt, der auf der Datengrundlage der Arbeitspläne, die im ERP System enthalten sind, aufsetzt.

Die Zuteilung von Ressourcen zu Aufträgen geschieht im Falle der MitarbeiterInnen (Agenten) nach dem Pull-Prinzip. Das bedeutet, dass die MitarbeiterInnen aktiv aus einem globalen "Pool" von Aufträgen den für sie am besten Geeigneten auswählen, siehe Bild 7. Bei dieser aktiven Auswahl wird das Ergebnis des Optimierungsalgorithmus mit einbezogen.

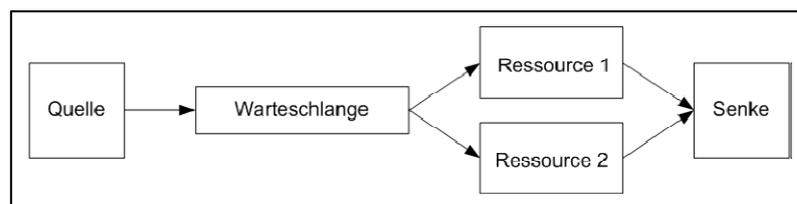


Bild 7: Pull-Prinzip.

Im Falle der Maschinen oder Werkzeuge geschieht dies nach dem genau umgekehrten, so genannten Push-Prinzip. Das heißt, dass den Ressourcen von außen Aufträge zugewiesen werden. Einmal zugewiesen, können die Aufträge nicht mehr umverteilt werden, siehe Bild 8.

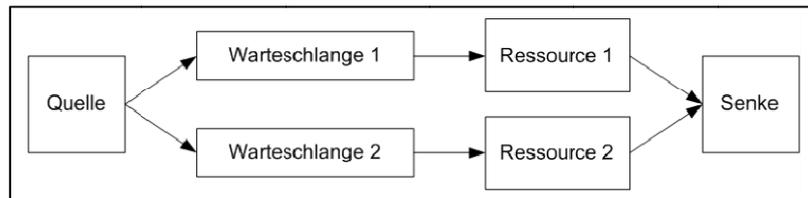


Bild 8: Push-Prinzip.

Datenmodell

Das Simulationsmodell benötigt als Grundlage die Daten aus einem ERP-System, in diesem Fall das beim Projektpartner AMSA eingesetzte System APPlus. Bild 9 stellt das zuletzt verwendete Datenmodell dar. Da die Daten in der dritten Normalform dargestellt und daher auf unterschiedliche Tabellen verteilt sind, wurden die unterschiedlichen Themenbereiche gruppiert und farblich zusammengefasst.

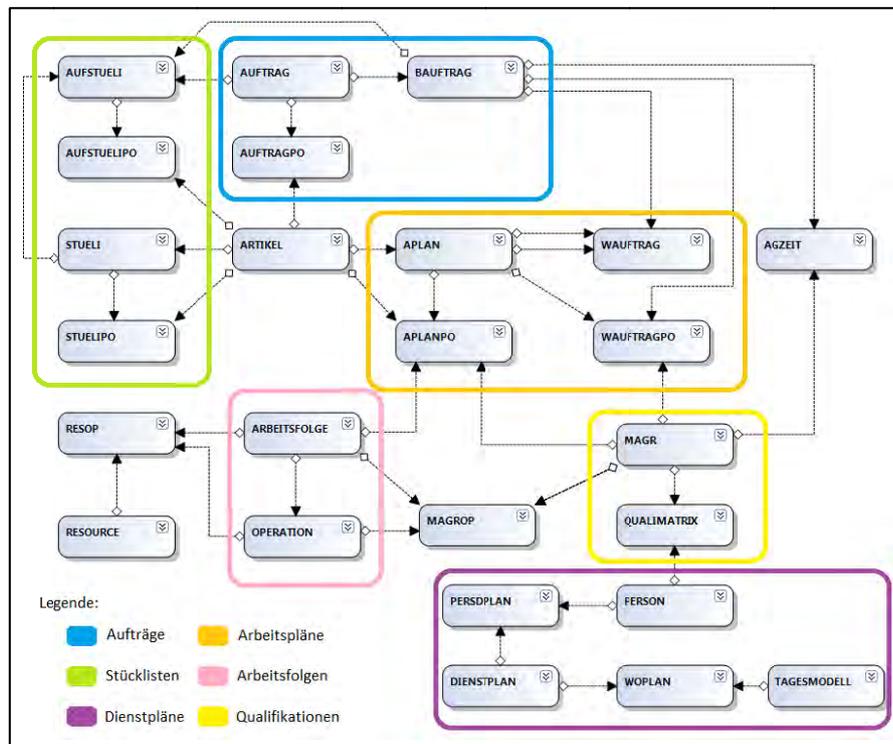


Bild 9: Datenmodell als Grundlage für das Simulationsmodell.

Die Datenbasis wird mit dem O/R Mapper Linq2Sql dem Simulationsmodell zugänglich gemacht und alle Datenzugriffs-Funktionen nur in Form von Interfaces bereitgestellt. Auf diese Weise kann die Datenbasis relativ leicht ausgetauscht werden, und dadurch das Modell auf andere Architekturen portiert werden.

Bewertungsmodell

Um mit Hilfe der Simulation Parameter wie etwa die Auftragsreihenfolge optimieren zu können, müssen Simulationsergebnisse untereinander vergleichbar sein. Dazu müssen die Simulationsläufe nach einem einheitlichen Schema bewertet werden, typischerweise wird dazu eine mathematische Zielfunktion definiert.

Ein Bewertungsmodell ist daher nichts anderes, als die Implementierung einer mathematischen Zielfunktion als Software-Komponente. In ihr werden unterschiedliche, unter Umständen auch gegenläufige Teilziele zu

einer Formel zusammengeführt, aus der ein Fitnesswert berechnet werden kann. Es gilt, den Fitnesswert im Rahmen der Optimierung entweder zu maximieren ($Z \rightarrow \max$) oder zu minimieren ($Z \rightarrow \min$).

Die während eines Simulationslaufes gewonnen Prozessdaten werden an das Bewertungsmodell übergeben. Der ermittelte Fitnesswert wiederum dient als Grundlage für die Evaluierung der Simulationsszenarien.

Das Bewertungsmodell dient dazu, die Optimierung an einen gewählten Betriebspunkt zu führen. Dieser gewählte Betriebspunkt sollte möglichst ganzheitlich und optimal auch im Sinne des nachhaltigen Wirtschaftens sein. Das bedeutet, dass neben technologischen und ökonomischen Kennzahlen noch zusätzliche Kennzahlen bewertet werden. Beispiel hierfür aus der kunststoffverarbeitenden Industrie ist unter anderem der Energie- und Ressourcenverbrauch durch wiederholtes Aufheizen einer Gießform bzw. Spritzgussform oder Rohstoffverluste bedingt durch Reinigung bei Material- bzw. Farbwechsel. Des Weiteren kann falsche Arbeitsplanung und Arbeitsgestaltung für psychische Monotonie, Sättigung usw. bei MitarbeiterInnen verantwortlich sein. Als Leitfaden im Hinblick auf das Thema Arbeitsergonomie wurden die arbeitsergonomischen Humankriterien nach Hacker (Ausführbarkeit, Schädigungslosigkeit, Beeinträchtigungslosigkeit bzw. Zumutbarkeit sowie die Persönlichkeits- und Lernförderlichkeit) verwendet. Vom Projektpartner Arbeitsleben wurde diesbezüglich ein Diskussionspapier erarbeitet, welches diese Fragestellung der Arbeitsergonomie genauer behandelt.

Um einen Fitnesswert zu ermitteln, wird eine mehrstufige Bewertungsfunktion verwendet. Im ersten Schritt erfolgt eine Bewertung der Kennzahlen mit einer nichtlinearen Übertragungsfunktion (Polygonzug). Mit dieser Übertragungsfunktion werden Kennzahlen in eine gemeinsame Einheit übergeführt. Hierfür kann eine beliebige Einheit gewählt werden, jedoch zeigte sich die vorteilhafte Verwendung vergleichbarer Punkte- oder Währungswerte. Kennzahlenreihen ohne Zeitbezug können nach ihrer Gewichtung durch Summenbildung zusammengeführt, Kennzahlen mit Zeitbezug entlang der Zeitachse integriert werden. Bei Bedarf können mehrere Kennzahlen gewichtet und zu Gruppenkennzahlen zusammengeführt werden.

Bewertungsframework

Für die Implementierung des Bewertungsmodells wurde ein vorhandenes Software-Framework genutzt, welches, ebenso wie das Simulationsframework, in der Programmiersprache C# implementiert ist.

Das Bewertungsframework ist so konzipiert, dass es in anderen Aufgabenstellungen und verschiedenen Domänen eingesetzt werden kann. Dem Benutzer wird die Möglichkeit gegeben einzelne Elemente der Bewertung zu einem kompletten Bewertungsmodell dynamisch zu verknüpfen. Diese Elemente werden durch Knoten und Pfade repräsentiert. In der Softwarebibliothek stehen folgende Knoten-Typen bereit: Summe, Integration, Multiplikation, Übertragungsfunktion, Gewichtung, Akkumulator, Statistik,...

Über Pfade werden diese Knoten miteinander verbunden und ergeben ein Netzwerk von Knoten und Pfaden die das Bewertungsmodell, entsprechend den jeweiligen Anforderungen darstellen. Zusätzlich stehen den Knoten noch Hilfsmittel, wie Operatoren, zweidimensionale Punkte, Graphen der Übertragungsfunktionen, Zahleneinheiten, Zeitspannen und Statistische Elemente zur Verfügung.

Gültigkeit der Pfade

Sollte einer der verschiedenen Pfade noch nicht alle benötigten eingehenden Betriebsdaten erhalten haben, so wird dieser Pfad so lange ungültig gesetzt bis diese Daten vorhanden sind. Nach Erhalt dieser Betriebsdaten wird der Pfad wieder gültig gesetzt. Werden diese nie geliefert bleibt das Ergebnis ungültig.

Aufgrund dieser Struktur (Aufteilung in Knoten und Pfade) können Zwischenergebnisse der Bewertung wiederum in die Simulation zurückgeführt werden und etwa für Dispatching-Regeln als Information dienen, die einen aktuellen oder voraussichtlichen Systemzustand reflektieren. Weiters können „schlechte“ Simulationsläufe aufgrund von ungünstigen Zwischenergebnissen frühzeitig erkannt werden. Durch den ehestmöglichen Abbruch solcher Läufe kann Ausführungszeit gespart werden, was wiederum für die Qualität der Optimierungsergebnisse von großer Bedeutung ist.

Bewertungsvarianten

Verschiedene Bewertungsstrategien erlauben eine unterschiedliche Gewichtung und die Einbeziehung bzw. Ausklammerung von unterschiedlichen Kennzahlen. Somit ist es möglich, die Produktion an verschiedenen gewählte Betriebspunkte zu führen, d. h. es können unterschiedliche Bewertungsszenarien evaluiert, und diese dann auch im Anschluss miteinander verglichen werden.

Die ursprüngliche Bewertung von ASMA beinhaltete lediglich den Umsatz der Eigenfertigung je produktiver Arbeitsstunde aller MitarbeiterInnen der Produktion, die Produktivität (AZE/PZE) sowie die Abweichung der Vorgabezeit zur Ist-Zeit je Auftrag.

Die Herausforderung bestand darin, dieses Modell dahingehend zu erweitern, dass auch arbeitsergonomische und ökologische Kriterien in die Bewertung einfließen.

In der praktischen Umsetzung wurde begonnen, die Bewertung mit wenigen Kennzahlen abzubilden. Dies diente vor allem der Modellvalidierung. Im Fortschreiten des Projektverlaufs wurden auch andere Kennzahlen in Betracht gezogen und in das Bewertungsmodell mit eingebunden.

Für weitere statistische Auswertungen und die Ergebnisaufbereitung wurde für jede betrachtete Kennzahl eine eigene Bewertungsinstanz implementiert. Dadurch ließen sich zum Beispiel für die unterschiedlichen Kennzahlen Durchschnittszeiten, längste bzw. kürzeste Zeiten einzelner Prozesse anschaulich betrachten.

Übertragungsfunktionen

Eine exemplarische Darstellung einer Übertragungsfunktion zeigt Bild 10. Auf der Y-Achse wird die zu überführenden Einheit aufgetragen. Diese kann sowohl Positive als auch Negative Werte annehmen.

Die gewonnen Betriebsdaten einer Kennzahl werden auf der X-Achse aufgetragen und anschließend entsprechend der Übertragungsfunktion in einen Wert überführt. Falls Betriebsdaten über festgesetzte minimale bzw. maximale Grenzen kommen wird der zu evaluierende Produktionsplan für ungültig erklärt.

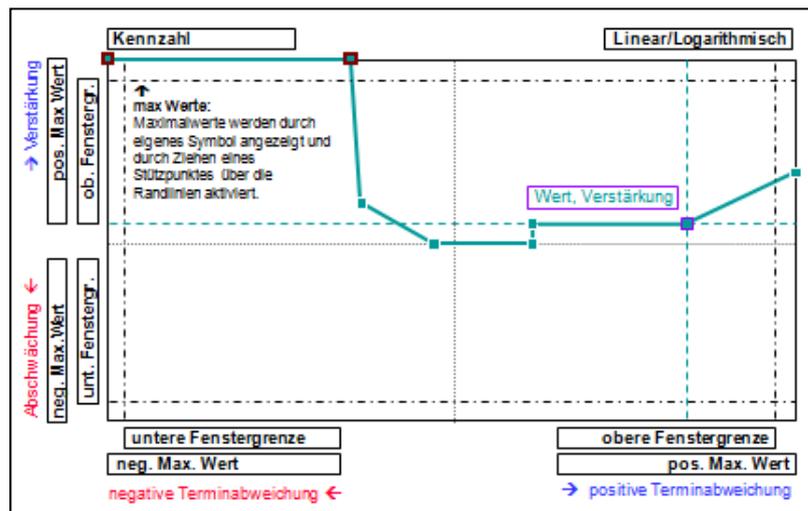


Bild 10: Skizze einer möglichen Bedienoberfläche für einen EditorInnenen zur Vorgabe von Übertragungsfunktionen.

Exemplarisch wird in Bild 11 die Übertragungsfunktionen für Terminabweichung skizziert:

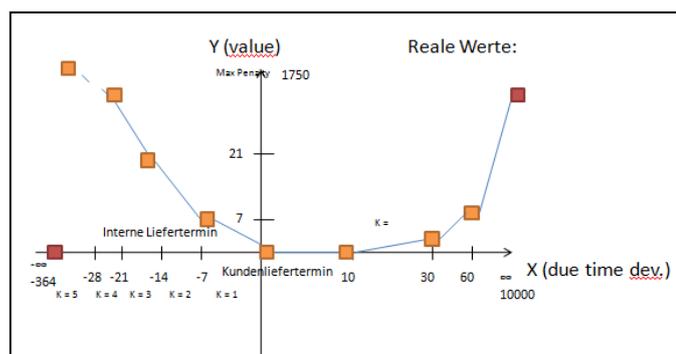


Bild 11: Übertragungsfunktion für die Bewertung einer Terminabweichung.

Stochastik der der gelieferten Betriebsdaten

Aufgrund der Stochastik des Produktionsprozesses sind auch die vom Ablaufmodell gelieferten Betriebsdaten stochastischer Natur. Diese stochastischen Prozesse werden durch statistische Verteilungen beschrieben. Um ein gegebenes Simulationsergebnis wiederholen zu können, muss ein zentraler reproduzierbarer Zufallszahlenstrom für die Verteilungen verwendet werden. Das erfolgt durch Vergabe eines zentralen Seed-Wertes aus denen alle Zufallszahlen gezogen werden. Um ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erhalten, muss die Anzahl der mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen durchgeführten Ablaufsimulationen hinreichend groß sein. Im Projekt wurde diese Anzahl Bewertungsläufe mit unterschiedlichem Zufallszahlenstrom entsprechend der Etappe der Optimierung angepasst um diese stochastischen Schwankungen zu berücksichtigen.

2.4.3.3 Herausforderungen

Eine zentrale Frage der Bewertung ist nach wie vor die Bewertung der Nichteinhaltung diverser Aspekte und die damit verbundene Pönalisierung im Bewertungsmodell. In den Übertragungsfunktionen wurden bisher Stützpunkte aus erfahrungsgemäßen oder geschätzten Werten verwendet. Mit der Gewichtung von arbeitsergonomischen Kriterien wurde experimentiert, Arbeitsergonomie im Sinne von Körperhaltung konnte aber schwer berücksichtigt werden.

Es wurden mehrere Varianten von Bewertungsmodellen implementiert. Aufgrund der Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten und der zahlreichen Optionen zur Gewichtung konnte aber keines der Modelle und keine der Einstellungen als einzig korrekt identifiziert werden. Es gibt offenbar mehrere Herangehensweisen, die valide sind; wichtig ist jedoch in jedem Fall, die Zielfunktion so zu formulieren, dass es nicht zu unerwünschten Nebeneffekten kommt.

Es stellten sich nicht alle Bewertungsstrategien als produktiv heraus. Der Optimierungsalgorithmus nutzt alle gegebenen Möglichkeiten zur Optimierung der im Bewertungsmodell definierten Fitnessfunktion aus. Dies kann dazu führen, dass in eine mögliche ungewollte Richtung optimiert wird. In diesem Bereich tun sich mehr und mehr interessante Fragestellungen auf, die behandelt werden sollten.

2.4.3.4 Highlights

Die unerwartete Komplexität der realen Prozesse führte schließlich zu einem höheren Modellierungsaufwand, der jedoch nach mehreren Umstrukturierungen in einem sehr generischen, wiederverwendbaren Modell (allgemein verwendbar für eine Werkstättenfertigung) bzw. in sehr leicht wiederverwendbaren Komponenten resultierte.

Die C#-Version des von Profactor entwickelten Bewertungsframeworks wurde erstmals verwendet, und gleichermaßen im Online- und Offline-Modus verwendet. Daraus konnten neue Erkenntnisse für die Verwendung in zukünftigen Projekten und für die Weiterentwicklung des Bewertungsframeworks selbst gezogen werden.

2.4.4 Entwicklung der automatisierten Planungs- und Optimierungsverfahren

2.4.4.1 Zielsetzung

Parallel zur Erstellung der Simulations- und Bewertungsmodelle sollten die Auswahl von Planungsverfahren und dazu jeweils die Entwicklung von geeigneten Optimierungsalgorithmen erfolgen. Hier sollten verschiedene heuristische und metaheuristische Verfahren für die entwickelte Problemstellung getestet und gegebenenfalls kombiniert werden.

2.4.4.2 Ergebnisse

Auswahl des Planungsverfahrens

Um die Robustheit des Planungsverfahrens zu gewährleisten, wurde eine Kombination aus Scheduling (Forschungspartner POM) und Dispatching (Forschungspartner HEAL) implementiert. Als Ausgangspunkt dient bei dieser Kombination ein Ablaufplan (Schedule), der bei Bedarf (z. B. im Falle von Störungen oder zu großen Unregelmäßigkeiten) durch Dispatching-Regeln ergänzt wird. Im konkreten Anwendungsfall kristallisierte sich die Dispatching-Variante als das passendere Planungsverfahren heraus.

2.4.4.3 Optimierungsansatz I - Scheduling

In Anlehnung an die aus der wissenschaftlichen Literatur bekannten Konzepte des Resource Constraint Project Scheduling (RCPS) kann der Produktionsprozess in einzelne Arbeitsgänge unterteilt werden, welche durch Vorrangbeziehungen miteinander verknüpft sind. Hierbei können minimale und auch maximale Zeitspannen für die Lagerung von Zwischenprodukten berücksichtigt werden. Diese Arbeitsgänge bestehen aus einem oder mehreren, direkt aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten. Für die Ausführung eines Arbeitsganges sind zuvor festgelegte Ressourcen (im Wesentlichen Maschinen und Personal) notwendig, welche während der gesamten Bearbeitungszeit dieses Arbeitsganges blockiert werden. Erst mit Beendigung des Arbeitsganges können die Ressourcen freigegeben und für andere Arbeitsgänge eingesetzt werden. Notwendige Maschinen- und Personalressourcen und deren flexibler Einsatz können hier direkt abgebildet werden. Wesentlich für die Auswahl dieses RCPS-Konzepts ist unter anderem die Möglichkeit Arbeits- und Pausenzeiten für MitarbeiterInnen und Servicezeiten für Maschine zu berücksichtigen. Damit ist gewährleistet, dass die Ergebnisse der MitarbeiterInnenuntersuchung des Projektpartners direkt in das Planungskonzept einfließen können.

Das Konzept von RCPS ermöglicht zwar eine sehr detailgenaue Darstellung des Produktionsprozesses, jedoch gibt es zwei Punkte, die zusätzlicher Überlegungen bedürfen:

- [1] Im Allgemeinen sind die Probleme des RCPS nicht einfach lösbar in dem Sinne, dass die beste Lösung rasch gefunden werden kann.
- [2] Es ist nicht möglich stochastische Schwankungen in Prozesszeiten und Ressourcenverfügbarkeit direkt zu berücksichtigen.

Punkt [1] kann dadurch gelöst werden, dass heuristische Approximationsverfahren eingesetzt werden. Erfolgversprechend sind hier nachbarschaftsbasierte Suchverfahren, die ausgehend von einer Startlösung besser Lösungen mit ähnlicher Struktur suchen. Bei Punkt [2] ist zunächst festzustellen, ob im Produktionsprozess vorliegende Schwankungen so groß sind, dass sie in der Planung berücksichtigt werden müssen. In Fällen geringer Schwankungen kann hier sehr einfach mit verschiedenen Sicherheitsstrategien gearbeitet werden. So ist die Erhöhung der Normalprozesszeiten um einen Sicherheitsaufschlag oder aber die reduzierte Auslastung von Ressourcen möglich. Bei größeren Schwankungen müssten diese direkt im Optimierungskonzept (zum Beispiel über die Rückkopplung des Simulationsverfahrens) berücksichtigt werden. Bisherige Untersuchungen lassen aber den Schluss zu, dass diese Schwankungen aber doch so gering sind, dass diese Rückkoppelung nicht notwendig erscheint. Genauere Aussagen können aber erst nach einer umfangreichen Evaluierung des Simulationsmodells erfolgen.

Resource Constrained Project Scheduling

Das Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) ist ein generelles Modell das für viele praktische Probleme Anwendung findet, wie z.B. die Verwaltung von komplexen Projekten, dem Abriss von Gebäuden sowie den Produktionsprozess von Unternehmen. Das RCPSP ist NP-hard (Blazewicz et al., 1983) und deswegen sehr schwierig zu lösen. Die grundsätzliche Beschreibung von RCPSP lautet wie folgt: ein Projekt besteht aus einer bestimmten Anzahl von Aktivitäten $A = \{1, \dots, n\}$ die wiederum ein bestimmtes Set von Ressourcen $R = \{1, \dots, m\}$ benötigen. Der Ressourcotyp $k \in R$ ist in seiner Kapazität R_k beschränkt, und eine Aktivität $j \in A$ benötigt r_{jk} Ressourcen während ihrer Bearbeitungszeit p_j . Aktivitäten unterliegen sogenannten Vorgängernebenbedingungen, das heißt ein Aktivität j kann nicht eingeplant werden bevor nicht alle Vorgänger P_j eingeplant wurden. Im konkreten Fall von ASMA stehen die Aktivitäten für Arbeitsgänge und die Ressourcen für MitarbeiterInnen oder Maschinen.

Seit seiner ersten Vorstellung von Pritsker et al. (1969) hat das RCPSP viel Aufmerksamkeit von der wissenschaftlichen Gemeinschaft bekommen und ist bis heute ein interessantes, praxisrelevantes und schwieriges Problem für das zahlreiche heuristische und/oder exakte Lösungsverfahren entwickelt wurden und werden.

Stand der Technik – RCPSP

Wie bereits oben erwähnt ist das RCPSP NP-hard und deswegen sehr schwierig zu lösen. Die wissenschaftliche Gemeinschaft hat deswegen zahlreiche exakte, heuristische oder auch hybride Verfahren entwickelt um das RCPSP effizient zu lösen. Sehr detaillierte Literaturübersichten über Lösungsansätze, mathematische Modelle und Varianten des RCPSP findet man z.B. bei Herroelen et al. (1998), Kolisch und Hartmann (1999), Brucker et al. (1999), Kolisch und Hartmann (2006) und Hartmann und Briskorn (2010).

Exakte Algorithmen um das RCPSP optimal zu lösen wurden unter anderem von Demeulemeester und Herroelen (1992, 1997), Mingozzi et al. (1997), Brucker et al. (1998), Vanhoucke et al. (2001), Schutt et al. (2009) und kürzlich Berthold et al. (2010) vorgestellt. Da diese Lösungsverfahren sehr aufwendig sind und nur Problemklassen mit bis zu sechzig Arbeitsgängen optimal lösen können, entwickeln Forscher gezielt (meta-)heuristische Ansätze für das RCPSP. Heuristische Verfahren, die ein nicht-optimales Ergebnis liefern aber dafür meist schnelle Lösungen garantieren und auf größere Problemklassen anwendbar sind, umfassen in der Regel Algorithmen die iterativ auf Grund von Prioritätsregeln entscheiden welcher Arbeitsgang als nächster eingeplant werden soll (siehe Kolisch und Hartmann, 1999).

Um auch große und komplexe Problemklassen effizient zu lösen, werden in den letzten Jahren vor allem Metaheuristiken entwickelt. Diese Entwicklung betrifft nicht nur das RCPSP sondern (fast) alle kombinatorischen Optimierungsprobleme im Bereich des Operations Research (OR). Metaheuristiken sind Algorithmen die mit Hilfe von problemspezifischen Operatoren und Verfahren näherungsweise versuchen kombinatorische Optimierungsprobleme zu lösen. Das prinzipielle Konzept einer einzelnen Metaheuristik ist allerdings im Gegensatz zu problemspezifischen Heuristiken auf mehrere Problemstellungen anwendbar. Bekannte metaheuristische Verfahren sind Ant Colony Optimization (basieren auf der algorithmischen Imitation von realen Ameisen auf Futtersuche), Simulated Annealing (Nachahmung eines Abkühlprozesses aus der Metallurgie), Genetischen Algorithmen (basieren auf der Nachbildung von Techniken der natürlichen Evolution wie Vererbung, Selektion, Mutation und Rekombination) sowie nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken wie Large Neighborhood Search (LNS), Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) oder

Variable Neighborhood Search (VNS) bei denen systematisch Nachbarschaften von Lösungen durchsucht werden.

Zu den erfolgreichsten Metaheuristiken für das RCPSP gehören genetischen Algorithmen von Debels und Vanhoucke (2007), Valls et al. (2008), Chen et al. (2010) und Mendes et al. (2009), die Scatter Search- Algorithmen von Debels et al. (2006) und Ranjbar et al. (2009), die hybride evolutionäre Metaheuristik von Kochetov and Stolyar (2003), die LNS von Palpant et al. (2003, 2004) sowie die ALNS von Muller (2009).

Aufgrund des jüngsten Erfolges von ALNS bzw. LNS für verschiedene Optimierungsprobleme wie Vehicle Routing Problem, Scheduling, aber auch RCPS, wurde entschieden das vorliegende Problem mit einer LNS zu lösen. Desweiteren bietet LNS durch seine Flexibilität die Möglichkeit einfach problemspezifische Charakteristika von ASMA zu implementieren.

Beschreibung der Methode – Large Neighborhood Search

Nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken wie Large Neighborhood Search (LNS), Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) oder Variable Neighborhood Search (VNS) gehören in den letzten Jahren zu den erfolgreichsten Lösungsverfahren für komplexe Optimierungsprobleme in der Wissenschaft so wie auch in der Praxis. Die von POM gewählte LNS (vorgestellt von Shaw, 1998) basiert auf der Idee, dass eine Initiaillösung graduell durch die sukzessive Anwendung von Zerstörern, bei denen ein Teil der momentanen Lösung entfernt wird, in Kombination mit Reparierern (wiederaufbauen der entfernten Lösungsteile) verbessert wird. Die Wahl der Operatoren unterliegt einer gewissen Stochastizität so dass in jeder Iteration verschiedene Teile einer Lösung betrachtet werden können. LNS nutzt also systematisch Nachbarschaften um in lokale Optima abzusteigen so wie aus diesen wieder zu entkommen.

Als Lösungsdarstellung kommen Aktivitätslisten (activity lists) zum Einsatz, die eine nachfolgergültige Liste aller Aktivitäten darstellen wobei die Positionierung innerhalb der Liste die Priorität für die Zuteilung der Ressourcen bestimmt.

Startlösung

Wie oben beschrieben basiert LNS auf einer Startlösung die mit Regret Based Biased Random Sampling (RBBRS) wie folgt generiert wird: bei der Erstellung eines gültigen Schedule werden die jeweils theoretisch einplanbaren Arbeitsgänge berechnet und die Auswahl randomisiert und mit Hilfe von verschiedenen Prioritätsregeln getroffen. Die Prioritätsregeln umfassen MLFT (Minimum Latest Finishing Time), LST (Minimum Latest Starting Time), Minimum Slack (LFT minus EFT), GRPW (Greatest Rank Position Weight), MTS (Most Total Successors), SPT (Shortest Processing Time), und GRD (Greatest resource demand).

Zerstörern

In jeder Iteration der LNS wird zufällig ein Arbeitsgang j ausgewählt, wobei Arbeitsgänge auf dem kritischen Pfad prioritär sind. Danach kommt einer der folgenden Operatoren zur Anwendung und zerstört einen Teil der Lösung. Die prozentuelle Größe der Lösung die zerstört wird, wird zufällig gewählt und wird im Weiteren als M bezeichnet.

- *Predecessor Clustering*: ein Arbeitsgang j wird aus der Lösung gelöscht so wie die direkten Vorgänger von j . Desweiteren werden jene Arbeitsgänge gelöscht die parallel zu j eingeplant sind und den gleichen Ressourcentyp nutzen. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die Größe M erreicht ist.

- *Successor Clustering*: ein Arbeitsgang j wird aus der Lösung gelöscht so wie die direkten Nachfolger von j . Desweiteren werden jene Arbeitsgänge gelöscht die parallel zu j eingeplant sind und den gleichen Ressourcentyp nutzen. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die Größe M erreicht ist.
- *Predecessor of the Successor Clustering*: ein Arbeitsgang j wird aus der Lösung gelöscht so wie die direkten Nachfolger plus deren Vorgänger. Desweiteren werden jene Arbeitsgänge gelöscht die parallel zu j eingeplant sind und den gleichen Ressourcentyp nutzen. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die Größe M erreicht ist.
- *Complete Clustering*: ein Arbeitsgang j wird aus der Lösung gelöscht so wie die direkten Nachfolger und Vorgänger von j . Desweiteren werden jene Arbeitsgänge gelöscht die parallel zu j eingeplant sind und den gleichen Ressourcentyp nutzen. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die Größe M erreicht ist.
- *Random Sequence*: eine zufällige Sequenz von Arbeitsgängen wird gelöscht.
- *Non Peak*: Arbeitsgänge in Perioden mit einer schlechten Ressourcennutzung werden von der Lösung gelöscht.

Reparieroperatoren

Um eine Lösung wieder zu reparieren werden zuerst die Positionen aller gelöschten Arbeitsgänge innerhalb einer Aktivitätsliste bestimmt. Danach wird – beginnend mit der ersten Position in der Aktivitätsliste – alle theoretisch einplanbaren Arbeitsgänge berechnet. Um einen Arbeitsgang auszuwählen kommt wie in der Startlösung RBBRS zur Anwendung.

2.4.4.4 Optimierungsansatz II - Regelbasiertes Dispatching

Regelbasiertes Dispatching ist eine *lokale* Entscheidungsstrategie welche zu einem bestimmten Zeitpunkt und mit zu diesem Zeitpunkt gegebenen Voraussetzungen eine Entscheidung trifft die lokal gierig erscheint, also den direkten *Gewinn* des Entscheidungsträgers zu maximieren versucht. Zwei Begriffe erfordern hier eine nähere Erklärung:

- *lokal* – bedeutet, dass ein Entscheidungsträger eine Entscheidung trifft ohne Rücksicht darauf zu nehmen, ob andere Entscheidungsträger, vielleicht sogar zu einem anderen Zeitpunkt, eine bessere Entscheidung treffen könnten.
- *Gewinn* – hängt von der schlussendlichen Regel ab. Besagt die Regel, dass der Auftrag mit der kürzesten Durchlaufzeit zuerst gewählt werden soll, so ist der Gewinn indirekt proportional zur Durchlaufzeit. Die Entscheidung für den Auftrag mit der kürzesten Durchlaufzeit wäre hierbei die Maximierung des Gewinns.

Entscheidungen werden relativ häufig getroffen, die Wahl des nächsten Auftrags zur Bearbeitung oder das Setzen von Pausen sind bewusste Entscheidungen, die von MitarbeiterInnen in produzierenden Firmen tagtäglich getroffen werden müssen. Bild 12 soll diesen Umstand graphisch verdeutlichen.

Bild 12: Darstellung der Entscheidungszeitpunkte (Blitzsymbol) anhand einer simulierten Abarbeitung von 4 Aufträgen auf 4 Ressourcen. Auch eine folgende Leerzeit könnte bewusst so entschieden worden sein (z.B. Pausen).

Die Anwendung einer solchen Entscheidungsregel bei allen beteiligten Entscheidungsträgern resultiert in komplexen und nicht vorhersehbaren Pfaden durch den Szenariobaum in dem jeder Knoten eine mögliche Situation und jede Entscheidung eine Kante darstellt (siehe Bild 13). Aufgrund der schnell wachsenden Größe des Szenariobaums, der schon bei einer geringen Menge an Entscheidungen und Knoten in seiner Gesamtheit nur schwer erfasst werden kann, wird Simulation dazu verwendet, verschiedene Pfade in diesem Baum zu explorieren und aus diesen Stichproben Rückschlüsse über die Qualität der Regel zu ziehen.

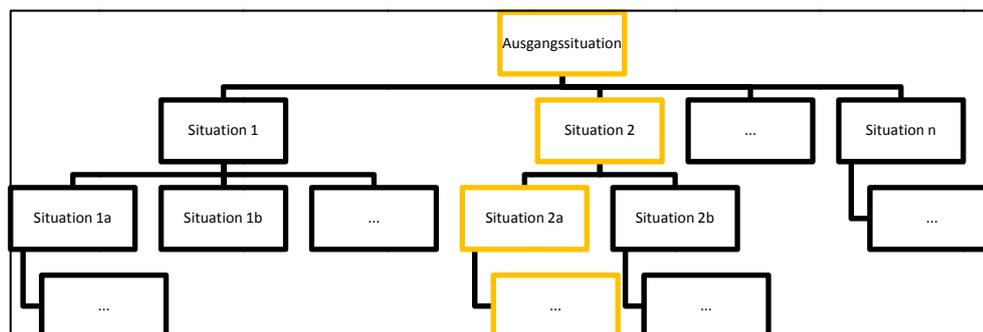


Bild 13: Schematische Darstellung eines Szenariobaums, ausgehend von einer Ausgangssituation ergeben sich durch unterschiedliche Entscheidungen, unterschiedliche Folgesituationen. Die Simulation bestimmt aufgrund der Entscheidungsstrategie (=Regel) welcher Weg von der Wurzel bis zu einem Blatt genommen wird (Beispielpfad in Orange).

Regelbasiertes Dispatching in der Werkstatt-Fertigung

Die Wahl des Entscheidungsträgers in der Werkstättenfertigung (dem Fertigungsprinzip des Anwendungspartners ASMA) hängt davon ab, wer in der Produktion der wesentliche Impulsgeber ist. Dies können z. B. MitarbeiterInnen sein, welche den Weg und die Bearbeitung der Produkte beeinflussen. Wenn diese durch ihre Tätigkeit oder Untätigkeit maßgeblich den Ablauf der Produktion bestimmen, ist es sinnvoll, die MitarbeiterInnen als Entscheidungsträger zu wählen. Auf der anderen Seite existieren ebenfalls stark maschinengetriebene Fertigungen, in denen der/die MitarbeiterIn nur eine untergeordnete Rolle spielt und die zeitlich kritischen Abläufe ohne Zutun von Menschen durchgeführt werden. In solchen Fällen ist es sinnvoller die Maschine als Entscheidungsträger zu betrachten. Im Fall der Firma ASMA ist die Fertigung sehr stark von den über 40 MitarbeiterInnen getrieben, welche mit unterschiedlichen Qualifikationen, auch die Qualität und den Prozess beeinflussen. Naturgemäß ist die Modellierung des Verhaltens von Menschen in der Simulation komplexer und zeitaufwendiger, da mehrere Faktoren berücksichtigt werden müssen. Auch

die Komplexität der Regel ist aufgrund dieser Tatsache eingeschränkter, da der Mensch diese während seiner Tätigkeit entweder im Kopf haben muss, um die Entscheidung selbst zu treffen, oder es werden ihm entsprechende technische Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, welche ihm das Ergebnis der Entscheidung präsentieren. In der Firma ASMA existieren z. B. bei einigen Arbeitsplätzen Terminals auf denen solche Informationen angezeigt werden können.

Die Umsetzung des regelbasierten Dispatchings in der Simulation sieht so aus, dass die Simulation immer dann anhält wenn eine Situation vorliegt, in der eine Entscheidung getroffen werden muss. Daraufhin werden alle Parameter und Entscheidungsmöglichkeiten erfasst, was bedeutet, dass der Szenariobaum der nächsten Ebene aufgespannt wird und die, anhand der Regel ermittelte, Entscheidung mit dem höchsten Gewinn getroffen wird.

Damit kann man nun einfache Entscheidungsregeln modellieren, simulieren, die gewonnenen Ergebnisse gegenüberstellen und entsprechende Rückschlüsse für die Fertigung ziehen und umsetzen.

Optimierung der Regel

Da die Entscheidung selbst, wie bereits erwähnt, nur eine lokale Gewinnmaximierung erzielt, muss der Ablauf der Regel über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Dabei wird evaluiert, ob die jeweiligen Kriterien für die lokale Gewinnmaximierung auch global, d.h. über die gesamte Prozesskette hinweg, zu einer Verbesserung der für die Firma wichtigen Kennzahlen führen. Die Veränderung und Optimierung der Regel erfolgt also im Hinblick auf die Unternehmenskennzahlen wie z.B. der Erreichung einer höheren Termintreue, der Verkürzung der Durchlaufzeiten, der Erhöhung des Durchsatzes, der Senkung der Prozesskosten oder anderer wirtschaftlich relevanter Kennzahlen. Auf der anderen Seite können allerdings auch soziale Kriterien, wie z.B. die MitarbeiterInnenzufriedenheit, Monotonie der Arbeit oder die Möglichkeit zur Gestaltung von Pausen einfließen lassen welche das nachhaltige Wachsen der Firma dadurch sichert, dass die eingesetzten Ressourcen nicht ausgebeutet werden, sondern mit dem Erfolg mitwachsen.

Offline Optimierung

Für die Optimierung der Regel generell gibt es zwei Möglichkeiten, eine die offline stattfindet, also entkoppelt von der tatsächlich ablaufenden Produktion und versucht eine bestimmte Menge an Arbeit effizient durch den Prozess zu leiten und eine die online stattfindet, die ohne Kenntnis über die Menge und Charakteristik der Aufträge Entscheidungen trifft, laufend bewertet und adaptiert wird.

Im Projekt wurde die offline Optimierung verwendet, da die Komplexität der Online-Optimierung bedeutend höher ist und einen noch stärkeren integrativen Charakter aufweist. Bei der Offline-Optimierung werden die Aufträge zu Beginn in das System eingelastet und danach der Ablauf simuliert. Die Ausgangssituation ist also für jede evaluierte Regel gleich. Auch die Menge der Aufträge ist in allen Fällen gleich und damit auch die Charakteristika der Verteilung der Auftragsdetails. Unter diesen Voraussetzungen werden nun mittels Offline-Optimierungsalgorithmen, wie z.B. einem genetischen Algorithmus, Optimierungsläufe durchgeführt und die Regeln schrittweise verbessert.

Die Allgemeingültigkeit derart optimierter Regeln hängt natürlich von der Menge an Aufträge ab, die zum Regeltraining verwendet wurden. Ist diese Menge charakteristisch für die Produktion, so kann auch davon ausgegangen werden, dass die Regeln stärker generalisierbar sind. Ist diese Menge jedoch nicht charakteristisch, so sind auch die Regeln eher für diese spezielle Situation ausgelegt.

Die Kopplung der Simulation mit der Optimierung und deren datentechnisches Zusammenspiel wurde über eine Kommunikationsschnittstelle gelöst, mit deren Hilfe Nachrichten getauscht werden. In der Nachricht des Optimierers ist die Regel hinterlegt, welche von der Simulation gelesen wird, während in der Nachricht der Simulation die Qualität dieser Regel enthalten ist. Das Zusammenspiel der beiden Teile konnte damit dokumentiert⁴ und die Entwicklung weitgehend unabhängig voneinander durchgeführt werden (siehe Bild 14).

Bild 14: Zusammenspiel von Optimierung der Dispatching-Regeln und der die Regeln anwendenden Simulation.

Genetische Programmierung

Zur Optimierung der Regeln wurde das Verfahren der genetischen Programmierung verwendet, welches ausgehend von einer Population von zufällig erzeugten Regeln eine schrittweise Verbesserung erzielt.

Bild 15: Der zyklische Ablauf der genetischen Programmierung. Ausgehend von einer Population von Regeln werden zwei Kandidaten selektiert und zu einer neuen Regel kombiniert. Bei dieser Auswahl kann z.B. die Qualität eine mehr oder weniger große Rolle spielen. Nach der Evaluierung der Regel über die Simulation erfolgt der Schritt der Offspring Selektion welcher sich in der Vergangenheit als positiv bewährt hat und welcher die gerade erzeugte Regel wieder verwirft, wenn diese einige Kriterien nicht erfüllt. Alle übrigen erfolgreichen Regeln werden in der Population der Nachfolgenergeneration gesammelt und stehen dann im nächsten evolutiven Schritt für die Selektion und Kreuzung zur Verfügung.

⁴ <http://dev.heuristiclab.com/trac/hl/core/wiki/DevelopersOptimizingExternalApplications>

Der Ablauf des Verfahrens ist in Bild 15 graphisch dargestellt und beschrieben. Die gefundenen Regeln bestehen anfangs nur aus den zufällig zur Verfügung stehenden Bausteinen. Durch Selektion der besseren Regeln, Kreuzung und Mutation werden anschließend bessere Regeln erzeugt. Der Schritt der Offspring Selektion unterzieht die gefundenen Regeln einem weiteren Selektionsprozess, der die gekreuzten „Kindregeln“ mit seinen „Eltern“ vergleicht. Es werden dabei jene ausselektiert, die sich gegenüber ihren Eltern nicht verbessern konnten, was den Suchprozess etwas robuster gestaltet und frühe Konvergenz vermeidet.

Der Qualitätsverlauf der sich ergibt, wenn man über mehrere Optimierungsläufe den Durchschnitt der besten Regel und den Durchschnitt der durchschnittlichen Regeln bildet, ist in Bild 16 dargestellt.

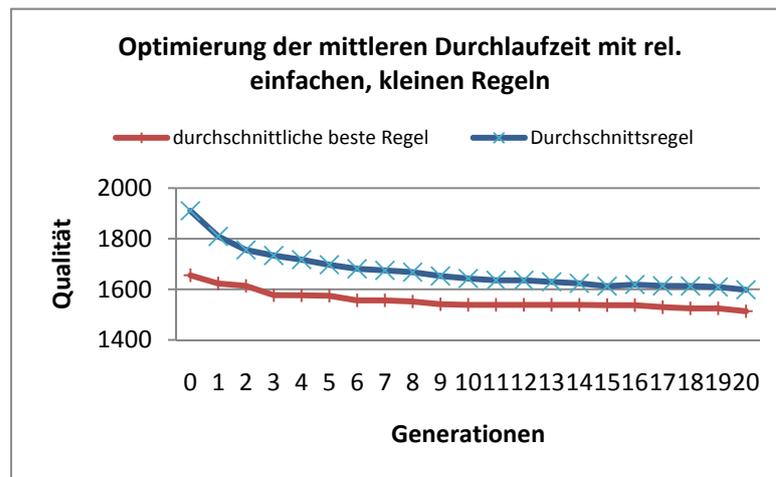


Bild 16: Qualitätsverlauf der Optimierung im Hinblick auf die Durchlaufzeit über mehrere Generation und mehreren unabhängigen Optimierungsläufen. Die Qualitätswerte lassen sich dabei nicht immer direkt in reale Kenngrößen umrechnen, da hier noch weitere Einflußfaktoren enthalten sein können wie zum Beispiel Strafwerte oder Gewichtungsfaktoren.

Funktionenbasis

Um die verschiedenen Kriterien miteinander in Verbindung zu bringen, wurde eine mathematische Funktionenbasis verwendet welche aus den typischen mathematischen Operationen besteht. Die Möglichkeiten sind vielfältig, ob es sich lohnt all diese auszuschöpfen wurde im Folgenden Teil untersucht. Grundsätzlich sind die folgenden Funktionen enthalten: Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division, Durchschnitt, Sinus, Cosinus, Tangens, Logarithmus naturalis, Exponentialfunktion, IF, Kleiner, Größer, Und, Oder und Nicht. Als Blätter im Formelbaum können nur Konstanten und Variablen (Kriterien) fungieren.

Als Kriterien wurden folgende Information zur Verfügung gestellt:

- *CurrentFlexibility* beschreibt wie flexibel ein Arbeiter gerade einsetzbar ist, d. h. auf wie vielen zur Zeit freien Arbeitsplätzen er sonst noch eingesetzt werden könnte.
- *Flexibility* beschreibt wie flexibel ein Arbeiter generell einsetzbar ist, d. h. auf wie vielen Arbeitsplätzen er überhaupt eingesetzt werden könnte.
- *Qualification* beschreibt die Höhe der Qualifikation eines Arbeiters auf einem bestimmten Arbeitsplatz.

- *QueueLength* beschreibt die Länge der Warteschlange vor einem bestimmten Arbeitsplatz.
- *Priority* beschreibt die Priorität eines Auftrags. Diese könnte z. B. von einem anderen Verfahren, wie dem Scheduler von POM errechnet werden.
- *SetupTime* beschreibt die notwendige Rüstzeit für einen Auftrag.
- *ProcessingTime* beschreibt die notwendige Bearbeitungszeit für einen Auftrag.
- *RemainingSteps* beschreibt die Anzahl der Prozessschritte, die noch notwendig sind, um den Auftrag abzuschließen.
- *BlockingItem* beschreibt ob der Auftrag die Maschine blockiert oder nicht.
- *TaskWorkingTime* beschreibt die Arbeitszeit für Arbeitsstationen bei denen die Bearbeitungszeit noch einmal heruntergebrochen wird auf Tasks.
- *TaskRequiresMachine* beschreibt ob der nächste Task die Maschine benötigt oder nicht.
- *TaskMachineCompletion* beschreibt wann der Task auf der Maschine enden wird.
- *SetupRequired* beschreibt ob ein Rüstvorgang notwendig ist.
- *FIFONumber* beschreibt eine fortlaufende Zahl in der Warteschlange, die sich nach dem Eintreffen richtet.
- *DueDate* beschreibt das Fälligkeitsdatum, genauer gesagt, die verbleibende Zeit bis zum Fälligkeitsdatum.
- *WaitingTime* beschreibt die Wartezeit, die ein Auftrag in der Warteschlange akkumuliert.

Die Verknüpfung dieser Kriterien mit den Funktionen ergibt dann den Regelbaum der zur Priorisierung der nächsten Tätigkeiten herangezogen werden kann.

Optimierungsziele

Im Rahmen des Projektes wurde das regelbasierte Dispatching anhand von drei Optimierungszielen durchgeführt, wobei jedes Ziel einzeln untersucht wurde und für jedes Ziel eigene Regeln optimiert wurden. Diese Ziele und Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

Mittlere Durchlaufzeit

Die mittlere Durchlaufzeit wird gemessen als die Zeitspanne vom Eintritt in die Fertigung bis zum Austritt. Über alle gefertigten Teile, oder im Beispiel ASMA, alle Teile die mit Polyurethan überzogen wurden, wird danach der Durchschnitt der Durchlaufzeiten gebildet.

Eine höhere Komplexität bei der Regelerstellung führte hier zu dem besten Ergebnis welches eine um ca. 2-3% kürzere mittlere Durchlaufzeit aufweisen konnte als vergleichende Optimierungsläufe mit eingeschränkteren Rahmenbedingungen, was die Größe der Regel und die Komplexität der möglichen Funktionen angeht. Die Regel ist als Baum in Bild 17 graphisch dargestellt. Eine tieferegehende Analyse dieser Regel ist jedoch aufgrund der Vielzahl verwendeter Kriterien kaum mehr möglich. Regeln dieser Art ließen sich zwar in der softwaregestützten Fertigung einsetzen, ein Verständnisgewinn der Prozesse oder eine Verständlichkeit für den Menschen sind jedoch nicht mehr gegeben.

In Bild 18 ist eine einfachere Regel dargestellt, welche zwar eine um 6.5% schlechtere Qualität aufweist, sich aber dafür besser analysieren lässt. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind die Bearbeitungszeit und die Rüstzeit und würde, wenn nicht der Sinus diese Kriterien einer periodischen Schwingung hinterlegt, die Teile mit der längeren Bearbeitungszeit und der kürzeren Rüstzeit bevorzugen. Aus diesem Hintergrund wird erkennbar, dass einerseits die Baumgröße und andererseits auch die Komplexität der mathematischen Funktionen auf die Regeln einwirken.

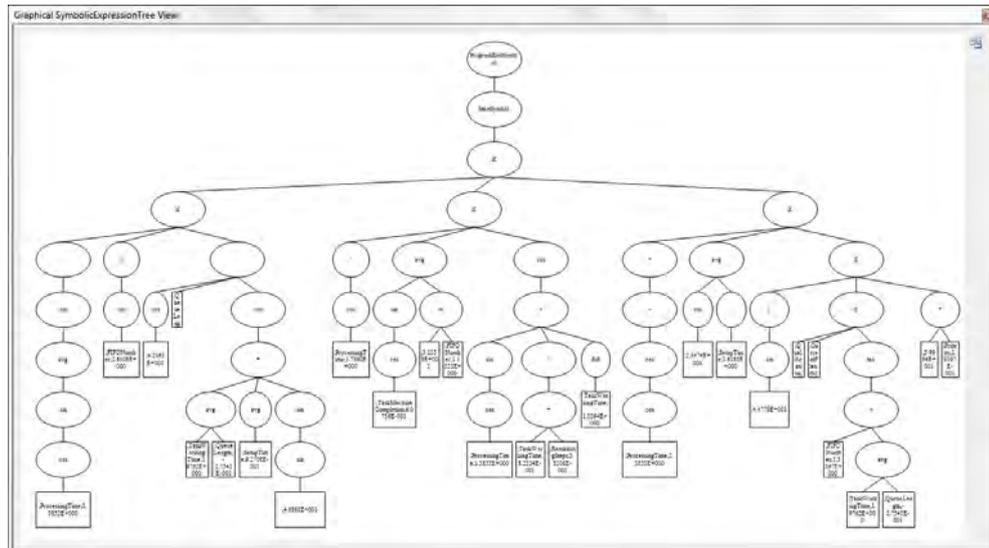


Bild 17: Graphische Darstellung der besten gefundenen Regel, welche auch die höchste Komplexität aufwies.

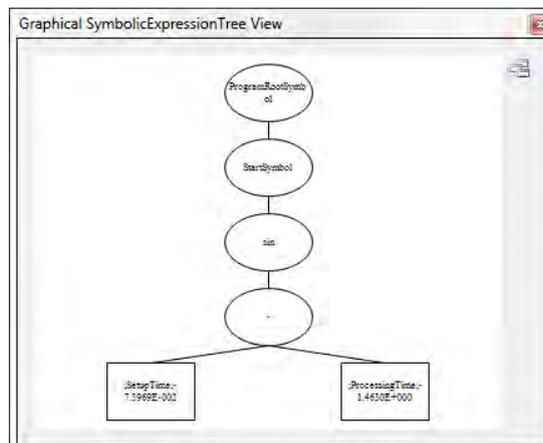


Bild 18: Graphische Darstellung einer einfacheren Regel.

In Bild 19 soll der Zusammenhang zwischen erzielbarer Lösungsqualität und Regelkomplexität veranschaulicht werden. Das Optimierungsproblem wurde dabei mit je zwei verschiedenen Einstellungen für zwei Komplexitätsebenen konfiguriert: Einfache mathematische Funktionenbasis (+, -, *, : und Durchschnitt) und komplexe Funktionenbasis welche die einfache Funktionenbasis um trigonometrische Funktionen,

Exponentialfunktionen, IF-Bedingungen und Logische Relationen erweitert. Die andere Komplexitätsebene ist die Größe des Regelbaums, also wie komplex die Verschachtelung der Formel werden kann.

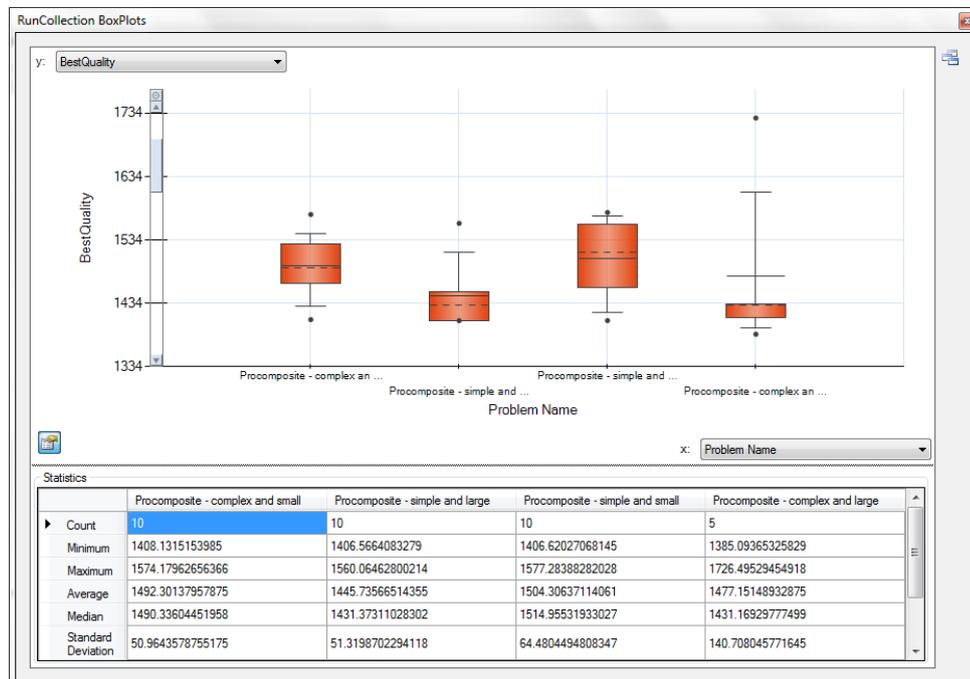


Bild 19: Auswirkung der Einschränkungen der Regelkomplexität auf die erzielbare Lösungsgüte. Je komplexer die Funktionenbasis (simple vs complex) wird und je größer die Formelbäume werden (small vs large), desto bessere Qualitäten lassen sich erzielen. Allerdings wird dabei auch die Analysierbarkeit erschwert.

Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass die erhöhte Komplexität grundsätzlich eine Verbesserung ermöglicht (bis auf einen Ausreißer). Auf der anderen Seite ist natürlich zu beachten, dass diese Regeln auch spezifischer auf die Trainingssituationen zugeschnitten sind und die Generalisierbarkeit darunter leidet.

Termintreue

Die Termintreue ergibt sich aus der absoluten Abweichung vom gewünschten zum simulierten Termin.

Generell liegen die Fitnesswerte hier sehr nahe beinander, trotzdem zeigten sich Unterschiede in der Komplexität der Regeln und deren Ergebnisse. Die beste gefundene Regel ist in Bild 20 dargestellt. Eine einfachere, aber fast ebenso gute Regel ist in Bild 21 dargestellt. Bild 22 verdeutlicht wiederum die Ergebnisse im Hinblick auf die Regelkomplexität.

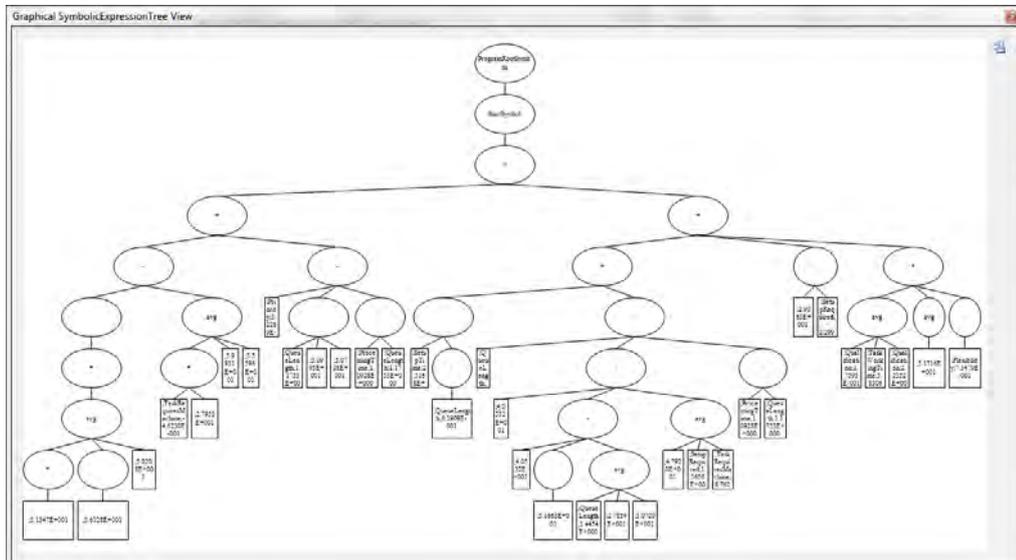


Bild 20: Beste gefundene Regel. Die Komplexität ist wiederum sehr hoch.

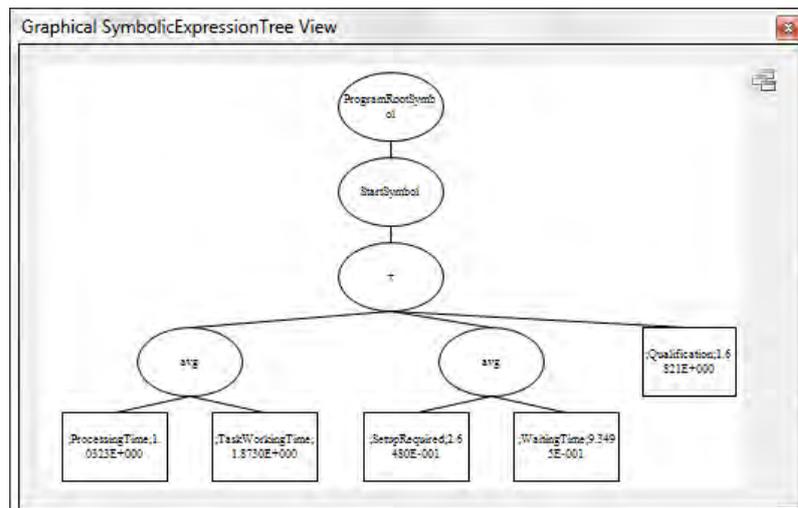


Bild 21: Eine nur unmerklich schlechtere, aber wesentlich einfachere Regel. Interessant ist die Kombination aus 3 Einflussgrößen, die sich hier als vorteilhaft erweisen: Bearbeitungszeiten, Wartezeiten und der Qualifikation.

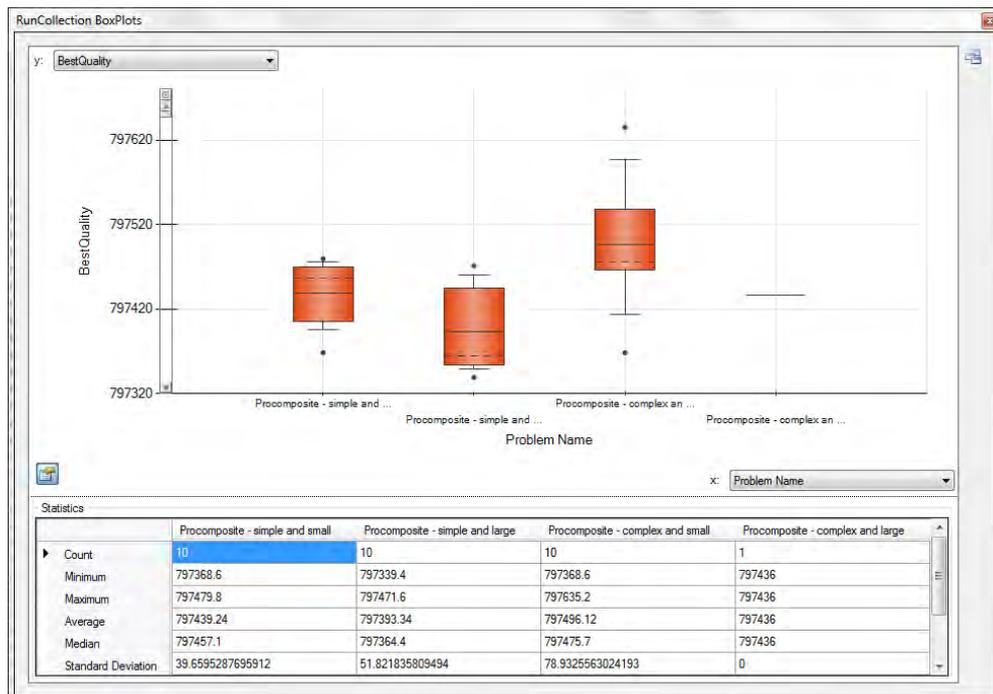


Bild 22: Für die Optimierung im Hinblick auf die Termintreue erwies sich eine sehr komplexe Funktionenbasis als wenig vorteilhaft. Im Gegenteil die vereinfachte Basis konnte die besseren Ergebnisse erzielen. Trotzdem erwiesen sich größere und damit komplexere Bäume wiederum als vorteilhafter. Im komplexesten Fall traten zudem sehr hohe Laufzeiten auf.

Durchsatz

Der Durchsatz misst die absolute Anzahl von Fertigungsteilen die in einer gewissen Zeitspanne den Fertigungsprozess durchlaufen. In diesem Fall soll das Ziel jedoch nicht minimiert werden, wie in den beiden anderen Fällen sondern maximiert. Es wird also diejenige Regel gesucht die den höchsten Durchsatz erzielt.

Die beste gefundene Regel ist wiederum in Bild 23 dargestellt, gegenüber gestellt mit einer Regel nur unmerklich schlechterer Qualität in Bild 24. Die erzielbare Lösungsqualität im Hinblick auf die Komplexität der Regeln ist wiederum in Bild 25 dargestellt.

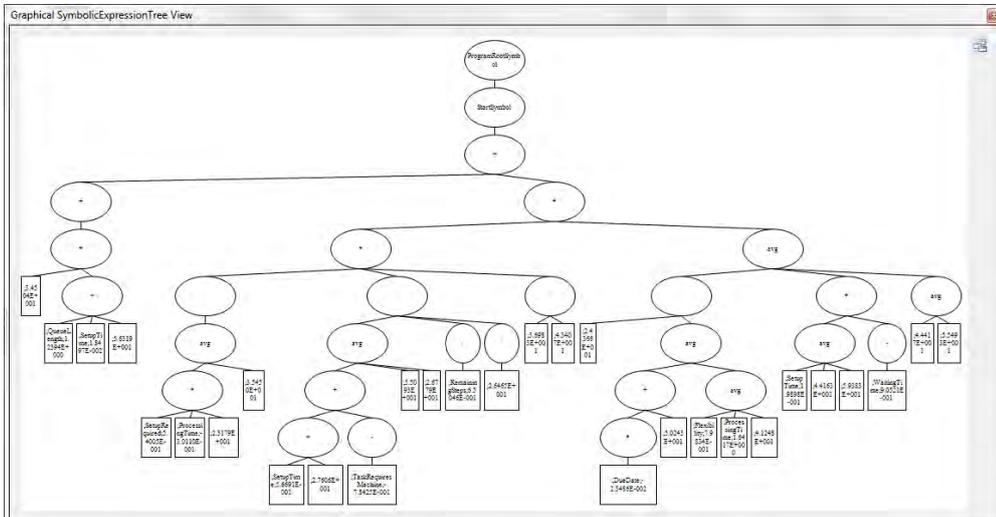


Bild 23: Die beste gefundene Regel, wiederum mit relativ hoher Komplexität, welche eine Analyse kaum ermöglicht.

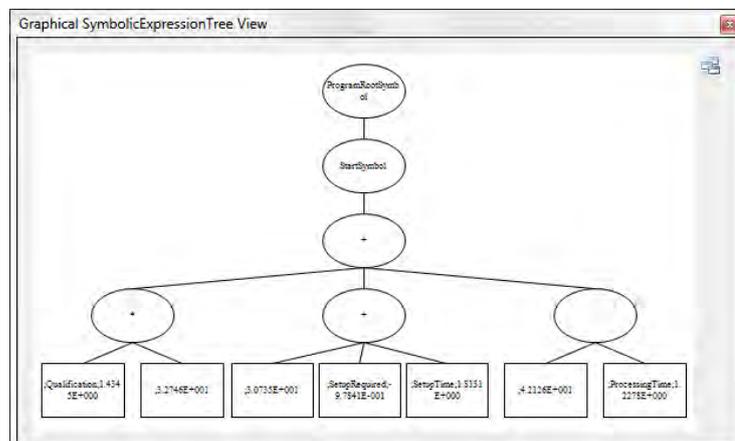


Bild 24: Eine nur unmerklich schlechtere Regel, jedoch mit weitaus geringerer Komplexität. Interessant ist auch wieder die Kombination aus Qualifikation, Rüstzeiten und Prozesszeiten.

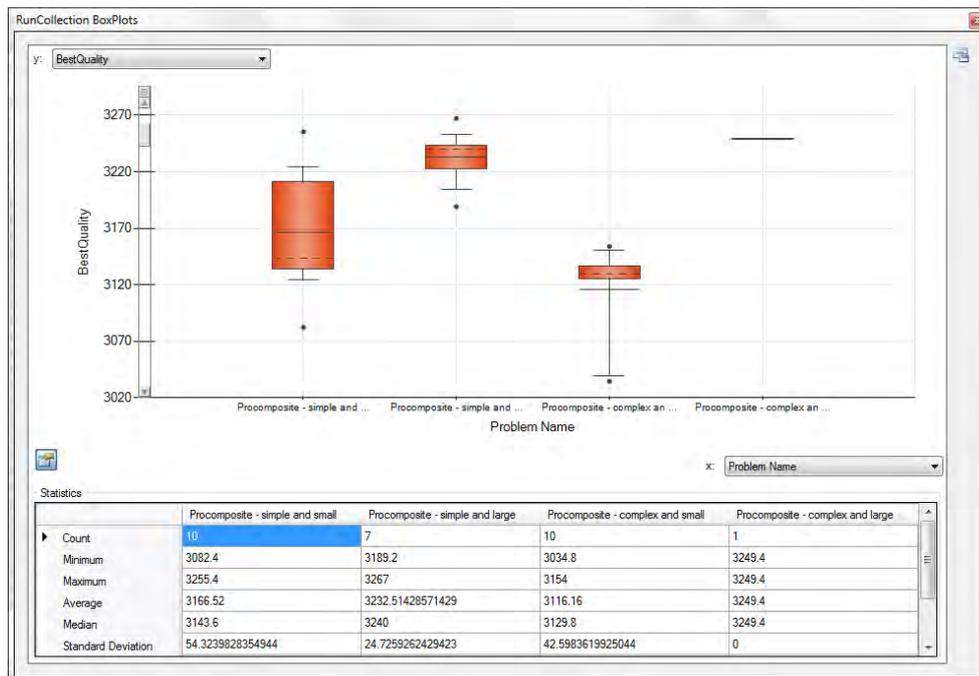


Bild 25: Die besseren Ergebnisse, diesmal je höher desto besser, wurden wiederum mit der einfachen Funktionenbasis erzeugt. Auch hier jedoch wieder profitiert die erzielbare Lösungsqualität von der zulässigen Größe des Regelbaums. Die Optimierung der Regeln mit der höchsten Komplexität gestaltete sich wiederum sehr schwierig, da die Laufzeiten sehr hoch waren.

2.4.4.5 Herausforderungen

Die Herausforderung in diesem Abschnitt war das Vereinbaren der langsamen Simulationsläufe mit den Optimierungsverfahren, die möglichst viel Feedback für die Suche nach Lösungen nahe dem Betriebspunkt benötigen.

Daher wurden in den frühen Phasen des Projektes, als das Tuning des Simulationsmodells noch nicht sehr weit vorangeschritten war, Methoden entwickelt, um auch bei wenig Information über den Lösungsraum zu ersten, aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen.

Im Fall der genetischen Programmierung (Dispatching-Ansatz) konnte dies vor allem durch die Reduktion der Generationsgrößen und durch die Steigerung der Mutationsrate erreicht werden.

Die Qualität der Lösungen aus dem ALNS-Verfahren (Scheduling-Ansatz) hing zwar nicht mit der Simulationsgeschwindigkeit zusammen, reifte aber ebenfalls mit der Zeit. Zunächst wurden einfache, imaginäre Probleme optimiert, um das Verfahren zu testen und zu stabilisieren. Danach erst konnte das Verfahren mit Echtdateien ausgeführt werden. Da das Verfahren in der Programmiersprache C++ implementiert wurde, war der Zugriff auf die Datenbank im Vergleich zu C# mit vermehrtem Aufwand verbunden. Da es unter C++ keine vorgefertigten Werkzeuge (O/R-Mapper) gibt, die den Zugang zu einer Datenbank abstrahieren, gestaltete sich dieser Implementierungsteil vergleichsweise aufwändig. Auch Reaktionen auf Änderungen waren mit vergleichsweise viel Kleinarbeit verbunden und gingen langsam voran.

Ein weiteres Problem, das bisher nur ansatzweise gelöst werden konnte, ist die Vorauswahl der Aufträge, falls mehr Aufträge vorhanden sind als im Optimierungszeitraum abgearbeitet werden können. Bisher wurden diese Aufträge nach menschlichem Ermessen ausgewählt, die Auswahl soll aber in Zukunft automatisiert werden bzw. zumindest in einem nach unterschiedlichen Kriterien einstellbaren "Picking-Algorithmus" festgelegt werden.

2.4.4.6 Highlights

Das Wiederfinden der zuvor angestellten realen Überlegungen in den automatisch generierten Dispatching-Regeln war ein erfreuliches Ergebnis dieses Arbeitspaketes. Es demonstriert die Anwendbarkeit und Sinnhaftigkeit der generierten Regeln und gibt einen Ausblick auf das mögliche Auffinden von allgemein gültigen Erkenntnissen im Bereich der Prozessoptimierung.

2.4.5 Evaluierungs- und Tuning-Phase

2.4.5.1 Zielsetzung

In der Evaluierungs- und Tuning-Phase erfolgte das Erproben bzw. das Feintunen der eingesetzten Verfahren. Neben einer Gegenüberstellung unterschiedlicher Strategien war vor allem das Gewinnen von Erkenntnissen über die Robustheit und Effizienz der eingesetzten Methoden von größter Bedeutung. In der Evaluierungsphase sollte nachgewiesen werden, dass die entwickelten Verfahren den Praxisanforderungen (Ausfallssicherheit, Bedienbarkeit, Transparenz der Entscheidungen etc.) gerecht werden und Zielsetzungen erfüllen.

Weiters sollen im Rahmen dieses Arbeitspaketes Spritzgussversuche mit dem im Rahmen des spanischen EUREKA-Projektes entwickelten Kunststoffmaterials durch den Partner SCHNEEGANS durchgeführt werden.

2.4.5.2 Ergebnisse

Da es sich bei der Simulation um eine zeitkritische Anwendung handelt, war jede Erweiterung während der gesamten Entwicklung von Tuning-Fragen begleitet. Zu Beginn der Implementierung lag etwa die Initialisierungsphase der Simulation im Minutenbereich. Durch die Reduktion der Anzahl der Datenbankabfragen (Zusammenfassung von Abfragen) konnte die Ausführungszeit jedoch in den einstelligen Sekundenbereich gebracht werden. Durch die Serialisierung des Modells nach der Initialisierung aus der Datenbank konnte ebenfalls Zeit gespart werden. Das Modell muss in den Folgedurchläufen nur mehr deserialisiert werden, und steht daher schneller zur Verfügung, da zeitintensive Datenbankzugriffe komplett vermieden werden. Ebenso war anfangs die Ausführungszeit eines Simulationslaufes im Minutenbereich. Modellanpassungen und Überarbeitungen führten diese in den Sekundenbereich. Durch Modellvereinfachungen (Reduktion der Menge der Entscheidungspunkte auf ca. 20 pro MitarbeiterIn pro Schicht) konnte die Ausführungsdauer bereits auf weniger als eine Sekunde reduziert werden.

Die Erreichung einer so geringen Ausführungszeit war eine wichtige Voraussetzung, um die benötigte Qualität bei der Optimierung mit Hilfe von genetischen Algorithmen zu erhalten. Die Evaluierung ergab, dass

eben dieser Ansatz (Optimierung von Dispatching-Regeln mit genetischen Algorithmen) die Planung für die Firma ASMA umfassender abdecken konnte. Die Variante des genetischen Algorithmus mit Offspring Selection, in Kombination mit kleiner Populationsgröße und hoher Mutationsrate, lieferte die besten Ergebnisse. Die Analyse der generierten Prioritätsregeln brachte sehr interessante Ergebnisse, da der Grund für den Erfolg "guter" Prioritätsregeln meist plausibel und nachvollziehbar war. Prozessexperten äußerten sich zu den Regeln so, dass sie ähnliche Ergebnisse auch durch "Nachdenken" hätten erreichen können und sahen ihre eigenen Vermutungen aufgrund der Optimierungsergebnisse bestätigt.

Der Scheduling-Ansatz, gemeinsam mit dem ALNS-Optimierungsalgorithmus, ist für andere Szenarien besser geeignet, hat aber auch hier seine Berechtigung und wurde unter anderem zu Validierungszwecken weiterhin parallel entwickelt. Zum Zweck der Modellvalidierung wurden auch eine Animation (Bild 28) und gemeinsam mit dem Automatisierungspartner ABF diverse Visualisierungskomponenten (Bild 26, Bild 27,) für das Simulationsmodell entwickelt. Diese Komponenten wurden auch dazu genutzt, um Vergangenheitsdaten (Bild 29) zu visualisieren.

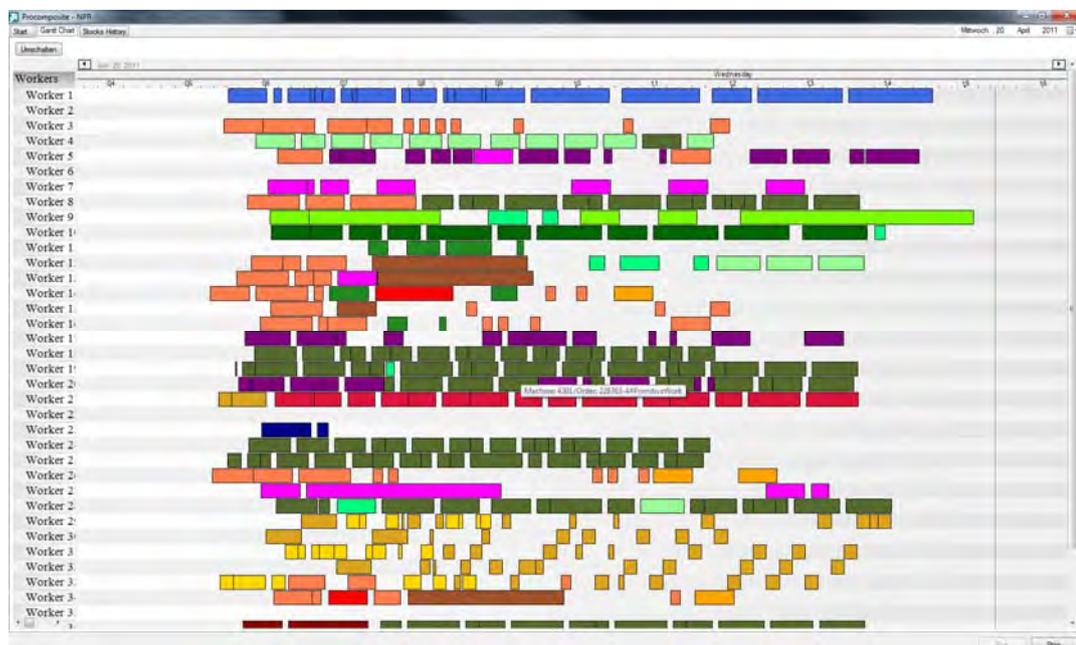


Bild 26: MitarbeiterInnen-Ansicht in der Simulationsvorschau.

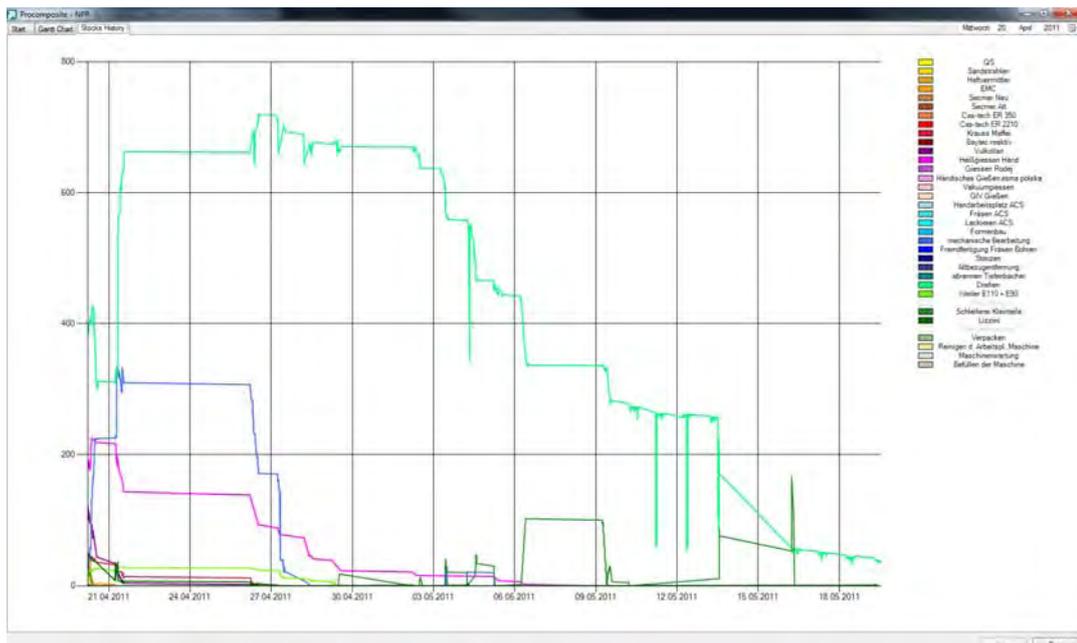


Bild 27: Bestandskurven in der Simulationsvorschau.



Bild 28: Animierte Ansicht auf dem Hintergrund des Produktionslayout.

Der Vergleich zwischen Vergangenheitsdaten und Simulationsergebnissen war ebenfalls sehr aufschlussreich und half mit, die Weiterentwicklung bzw. Verfeinerung des Modells zielgerichteter zu betreiben.

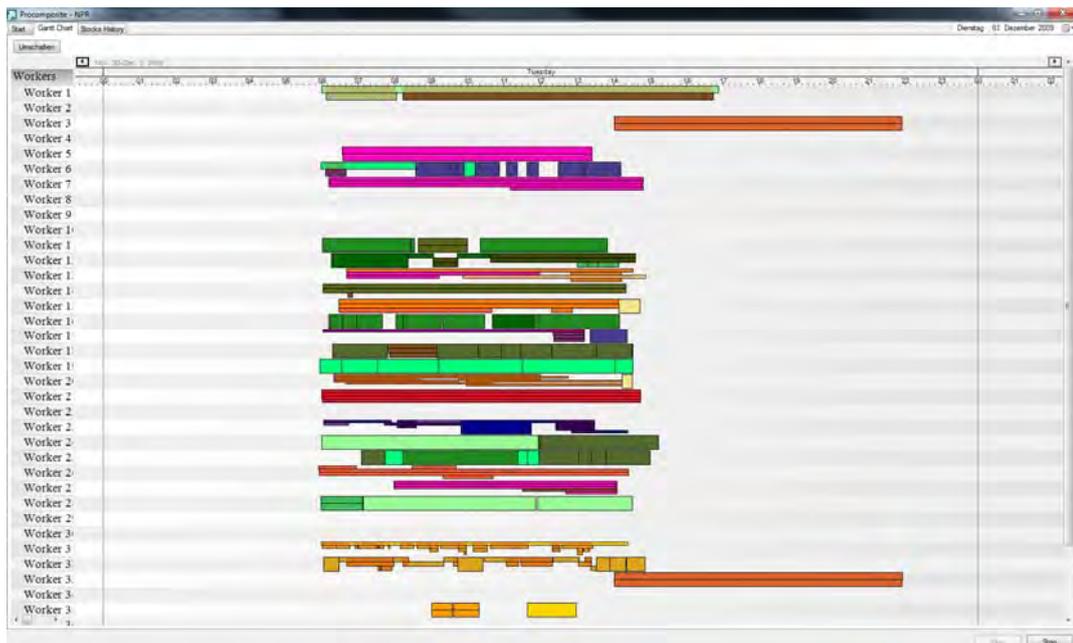


Bild 29: Ansicht auf Vergangenheitsdaten (Zeitbuchungen von MitarbeiterInnen, ohne Pausen).

2.4.5.3 Herausforderungen

Die nach einer ersten Implementierung der Simulationsmodelle festgestellten langen Ausführungszeiten konnten durch eine Anpassung der Software-Architektur sowie durch ein intensives Tuning des Codes soweit reduziert werden, sodass die Berechnung einer Produktionsvorschau unter Anwendung eines bestehenden Regelsatzes nunmehr in vertretbaren Zeiten ausgeführt werden kann. Die Optimierung eines Regelsatzes benötigt aber nach wie vor mehrere Stunden, kann aber offline durchgeführt werden und ist damit kein anwendungsbeschränkendes Hindernis.

Deutlich unterschätzt wurde vor Projektbeginn die Komplexität der Produktionsabläufe und die sich daraus ergebende Komplexität der Simulationsmodelle sowie der zu beachtenden Randbedingungen und Einschränkungen.

Die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Optimierungsexperimente zeigen ein hohes Potential der angewendeten Verfahren, müssen aber vor dem operativen Einsatz noch besser auf die konkrete Problemstellung abgestimmt werden, da durch diese Anpassungen bessere Optimierungsergebnisse in kürzerer Zeit erzielt werden können. Außerdem sollen noch weitere Validierungsmaßnahmen zu diesem Zweck wurde als Nachfolgeprojekt ein Bridge-I-Projekt beantragt, das unter der FFG-Projektnummer 829679 genehmigt wurde.

Spritzgussversuche mit neuem Kunststoffmaterial

Die geplanten Tests mit dem im Rahmen des Eureka-Projektes vom spanischen Konsortium entwickelten faserverstärkten Kunststoffmaterials durch den Projektpartner Schneegans konnten in der Projektlaufzeit nicht wie geplant durchgeführt werden. Ursache war zunächst eine Verzögerung der Materialfreigabe durch das spanische Konsortium, nachdem erste Materialproben zu Beschädigungen an Maschinen geführt hatten. So konnte das Material zunächst nur aufgrund von Spezifikationen bewertet werden. Kurz vor

Projektabschluss wurde schließlich vom spanischen Hersteller noch 5 unterschiedliche Rezepturen für Versuche bereitgestellt. Bislang wurde das Material im Labor begutachtet. Aufgrund der aktuellen Auftragslage und zur Vermeidung eines Risikos konnten jedoch bislang noch keine Spritzgussversuche an Maschinen gefahren werden. Der Projektpartner Schneegans plant, diese Versuche vorzunehmen und den spanischen Projektpartnern eine Rückmeldung zu geben, sobald freie Kapazitäten verfügbar sind. Ein hohes Interesse am neuen Material ist bislang gegeben.

2.4.5.4 Highlights

Die Validierung der Eingangsdaten sowie des erstellten Simulationsmodells führte bei allen Beteiligten zu einem tieferen, gemeinsamen Prozessverständnis und half mit, zahlreiche Datenfehler und Missverständnisse zu korrigieren. Es gab auch sichtbare Übereinstimmungen/Ähnlichkeiten zwischen Vergangenheitsdaten und Simulationsdaten, wodurch die Integrität des Simulationsmodells mehr und mehr bestätigt wurde. Darüber hinaus konnte eine Reduktion der Ausführungszeit von anfangs mehreren Minuten auf wenige Sekunden (< 5) bzw. auf einzelne Sekunden (< 1) im Optimierungszeitraum (einzelne Schicht, einzelner Tag) reduziert vorgenommen werden.

3 Ergebnisse des Projektes

Schema und Vorgehensmodell für die Produktionsfeinplanung nach ganzheitlichen Gesichtspunkten

Gewählt wurde ein simulationsbasierter Ansatz für die Erstellung von Ablaufplänen bzw. für die automatisierte Synthese von Dispatching-Regeln. Das Schema besteht aus einem Prozess- und Bewertungsmodell sowie aus dem jeweiligen Optimierungsverfahren.

Test- und Evaluierungsumgebung als Prototyp einer simulationsgestützten Produktionsregelung

Im Zuge des Projektes wurde das entwickelte Konzept prototypisch unter .NET als Test- und Evaluierungsumgebung für die Erprobung am Beispiel des Kunststoffgießens implementiert. Als Basis für die Erstellung der Prozess- und Bewertungsmodelle wurde die von Profactor entwickelte Simulationsbibliothek SiRO für die Abbildung ereignisdiskreter Systeme gewählt, für die Synthese und Optimierung der Dispatching-Regeln wurde das am HEAL entwickelte HeuristicLab eingesetzt, welches im Zuge des Projektes mit dem Prozess- und Bewertungsmodell zu einem Optimierungssystem kombiniert wurde. Das Adaptive Large Neighborhood Search Verfahren wurde unter C++ implementiert. Die für die Initialisierung der Prozessmodelle erforderlichen Stammdaten sowie die zu verplanenden Auftragsdaten werden über eine Datenbankschnittstelle aus dem ERP-System APplus übernommen. Das Prozessmodell umfasst alle relevanten Produktionsschritte von der Kernvorbereitung bis zur mechanischen Nachbearbeitung der gegossen Teile.

Modellierungsbibliothek

Für die Erstellung der Simulationsmodelle wurden zunächst entsprechende Klassenbibliotheken entwickelt, aus denen die Modelle des Referenzszenarios erstellt wurden. Die Bibliothek steht für die die Modellierung weiterer, werkstatorientierter Produktionsstätten zur Verfügung.

Zwei unterschiedliche Planung- und Optimierungsansätze

Aufgrund der hohen stochastischen Einflüsse durch alltägliche Störungen wurde die Idee verfolgt, parallel zu den Ablaufplänen auch Prioritätsregeln zu entwickeln, und im Falle einer Störung von der Ablaufplanung (Scheduling) auf eine situationsbasierte Planung (Dispatching) umzuschalten.

Für die Erstellung der Ablaufpläne wurde das Konzept des Resource Constraint Project Scheduling (RCPS) herangezogen und als Adaptive Large Neighborhood Search, einer nachbarschaftsbasierte Metaheuristik implementiert.

Für das regelbasierte Dispatching wurde das Prozessmodell um Regelinterpreter an den einzelnen Entscheidungspunkten erweitert, welche bei Bedarf die eingestellten Prioritätsregeln ausführen und situativ Entscheidungen fällen. Die Prioritätsregeln wurden automatisch mittels Genetic Programming synthetisiert und optimiert.

Ganzheitliche Bewertung von Szenarien

Das individuelle Bewertungsmodell berücksichtigt ökonomische (Durchsatz, Termintreue, Durchlaufzeit), ökologische (Rüstvorgänge mit Materialverbrauch, Nachbearbeitungszyklen) und arbeitsergonomische Aspekte (Einhaltung Pausenzeiten, Regeneration von Überstunden, Arbeitsmonotonie, Hitze und Kälte). Neben den Einzelkennzahlen und dem zusammengeführten Fitnesswert wird die Qualität der

Planungslösung bzw. der Dispatching-Regeln mit Hilfe eines Gantt-Charts der Produktionsabläufe visualisiert.

Spezifische Analysen zum Thema Arbeitsergonomie

Als Grundlage für den arbeitsergonomischen Anteil am Bewertungsmodell wurde eine Belastungs- und Ressourcen-Ermittlung durchgeführt sowie ein darauf aufbauender Maßnahmenkatalog (Parameterkatalog als Input für das Simulationsmodell und die Zielfunktionen) mit dem Anwendungspartner ausverhandelt und erstellt.

Im Zuge der Analysetätigkeit wurde darüber hinaus eine MitarbeiterInnenbefragung über die subjektive Arbeitsqualität vor der Einführung des ganzheitlichen Optimierungstools (Baseline für die spätere Wirkungsüberprüfung), eine Arbeitsanalyse als Maßnahmenliste tauglich für die Arbeitsplatzevaluierung nach §4 des ArbeitnehmerInnenschutzgesetzes, Überlegungen zur monetären Bewertung arbeitsergonomischer Aspekte sowie eine Einführung bzw. Visualisierung wie Verankerung des professionellen Anspannungs- und Entspannungszyklus („Kurzpausensystem“ nach Graf, 1927) durchgeführt.

Evaluierung der Methoden am Beispiel des Kunststoffgießens

Die entwickelten Methoden wurden am Beispiel des Kunststoffgießens, einer flexiblen, werkstattorientierten Produktion evaluiert. Die betrachtete Produktion besteht aus den Bereichen Formenbau, Kernvorbereitung, Gießen, Härten und mechanische Bearbeitung, welche sich durch einen hohen Anteil an manuellen, sich teilweise überlappenden Tätigkeiten auszeichnen. Die hohe Flexibilität der MitarbeiterInnen und die Variabilität der Prozesse (Prozesszeiten und Qualität sind z. B. von der Luftfeuchte und Lufttemperatur abhängig) erschweren den Planungsprozess bzw. vergrößern den zur Verfügung stehenden Parameterraum.

Erkenntnisse zum Thema Produktionsfeinplanung

Die im Projekt durchgeführten Experimente bestätigen den gewählten Lösungsansatz: Mit beiden implementierten Verfahren konnten die Auftragsreihenfolgen optimiert werden. Eine Aussage über die Qualität der gewählten Algorithmen und deren Parametrierung konnte jedoch noch nicht gemacht werden.

Aufgrund der hohen Komplexität der realen Prozesse, insbesondere der manuellen Tätigkeiten, musste mehr Aufwand in die Erstellung des Prozess- und Bewertungsmodells gesteckt werden, als ursprünglich in das Projekt eingeplant wurde. Trotz eines bereits hohen Detaillierungsgrades konnten einige Aspekte der realen Produktionsumgebung (z. B. diverse einzuhaltende Randbedingungen) noch nicht vollständig abgebildet und mit Regeln hinterlegt werden. Auch für das Bewertungsmodell gibt es noch Anforderungen für Erweiterungen, die im Projekt nicht vollständig implementiert werden konnten.

Für eine tiefergehende, wissenschaftliche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Konfigurationen und Parametrierungen von Optimierungsverfahren, Bewertungsmodell und Simulationsmodell wurde ein Nachfolgeprojekt initiiert. Speziell sollen in diesem Projekt die Algorithmen und Modelle noch weiter auf ihre Robustheit und Performance untersucht werden. So gilt es u. a. zu klären, wie sich die Algorithmen, bzw. synthetisierten komplexen Prioritätsregeln bei Datenfehlern, Veränderung von Prozess- und Auftragsparametern oder bei einer Änderung der Produktionsstrategie (Anpassung des

Bewertungsmodells) verhalten. Ein weiterer, wissenschaftlich noch zu untersuchender Punkt ergibt sich aus der Interpretation der mit genetischer Programmierung optimierten Modelle (komplexe Prioritätsregeln).

Evaluierung eines neuen, zellulosefaserverstärkten Kunststoffmaterials

Unabhängig vom Thema der Produktionsregelung wurde im Zuge des Projektes begonnen, ein zellulosefaserverstärktes Kunststoffmaterial zu evaluieren, das im Rahmen des übergeordneten EUREKA-Projektes von einem spanischen Konsortium entwickelt wurde. Die Evaluierung des Materials wird nach Projektende fortgeführt.

4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

4.1 Einpassung in die Programmlinie

Das Projekt wurde im Zuge der 4. Ausschreibung des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften im Themenfeld „Produkte und Produktdienstleistungssysteme: Entwicklung von innovativen industriellen und gewerblichen Produkten“ durchgeführt.

Das Projekt erbrachte Beiträge zu den spezifischen den Themenbereichen „Technologien und Innovationen bei Produktionsprozessen“ sowie „Nutzung nachwachsender Rohstoffe“.

4.2 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie sowie zu den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung

Eine integrierte Planung und Optimierung von Werkstoff, Produkt, Prozess und Betriebsführung ist heute Voraussetzung für den nachhaltigen Erfolg eines Produktionslebenszyklus. Das entwickelte Lösungskonzept sowie die entwickelten Methoden tragen über folgende Faktoren zur nachhaltigen Technologieentwicklung und damit zur Stärkung des Standortes Österreich bei:

- *Aufgreifen des Themas Nachhaltigkeit in der Produktionsplanung sowie in Systemen der Produktionssteuerung:*

Das Aufgreifen der Thematik Nachhaltigkeit in der operativen Produktionssteuerung trägt dazu bei, bestehende Produktionen konkurrenzfähiger zu führen und damit der Herausforderung von sogenannten Billiglohnländern entgegenzuwirken.

Das Thema Nachhaltigkeit wird in Österreich und generell in Europa bereits bei der Produkt- und teilweise bei der Prozessentwicklung bedacht, in der Prozessführung wurde mit der Projektidee jedoch Neuland betreten.

- *Beitrag zur Entwicklung eines neuen, nachhaltigen Verbundwerkstoffes:*

Mit der Teilnahme am übergeordneten EUREKA-Projekt erhielten die beiden teilnehmenden Kunststoffverarbeiter Zugang zur Entwicklung eines neuen, faserverstärkten Verbundwerkstoffes auf Basis von Zellulosefasern. Diese zeichnen sich im Gegensatz zu glas- oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe durch seine höhere Nachhaltigkeit aus.

- *Einsatz von Ablaufsimulation zur Modellierung und Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten:*

Die simulationsgestützte Produktionsregelung bietet die Möglichkeit, kunststoffverarbeitende Produktionen unter vollständiger Berücksichtigung ihres dynamischen Verhaltens zu beplanen und zu führen. Mit der Aufnahme von Aspekten der Nachhaltigkeit in die Zielfunktionen leistete das Projekt einen Innovationsbeitrag zu einer neuen, ganzheitlichen und nicht ausschließlich technisch-ökonomischen Betrachtung von Produktionsprozessen.

Erst in letzter Zeit wird dem Thema energieminimale Produktion vermehrt an Bedeutung geschenkt, was die Ambition des durchgeführten Projektes bestätigt. Generell wird das Thema einer nachhaltigen Produktionsregelung noch zu wenig bedient und bietet daher eine Möglichkeit für die österreichische F&E-Landschaft sich weiter zu profilieren.

Bei den durchgeführten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten für das entwickelte Konzept der nachhaltigen Produktionsregelung wurden die sieben Leitprinzipien einer nachhaltigen Technologieentwicklung wie folgt berücksichtigt und umgesetzt:

- *Prinzip der Dienstleistungs- Service- und Nutzenorientierung:* Die vorgestellte ganzheitliche, simulationsgestützte Analyse und Optimierung der logistischen Produktionsprozesse unter Verwendung von nachhaltigen Bewertungsmodellen und Zielfunktionen ermöglicht eine Ausrichtung der Produktionsstrategie im Sinne eines nachhaltigen Wirtschaftens.
- *Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen:* Mit der Substitution klassischer Mineral- oder Synthetikfasern in Kunststoffverbundwerkstoffen durch organische, nachwachsende Naturfasern wird das Projekt über die begonnene Materialevaluierung diesem Prinzip gerecht.
- *Effizienzprinzip:* Die automatisierte Produktionsregelung zielt auf eine energie- und materialeffiziente wie auch kosteneffiziente Produktion ab und erfüllt damit das geforderte Effizienzprinzip.
- *Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit:* Der im übergeordneten EUREKA-Projekt vom spanischen Projektkonsortium entwickelte Faserverbundwerkstoff zeichnet sich durch eine hohe Rezyklierungsfähigkeit aus, sodass sich sowohl Endprodukte als auch die während der Produktion anfallenden Abfälle (z. B. Anguss- und Ausschussteile) leichter wiederverwerten lassen.
- *Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit:* Dieses Prinzip trifft vor allem auf die automatisierte Produktionsregelung zu, deren Verhalten sich über die Einstellungen am Bewertungsmodell an die jeweiligen Randbedingungen anpassen und nachführen lässt. Strategien werden dabei als Verschiebung von Gewichtungen einzelner Nachhaltigkeitsaspekte abgebildet und können den jeweiligen Umständen angepasst werden.
- *Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge:* Die eingesetzten Verfahren und Algorithmen, speziell das regelbasierte Dispatching wurde als robuste Lösungen ausgelegt, die Parametertoleranzen und Störeinflüsse in einem bestimmten Bereich ausgleichen kann und in der Regel zu keinen instabilen oder problematischen Lösungen führt. Dies kann als eine Art Fehlertoleranz ausgelegt werden. Mit dem Einsatz der Simulationsmodelle können kritische Szenarien (Produktionspläne) im Vorhinein risikolos erprobt und auf ihr „Gefahrenpotential“ (z. B. vermehrten Energieverbrauch oder Schadstoffausstoß) untersucht werden.
- *Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität:* Eine auf Nachhaltigkeit optimierte Betriebsführung sichert grundsätzlich eine lebenswerte Umwelt. Eine Erhöhung der Lebensqualität wird konkret durch die Einbeziehung von arbeitsergonomischen Aspekten (z. B. beanspruchungsoptimale Arbeitsgestaltung) in die Bewertungsmodelle und damit in die Gestaltung der Arbeitspläne erzielt.

Einer möglichen Argumentation, dass eine Automatisierung von Planungsvorgängen Arbeitsplätze von Planern gefährdet, muss entgegengestellt werden, dass die angestrebten Verfahren als Werkzeuge gesehen werden, die einen Planer entlasten und ihm die Möglichkeit bieten, seine Produktion im Sinne von Nachhaltigkeit effizienter und damit wirtschaftlicher zu führen. Dadurch kann z. B. die Attraktivität von bestehenden Standorten gehalten und gegenüber konkurrierenden „Billiglohnstandorten“ verteidigt werden. Eine optimierte Betriebsführung mit der alle Potentiale

eines Standortes ausgeschöpft werden können, versetzt Firmen in die Lage ihre Produktivität zu steigern und damit neue Arbeitsplätze zu generieren.

4.3 Einbeziehung von Zielgruppen

Im Zuge des Projektes wurden folgende Zielgruppen entweder durch aktive Teilnahme am Projekt oder durch Gespräche im Zuge der Anforderungsanalyse und Konzepterstellung eingebunden:

- *EndanwenderInnen in Form von produzierenden Unternehmen:* diese Zielgruppe wurde durch die beiden teilnehmenden Kunststoffverarbeiter abgedeckt. Darüber hinaus wurden im Verlauf des Projektes das Konzept mit weiteren produzierenden Unternehmen vornehmlich aus dem Bereich der Metallerzeugung, der Automobilindustrie sowie der Halbleiterproduktion besprochen, um deren Bedürfnisse.
- *Systementwickler bzw. Systemintegratoren von Planungs- und Leitsystemen, ERP-, MES-Hersteller:* diese Zielgruppe wurde durch den teilnehmenden Automatisierungsspezialisten abgedeckt. Darüber hinaus wurden im Laufe des Projektes Gespräche mit Leitsystem- und ERP-Herstellern geführt.
- *Fabrik- und ProzessplanerInnen:* Die entwickelte Simulationsbibliothek lässt sich nicht nur für die Produktionsfeinplanung einsetzen, sondern kann auch für die Fabrikplanung genutzt werden, sodass das entwickelte Konzept auch mit Planern diskutiert wurde.

4.4 Verbreitungs- und Umsetzungspotentiale

Der Markt für Manufacturing Execution Systeme (MES), zu der auch die entwickelte Lösung der simulationsgestützten Produktionsfeinplanung zählt, ist weiterhin wachsend. Die meisten Unternehmen verfügen zwar bereits über ERP (Enterprise Resource Planning) und/oder Produktionsplanungssysteme, die Planungsaufgaben bis auf Tagesebene übernehmen, eine systemunterstützte Feinplanung auf Shop Floor Ebene ist jedoch nach wie vor selten anzutreffen.

Eine Ursache dafür ist die nach wie vor unzureichende IT-Vernetzung auf Shop Floor Ebene, sodass vielfach für eine Feinplanung relevante Zustandsinformationen nicht zeitnahe an ein Planungssystem geliefert werden können. Eine weitere Ursache für den geringen Verbreitungsgrad von MES ist die hohe und stetig zunehmende Komplexität und erforderliche Flexibilität der Produktionssteuerung speziell bei Produktionen mit einem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten. Klassische Planungsansätze können diese Komplexität nur unzureichend bedienen, sodass vielfach auf eine Automatisierung der Produktionsfeinplanung verzichtet wurde.

Mit der aus Qualitätssicht zunehmenden Notwendigkeit einer lückenlosen Materialverfolgung steigt auch der Grad an IT-Vernetzung auf Shop Floor Ebene, sodass vermehrt die Voraussetzungen für die Einführung einer Produktionsregelung in der entwickelten Form gegeben sind.

Die im Projekt verfolgte Kombination aus klassischem Scheduling und regelbasiertem, situativen Dispatchen verspricht eine Beherrschung der in der Praxis vorgefundenen Komplexität, sodass der Markt erschlossen werden kann.

Die Erschließung des Marktes soll in mehreren Schritten erfolgen:

- *Referenzimplementierung beim Projektpartner ASMA:* Zunächst soll das im Projekt entwickelte Testbed zu einem einsatzfähigen Prototyp für den Projektpartner ASMA weiterentwickelt werden. Mit diesem Prototypen sollen einerseits Erfahrungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit der entwickelten Methoden sowie Anregungen für die Weiterentwicklung gewonnen werden, andererseits soll mit dieser Referenzinstallation die Kunststoffbranche erschlossen werden.
- *Verbreitung in der gleichen Domäne:* Aufbauend auf der Referenzinstallation bei ASMA sollen zunächst weitere Kunststoffgießer und anschließend Kunststoffspritzgießer sowie andere kunststoffverarbeitende Unternehmen angesprochen werden.
- *Anwendung auf Branchen mit hoher Komplexität und hohen Investitionen:* Besonders attraktiv ist der gewählte Ansatz für Produktionen mit hoher Komplexität und starken stochastischen Einflüssen wie beispielsweise die Halbleiterindustrie oder mit hohen Investitionen wie die Metallerzeugung und -verarbeitung. Forschungspartner Profactor hat bereits eine Planungslösung für die Halbleiter-Prüffelder, welche um ganzheitliche Bewertungsmodelle und eine automatische Regelentwicklung erweitert werden soll. Projektpartner ABF ist als Automatisierungsanbieter im Bereich der Metallerzeugung und -verarbeitung tätig und wird diese Domäne erschließen. Forschungspartner HEAL bedient ebenfalls die Metallverarbeitung.
- *Anwendung auf Branchen mit hoher Umweltbelastung:* In letzter Zeit konnte eine vermehrte Sensibilisierung der produzierenden Unternehmen auf die Themen Energie und CO₂-Ausstoß erkannt werden. Damit bietet sich die Möglichkeit, das Thema einer nachhaltigen Produktionsregelung speziell über die Energieproblematik zu erschließen und schrittweise auf Arbeitsergonomie und Schadstoffe zu erweitern.

Neben dem direkten Zugang auf produzierende Unternehmen, werden die Projektergebnisse mit weiteren MES und ERP-Anbietern diskutiert. Ziel ist es, das entwickelte Konzept als APS (Advanced Planning & Scheduling Modul) für bestehende Systeme weiter zu entwickeln, um auf diese Weise einen größeren Markt zu erschließen.

Die wissenschaftliche Verbreitung der im Zuge des Projektes entwickelten Ideen und gewonnenen Erkenntnisse erfolgte bislang durch Präsentationen auf folgenden Tagungen:

- **Summerauer Wolfgang, Almeder Christian, Hartl Richard:** *Improving a Make-to-Order Production Process using Resource-Constrained Project Scheduling*; Vortrag auf der EURO 2010 – 24th European Conference on Operational Research, 11.-14. Juli 2010, Lissabon.
- **Beham Andreas, Kofler Monika, Wagner Stefan, Affenzeller Michael, Heiß Helga, Vorderwinkler Markus:** *Enhanced Priority Rule Synthesis With Waiting Conditions*; Tagungsband des EMSS'10 – 22nd European Modeling and Simulation Symposium; Fes, Marokko, 13.-15. Oktober 2010, S.65-70.
- **Beham Andreas, Heiß Helga:** *Einsatz von Metaheuristiken in der simulationsgestützten Produktionsfeinplanung am Beispiel des Kunststoffgießens*; SimForumSteyr'2010, Linz, Österreich, 25. November 2010.

4.5 Potential für Demonstrationsvorhaben

Das im Zuge des Projektes entwickelte Test- und Entwicklungsumgebung soll schrittweise in einen Demonstrator (Referenzimplementierung) für das Kunststoffgießen weiter entwickelt werden. Zunächst sollen allerdings in einem Nachfolgeprojekt spezifische Fragestellung der Optimierung weiter vertieft und die Algorithmen ausgebaut werden.

5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

5.1 Erkenntnisse

Die wichtigste Erkenntnis aus dem Projekt war der erfolgreiche Nachweis der Anwendbarkeit des gewählten Konzeptes einer simulationsgestützten Produktionsfeinplanung für eine werkstatorientierte Kunststoffgießerei und damit eine Bestätigung der Projektvision.

Besonders interessant war die hohe Übereinstimmung der in den arbeitsergonomischen Analysen als kritisch identifizierten Arbeitsbereichen mit den im Simulationsmodell erkannten Problembereichen.

Arbeitspsychologische Beiträge fanden Eingang in ein simulationsgestütztes Produktionsfeinplanungswerkzeug und vervollständigten damit das Bild der menschlichen Arbeitsweise in der Simulation. Durch dieses bessere, vollständigere Bild des Menschen wird das Werkzeug präziser und dadurch verlässlicher. Paradoxerweise verhilft das bewusste Einplanen und von Pausen, Störungen, Systemerhaltung und von typisch menschlichen Leistungsschwankungen (die rein rechnerisch nichts anderes als eine Reihe von kleinen Störungen sind) zu mehr Störungsresistenz. Die Pläne sind durch diese Herangehensweise robuster, da die theoretischen Optimierungsergebnisse viel mehr die Praxis widerspiegeln. Je besser "Störungen" eingeplant werden, umso besser kann auch damit umgegangen werden (Bewältigungshilfe), und umso besser auch die Gesamtergebnisse, die erzielt werden.

Diese Lektion wurde in dem volatilen Produktions-Umfeld von ASMA ganz besonders deutlich. Die Werkstättenfertigung weist eine nicht zu unterschätzende Komplexität auf; sie verfügt über die größte Flexibilität, aber gleichzeitig auch über die höchste Dichte an Störungen und Unregelmäßigkeiten. Aus diesem Grund wurde auch der flexiblere Dispatching-Ansatz als bevorzugte Planungsmethode eingesetzt. Zu Beginn der Regelentwicklung bestand die Hoffnung, dass sich unter den Dispatching-Regeln auch solche bilden würden, die sich auf konkrete Maschinen oder Ressourcen beziehen. Dadurch würden Engpässe oder sonstige Arbeitsbereiche aufgedeckt, die eine besondere Rolle spielen. Leider konnte diese gewünschte Eigenschaft bislang nicht erkannt werden. Im geplanten Folgeprojekt sollen daher Erweiterungen für die Parametrisierung der genetischen Algorithmen implementiert werden, welche die Einmischung von Maschinen und Ressourcen in GP-Regeln erleichtern. Ansonsten waren Ergebnisse aus der genetischen Programmierung aber bereits sehr hilfreich und brachten interessante Erkenntnisse über die Problemstruktur und auch über Optimierungspotentiale, die über die Auftragsreihenfolgeplanung hinausgehen (z. B.: Investitionen in Maschinen oder Qualifikationsmaßnahmen).

Da bei Rüstvorgängen und beim Materialwechsel sehr viele unnötige Abfälle anfallen, kann durch die Reduktion von Rüstvorgängen ein wichtiger Beitrag zur Schonung der Umwelt geleistet werden. (Ein Minimum an Abfällen wird es jedoch immer geben, daher ist Recycling nach wie vor ein wichtiges Thema.) Selbst in Situationen, in denen großer Termindruck herrscht und häufige Wechsel nötig sind, werden diese inhärent auf ein Minimum reduziert, da auch Rüstvorgänge Zeit benötigen. Über das Bewertungsmodell kann Materialverschwendung noch zusätzlich penalisiert werden, was jedoch zu suboptimalen Lösungen in anderen Bereichen führt. Die "richtige" Gewichtung und Verknüpfung von Bewertungskriterien ist daher eine wichtige unternehmerische Entscheidung, die auf Erfahrung und auf langfristigen Zielsetzungen beruhen muss. Die unternehmerische Entscheidung kann niemandem abgenommen werden; die Erfahrung kann jedoch weit im Voraus gesammelt werden. Es wurden bereits mehrere Konfigurationen von

Bewertungsmodellen getestet, die definitiv zu unerwünschten Ergebnissen geführt haben. Diese Erfahrungen sollen im Folgeprojekt tiefer erforscht und genau dokumentiert werden.

Im gegenständlichen Projekt wurde viel Zeit für die Bereinigung von Daten aufgewendet, um die Integrität des Simulationsmodells zu gewährleisten. Dieser Zeitaufwand wird im Allgemeinen unterschätzt, was sich bei Procomposite einmal mehr als wahr herausstellte. Das Auftreiben von Ergonomie-Daten gestaltete sich an einigen Stellen trivial (Monotonie, Pausen), meist aber aufwändig (Hitze, Kälte) und manchmal unmöglich (Ergonomie, etwa im Sinne von Körperhaltung). Arbeitsergonomische Kriterien wurden in Software als so genannte "Ergonomie-Tanks" abgebildet. Die Größe eines Tanks gibt die Menge des "Erträglichen" für den Menschen an. Ist beispielsweise der Monotonie-Tank eines/einer MitarbeiterIn gefüllt, weil er eine Woche lang an demselben Auftrag gearbeitet hat, muss er unbedingt den Arbeitsauftrag oder den Arbeitsplatz wechseln, damit sich der Tank wieder entleeren kann. Ähnliches gilt für Hitze und Kälte, Pausen und Lärm. Diese Abstraktion wurde auch vom Projektpartner Arbeitsleben befürwortet und es wurden gemeinsam die Tank-Größen festgelegt.

Eine weitere Erfahrung die gemacht werden musste, ist, dass Rechenkapazität nach wie vor eine zentrale Herausforderung für den operativen Einsatz für die simulationsgestützte Optimierung ist. Während im Forschungsprojekt lange Rechenzeiten für das Durchführen der Optimierungsläufe akzeptiert werden können, stellen diese für den täglichen Einsatz ein massives Problem dar.

Damit wurde Performance-Tuning (v. a. des Simulationsmodells) ebenfalls ein unerwartetes Themengebiet, da das gewählte Konzept nur dann greift, wenn auch die Ausführungsgeschwindigkeit in absehbarer Zeit auf akzeptable Werte gesenkt werden kann. Aus gewonnen Erkenntnissen wurden Richtlinien abgeleitet, auf die bei zukünftigen Entwicklungen zurückgegriffen werden kann:

- Datenbankabfragen haben einen großen "Overhead", das heißt, sie benötigen für die Ausführung jedes Mal mindestens 30 - 40 Millisekunden, bei großen Datenmengen noch mehr. Daher sollte die Anzahl der Abfragen auf ein Minimum reduziert werden. Diese Herangehensweise führt zu wenigen sehr großen, komplexen, monolithischen Abfragen, die im Quelltext zwar schwierig zu lesen sind, sonst aber keine Nachteile haben.
- Datenbankabfragen sollten nur während der Modellinitialisierung quasi "gebündelt" abgewickelt werden, da sie ansonsten die Simulationsausführung bremsen.
- Das Serialisieren und Deserialisieren von Modellen führt zu erheblichen Zeitersparnissen bei der erneuten Modellinitialisierung (gilt nur im Rahmen der Optimierung), da auch hier der Zugriff auf die Datenbank vermieden wird.
- Das Ausschalten von Visualisierung, Animation, Konsolenausgaben und Logging beschleunigt die Ausführung (nur bei der Optimierung anwendbar).
- Die Reduktion der Menge der Entscheidungspunkte führt zu einer Reduktion der Ereignisse und somit ebenfalls zu einer schnelleren Ausführungsgeschwindigkeit.
- Die Offline-Version des Bewertungsmodells führt zu schnelleren Ergebnissen.
- Die letzten Sekundenbruchteile können mit Hilfe von Profiling-Werkzeugen geholt werden.

Da die Simulation während der Projektlaufzeit erst nach und nach beschleunigt werden konnte, wurde zunächst versucht, die Optimierung dahingehend zu parametrisieren, dass auch nach einer kleinen Anzahl von Durchläufen bereits gute Ergebnisse erzielt werden können. Im Fall der genetischen Algorithmen waren

dies eine hohe Mutationsrate gepaart mit kleinen Populationen, die es früh zu anschaulichen Ergebnissen brachten.

Letztlich führt ein funktionierendes MES-System mit einer guten Optimierung auch zu positiven Auswirkungen auf das Betriebsklima, da die Ergebnisse von den MitarbeiterInnen angenommen werden und nicht mehr intern um die Umreihung von Aufträgen gestritten wird. In dieser Hinsicht sind die auf dem Markt gängigen MES-Systeme in der Preisklasse für KMU nicht besonders weit. Eine Gruppe von potentiellen Verwertern sind daher eben die Hersteller von PPS- und MES-Systemen. Die Vision ist, für unterschiedliche Fertigungstypen (Werkstätte, Insel, Linie,...) jeweils ein einfaches, generisches Standard-Simulationsmodell zu erstellen, das Grundlage für eine Standardlösung ist. Auf diesem Weg könnte Simulation für KMU besser leistbar werden.

Als Grundlage für dieses Vorhaben wurden die in Procomposite entstandenen generischen Komponenten in den Simulator SiRO integriert, damit diese in zukünftigen Projekten zur Wiederverwendung zur Verfügung stehen. Aus Procomposite entstammt das (weitgehend generische) Modell der Werkstättenfertigung, Modelle für andere Fertigungstypen könnten aus zukünftigen Projekten kommen.

5.2 Schlussfolgerungen zum Thema ganzheitliche Bewertung

Die Entwicklung von Fitnesswerten zur Integration arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse in die programmierte Produktionssteuerung (PPS) wirft einige grundsätzliche Diskussionspunkte auf:

- [1] Welchem Charakter ist die zu entwickelnde Methode verpflichtet und an welchen Merkmalen lässt sich dies festmachen? Es können zwei Technologietypen grob identifiziert werden: Einerseits sogenannte Rationalisierungstechnologie und andererseits Humanisierungstechnologie. Während sich beim ersten Typus soziale Kriterien im Produktionsverlauf eher unterzuordnen haben, wird im zweiten Typus ein systemisches Prinzip verfolgt, wo Arbeitsmittel, -stoffe und -abläufe nach wirtschaftlichen und sozialen Gesichtspunkten gleichberechtigt abzustimmen sind. Gleichwohl reduziert Rationalisierungstechnologie auch z.B. körperliche Fehlbelastungen, doch meist zum Preis von anderen Fehlbeanspruchungen wie z.B. monotone Aufgabenanforderungen oder Arbeitsverdichtung etc.

Diese Diskussion ist daher auch in einem Projekt, das der Entwicklung von Methoden zur Automatisierung der operativen Produktionssteuerung unter dem Gesichtspunkt des nachhaltigen Wirtschaftens dient, erforderlich, weil die mehrjährige Beschäftigung der Wirtschaftsinformatik bzw. der Operations Research mit Maschinenbelegungsplanung ein praktisches Dilemma aufzeigen: Als Leitlinie unternehmerischen Handelns wird die Wirtschaftlichkeit als Quotient aus erbrachten Leistungen (output) und der dabei entstandenen Kosten (input) angeführt. Die Steuerungsfelder sind 1. Maschinencharakteristika, 2. Auftragscharakteristika und 3. Zielsystem. Nach Wiendahl (2005) hat sich ein Zielsystem etabliert, das aus mehreren Zielkriterien besteht. Gleichwohl zeigt die Praxis, dass es nicht möglich ist alle Ziele gleichzeitig zu verfolgen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines Vorschlagssystems nach abgestuften Fitnesswerten/Lösungsqualitäten für betriebliche PlanungsakteurInnen. Die Integration ergonomischer Fitnesswerte würde wohl sichtbar machen, welche positiven oder negativen Folgen eine konkrete Steuerungsentscheidung mit sich bringt. Es öffnet aber das Tor für folgendes Worst Scenario: Aufgrund drohender Schwierigkeiten

mit der Termintreue bei der Abwicklung eines Auftrags wird der professionelle Anspannungs-Entspannungszyklus (professionelles „Kurzpausensystem“ nach Graff) gepflegt.

Dieses Beispiel bewog das arbeitsleben-Team zur Diskussion, welche ergonomischen Basiserfordernisse (Antworten auf die Planungsfrage „Wie soll gearbeitet werden?“ im Rahmen des Aushandlungsprozesses mit dem Anwenderbetrieb) sollen als Ergonomiecharakteristika (fest gesetzte Gestaltungselemente vergleichbar wie die oben genannten Maschinen- und Auftragscharakteristika) definiert werden und welche ins variable ergonomische Fitnesswerte-System eingepflegt werden.

Das Ergebnis dieser Diskussion ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt, dass ein Großteil der erhobenen und mit dem Anwenderbetrieb abgestimmten Ergonomieerfordernisse als gesetzte Simulationselemente wie z.B. als „Ergonomietanks“ berücksichtigt wurden. Die Beschäftigung mit der Definition von ergonomischen Fitnesswerten ist damit nicht beendet, führt aber gleichzeitig zum nächsten Problemfeld (siehe nachstehenden Punkt 2).

- [2] Die übliche Praxis der PPS (Junge, 2007) konzentriert sich darauf die Kosten im Rahmen der Berechnung des Wirtschaftlichkeitsquotienten zu beeinflussen. Das bedeutet, dass zum Planungszeitpunkt die Kosten als Zielgrößen vorliegen sollten. Meist liegen aber diese Kosteninformationen wie z. B. die konkrete Beanspruchungswahrscheinlichkeit der jeweiligen Beschäftigten nicht vor. Neben ethischen Einschränkungen stellt sich auch die Frage der Verhältnismäßigkeit der Ermittlung solcher Zielkriterien für Produktionsplanung und -steuerung. Zusätzlich würde es sich bei diesen Informationen um Opportunitätskosten handeln, die schwer objektiv zu fassen und in einem hohen Ausmaß das Ergebnis einer betrieblichen Wertediskussion bzw. eines betrieblichen Aushandlungsprozesses sind.

In diesem Sinne ist die Definition eines monetären Fitnesswert nur bei wenigen Arbeitsaspekten wie z. B. im Falle von Arbeitsaufgaben mit Handhabung schwerer Lasten monetär bewertet und mit dem Anwendungsbetrieb abgestimmt worden.

- [3] Bei diesen Diskussionen darf nicht übersehen werden, dass die Kosten, die durch eine Unterschätzung der Ergonomiecharakteristika in der Produktionsplanung entstehen, kurz- oder langfristig bezahlt werden müssen, entweder vom Betrieb (Zeitverlust, Qualitätseinbußen, höherer Ausschuss, Arbeitsunfälle, Krankenstände) oder im Falle von berufsbedingten Erkrankungen oder Invaliditätspensionen langfristig von der Gesellschaft (Büssing & Glaser, 2002). Die zugrunde liegende Komplexität und fehlende monetäre Einheitswerte dafür erschweren die Operationalisierung von Fitnesswerten.

Ein Schwerpunkt in der weiterführenden Arbeit wird daher in der richtigen Einschätzung bzw. der Objektivierung der Bewertung liegen. Die bisher gesammelten Erfahrungen mit unterschiedlichen Bewertungsstrategien sollen vertieft und bestätigt werden. Die bisherigen praktischen Ergebnisse (methodische Grundlagen und vorhandenes Software-Framework) bieten dahingehend eine fundierte Grundlage.

5.3 Schlussfolgerungen zum Thema regelbasiertes Dispatching

Regelbasiertes Dispatching ist eine Entscheidungsstrategie, welche aus einer Menge an zu einem bestimmten Zeitpunkt möglichen Entscheidungen nach bestimmten und definierten Kriterien vorgeht. Einfache Entscheidungsstrategien, wie zum Beispiel die Abarbeitung in Reihenfolge des Eintreffens, sind in der Anwendung unkompliziert, von Mensch und Maschine beherrschbar und weit verbreitet. Wenn sich jedoch Staus bilden oder die Auslastung in der Kette ungleich verteilt ist, kann es sinnvoll sein, die Kriterien anders zu gestalten. Je komplexer jedoch die Kriterien werden, umso stärker ist es erforderlich, diese Kriterien a) richtig in Relation zueinander zu setzen und b) die Auswirkungen auf die Performanz der Prozesskette zu untersuchen.

In diesem Projekt wurde dies versucht, in dem eine Werkstättenfertigung durch ein Simulationsmodell erfasst und an ein Optimierungssystem gekoppelt wurde, die im wechselseitigen Austausch die Regeln zur Entscheidung optimieren und bewerten. Durch das Simulationsmodell wird es ermöglicht, das Verhalten am Computer zu analysieren und Auswirkungen zu untersuchen. Weiters wurden Kriterien erarbeitet, anhand derer Entscheidungen getroffen werden können, sowie eine komplexe Struktur in Form einer mathematischen Formel entwickelt, in der die Kriterien zusammenspielen können.

Die Ergebnisse aus dem Projekt zeigen, dass die Regeln einen Einfluss auf die Produktion haben und mit den richtigen Kriterien bessere Entscheidungen getroffen werden können. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine umfassendere Analyse der Entscheidungen und ihrer Robustheit notwendig ist, bevor diese im Betrieb direkt umgesetzt werden können.

Die Ergebnisse, die mit den Regeln erzielt werden konnten, sind positiv zu bewerten. Die Optimierung war in der Lage, die Kriterien effektiv zueinander in Verbindung zu setzen. Trotz alledem zeigte sich, dass sehr hohe Regelkomplexitäten teilweise in Kauf genommen werden mussten. Die Optimierung sollte daher auch danach ausgerichtet werden, entweder weiterhin die Komplexität explizit einzuschränken, da auch hierbei gute Lösungen erzielt werden konnten, oder die Komplexität ebenfalls in die Qualität der Regel einzuberechnen.

Die endgültige Bewertung der Regeln ist jedoch schwierig, da hierfür ein weiteres Testszenario notwendig wäre, mittels dessen die Generalisierbarkeit geprüft werden kann. Aus diesem Grund sind sicherlich einfachere Regeln zu bevorzugen, die auch von einem menschlichen Produktionsplaner mit entsprechenden mathematischen Kenntnissen schnell erfasst werden können. Darüber hinaus sind noch weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Robustheit und Langlebigkeit der Regeln durchzuführen. Auch eine Reduktion der Komplexität des Produktionsszenarios würde die Analysierbarkeit erleichtern. Die auf Echtdate basierte Simulationsumgebung ist durch die vielen Rahmenbedingungen, die sich in der echten Produktion ergeben, naturgemäß weitaus komplexer und schwerer durchschaubar. Nichtsdestotrotz lassen sich mit der entwickelten Umgebung weitere Szenarien abbilden und analysieren.

Ein weiterer, langfristiger Schwerpunkt der weiterführenden Arbeit wird die schrittweise, prototypische Eingliederung der simulationsgestützten Optimierung in das vorhandene MES-System des produzierenden Betriebs sein. Erst durch diesen, entscheidenden Schritt können die praktischen Auswirkungen einer automatisierten, vorausschauenden, nachhaltigen Produktionsplanung bewiesen und die letzten Hürden auf dem Weg dahin bewältigt werden.

6 Ausblick und Empfehlungen

Die weiterführenden Arbeiten konzentrieren sich vorerst auf ein Nachfolgeprojekt, das sich mit den Themen Bewertung und multikriterielle Optimierung auseinandersetzt. Es wurde im gegenständlichen Projekt deutlich, wie wichtig es ist, Erfahrungen mit der Gewichtung und Verflechtung unterschiedlicher Zielkriterien zu sammeln, da dieses Konstrukt eine sehr große Fehlerquelle darstellt.

Nach der hinreichenden Elimination dieser Fehlerquelle soll es möglich sein, den Prototypen zunächst bei der Firma ASMA einzuführen und zu erproben. Parallel dazu soll das Konzept auch bei weiteren Werkstattfertigern bzw. in branchengleichen Unternehmen umgesetzt werden.

Langfristiges Ziel ist es, die Simulation für Standardlösungen zugänglich zu machen, um die nötige Breitenwirkung zu erzielen. Nachhaltige Planung soll bewusst geschehen, sie soll allgegenwärtig und leistbar sein. Erst durch die Verbreitung in der Masse der kleinen und mittleren Unternehmen kommt der ökologische Effekt richtig zum Tragen, deshalb ist es wichtig, diese Verbreitung voranzutreiben.

Das gleiche gilt jedoch auch für Großunternehmen; dort sind es jedoch weniger Rüstreihenfolgen, die eine große Rolle spielen, sondern häufig liegt das Optimierungspotential im Umgang mit Energie. Dieser Weg soll ebenfalls gegangen werden, benötigt aber einen gesonderten Lösungsansatz.

6.1 Weiterführende Zusammenarbeit des Projektteams

Die Projektpartner ASMA, arbeitsleben, POM und HEAL werden die Thematik in einem bereits genehmigten Bridge-I-Projekt „Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung für die optimierte Produktionsregelung“ (FFG-Proj. Nr. 829679) auf Forschungsebene gemeinsam weiterführen. In diesem Projekt soll eine tiefergehende, wissenschaftliche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Konfigurationen und Parametrierungen von Optimierungsverfahren, Bewertungsmodell und Simulationsmodell erfolgen. Speziell sollen die Algorithmen und Modelle noch weiter auf ihre Robustheit und Performance untersucht werden. So gilt es u. a. zu klären, wie sich die Algorithmen, bzw. synthetisierten komplexen Prioritätsregeln bei Datenfehlern, Veränderung von Prozess- und Auftragsparametern oder bei einer Änderung der Produktionsstrategie (Anpassung des Bewertungsmodells) verhalten. Ein weiterer wissenschaftlich noch zu untersuchender Punkt ergibt sich aus der Interpretation der mit genetischer Programmierung optimierten Modelle (komplexe Prioritätsregeln). Untersuchungen nach den relevanten Einflussgrößen von Regelparametern auf die Qualität, sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Regeln, oftmals mit ähnlicher Bewertung, auf die Einzelkriterien, wie Durchlaufzeit oder arbeitsergonomische Kriterien stehen noch aus.

Mit dem Partner ABF erfolgt eine weitere bilaterale Zusammenarbeit in Richtung einer industriellen Umsetzung der Ergebnisse in den Domänen der Metallverarbeitung und -erzeugung.

6.2 Relevanz der Ergebnisse für andere Zielgruppen

Die im Projekt entwickelten Methoden und Software-Komponenten lassen sich im Prinzip auf alle werkstatorientierte Produktionen anwenden. Die Einbindung von arbeitsergonomischen und umweltrelevanten Aspekte in die Bewertung und Optimierung machen die Methoden besonders attraktiv für

Produktionen mit einem hohen Anteil an belastenden, manuellen Tätigkeiten sowie für Produktionsprozesse mit Umweltbelastung (z. B. Energieverbrauch, Schadstoffausstoß).

Die Forschungspartner planen die Ergebnisse schrittweise auf andere Domänen zu übertragen. Dazu sollen speziell Hersteller von MES und PPS-Systemen angesprochen werden, da diese als Multiplikatoren der Ergebnisse dienen können. Die Vision ist, für unterschiedliche Fertigungstypen (Werkstätte, Insel, Linie,...) jeweils ein einfaches, generisches Standard-Simulationsmodell zu erstellen, das Grundlage für eine Standardlösung ist. Auf diesem Weg könnte Simulation für KMU besser leistbar werden.

7 Literatur- / Abbildungs- / Tabellenverzeichnis

7.1 Literatur

- [BehamHeiß10] Beham Andreas, Heiß Helga: *Einsatz von Metaheuristiken in der simulationsgestützten Produktionsfeinplanung am Beispiel des Kunststoffgießens*; SimForumSteyr'2010, Linz, Österreich, 25. November 2010.
- [BehamKofler..10] Beham Andreas, Kofler Monika, Wagner Stefan, Affenzeller Michael, Heiß Helga, Vorderwinkler Markus: *Enhanced Priority Rule Synthesis With Waiting Conditions*; Tagungsband des EMSS'10 – 22nd European Modeling and Simulation Symposium; Fes, Marokko, 13.-15. Oktober 2010, S.65-70.
- [BertholdHeinz..10] T. Berthold, S. Heinz, M. E. Lübbecke, R. H. Möhring, and J. Schulz. A: *constraint integer programming approach for resource-constrained project scheduling*. Zib-report 10-03, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik; Berlin, 2010.
- [BlazewiczDomschke..96] Blazewicz J. W., Domschke W., Pesch E.: "The Job Shop Scheduling Problem: Conventional and New Solution Techniques". *European Journal of Operational Research*, vol. 33, pp. 1-33. 1996.
- [BlazewiczLenstra..83] J. Blazewicz, J. K. Lenstra, and A. H. G. Rinnooy Kan: *Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity*. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1):11 - 24, 1983.
- [BlumSampels04] Blum C., Sampels M.: "An Ant Colony Optimization Algorithm for Shop Scheduling Problems". *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol. 3 (3), 285-308. 2004.
- [BruckerDrexl..99] P. Brucker, A. Drexl, R. Möhring, K. Neumann, and E. Pesch: *Resource constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods*. *European Journal of Operational Research*, 112(1):3-41, 1999.
- [BruckerKnust98] P. Brucker, S. Knust, A. Schoo, and O. Thiele.: *A branch and bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem*. *European Journal of Operational Research*, 107(2):272-288, June 1998.
- [BüssingGlaser02] Büssing André & Glaser Jürgen: *Das Tätigkeits- und Arbeitsanalyseverfahren für das Krankenhaus – Selbstbeobachtungsversion (TAA-KH-S)*. Göttingen, Hogrefe, 2002.
- [ChenShi..10] W. Chen, Y. Shi, H. Teng, X. Lan, and L. Hu: *An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling*. *Inf. Sci.*, 180:1031-1039, March 2010.
- [DebelsReyck..06] D. Debels, B. De Reyck, R. Leus, and M. Vanhoucke: *A hybrid scatter search/electromagnetism meta-heuristic for project scheduling*. *European Journal of Operational Research*, 169(2):638-653, March 2006.
- [DebelsVanhoucke07] D. Debels and M. Vanhoucke: *A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project-scheduling problem*. *Operations Research*, 55(3):457-469, 2007.
- [DemeulemeesterHerroelen92] E. Demeulemeester and W. Herroelen: *A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem*. *Manage. Sci.*, 38:1803-1818, December 1992.
- [DemeulemeesterHerroelen97] E. Demeulemeester and W. Herroelen: *New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem*. *Manage. Sci.*, 43:1485-1492, November 1997. ISSN 0025-1909.
- [DomschkeScholl..97] Domschke Wolfgang, Scholl Armin, Voß Stefan: "Produktionsplanung". Springer Verlag. 1997.
- [DorigoStützle04] Dorigo M., Stützle T.: "Ant Colony Optimization". MIT Press. 2004.
- [GloverKochenberger03] Glover F., Kochenberger G.: "Handbook of Metaheuristics". Springer Verlag. 2003.
- [GloverLaguna97] Glover F., Laguna M.: "Tabu Search". Kluwer Academic Publishers. 1997.
- [Graf27] Graf Oskar: *Die Arbeitspause in Theorie und Praxis*. In: *Psychologische Arbeiten*, 1927, 9, S. 563-681.
- [Günther06] Günther Schuh (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3. Auflage. Springer, Berlin 2006, ISBN 978-3-540-40306-7.
- [GüntherTempelmeier07] Hans-Otto Günther, Horst Tempelmeier: *Produktion und Logistik*. 7. Auflage. Springer, Berlin 2007, ISBN 978-3-540-74152-7.
- [HansenMladenovic01] Hansen, P., Mladenovic, N.: *Variable Neighborhood Search: Principles and Applications*. *European Journal of Operational Research* 130, 449-467, 2001.
- [IlmarinenTempel10] Ilmarinen Juhani & Tempel Jürgen: *Arbeitsfähigkeit 2010. Was können wir tun, damit Sie gesund bleiben?* Hrsg. von Giesert Marianne im Auftrag des DGB-Bildungswerk e.V., Hamburg, VSA-Verlag, ISBN 3-87975-840-9.

- [Jodlbauer08] Jodlbauer, Herbert: *Produktionsoptimierung, Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung*. 2. Auflage. Springer, Wien New York 2008, ISBN 978-3-211-78140-1.
- [KirkpatrickGelatt..83] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P.: "Optimization by Simulated Annealing". Science, vol. 220, pp. 671-680. 1983.
- [KolischHartmann06] R. Kolisch and S. Hartmann: *Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update*. European Journal of Operational Research, 174(1):23-37, 2006.
- [KolischHartmann99] R. Kolisch and S. Hartmann: *Heuristic algorithms for solving the resource constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis*. In Project scheduling: Recent models, algorithms and applications, pages 147-178. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Kurt03] Landau Kurt: *Arbeitswissenschaft und Betriebspraxis*. In: Strasser Helmut, Kluth Karsten, Rausch, Herbert, Bubb Heiner (Ed.): *Quality of Work and Products in Enterprises of the Future*. Stuttgart, Ergonomia Verlag, 2003, S. 939-942, ISBN 3-935089-68-6.
- [Mark07] Junge Mark: *Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung*. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [MendesGoncalves..09] J. J. M. Mendes, J. F. Gonçalves, and M. G. C. Resende: *A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem*. Comput. Oper. Res., 36:92-109, January 2009.
- [MingozziManiezzo..97] A. Mingozzi, V. Maniezzo, S. Ricciardelli, and L. Bianco: *An exact algorithm for the resource constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation*. Manage. Sci., 1997.
- [Muller09] L. F. Muller: *An adaptive large neighborhood search algorithm for the resource-constrained project scheduling problem*. In Proceedings of the VIII Metaheuristics International Conference (MIC) 2009.
- [OddiCesta97] Oddi A., Cesta A.: "A tabu search strategy to solve scheduling problems with deadlines and complex metric constraints". Proceedings of the 4th European Conference on Planning (ECP-97): Recent Advances in AI Planning, pp. 351-363. 1997.
- [OesterreichLeitner..00] Oesterreich Rainer, Leitner Konrad & Resch Marianne: *Analyse psychischer Anforderungen und Belastungen in der Produktionsarbeit. Das Verfahren RHIA/VERA-Produktion*. Manual und Antwortblätter. Göttingen, Hogrefe-Verlag, 2000, ISBN 3-8017-1393-8.
- [PalpangArtigues..03] M. Palpant, C. Artigues, and P. Michelon: *A LNS method for solving the resource-constrained project scheduling problem*. In Fifth Metaheuristics International Conference MIC2003, pages 59.1-59.6, Kyoto, 2003.
- [PalpantArtigues..04] M. Palpant, C. Artigues, and P. Michelon. Lssper: *Solving the resource constrained project scheduling problem with large neighbourhood search*. Annals of Operations Research, 131(1-4):237-257, 2004.
- [Pinedo01] Pinedo Michael: "Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems". 2nd Edition. Prentice Hall. New York. 2001.
- [PisingerRopke10] D. Pisinger and S. Ropke: *Handbook of Metaheuristics*, chapter Large neighbourhood search. Springer, 2nd edition, 2010.
- [PritskerWatters..69] A. A. B. Pritsker, L. J. Watters, and P. M. Wolfe: *Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach*. Management Science, 16:93-108, 1969.
- [PrümperHartmansgruber..95] Prümper Jochen, Hartmansgruber Klaus & Frese Michael: *KFZA. Kurz-Fragebogen zur Arbeitsanalyse – ein arbeitspsychologisches Verfahren*. In: Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie, 1995, 39, (N.F. 13), 3 Göttingen, Hogrefe-Verlag, S. 125-132.
- [RanjbarDeReyck..09] M. Ranjbar, B. De Reyck, and F. Kianfar: *A hybrid scatter search for the discrete time/resource trade-off problem in project scheduling*. European Journal of Operational Research, 193(1):35-48, February 2009.
- [RichterHacker98] Richter Peter & Hacker Winfried: *Belastung und Beanspruchung: Stress, Ermüdung und Burnout im Arbeitsleben*. Heidelberg, Roland Asanger Verlag, 1998, ISBN 3-89334-324-5.
- [RoachNagi96] Roach A., Nagi R.: "A Hybrid GA-SA Algorithm for Just-in-time Scheduling of Multi-Level Assemblies". Computers and Industrial Engineering, vol. 30 (4), pp. 1047-1060. 1996.
- [RopkePisinger06] S. Ropke and D. Pisinger: *An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows*. Transportation Science, 40:455-472, November 2006.
- [SampelsBlum..02] Sampels M., Blum C., Mastrolilli M., Rossi-Doria O.: "Metaheuristics for Group Shop Scheduling". Proceedings of PPSN-VII, Seventh International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Lecture Notes in Computer Science, pp. 631-640. Springer Verlag, Berlin. 2002.
- [SchuttFeydy09] A. Schutt, T. Feydy, P.J. Stuckey, and M. G. Wallace: *Why cumulative decomposition is not as bad as it sounds*. In Proceedings of the 15th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, volume 5732 of LNCS. Springer-Verlag, 2009.

[Shaw98] P. Shaw. : *Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems*. In CP-98 (Fourth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming), volume 1520 of Lecture Notes in Computer Science, pages 417–431, 1998.

[SummerauerAlmeder..10] Summerauer Wolfgang, Almeder Christian, Hartl Richard: *Improving a Make-to-Order Production Process using Resource-Constrained Project Scheduling*; Vortrag auf der EURO 2010 – 24th European Conference on Operational Research, 11.-14. Juli 2010, Lissabon.

[VaessensAarts..96] Vaessens R. J. M., Aarts E. H. L., Lenstra J. K.: "Job Shop Scheduling by Local Search". *INFORMS Journal on Computing*, vol. 8, pp. 302-317. 1996.

[VallsBallestin08] V. Valls, F. Ballestin, and S. Quintanilla: *A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem*. *European Journal of Operational Research*, 185(2):495-508, March 2008.

[VanhouckeDemeulemeester..01] M. Vanhoucke, E. Demeulemeester, and W. Herroelen: *An exact procedure for the resource-constrained weighted earliness-tardiness project scheduling problem*. *Annals OR*, 102(1-4):179-196, 2001.

[VDI5600] VDI-Richtlinie 5600: *Manufacturing Execution Systeme, Fertigungsmanagementsysteme*, VDI, August 2006.

[WangFu02] Wang T., Fu Y.: "Application of an Improved Genetic Algorithm for Shop Floor Scheduling". *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 8 (5), pp. 392-420. 2002.

[Wiendahl05] Wiendahl Hans-Peter: *Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München, Hanser Verlag, 2005, ISBN 3-446-40045-1.

[Wienhdah08] Hans-Peter Wiendahl: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 6. Auflage. Hanser, München 2008, ISBN 978-3-446-41279-8.

[Zäpfel82] Günther Zäpfel: *Produktionswirtschaft: operatives Produktions-Management*. de Gruyter, Berlin 1982, ISBN 3-11-007450-8.

[Zäpfel96] Zäpfel Günther: "Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement". de Gruyter Verlag, Berlin – New York. 1996.

Wikipedia: *Produktionsplanung und -steuerung* [http://de.wikipedia.org/wiki/Produktionsplanung_und_-steuerung]

7.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Unterstützung der Planungstätigkeiten durch ein simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem.	25
Bild 2:	Darstellung der betrachteten Produktionsbereiche.	27
Bild 3:	Vermittlungsmodell von Regulationsbehinderungen und ihren Folgen (in Anlehnung an Büssing und Glasner, 2002).	29
Bild 4:	Auszug aus dem Gütekriterien-System.	30
Bild 5:	Architektur des Simulationsmodells und Beziehungen zu anderen Komponenten	32
Bild 6:	Zustandsautomat, der die Zustände und Zustandsübergänge der Mitarbeiter abbildet.	33
Bild 7:	Pull-Prinzip.	33
Bild 8:	Push-Prinzip.	34
Bild 9:	Datenmodell als Grundlage für das Simulationsmodell.	34
Bild 10:	Skizze einer möglichen Bedienoberfläche für einen EditorInnenen zur Vorgabe von Übertragungsfunktionen.	37
Bild 11:	Übertragungsfunktion für die Bewertung einer Terminabweichung.	37
Bild 12:	Darstellung der Entscheidungszeitpunkte.	43
Bild 13:	Schematische Darstellung eines Szenariobaums.	43
Bild 14:	Zusammenspiel von Optimierung der Dispatching-Regeln und der die Regeln anwendenden Simulation.	45
Bild 15:	Der zyklische Ablauf der genetischen Programmierung.	45
Bild 16:	Qualitätsverlauf der Optimierung im Hinblick auf die Durchlaufzeit über mehrere Generation und mehreren unabhängigen Optimierungsläufen.	46
Bild 17:	Graphische Darstellung der besten gefundenen Regel, welche auch die höchste Komplexität aufwies.	48
Bild 18:	Graphische Darstellung einer einfacheren Regel.	48
Bild 19:	Auswirkung der Einschränkungen der Regelkomplexität auf die erzielbare Lösungsgüte.	49
Bild 20:	Beste gefundene Regel.	50
Bild 21:	Eine nur unmerklich schlechtere, aber wesentlich einfachere Regel.	50
Bild 22:	Für die Optimierung im Hinblick auf die Termintreue erwies sich eine sehr komplexe Funktionenbasis als wenig vorteilhaft.	51
Bild 23:	Die beste gefundene Regel.	52
Bild 24:	Eine nur unmerklich schlechtere Regel.	52

Bild 25:	Die besseren Ergebnisse.	53
Bild 26:	Mitarbeiter-Ansicht in der Simulationsvorschau.	55
Bild 27:	Bestandskurven in der Simulationsvorschau.	56
Bild 28:	Animierte Ansicht auf dem Hintergrund des Produktionslayout.	56
Bild 29:	Ansicht auf Vergangenheitsdaten (Zeitbuchungen von Mitarbeitern, ohne Pausen).	57