

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die
Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen**

Tobias Rainer Philipp

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Die Dissertation wurde am 19.08.2013 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
04.12.2013 angenommen.

Tobias Philipp

**RFID-gestützte
Produktionssteuerungsverfahren
für die Herstellung von Bauteilen
aus Faserverbundkunststoffen**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 282

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4346-2

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Philipp Engelhardt, Florian Geiger, Emin Genc und Thorsten Klein für die kritische Durchsicht meiner Arbeit sowie die damit verbundenen fachlichen Diskussionen. Ihre zahlreichen konstruktiven Verbesserungsvorschläge machten es möglich, diese Arbeit qualitativ abzurunden. Außerdem gilt mein großer Dank allen Studentinnen und Studenten, die mich in Form von Studienarbeiten oder Hiwi-Tätigkeiten beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben.

Schließlich gilt mein besonderer Dank meinen Eltern und Geschwistern. Sie haben mich in meiner Arbeit stets unterstützt und so zum Gelingen der Promotion beigetragen. In besonderem Maße danke ich Lisa für ihre immerwährende Unterstützung und ihr Verständnis für die Arbeit an der Dissertation während zahlreicher Wochenenden.

München, im Januar 2014

Tobias Philipp

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis | IV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung | 2 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik | 7 |
| 2.1 Überblick | 7 |
| 2.2 Bauteile aus Faserverbundkunststoffen | 7 |
| 2.2.1 Eigenschaften und Anwendungen | 7 |
| 2.2.2 Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen | 11 |
| 2.2.2.1 Allgemeines | 11 |
| 2.2.2.2 Eigenschaften von Prepregs | 11 |
| 2.2.2.3 Manuelles Prepreg-Verfahren | 14 |
| 2.2.2.4 Tapelege-Verfahren | 14 |
| 2.2.2.5 Pressverfahren | 15 |
| 2.2.2.6 Aushärten im Autoklaven | 15 |
| 2.3 Planung und Steuerung von Abläufen der Produktion | 17 |
| 2.3.1 Überblick behandelter Planungs- und Steuerungsaspekte | 17 |
| 2.3.2 Zielgrößen der Planung und Steuerung | 18 |
| 2.3.2.1 Grundlagen | 18 |
| 2.3.2.2 Kurze Durchlaufzeiten | 19 |
| 2.3.2.3 Hohe Termintreue | 20 |
| 2.3.2.4 Geringe Bestände | 20 |
| 2.3.2.5 Hohe Auslastung | 21 |
| 2.3.3 Grundlagen der Produktionsplanung | 21 |
| 2.3.4 Grundlagen der Produktionssteuerung | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3.5 | Planung und Steuerung bei Chargenarbeitssystemen | 25 |
| 2.3.5.1 | Chargenbildungsprobleme | 25 |
| 2.3.5.2 | Lösungsansätze | 27 |
| 2.3.6 | Berücksichtigung von Zustandsgrößen des Produkts in der Produktionssteuerung | 30 |
| 2.3.6.1 | Herausforderungen | 30 |
| 2.3.6.2 | Lösungsansätze | 33 |
| 2.3.6.3 | Bezug zur Herstellung von Bauteilen aus Prepregs | 35 |
| 2.4 | RFID-Technologie für die Produktionssteuerung | 36 |
| 2.4.1 | Grundlagen der RFID-Technologie | 36 |
| 2.4.2 | Nutzenpotenziale der RFID-Technologie in der Produktion | 40 |
| 2.4.3 | RFID-Technologie im Umfeld der Faserverbundwerkstoffe | 41 |
| 3 | Konzeption der Produktionssteuerungsverfahren | 45 |
| 3.1 | Überblick | 45 |
| 3.2 | Anforderungsanalyse | 45 |
| 3.3 | Modell der Produktion von Bauteilen aus Prepregs | 49 |
| 3.3.1 | Allgemeines | 49 |
| 3.3.2 | Prepreg-Rollen | 50 |
| 3.3.3 | Bauteile bzw. Aufträge | 52 |
| 3.3.4 | Fertigungsstationen, Puffer und Lager | 55 |
| 3.3.5 | Produktionsplan | 60 |
| 3.3.6 | RFID-System | 61 |
| 3.4 | Wirkungsbereich der Produktionssteuerungsverfahren | 63 |
| 4 | Evaluierung | 69 |
| 4.1 | Technische Bewertung | 69 |
| 4.2 | Wirtschaftliche Bewertung | 71 |
| 4.3 | Beispielhaftes Anwendungsszenario | 73 |
| 5 | Schlussbetrachtung | 77 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 77 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | Ausblick | 78 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 81 |
| 7 | Abbildungsverzeichnis | 95 |
| 8 | Tabellenverzeichnis | 99 |
| 9 | Anhang | 101 |
| 9.1 | Übersicht betreuter Studienarbeiten | 101 |
| 9.2 | Genutzte Softwareprodukte | 103 |
| 9.3 | Zusammenfassungen der eingebundenen Publikationen | 103 |
| 9.3.1 | P1: „Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics“ | 103 |
| 9.3.2 | P2: „Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung“ | 105 |
| 9.3.3 | P3: „Vorausschauende Steuerung der Auftauprozesse für Prepreg-Materialien“ | 106 |
| 9.3.4 | P4: „Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites“ | 108 |
| 9.3.5 | P5: „Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing“ | 109 |
| 9.4 | Veröffentlichungen des Autors | 111 |

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|--|
| AutoID | Automatische Identifikation |
| AZ | Aktenzeichen |
| BMC | Bulk Moulding Compound |
| BMW | Bayerische Motorenwerke |
| bspw. | beispielsweise |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CARV | Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production |
| CFK | Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |
| CIRP | Internationale Akademie für Produktionstechnik (französisch: <i>Collège International pour la Recherche en Productique</i>) |
| d. h. | das heißt |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EDI | Electronic Data Interchange |
| engl. | englisch |
| EPICIS | Electronic Product Code Information Services |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| et al. | und andere |
| e. V. | eingetragener Verein |
| f./ff. | und folgende (Singular/Plural) |
| FVK | Faserverbundkunststoff |
| FVW | Faserverbundwerkstoff |

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|--|
| GFK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| HF | High Frequency |
| Hrsg. | Herausgeber |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| LF | Low Frequency |
| max. | maximal |
| MES | Manufacturing Execution System |
| MW | Mikrowelle |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| Nr. | Nummer |
| PPS | Produktionsplanung und -steuerung |
| Prepreg | vorimprägniertes Faserhalbzeug (engl. <i>preimpregnated fibers</i>) |
| Red. | Redaktion |
| RFID | Radiofrequenzidentifikation (engl. <i>Radio Frequency Identification</i>) |
| S. | Seite |
| SCM | Supply-Chain-Management |
| SFB | Sonderforschungsbereich |
| SMC | Sheet Moulding Compound |
| SOPRO | Selbstorganisierende Produktion |
| u. a. m. | und andere mehr |
| UD | unidirektional |
| UHF | Ultra High Frequency |
| UML | Unified Modeling Language |

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|-----------------------------|
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| vgl. | vergleiche |
| z. B. | zum Beispiel |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|----------------|--|
| $a_{AH,j}$ | m | Länge der Nutzfläche des Autoklaven j |
| $a_{B,i}$ | m | Länge des Bauteils i der Autoklavencharge |
| $b_{AH,j}$ | m | Breite der Nutzfläche des Autoklaven j |
| $b_{B,i}$ | m | Breite des Bauteils i der Autoklavencharge |
| r_j | % | Nutzbarer Flächenanteil des Autoklaven j |
| T_1 | °C | Temperatur Haltestufe 1 |
| T_2 | °C | Temperatur Haltestufe 2 |
| T_{KH} | °C | Temperatur im Kühlhaus |
| T_R | °C | Raumtemperatur |
| t_{1min} | hh:mm | Minimale Haltezeit Haltestufe 1 |
| t_{1max} | hh:mm | Maximale Haltezeit Haltestufe 1 |
| $t_{1min,i}$ | hh:mm | Minimale Haltezeit Haltestufe 1 des Bauteils i |
| $t_{1max,i}$ | hh:mm | Maximale Haltezeit Haltestufe 1 des Bauteils i |
| t_{2min} | hh:mm | Minimale Haltezeit Haltestufe 2 |
| t_{2max} | hh:mm | Maximale Haltezeit Haltestufe 2 |
| $t_{2min,i}$ | hh:mm | Minimale Haltezeit Haltestufe 2 des Bauteils i |
| $t_{2max,i}$ | hh:mm | Maximale Haltezeit Haltestufe 2 des Bauteils i |
| $t_{AH,1}$ | hh:mm | Gewählte Haltezeit Haltestufe 1 |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im Kontext des steigenden Bewusstseins für die Endlichkeit von Material- und Energieressourcen gewinnt der Leichtbau seit mehreren Jahren stetig an Bedeutung (CHERIF 2011, S. v). Vor diesem Hintergrund wird vor allem im Bereich der Verkehrsmittel konsequent die Verwendung von Leichtbaumaterialien vorangetrieben, was einen steigenden Bedarf an Faserverbundkunststoffen (FVK) bewirkt. In diesem Zusammenhang soll der globale Bedarf an Kohlenstofffasern von 29.000 Tonnen im Jahr 2008 auf 130.000 Tonnen im Jahr 2020 steigen (TRECHOW 2012). Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden in zahlreichen Anwendungen, beispielsweise in Flugzeugen, Automobilen, Windkraftanlagen oder Sportgeräten eingesetzt (DAVÉ & LOOS 2000, S. 33, JÄGER & HAUKE 2010). Grund für den Einsatz dieser Werkstoffklasse sind die herausragenden mechanischen Eigenschaften, die je nach Anwendung eine Gewichtersparnis von bis zu 50 % gegenüber einem Bauteil aus Aluminium ermöglichen (JÄGER & HAUKE 2010).

Größtes Hemmnis bei der weiteren Verbreitung dieser Werkstoffe sind die Kosten (SCHMITT ET AL. 2008, BRUCKNER 2012). Einerseits sind die Materialkosten deutlich größer als die für alternative metallische Werkstoffe, andererseits sind die Fertigungskosten für FVK-Bauteile sehr hoch (NEITZEL & MITSCHANG 2004). Nach FEHER & THUMM (2003) machen diese ca. 70 % der späteren Bauteilkosten aus. Die Senkung der Fertigungskosten kann nun aus zwei Perspektiven betrachtet werden. Auf der einen Seite können sie durch die Verbesserung der Herstellungsprozesse bzw. der Anlagentechnik reduziert werden, auf der anderen Seite ist eine Betrachtung aus der Sicht der Abläufe in der Fertigung möglich. Nachdem die erste Perspektive bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten beleuchtet wird (z. B. SCHMIDT 1994, RUMMENHÖLLER 1996, RÜMENAPP 1996, ENEWOLDSSEN 1998, SCHMIDT 2005, ORTH 2008, HENNE ET AL. 2009, MERSMANN 2011, STRABER 2012, EHINGER 2013, BRECHER ET AL. 2013 und STEYER 2013), soll hier die zweite eingenommen werden und damit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit aus Sicht der Fertigungsabläufe realisiert werden. Diese Perspektive ist für die Herstellung von FVK-Bauteilen neu, aber vielversprechend, da bereits in Fertigungsumgebungen für Bauteile aus klassischen Werkstoffen große Beiträge zur Kostensenkung bzw. Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch die Optimierung von Abläufen und deren Steuerung geleistet wurden (z. B. NYHUIS 2006, OSTGATHE 2012).

Als technologischer Befähiger kann an dieser Stelle die Radiofrequenzidentifikation (engl. *Radio Frequency Identification*, RFID) dienen, die einerseits durch die Automatisierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten und andererseits durch das Schaffen von Transparenz in der Fertigung die effiziente Steuerung von Abläufen ermöglicht (AURICH ET AL. 2010). Insbesondere durch die Forschungsergebnisse von BERNHARD ET AL. (2011) wurde zudem die RFID-Technologie für eine Anwendung in der Produktion von FVK-Bauteilen weiterentwickelt.

Innerhalb der Klasse der FVK können höchste Bauteilqualitäten hinsichtlich der Festigkeitswerte durch die Verwendung vorimprägnierter Faserhalbzeuge, sogenannter Prepregs (engl. *preimpregnated fibers*) erreicht werden (SCHÜRMAN 2007, S. 149). Diese stellen Hochleistungsverbundwerkstoffe dar, die hauptsächlich für die Fertigung von Flugzeugen und Hubschraubern eingesetzt werden (EHRENSTEIN 2006, S. 11, SCHÜRMAN 2007, S. 5 ff.). Da diese Arbeit maßgeblich durch Anwendungen der Luftfahrtindustrie motiviert ist, soll im weiteren Verlauf die Bauteilherstellung in Prepreg-Technologie fokussiert betrachtet werden.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschreibt aus der oben angeführten Motivation heraus Verfahren zur Produktionssteuerung für die Herstellung von FVK-Bauteilen, insbesondere von Bauteilen aus Prepregs. Deren Materialeigenschaften sowie die zugehörigen Verarbeitungsprozesse stellen besondere Anforderungen an die Produktionssteuerung, die von bestehenden Verfahren und Methoden bisher nicht vollständig berücksichtigt sind. Die hier vorgestellten Verfahren sind speziell auf diese Anforderungen angepasst und basieren auf den technologischen Möglichkeiten, die die RFID-Technologie als ein Vertreter der automatischen Identifikationstechnologien (AutoID-Technologie) bietet. Im Einzelnen sollen folgende drei Verfahren entwickelt werden:

1. Verfahren zum vorausschauenden Auftauen von Prepreg-Rollen, das die Termintreue bei der Bereitstellung der Prepreg-Rollen erhöht und gleichzeitig die begrenzten Zeitkontingente für die Lagerung und Verarbeitung der Prepreg-Materialien schont.
2. Verfahren zur optimierten Chargenbildung am Autoklaven, das den Gesamtdurchsatz der Fertigung erhöht, indem das Engpasssystem Autoklav besser ausgelastet wird.

3. Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung, das die begrenzten Zeitkontingente für die Verarbeitung von Prepreg-Materialien bei der Priorisierung von Fertigungsaufträgen berücksichtigt und dadurch Ausschuss vermeidet.

Mit Hilfe dieser Verfahren soll die Produktivität der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs gesteigert und damit ein Beitrag geleistet werden, die Faserverbundfertigung aus Sicht der Fertigungsabläufe für eine effiziente und wirtschaftliche Serienfertigung zu befähigen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist als publikationsbasierte Dissertation aufgebaut, die nachstehende papiergebundene oder elektronische Veröffentlichungen einbindet. Alle eingebundenen Publikationen haben zur wissenschaftlichen Qualitätssicherung ein sogenanntes *Peer-Review* durchlaufen.

P1 **T. R. Philipp**, G. Reinhart: “Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics” (PHILIPP & REINHART 2011)

Diese Publikation wurde auf der 4th *International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV)* im Jahr 2011 in Montreal (Kanada) präsentiert. Danach ist sie in *ELMARAGHY* (2011) erschienen.

Darin werden Machbarkeitstests zur Anwendung der RFID-Technologie in der Produktion von FVK-Bauteilen präsentiert. Darüber hinaus werden eine industrielle Fertigungsumgebung für FVK-Bauteile in ein Simulationsmodell überführt und die positiven Einflüsse der RFID-Anwendung auf die logistischen Zielgrößen evaluiert.

P2 G. Reinhart, **T. R. Philipp**: „Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung“ (REINHART & PHILIPP 2012)

Diese Publikation ist in der elektronischen Zeitschrift *wt Werkstattstechnik online* im Heft 3 des Jahres 2012 (Jahrgang 102) erschienen.

Hier wird die Herstellung von Bauteilen aus FVK aus Sicht der Produktionssteuerung charakterisiert und ein Systemaufbau für die Produktionsplanung und -steuerung bei der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs präsentiert.

P3 **T. R. Philipp**, M. Schreiber, G. Reinhart: „Vorausschauende Steuerung der Aufbauprozesse für Prepreg-Materialien“ (PHILIPP ET AL. 2013A)

Diese Publikation ist in der elektronischen Zeitschrift *wt Werkstattstechnik online* im Heft 4 des Jahres 2013 (Jahrgang 103) erschienen.

Die Veröffentlichung beschreibt ein Verfahren zum vorausschauenden Auftauen von Prepreg-Rollen, das einerseits eine hohe Termintreue in der Bereitstellung der Materialien bewirkt und andererseits die beschränkten Zeitkontingente für die Lagerung und Verarbeitung der Prepreg-Materialien schont.

P4 **T. R. Philipp**, T. P. Klein, G. Reinhart: “Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites” (PHILIPP ET AL. 2012A)
Diese Publikation wurde im Jahr 2012 auf der *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* in Hong Kong (China) präsentiert.

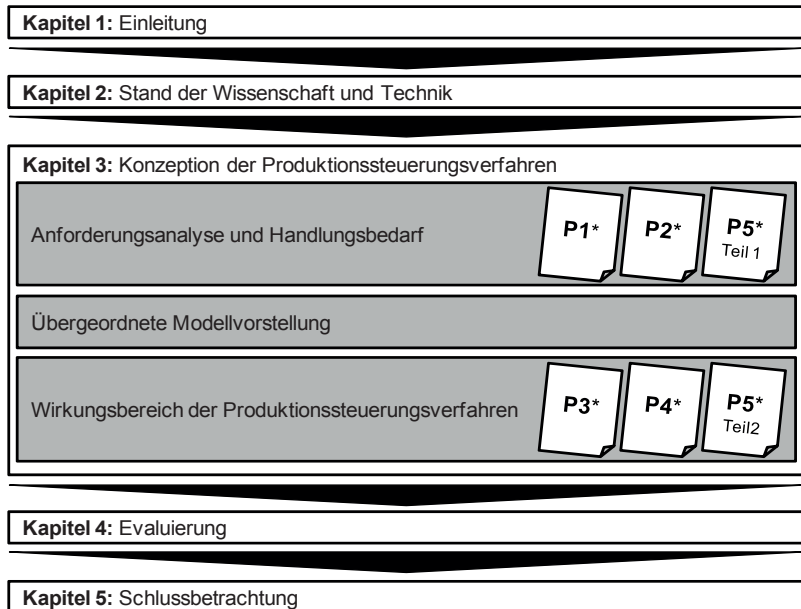
In der Veröffentlichung wird ein Chargenbildungsalgorithmus vorgestellt, der spezifisch für die Steuerung des Materialflusses zum Aushärten von Prepreg-Bauteilen im Autoklaven entwickelt wurde. Dieser ist dazu geeignet, den Teileausstoß der gesamten Fertigung zu erhöhen.

P5 **T. R. Philipp**, T. Winkler, G. Reinhart: „Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing“ (PHILIPP ET AL. 2013B)
Diese Publikation wurde auf der *46th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS)* in Setúbal (Portugal) präsentiert und ist im Anschluss im Band 7 der elektronischen Zeitschrift *Procedia CIRP* (Jahr 2013) erschienen. Im ersten Teil der Publikation werden Ergebnisse einer Umfrage präsentiert, die die Notwendigkeit der Entwicklung prepregspezifischer Produktionssteuerungsverfahren stützen. Der zweite Teil von P5 beinhaltet ein Verfahren zur Reihenfolgebildung und Auftragsfreigabe bei der Herstellung von Prepreg-Bauteilen. In diesem werden die beschränkten Verarbeitungs- und Lagerzeiten von Prepreg-Materialien explizit berücksichtigt und in einer erweiterten Schlupfzeitregel verarbeitet.

Ausführliche Zusammenfassungen der eingebundenen Publikationen sind im Anhang (Kapitel 9.3) zu finden.

Die Arbeit hat demnach folgenden Aufbau (vgl. Abbildung 1): Das erste Kapitel ordnet die Themenstellung dieser Arbeit ein und erläutert die Zielstellung sowie den Aufbau. Daran anknüpfend werden im Kapitel 2 die relevanten Teilgebiete des Stands der Wissenschaft und Technik erörtert. Dabei wird ebenfalls auf die Grundlagen, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, eingegangen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte werden punktuell durch den in den

einzelnen eingebundenen Veröffentlichungen aufgeführten Stand der Technik ergänzt. In Kapitel 3 werden dann die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Produktionssteuerungsverfahren konzipiert. Dafür wird zunächst die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs aus Sicht der Produktionssteuerung charakterisiert. Neben dem Stand der Wissenschaft und Technik werden dafür die Ergebnisse einer vom Autor durchgeführten Umfrage herangezogen. Diese beiden Elemente erlauben die Ableitung des spezifischen Handlungsbedarfs, der mit dieser Arbeit bedient wird (Kapitel 3.2).



*P1, P2, P3, P4, P5: Im Sinne einer publikationsbasierten Dissertation eingebundene Veröffentlichungen

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Darauf aufbauend wird ein Modell der Produktion von Bauteilen aus Prepregs vorgestellt (Kapitel 3.3), das sowohl die zugehörigen Materialflussobjekte Prepreg-Rollen und -Bauteile beinhaltet als auch die Fertigungsstationen, die für die Herstellungsprozesse notwendig sind. Darüber hinaus werden hier die Schnittstelle zum Produktionsplan sowie die Anwendung der RFID-Technologie erläutert. Auf dieser Grundlage werden dann drei Produktionssteuerungsverfahren entworfen (Kapitel 3.4), die in den eingebundenen Publikationen P3, P4 und P5 detailliert erläutert

sind. Die Evaluation der Verfahren ist ebenfalls Bestandteil der eingebundenen Publikationen und wird zusätzlich im Kapitel 4 thematisiert. Kapitel 5 rundet die Arbeit ab, indem es zusammenfassend die erreichten Forschungsergebnisse darstellt und mögliche Stoßrichtungen weiterer Forschungsaktivitäten aufzeigt.

Die Zuordnung der eingebundenen Publikationen zu den einzelnen Kapiteln ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt, wobei ersichtlich ist, dass die Publikationen P1, P2 sowie der erste Teil von P5 die Ableitung des mit dieser Arbeit bedienten Handlungsbedarfs betreffen. Aufbauend auf der übergeordneten Modellvorstellung werden dann die in den Publikationen P3, P4 und im zweiten Teil von P5 beschriebenen Produktionssteuerungsverfahren abgeleitet und konzipiert.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Überblick

Die vorliegende Arbeit verbindet die Themengebiete der Produktionsplanung und -steuerung, der Faserverbundfertigung – im Speziellen der Herstellung von Prepreg-Bauteilen – und der RFID-Technologie. Dementsprechend ist dieses Kapitel gegliedert, wobei der mit dieser Arbeit bediente Forschungsbedarf als Schnittmenge der drei Gebiete dargestellt werden kann (vgl. Abbildung 2). Für jedes Themenfeld wird zum einen in die relevanten Grundlagen eingeführt und zum anderen der für diese Arbeit relevante Stand der Wissenschaft und Technik aufbereitet. Dieser wird zusätzlich in den eingebundenen Publikationen ergänzt.

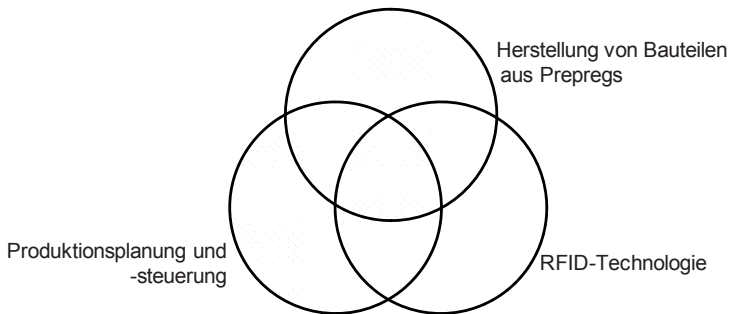


Abbildung 2: Übersicht des relevanten Stands der Technik

2.2 Bauteile aus Faserverbundkunststoffen

2.2.1 Eigenschaften und Anwendungen

Nach NEITZEL & MITSCHANG (2004, S. 25) sind Faserverbundwerkstoffe (FVW) folgendermaßen definiert:

„Faserverbundwerkstoffe bieten synergetisch eine Kombination der positiven Eigenschaften von mindestens zwei Materialien, nämlich Fasern und Matrix (...). Die Fasern mit hoher Steifigkeit und Festigkeit übertragen die Lasten; sie bilden die Verstärkungskomponente. Die Funktion der Matrix ist der Schutz der Fasern gegen äußere Einflüsse, und sie fixiert die Fasern in ihrer Position. Die Grenzfläche

zwischen der Matrix und den Fasern bewirkt, dass die Last von der Matrix in die tragenden Fasern eingeleitet wird.“

Eine Untergruppe der FVW sind Faserverbundkunststoffe oder auch faserverstärkte Kunststoffe, kurz FVK, bei denen ein Kunststoff als Matrix eingesetzt wird (AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 17). Die gängigsten Vertreter dieser Werkstoffgruppe sind in technischen Anwendungen kohlenstoff-, glas-, aramid- und naturfaserverstärkte Kunststoffe, die über ein duroplastisches Matrixsystem aus ungesättigten Polyester- oder Epoxidharzen verfügen (EHRENSTEIN 2006).

FVK werden bevorzugt in Leichtbauanwendungen genutzt, da sie exzellente mechanische Eigenschaften mit einem geringen Bauteilgewicht kombinieren (vgl. Abbildung 3). Dies wird durch das gezielte Ausnutzen der anisotropen Eigenschaften des Werkstoffs möglich (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 4), wobei höchste mechanische Eigenschaften erreicht werden, wenn die Fasern gerichtet und endlos im Werkstoff eingebettet sind (AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 17). Es können so Bauteile hergestellt werden, die 80 % leichter als Stahl und 50 % leichter als Aluminium sind, aber gleichzeitig die doppelte Festigkeit und Steifigkeit besitzen (JÄGER & HAUKE 2010, S. 4).

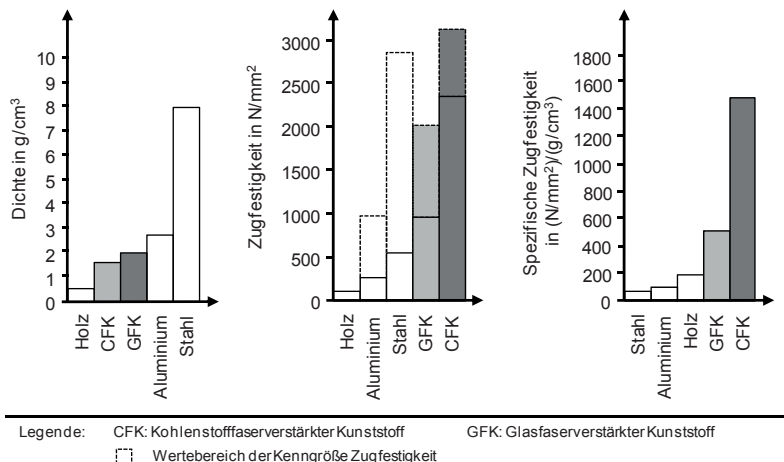


Abbildung 3: Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe (JÄGER & HAUKE 2010, S. 47)

Weitere herausragende Eigenschaften, insbesondere von CFK sind nach JÄGER & HAUKE (2010, S. 44) geringe thermische Ausdehnung, gutes Dämpfungsverhalten, vergleichsweise hohe Ermüdungsfestigkeit, hohe chemische Beständigkeit u. a. m.

FVK werden als Hochleistungswerkstoffe branchenübergreifend angewendet. Die Luftfahrtindustrie ist hier als Vorreiterbranche zu sehen (JÄGER & HAUKE 2010, S. 48 f.) (vgl. Abbildung 4). Deutlich wird dies an den Flugzeugen Airbus A 350 und Boeing 787, bei denen das Gewicht der Rumpf- und Tragflächenprimärstruktur durch die verstärkte Verwendung von CFK um bis zu 20 % sinken wird (WULFSBERG ET AL. 2010). Durch diese Gewichtsreduktion kann der Kraftstoffverbrauch gesenkt und die Lebensdauer sowie die Sicherheit erhöht werden (SCHMITT ET AL. 2009).

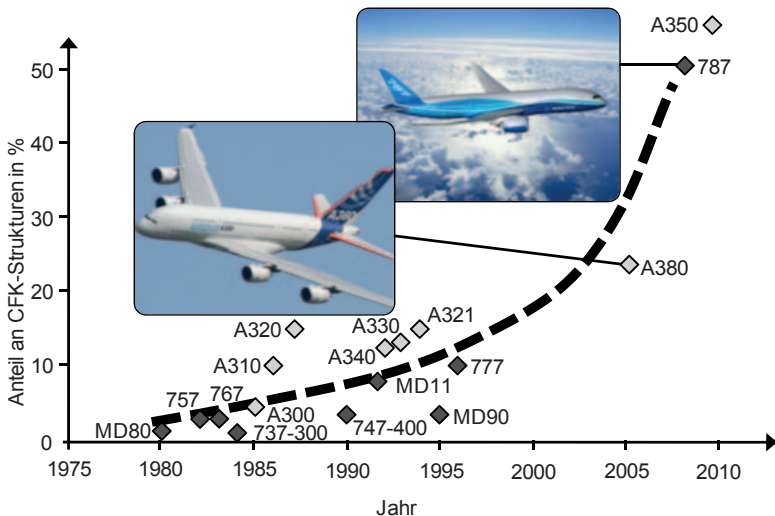


Abbildung 4: Verwendung von FVK in der Luftfahrt (JÄGER & HAUKE 2010, S. 49, unter Nutzung von Daten der NASA sowie von Airbus und Boeing)

Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von FVK zum Bau von Rotorblättern für Windenergieanlagen. Aktuell werden diese vornehmlich aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) gefertigt. Bei Rotorblattlängen von 50 m und mehr sind aufgrund des Ermüdungsverhaltens jedoch nur noch Kohlenstofffasern einsetzbar (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 15). Darüber hinaus finden FVK Anwendung im Transportbereich (AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE

E. V. 2010, S. 20), wozu nicht zuletzt das Elektrofahrzeug BMW i3 zu zählen ist, dessen Markteinführung für 2013 vorgesehen ist (REITHOFER 2013).

Der Markt für FVW befindet sich in stetigem Wachstum (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 11 ff.). So beträgt nach AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. (2010, S. 18) das durchschnittliche Marktwachstum zwischen 1960 und 2010 jährlich fast 10 %. Aufgrund der weiter steigenden Anstrengungen im Bereich der Energie- und Kosteneinsparungen, die eine steigende Nachfrage nach Leichtbau-Lösungen zur Folge haben, stehen die Chancen für weiteres Wachstum sehr gut (AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 20 f.). Speziell für den Markt der Verkehrsflugzeuge wird darüber hinaus ein starkes Wachstum vorhergesagt (HEUMER 2013).

Trotz der herausragenden Eigenschaften der FVK und der großen Zahl an Anwendungen konnten sich diese jedoch bisher nicht vollständig industriell durchsetzen (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 155 f.). Als Hauptgrund dafür werden Mängel der Fertigungstechnik für FVK hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Qualität gesehen (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 1). Dies wird deutlich, wenn die Kostenstruktur eines Bauteils aus FVK nach FEHER & THUMM (2003) in Abbildung 5 betrachtet wird. Daraus folgt, dass Massenmärkte diesen Werkstoffen bisher größtenteils verschlossen bleiben (SCHMITT ET AL. 2009) und die Verarbeitungstechnik als Schlüssel zu zukünftigen Märkten gilt (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 1).

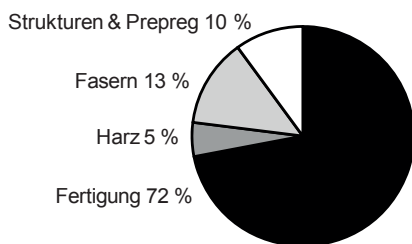


Abbildung 5: Kostenstruktur von CFK-Bauteilen (FEHER & THUMM 2003)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass FVW zwar deutliche technische Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen haben, sich jedoch noch nicht vollständig in der Anwendung durchgesetzt haben. Gründe dafür sind die mangelnde Wirtschaftlichkeit, die vor allem in der Bauteilherstellung aufgrund hoher Materialkosten, fehlender Verarbeitungstechnik und fehlender Prozessketten mit entsprechen-

dem Qualitätsmanagement begründet liegt. Dies führt zu einer personalintensiven Produktion, teuren Fertigungsverfahren, langen Fertigungszeiten und einer hohen Ausschussrate. (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 3 & S. 155 f.)

2.2.2 Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen

2.2.2.1 Allgemeines

Abhängig von den Kenngrößen *Bauteilkomplexität und -größe, Materialauswahl und -bereitstellung* sowie *Stückzahlbereich und Qualität* (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 157) existiert eine große Vielzahl an Herstellungsverfahren für FVK. Grundsätzlich muss hier zwischen der Verarbeitung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen, zu denen die Prepregs gehören, und der Verarbeitung trockener Faserhalbzeuge unterschieden werden (FEHER & THUMM 2003). Dabei wird unter einem Prepreg „ein mit einem Matrixpolymer (Harz) imprägniertes, aber noch nicht ausgehärtetes *endloses* Carbonfaserband oder zweidimensionales technisches Textil“ (JÄGER & HAUKE 2010, S. 40) verstanden. Die Prozessketten zur Verarbeitung trockener Faserhalbzeuge werden auch als Preform-Route bezeichnet. Dabei werden die Fasern entweder direkt oder über Zwischenschritte textiler Strukturen in Bauteilform gebracht und anschließend mit Harz imprägniert (JÄGER & HAUKE 2010, S. 36).

Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Verarbeitung von Prepregs im Fokus steht, sei für die Prozessketten trockener Fasern auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (z. B. NEITZEL & MITSCHANG (2004), AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. (2010), HENNING & MOELLER (2011)).

2.2.2.2 Eigenschaften von Prepregs

Die Entwicklung der Prepregs geht auf die Firma Boeing zurück, die mit diesen Materialien seit den 1960er Jahren Strukturbauteile für die Luft- und Raumfahrt herstellt. Auch aktuell dominieren Prepregs den Einsatz von FVK in der Luft- und Raumfahrtindustrie. (AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 233)

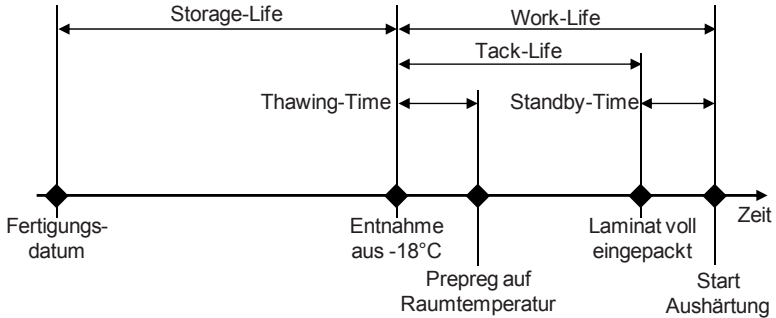
Prepregs treten in der Regel als Tapes, unidirektionale (UD) Gelege oder Gewebe auf und können entweder mit einer thermoplastischen oder einer duroplastischen Matrix imprägniert sein (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 105 ff.). Dabei sind Fasern und Matrix in einem fest definierten Verhältnis zueinander eingestellt (AVK

- INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 233). Da die Imprägnierung unabhängig vom Formvorgang stattfindet, können mit Prepregs höchste Faservolumenanteile von über 60 % bei hochgenauer Positionierung der Fasern erreicht werden (SCHÜRMAN 2007, S. 161 f.). Dazu trägt ebenfalls die geringe Dicke von einigen Zehntel Millimetern bei (JÄGER & HAUKE 2010, S. 42, AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 234). Vor dem Hintergrund, dass der theoretisch maximale Faservolumenanteil unter der Annahme einer quadratischen Packung 79 % ($0,25\pi$) beträgt, wird deutlich, dass mit Prepregs Hochleistungsfaserverbundkunststoffe bzw. -bauteile hergestellt werden können (JÄGER & HAUKE 2010). Ähnliche Eigenschaftsprofile können nur noch mit hochpräzisen Wickelverfahren erreicht werden, die jedoch auf Rotationskörper eingeschränkt sind (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 107, SCHÜRMAN 2007, S. 161 f.).

Die Tatsache, dass Prepregs bereits mit Harz imprägniert sind, bedeutet im Falle der duroplastischen Prepregs, dass diese nur zeitlich begrenzt lager- und verarbeitbar sind. Dies liegt am autokatalytischen Verhalten der Harze (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 107). Um das vorzeitige Aushärten der Prepregs zu verzögern, werden diese in Tiefkühlräumen bei ca. -18°C gelagert, was einem Herabsetzen der Reaktionsgeschwindigkeit gleich kommt (JÄGER & HAUKE 2010, S. 41). Abhängig von den speziellen Werkstoffeigenschaften und den Lagerbedingungen ist dies für einige Wochen möglich (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 107). Nach dem kontrollierten Auftauen der Prepregs ist die Verarbeitungszeit ebenfalls begrenzt und kann teilweise nur einige Tage betragen (EHRENSTEIN 2006).

Abbildung 6 fasst die temperaturabhängigen Lager- und Verarbeitungszeiten zusammen, die im Bereich der Luftfahrt gelten. Dabei wird deutlich, dass diese Zeiten bis zu dem Moment beschränkt sind, an dem die Aushärtung des Bauteils startet. In der Luft- und Raumfahrt, die durch einen erheblichen Prüf- und Qualifizierungsaufwand geprägt ist (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 107), muss die Einhaltung der genannten Zeiten nachgewiesen werden, um eine einwandfreie Bauteilqualität sicherzustellen.

Da der Durchbruch bei Prepregs mit thermoplastischen Matrixsystemen aufgrund hoher Polymerkosten und eines deutlich verringerten Faservolumengehalts noch nicht erreicht ist, fokussiert diese Arbeit im Folgenden Prepregs mit duroplastischer Matrix (JÄGER & HAUKE 2010, S. 34).



| Englischer Fachbegriff | Deutsche Beschreibung |
|------------------------|--|
| Storage-Life | Lagerzeit, hier auch: Kaltzeitkontingent |
| Work-Life | Verarbeitungszeit/Offenzeit, hier auch: Warmzeitkontingent |
| Thawing-Time | Auftauzeit |
| Tack-Life | Laminierfähigkeitszeit |
| Standby-Time | Wartezeit vor dem Aushärten |

Abbildung 6: Definition der temperaturabhängigen Lager- und Verarbeitungszeiten für Prepreg-Materialien (PHILIPP ET AL. 2012B, unter Verwendung von Daten der Eurocopter Deutschland GmbH)

Der große Vorteil dieser Materialien ist dabei die Möglichkeit, Bauteile von höchster Qualität herzustellen, was durch eine äußerst gleichmäßige Faserverteilung, eine präzise Ausrichtung der Fasern sowie eine nahezu luftblasenfreie Imprägnierung erreicht wird. Dem stehen folgende Nachteile gegenüber, die zu hohen Herstellkosten für Bauteile aus duroplastischen Prepregs führen (SCHÜRMANN 2007, S. 149 f.):

- Hohe Materialkosten
- Hohe Transport- und Lagerkosten aufgrund der begrenzten Lager- und Verarbeitungszeiten der Prepregs
- Hohe Investitionskosten für Betriebsmittel
- Hoher Handarbeitsanteil mit der Folge einer zeitintensiven Herstellung

2.2.2.3 Manuelles Prepreg-Verfahren

Die Prepreg-Technologie ist ein typisches Herstellungsverfahren für FVW in der Luftfahrtindustrie, mit dem 80 – 90 % der CFK-Strukturen hergestellt werden (EHRENSTEIN 2006, S. 11). Dabei kann das Herstellungsverfahren des manuellen Prepreg-Laminierens in Anlehnung an CAMPBELL (2004) in 5 Schritte unterteilt werden (vgl. Abbildung 7). Im ersten Schritt werden die Prepreg-Rollen kontrolliert aufgetaut (1). Danach werden bauteilindividuelle zweidimensionale Zuschnitte gefertigt (2) und in einem dritten Schritt in ein Werkzeug eingelegt (3). Bei diesem Schritt, dem sogenannten Laminieren, werden mehrere Schichten an Prepregs belastungsgerecht erzeugt. Anschließend erhält das Bauteil einen Vakuumaufbau und wird im Autoklaven unter Einwirkung von Druck und hohen Temperaturen ausgehärtet (4). Danach wird das Bauteil weiteren Bearbeitungsschritten, z. B. Bohren, unterzogen (5), bevor es in einem Endprodukt oder einer Baugruppe montiert wird.

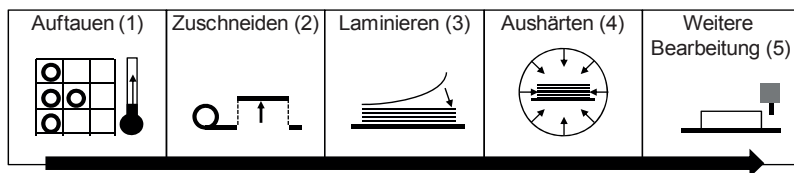


Abbildung 7: Bauteilherstellung im Prepreg-Verfahren in Anlehnung an CAMPBELL (2004), Darstellung: P5

Vor dem bauteilindividuellen Zuschnitt befinden sich die Prepregs auf Rollen, die tiefgekühlt gelagert werden (EHRENSTEIN 2006, S. 150). Diese müssen vor dem Zuschnitt kontrolliert aufgetaut werden. Dadurch verliert der Werkstoff einerseits an Sprödigkeit, sodass er beim Laminieren einfach an die durch das Formwerkzeug vorgegebenen Konturen angelegt werden kann. Andererseits werden die Prepregs durch das Auftauen leicht klebrig, sodass sie auch in Zwangslagen exakt positioniert werden können (EHRENSTEIN 2006, S. 151, SCHÜRMAN 2007, S. 147).

2.2.2.4 Tapelege-Verfahren

Bei der Bauteilherstellung mittels Tapelegen wird der Lagenaufbau eines Bauteils durch schmale Streifen aus UD-Prepregs hergestellt, die sukzessive in eine Form eingelegt werden. Um diese am Endpunkt zu fixieren, werden sie dort leicht erhitzt. Dadurch steigt lokal die Klebrigkeit des Materials. Nachdem der Laminataufbau

fertiggestellt ist, müssen die Bauteile final konsolidiert werden, was z. B. in einem Autoklaven geschehen kann (AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 486). Grund dafür ist, dass bisher keine Tapelege-Anlagen verfügbar sind, die im Legeprozess eine vollständige Konsolidierung durchführen können (AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 484).

Für den Fall, dass komplexe Geometrien mit Hilfe von Tapes hergestellt werden sollen, besteht die Möglichkeit des sogenannten Multi-Tapelegens. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom herkömmlichen Tapelegen, indem parallel zwischen 12 und 32 Bändchen (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 264) mit geringer Breite (max. 15 mm) abgelegt werden (AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 485).

Bei beiden Verfahrensvarianten müssen die Tapes bis zur Verarbeitung gekühlt werden, wofür Kühlschränke innerhalb der Tapelegeanlage existieren (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 264 f.). Im Allgemeinen wird das Tapelegen für großflächige, flache oder wenig gekrümmte Bauteile verwendet (AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010, S. 484 f.).

Prozessorientierte Forschungsarbeiten zum Tapelege-Verfahren können z. B. BÄUMER (1992), ZENDER (1992), ESCHE (2001), BRECHER ET AL. (2013) und STEYER (2013) entnommen werden.

2.2.2.5 Pressverfahren

Vorimprägnierte Faserhalbzeuge können ebenfalls in Form von Pressmassen vorliegen. In der Regel werden hier fließfähige Harzmassen verarbeitet, die besser unter den Begriffen Sheet Moulding Compound (SMC) und Bulk Moulding Compound (BMC) bekannt sind (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 105 & S. 108). Da diese Materialien und Herstellungsverfahren nicht im Fokus der Arbeit stehen, sei lediglich auf die einschlägige Fachliteratur, z. B. NEITZEL & MITSCHANG (2004) oder AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. (2010), verwiesen.

2.2.2.6 Aushärten im Autoklaven

Der Aushärtevorgang findet für Prepregs in der Regel im Autoklaven statt. Dieser erlaubt eine reproduzierbare Steuerung von Temperatur- und Druckverläufen und

sorgt somit für einen konstanten Konsolidierungsdruck über der gesamten Bauteiloberfläche unabhängig von der Bauteilgeometrie (im Gegensatz z. B. zum Pressen). Bei einem Autoklavenzyklus, der ca. drei bis zwölf Stunden dauern kann, werden die Bauteile unter Einwirkung von Temperaturen zwischen 80 und 180°C sowie Drücken zwischen sechs und zehn bar ausgehärtet (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 232).

Abbildung 8 zeigt einen exemplarischen Verlauf von Druck und Temperatur. Dabei ist ersichtlich, dass das zu härtende Bauteil zunächst auf eine erste Temperaturhaltstufe erhitzt wird, um die Viskosität des Harzes entsprechend zu senken und somit das vollständige Durchtränken der Fasern zu begünstigen. Danach wird der Konsolidierungsdruck aufgebracht und die Temperatur auf eine zweite Haltestufe gesteigert. Vor der Fertigstellung des Bauteils findet ein kontrolliertes Abkühlen statt. (CAMPBELL 2004, S. 180 ff.)

Um während des Autoklavenzyklus sicherzustellen, dass jedes Bauteil den vorgesehenen Temperaturverlauf auch tatsächlich erfährt, werden im Autoklaven Temperatursensoren verwendet, die in die Aushärtevorrichtungen integriert sind und damit entweder einzelnen Bauteilen oder Bauteilgruppen zugeordnet werden können. Insbesondere ist dies wichtig, da die Aushärtereaktion exotherm ist und überhöhte Temperaturen genauso ungünstig für die Bauteilqualität sind wie zu niedrige. Dabei bestimmt stets dasjenige Bauteil, das eine Haltestufe als letztes erreicht, die Zeitählung und somit die Dauer des gesamten Autoklavenzyklus.

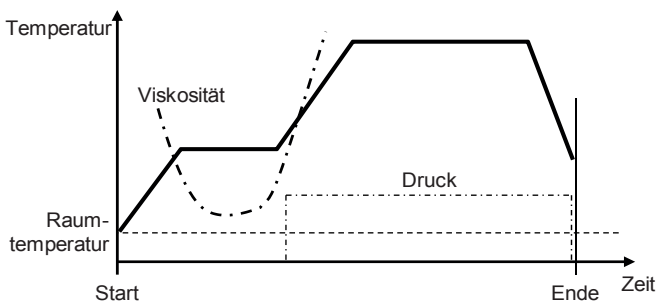


Abbildung 8: Autoklavenzyklus (CAMPBELL 2004, S. 181 ff.)

Autoklaven sind sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb teuer (JÄGER & HAUKE 2010, S. 43). Jedoch wird dieser Nachteil durch die einzigartige Möglichkeit aufgewogen, Strukturen aus FVK mit exzellenten mechanischen Eigenschaften

herzustellen (JÄGER & HAUKE 2010, S. 43). Aufgrund dieser Rahmenbedingungen werden Autoklaven hauptsächlich für Hochleistungsbauteile in der Luft- und Raumfahrt genutzt und werden dort auch mittelfristig die dominierende Technologie bleiben (NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 234, JÄGER & HAUKE 2010, S. 43).

2.3 Planung und Steuerung von Abläufen der Produktion

2.3.1 Überblick behandelter Planungs- und Steuerungsaspekte

Dieses Kapitel erläutert zunächst die Zielgrößen, die durch die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) verfolgt werden (Kapitel 2.3.2). Ebenfalls wird die Bedeutung der PPS für den wirtschaftlichen Unternehmenserfolg dargelegt. Danach werden grundlegende Aspekte und Aufgaben der Produktionsplanung (Kapitel 2.3.3) und -steuerung (Kapitel 2.3.4) eingeführt. Darauf aufbauend wird in den Abschnitten zur Planung und Steuerung bei Chargenarbeitssystemen (Kapitel 2.3.5) und zur Berücksichtigung von Zustandsgrößen des Produkts in der Produktionssteuerung (Kapitel 2.3.6) der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung aufbereitet.

Die Produktionsplanung und -steuerung wird dabei wie in Abbildung 9 nach HACKSTEIN (1989, S. 4 f.) ins Unternehmen eingeordnet. Dabei werden alle Fertigungsverfahren nach DIN 8580 betrachtet. Aus diesem Grund werden für den weiteren Verlauf dieser Arbeit die Begriffe *Fertigung* und *Produktion* bzw. *Fertigungssteuerung* und *Produktionssteuerung* als synonym betrachtet.

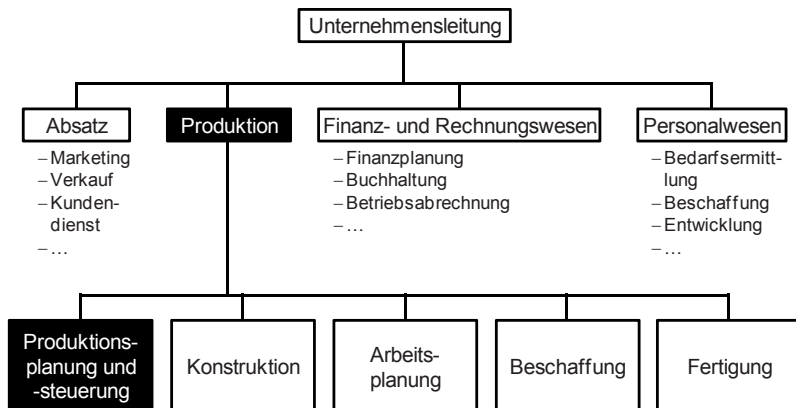


Abbildung 9: Einordnung der PPS ins Unternehmen (HACKSTEIN 1989, S. 4 f.)

2.3.2 Zielgrößen der Planung und Steuerung

2.3.2.1 Grundlagen

Die Produktionsplanung und -steuerung ist eine der wichtigsten und anspruchsvollsten Aufgaben in einem Industrieunternehmen (KURBEL & ENDRES 2005, S. 1, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 27 ff., WIENDAHL 2010, S. 1 ff. & S. 256). Sie dient als organisatorische Rationalisierungsmaßnahme der effizienten Planung und Steuerung von Abläufen in der Produktion und sichert damit die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen (HACKSTEIN 1989, S. 1). Aus diesem Grund soll sie gemäß des Wirtschaftlichkeitsprinzips derart ausgeführt werden, dass die vorgegebenen Leistungen mit möglichst geringen Kosten erreicht werden (ZÄPFEL 2001, S. 40 f.).

WIENDAHL (1997) stellt ebenfalls die Wirtschaftlichkeit ins Zentrum seines Zielsystems für die Produktionsplanung und -steuerung (vgl. Abbildung 10). Die Einflussgrößen darauf gruppiert er unter den Begriffen Logistikkosten sowie Logistikleistung. Dabei nimmt der Kunde die Logistikleistung durch kurze Lieferzeiten, geringe Terminabweichungen sowie eine hohe Liefertreue (bei Auftragsfertigern) bzw. einen hohen Servicegrad (bei Lagerfertigern) wahr (LÖDDING 2005, S. 19). Die Logistikkosten hingegen wirken zunächst betriebsintern. Sie werden durch Bestände, Auslastungen und Vezugskosten bestimmt. Aufgrund der Tatsache, dass diese bei der Preisgestaltung für Produkte berücksichtigt werden müssen, wirken sie jedoch mittelbar auf den Kunden (LÖDDING 2005, S. 19 f.).

Somit entsteht ein Konflikt zwischen den Zielen des Kunden bzw. den Marktzielen (hohe Logistikleistung) und den Betriebszielen (geringe Logistikkosten) (WIENDAHL 1997, S. 252). Seit den 1980er Jahren findet hier jedoch aufgrund der zunehmend gesättigten Märkte und des damit verbundenen Wandels vom Verkäufer- zum Käufermarkt eine kontinuierliche Verschiebung der Bedeutung hin zur Logistikleistung statt (WIENDAHL 1997, S. 252 f., KURBEL & ENDRES 2005, S. 11 f.). Dies geschieht in Verbindung mit gestiegenen Anforderungen an die PPS (KURBEL & ENDRES 2005, S. 12).

Ausgehend von der Wirtschaftlichkeit leitet WIENDAHL (1997, S. 250 ff.) operative Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung ab, die beim Ergreifen von Maßnahmen und Entscheidungen der PPS als Ersatzzielgrößen dienen. Dies ist notwendig, da diejenigen Kosteninformationen, die notwendig wären, um daraus

Steuerungsmaßnahmen abzuleiten, in aller Regel zum Planungs- bzw. Steuerungszeitpunkt nicht verfügbar sind (KURBEL & ENDRES 2005, S. 9 f.).

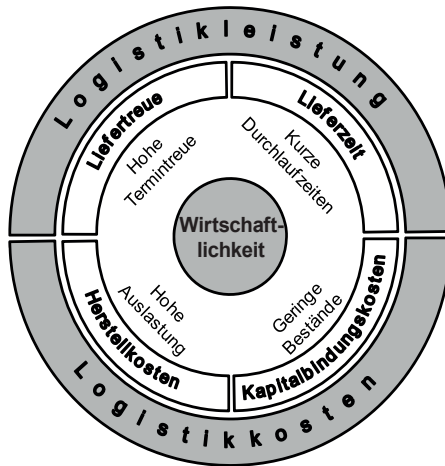


Abbildung 10: Zielsystem der Produktionslogistik (WIENDAHL 1997, S. 251)

Die Zielgrößen nach WIENDAHL (1997) sind dabei in hohem Maße als richtig und vollständig anerkannt und werden im Folgenden näher erläutert, vgl. z. B. KURBEL & ENDRES (2005), LÖDDING (2005) oder SCHUH (2006A).

2.3.2.2 Kurze Durchlaufzeiten

Als Durchlaufzeit eines Auftrages wird die Zeitspanne zwischen seiner Freigabe und Fertigstellung definiert (WIENDAHL 1997, S. 262 f.). Ziel der Produktionssteuerung ist es, für kurze Durchlaufzeiten zu sorgen. Häufig wird dabei vereinfachend nur tagesgenau gerechnet (LÖDDING 2005, S. 29).

Die Durchlaufzeit ist die Untergrenze der Lieferzeit eines Auftrages und bestimmt daher maßgeblich die Logistikleistung eines Betriebs, die direkt mit dem wirtschaftlichen Erfolg verknüpft ist. Darüber hinaus beeinflusst eine Streuung der Durchlaufzeiten die Termin- bzw. Liefertreue eines Unternehmens. Auch an dieser Stelle sind kurze Durchlaufzeiten von Vorteil, da somit einerseits die Schwankungen geringer ausfallen und andererseits die Wahrscheinlichkeit steigt, auf spät eintreffende Kundenwünsche noch reagieren zu können. (LÖDDING 2005, S. 29)

Insbesondere bei der Herstellung von Produkten, deren Zustand sich durch die Umgebungsbedingungen der Fertigung verändert, muss der Durchlaufzeit erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Solche Produkte können bspw. elektronische Bauteile sein, bei denen ein erhöhter Staubeintrag Fehlfunktionen hervorruft (LÖDDING 2005, S. 29), oder Produkte, deren Eigenschaften temperaturabhängig sind, wie in der vorliegenden Arbeit.

2.3.2.3 Hohe Termintreue

Die Termintreue ist ein Maß für die Terminabweichung einer Auftragsgruppe innerhalb eines Zeitintervalls. Sie ist definiert als der prozentuale Anteil derjenigen Aufträge, die innerhalb einer vorgegebenen Termintoleranz fertiggestellt wurden. Die Termintreue wird von der Durchlaufzeit beeinflusst, da diese maßgeblich den Ist-Termin bestimmt. Ebenfalls hat die Höhe und Flexibilität der zur Verfügung stehenden Kapazitäten einen großen Einfluss auf die Durchlaufzeit und Termintreue. Diese wirkt dann unter dem Einfluss von eventuell vorhandenen Puffern direkt auf die Liefertreue, die vom Kunden wahrgenommen wird. Häufig wird anstelle der Termintreue auch die Terminabweichung gemessen, die als Differenz zwischen einem Ist- und einem Soll-Termin definiert ist, wobei dann die Lieferterminabweichung und die Fertigstellungsterminabweichung besonders relevant sind. Die Terminabweichung wird in diesem Fall in Betriebskalendertagen gemessen, wobei ein positiver Wert eine verspätete Lieferung oder Fertigstellung bedeutet und ein negativer Wert für eine verfrühte Lieferung oder Fertigstellung steht. (LÖDDING 2005, S. 29 ff.)

2.3.2.4 Geringe Bestände

Bestände in einem Unternehmen können grundsätzlich als Lager- oder Fertigungsbestand in Form von Rohmaterial, Halbfabrikaten oder Fertigwaren vorliegen. Der Bestand kann dabei entweder in Mengen- oder Geldeinheiten gemessen werden und soll möglichst gering gehalten werden. Bestände wirken direkt auf die Finanzen des Unternehmens, indem sie Kapitalbindungskosten und zugehörige Zinskosten verursachen. Darüber hinaus nimmt ein steigender Bestand ein steigendes Raumvolumen ein, das ebenfalls mit Kosten verbunden ist. Aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung fördert ein geringer Bestand den Überblick in der Fertigung und bewirkt dadurch eine bessere Steuerbarkeit. Der Bestand ist darüber hinaus eng mit der Zielgröße der hohen Auslastung verknüpft. An dieser Stelle bewirken große Bestände eine hohe Auslastung der Arbeitsstationen. Umgekehrt verhält sich der

Zusammenhang zwischen dem Bestand und der Durchlaufzeit. Hier steigt die Durchlaufzeit mit steigenden Beständen. Dieser Zielkonflikt ist als Dilemma der Ablaufplanung bekannt. (LÖDDING 2005, S. 32 ff.)

2.3.2.5 Hohe Auslastung

Die Auslastung ist definiert als das Verhältnis von mittlerer und maximal möglicher Leistung eines Arbeitssystems, wobei die Leistung (auch Durchsatz oder Ausbringung) in der Einheit Stunden pro Betriebskalendertag gemessen wird. Sie wird meist in der Einheit Prozent angegeben. Unter der Voraussetzung, dass die hergestellten Produkte abgesetzt werden können, hat eine höhere Auslastung auch einen höheren Umsatz, höhere Deckungsbeiträge und einen höheren Unternehmensgewinn zur Folge. Sie wirkt dabei auf die Logistikkosten. Als illustrierendes Beispiel können hier zwei Firmen mit einem gleichen Maschinenpark genannt werden, wobei eine Firma eine höhere Ausbringungsleistung erzielt. Eine vollständige Auslastung aller Arbeitssysteme ist praktisch unmöglich. Grund dafür ist, dass unterschiedliche Aufträge die verschiedenen Arbeitssysteme in unterschiedlichem Maße belasten. Deutlich wird dies, wenn in der Fertigung ein eindeutiger Engpass existiert, der dadurch gekennzeichnet ist, dass er deutlich höher ausgelastet ist als die übrigen Arbeitssysteme. Das bedingt, dass diese nicht zu 100 % ausgelastet werden können. (LÖDDING 2005, S. 35 ff.)

2.3.3 Grundlagen der Produktionsplanung

Mit Planung wird die „Suche nach einer realisierbaren Lösung für eine Aufgabe in befristeter Zeit mit vorgegebenem Kostenaufwand unter Berücksichtigung aller wesentlichen Faktoren und Einflußgrößen“ bezeichnet (VDI 2385, S. 2). Vor diesem Hintergrund ist die Produktionsplanung nach VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. (1983, S. 167) folgendermaßen definiert: „Systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.“

In der Literatur existieren verschiedene Aufteilungen der Produktionsplanung in Teilaufgaben. In der vorliegenden Arbeit soll die Untergliederung nach HACKSTEIN (1989, S. 5) genutzt werden, die die Produktionsplanung in die Querschnittsfunktion der Datenverwaltung und die Funktionsgruppen der Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung sowie Termin- und Kapazitätsplanung einteilt (vgl. Abbildung 11). Dieses Modell wurde stetig weiterentwickelt und ergänzt und diente in diesem

Zusammenhang unter anderem als Grundlage des Aachener PPS-Modells (SCHUH 2006A, S. 5 ff.).

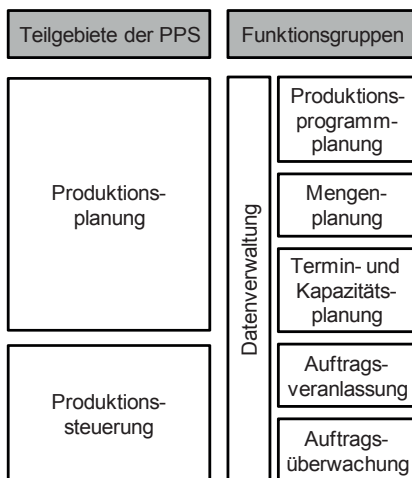


Abbildung 11: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (HACKSTEIN 1989, S. 5)

Die Produktionsprogrammplanung ist der Ausgangspunkt der Produktionsplanung und basiert auf bestehenden Kundenaufträgen und Absatzprognosen. Diese werden genutzt, um einen Bedarf an Erzeugnissen (Primärbedarf) zu bestimmen, auf dessen Basis der sogenannte Sekundärbedarf bestimmt werden kann, der den Materialbedarf zur Deckung dieses Primärbedarfs beschreibt. Auf dieser Grundlage wird dann das Produktionsprogramm, d. h. eine grobe zeitliche und mengenmäßige Festlegung der zukünftig herzustellenden Produkte bzw. Bauteile, bestimmt. (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. 1983, S. 167, HACKSTEIN 1989, S. 10 f.)

Die Funktionsgruppe der Mengenplanung betrachtet ausgehend vom Produktionsprogramm Roh- und Werkstoffe, Halbzeuge, Hilfs- und Betriebsstoffe, Teile und Gruppen nach ihrer Art, Menge und Termin. Dabei werden Lagerbestände berücksichtigt (Nettobedarfermittlung) und optimierte Bestellvorschläge für den Einkauf erarbeitet. Daraus wiederum ergibt sich das Fertigungsprogramm für die Eigenfertigung. Ebenfalls fallen die Lieferantenauswahl und die Bestellüberwachung in diese Funktionsgruppe. (HACKSTEIN 1989, S. 11)

Bei der Termin- und Kapazitätsplanung geht es um die zeitliche und kapazitätsmäßige Festlegung der Auftragsabläufe in der Produktion. Durch die Aktivitäten

der Durchlaufterminierung, Kapazitätsbedarfsrechnung, Kapazitätsabstimmung, Reihenfolgeplanung und Kapazitätsangebotsermittlung wird im Ergebnis jedem Auftrag ein (Bedarfs-)Termin zugeordnet. Zudem werden Kapazitätsbedarfslisten bzw. Arbeitsverteilungsvorschläge erstellt. Die Schnittstelle zwischen der Produktionsplanung und der Produktionssteuerung wird einerseits über die Querschnittsaufgabe der Datenverwaltung und andererseits durch den Termin- und Kapazitätsplan realisiert. (HACKSTEIN 1989, S. 5 & S. 13 ff.)

Da die Produktionsplanung kein Schwerpunkt dieser Arbeit ist, wird für weitergehende Informationen auf die einschlägige Literatur, z. B. HACKSTEIN (1989), ZÄPFEL (2001), KURBEL & ENDRES (2005), SCHUH (2006A) oder FANDEL ET AL. (2011) verwiesen.

2.3.4 Grundlagen der Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung verwendet die Ergebnisse der Produktionsplanung als Eingangsgrößen und findet im Gegensatz zu dieser zeitlich parallel zur laufenden Produktion statt. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. (1983, S. 167) definiert die Produktionssteuerung folgendermaßen:

„Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen.“

Dabei wird *Veranlassen* als ein „terminorientierter Anstoß der Aufgabendurchführung (z. B. Disposition)“, *Überwachen* als „Feststellen der Aufgabenerfüllung oder der Abweichungen der Ist- von den Solldaten“ und *Sichern* als „Maßnahmen zum Vermeiden oder Vermindern dieser Abweichungen“ verstanden.

LÖDDING (2005) stellt ein detailliertes Modell der Fertigungssteuerung vor, in dem er diese in die Aufgaben Auftragszerzeugung, Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung unterteilt (vgl. Abbildung 12). Bei der Auftragszerzeugung werden Planwerte für den Zugang, den Abgang sowie die Reihenfolge von Aufträgen festgelegt. Fertigungsaufträge können dabei ausgehend von Kundenaufträgen (Auftragsfertigung) oder Aufträgen zum Füllen eines Lagers (Lagerfertigung) erzeugt werden. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Auftragszerzeugung nur im Falle einer Lagerfertigung als Bestandteil der Produktionssteuerung zu sehen ist. Im Falle einer Auftragsfertigung ist sie als Bestandteil der Produktionsplanung einzuordnen.

Bei der Auftragsfreigabe werden die in den Freigabehorizont fallenden Aufträge ausgewählt und zur Produktion freigegeben. Es wird somit der Zeitpunkt bestimmt, ab dem Fertigungsaktivitäten für einen Auftrag durchgeführt werden dürfen. Der Zeitpunkt der Auftragsfreigabe hat einen wichtigen Einfluss auf das Erreichen der logistischen Ziele (FANDEL ET AL. 2011, S. 703).

Die Teilaufgabe der Kapazitätssteuerung bestimmt kurzfristig die zu verwendenden Kapazitäten, z. B. Arbeitszeit und Zuordnung von Mitarbeitern zu Maschinen. Für den Fall, dass unvorhergesehene Ereignisse eintreten, z. B. Maschinenausfälle, kann die Kapazitätssteuerung Maßnahmen ergreifen, um die geforderten Kapazitäten zur Verfügung zu stellen.

Die Reihenfolgebildung legt unter Verwendung von Prioritätsregeln fest, welcher Auftrag an einem gegebenen Arbeitssystem als nächster bearbeitet wird.

Die durch die Aufgaben beeinflussten Stellgrößen der Produktionssteuerung wirken über die Regelgrößen Bestand, Rückstand und Reihenfolgeabweichung direkt auf die Zielerreichung der logistischen Zielgrößen (siehe Kapitel 2.3.2).

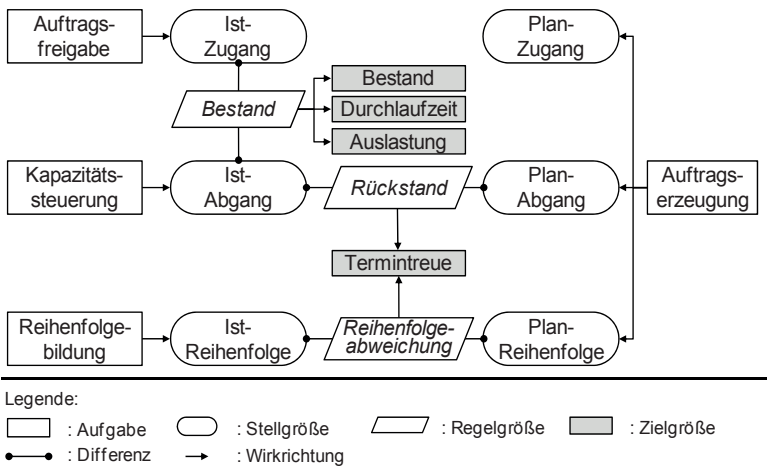


Abbildung 12: Modell der Fertigungssteuerung nach LÖDDING (2005, S. 7)

Zur Erfüllung der Teilaufgaben der Fertigungssteuerung stehen nun verschiedene Verfahren zur Verfügung, die je nach Anwendungsfall auf unterschiedliche Weise miteinander kombiniert werden können. Eine ausführliche Darstellung solcher

Verfahren kann LÖDDING (2005) entnommen werden. Gemäß des Modells der Fertigungssteuerung untergliedert er die Verfahren in:

- Auftragserzeugungsverfahren
- Auftragsfreigabeverfahren
- Reihenfolgebildungsverfahren
- Kapazitätssteuerungsverfahren

Entsprechende Verfahren, die speziell auf die Herstellung von Prepreg-Bauteilen angepasst sind, werden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

2.3.5 Planung und Steuerung bei Chargenarbeitssystemen

2.3.5.1 Chargenbildungsprobleme

Chargenarbeitssysteme kommen in den unterschiedlichsten Branchen vor. Insbesondere sind Anwendungsfälle aus dem Bereich der Halbleiterfertigung, z. B. KEMPF ET AL. (1998), der Metallverarbeitung, z. B. LIU ET AL. (2005B), WANG & TANG (2008), und der Verarbeitung von Lebensmitteln, z. B. SIMPSON & ABAKAROV (2009), weit verbreitet. Bei der Herstellung von FVK stellt der Autoklav ein Chargenarbeitssystem dar (KEMPF ET AL. 1998, DAVÉ & LOOS 2000, S. 296, CAMPBELL 2004, S. 176).

Nach LÖDDING (2005, S. 102) ist die Chargenfertigung dadurch definiert, dass mehrere Lose zusammen bearbeitet werden. Ein zugehöriges Arbeitssystem soll im Folgenden als Chargenarbeitssystem bezeichnet werden. Obwohl vor allem in der englischsprachigen Literatur keine Einigkeit darüber besteht (KUIK ET AL. 1994), soll die Bildung von Chargen (engl. *batching*) im Folgenden von der Bildung und Optimierung von Fertigungslosen bzw. der Losgrößenrechnung (engl. *lotsizing*) unterschieden werden. Als typische Chargenprozesse gelten Ofenprozesse (LÖDDING 2005, S. 102, KLEMMT ET AL. 2008). Meist sind dabei die Prozesszeiten von Chargenarbeitssystemen deutlich länger als die von Maschinen, die die Aufträge sequenziell bearbeiten (KEMPF ET AL. 1998, CHIANG ET AL. 2008). Zusätzlich weist LÖDDING (2005, S. 102) darauf hin, dass Chargenarbeitssysteme häufig für einen großen Teil der Durchlaufzeit verantwortlich sind, was auf die Zeiten für das Sammeln, Vorbereiten und die Parallelbearbeitung der Aufträge sowie auf die Belastungsspitzen an den Folgearbeitssystemen zurückzuführen ist.

Aus der Sicht der Produktionsplanung und -steuerung sind Chargenarbeitssysteme unvorteilhaft, weil sie hohe Bestände und Durchlaufzeiten verursachen, und sollen daher vermieden werden (LÖDDING 2005, S. 102). Für den Fall, dass dies nicht möglich ist, besteht in der Literatur Einigkeit darüber, dass der Planung und Steuerung solcher Arbeitssysteme erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, da sie die logistische Zielerreichung der gesamte Fertigung stark beeinflussen (KEMPF ET AL. 1998, SUNG ET AL. 2002, CHENG ET AL. 2008, CHIANG ET AL. 2008, LI ET AL. 2009, KLEMMT ET AL. 2009). Aus diesem Grund existieren zahlreiche Forschungsarbeiten zu diesem Themenbereich (POTTS & KOVALYOV 2000, SUNG ET AL. 2002, CHENG ET AL. 2008, KLEMMT ET AL. 2008, LI & QIAO 2008, JINTAO ET AL. 2010), die zu großen Anteilen aus dem Bereich der Halbleiterfertigung stammen (z. B. KEMPF ET AL. 1998, SUNG ET AL. 2002, JOLAI 2005, LI & QIAO 2008, KLEMMT ET AL. 2008, LI ET AL. 2009, KLEMMT ET AL. 2009, GUO ET AL. 2010, JINTAO ET AL. 2010, SOBEYKO & MÖNCH 2011).

Die Forschung im Bereich der Chargenbildung lässt sich anhand der in Abbildung 13 genannten Kriterien klassifizieren.

| Kriterium | Ausprägung | |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Anordnung Chargenarbeitssysteme | Parallel | Einzel |
| Kapazitäten | Unbeschränkt | Beschränkt |
| Art Chargenarbeitssysteme | Identisch | Unterschiedlich |
| Auftragsfamilien | Keine oder kompatibel | Inkompatibel |
| Fertigungsaufträge | Zunächst unbekannt | Bekannt |
| Perspektive | Produktionsplanung | Produktionssteuerung |

Beispielhaftes Chargenbildungsproblem

Abbildung 13: Unterscheidungsmerkmale bei Chargenbildungsproblemen

Die adressierten Chargenbildungsprobleme lassen sich zunächst hinsichtlich der Eigenschaften der Chargenarbeitssysteme unterscheiden. Es wird hier zwischen der Betrachtung einzelner oder paralleler Chargenarbeitssysteme (engl. *single* or *parallel batch processing machines*) unterschieden. Dabei wird im Falle paralleler Chargenarbeitssysteme davon ausgegangen, dass zeitgleich mehrere Maschinen zur

Verfügung stehen, auf denen Chargen bearbeitet werden können. Es müssen also für mindestens zwei Maschinen gleichzeitig Chargen bestimmt werden. Für den Fall eines einzelnen Chargenarbeitssystems existiert keine Alternative auf Seiten der Ressourcen. Weiter lassen sich die Problembeschreibungen für Chargenarbeitssysteme in solche unterscheiden, die die beschränkten Kapazitäten der Arbeitssysteme berücksichtigen und solche, die von unbeschränkten Kapazitäten (engl. *bounded* bzw. *unbounded capacities*) ausgehen. Ein zusätzliches Unterscheidungsmerkmal ist, ob von identischen Chargenarbeitssystemen (engl. *identical batch processing machines*) ausgegangen wird oder von unterschiedlichen.

Die zu bearbeitenden Aufträge betreffend wird in der Literatur zusätzlich zwischen Problemen unterschieden, die inkompatible Auftragsfamilien berücksichtigen und solchen, die dies nicht tun. Auftragsfamilien liegen vor, wenn die Aufträge nicht beliebig zu Chargen kombiniert werden können. In diesem Fall gehört jeder Auftrag einer Familie an und kann nur mit Aufträgen derselben Familie zu einer Charge kombiniert werden (POTTS & KOVALYOV 2000, LÖDDING 2005, S. 102). Des Weiteren werden die Chargenbildungsprobleme danach unterschieden, ob die Aufträge dynamisch zu unterschiedlichen Zeiten, d. h. nicht zwangsläufig zu Beginn des Betrachtungshorizonts (CHIANG ET AL. 2008), zur Chargenbildung eintreffen oder ob jederzeit alle zu bearbeitenden Aufträge bekannt sind. In eine ähnliche Richtung geht die Klassifizierung nach online- und offline-Problemen. Beide Aspekte beschreiben in der Quintessenz, ob das Problem aus Sicht der Produktionsplanung (engl. *offline*) oder der Produktionssteuerung (engl. *online, dynamic job arrivals*) betrachtet wird. Es überwiegen dabei die Betrachtungen aus Sicht der Produktionsplanung.

Es existieren in der Literatur zahlreiche weitere Kriterien zur Klassifizierung von Chargenbildungsproblemen. Diese besitzen jedoch eine deutlich geringere Verbreitung und werden daher nicht ausführlich diskutiert. Zu diesen Kriterien gehören die Berücksichtigung sekundärer Ressourcen wie z. B. Werkstückträger (KEMPF ET AL. 1998), Rüstzeiten (SIKORA 1996, LI & QIAO 2008, LI ET AL. 2009), ungleiche Auftragsgrößen (CHENG ET AL. 2010), beschränkte Puffer-Kapazitäten (SIKORA 1996) und andere.

2.3.5.2 Lösungsansätze

Im Bereich der Lösungsverfahren kann zwischen Verfahren unterschieden werden, die auf Prioritätsregeln (z. B. frühester Plan-Endtermin für die Reihenfolgebildung), auf exakten oder auf heuristischen Optimierungsverfahren beruhen. Wegen der

Größe und Komplexität der Chargenbildungsprobleme sind die meisten unter ihnen nicht mit polynomialem Aufwand lösbar (NP-schwer), was dazu führt, dass für diese vornehmlich heuristische Optimierungsverfahren als Kompromiss zwischen Berechnungsgenauigkeit und -geschwindigkeit eingesetzt werden (DAMODARAN ET AL. 2006, SOBEYKO & MÖNCH 2011). Die Berechnungszeit, die exakte Verfahren benötigen, ist an dieser Stelle zu groß. Dabei unterscheiden sich bestehende Arbeiten zunächst anhand der genutzten Zielgröße. Häufig werden an dieser Stelle folgende gewählt:

- Minimierung der kumulierten, gewichteten Verspätung aller Aufträge (engl. *total weighted tardiness*), z. B. LI & QIAO (2008), LI ET AL. (2009), KLEMMT ET AL. (2009), GUO ET AL. (2010), SOBEYKO & MÖNCH (2011)
- Minimierung der maximalen Verspätung (engl. *maximum lateness*), z. B. WANG & UZSOY (2002)
- Minimierung der Anzahl verspäteter Aufträge (engl. *minimization of the number of tardy jobs*), z. B. JOLAI (2005)
- Minimierung der Abweichung vom Zieltermin (engl. *deviation from due dates*), z. B. VENTURA & KIM (2003)
- Minimierung der Lagerkosten, z. B. LI & YUAN (2006)
- Minimierung der Fertigungszeit für alle Aufträge (engl. *makespan, total completion time*), z. B. KEMPF ET AL. (1998), SUNG ET AL. (2002), KLEMMT ET AL. (2008), JINTAO ET AL. (2010)

Um diese Zielgrößen zu optimieren, wird eine große Vielfalt an heuristischen Optimierungsverfahren genutzt. Auszugsweise sind dies:

- Simulated Annealing (DAMODARAN ET AL. 2006, CHENG ET AL. 2010)
- Ameisen-Schwarm-Algorithmen (engl. *ant colony algorithms*) (CHENG ET AL. 2010, GUO ET AL. 2010, GUO ET AL. 2012)
- Genetische Algorithmen (SIKORA 1996, DAMODARAN ET AL. 2006)

Da sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderer Relevanz sind, sollen im Folgenden die Arbeiten von CHENG ET AL. (2008) und CHIANG ET AL. (2008) ausführlicher betrachtet werden. Die Arbeiten der Autoren sind durch die Motivation begründet, bestehende Modellvorstellungen und Produktionsplanungs- und -steuerungsverfahren im Bereich der Chargenarbeitssysteme näher an reale Fertigungsum-

gebungen zu bringen und dort nutzbar zu machen. An dieser Stelle haben sie eine Lücke im Stand der Forschung identifiziert. Insbesondere werden Anwendungsbeispiele aus der Halbleiterfertigung betrachtet. (CHENG ET AL. 2008, CHIANG ET AL. 2008)

Die Modelle von CHENG ET AL. (2008) und CHIANG ET AL. (2008) können als parallele Chargenarbeitssysteme beschrieben werden, mit denen Aufträge aus inkompatiblen Familien unter dynamischen Ankunftszeiten bearbeitet werden. Zur Behandlung dieser Chargenbildungsprobleme werden Heuristiken vorgeschlagen, die einmal die Minimierung der maximalen Verspätung mit Hilfe eines lokalen Suchverfahrens (CHIANG ET AL. 2008) und das andere Mal die Minimierung der maximalen kumulierten, gewichteten Verspätung mit Hilfe eines memetischen Algorithmus (Genetischer Algorithmus mit lokaler Suchfunktion) zum Ziel haben (CHENG ET AL. 2008), wobei die Gewichtungen genutzt werden, um die Prioritäten der Aufträge zu beschreiben. Bei beiden Ansätzen werden nicht nur diejenigen Aufträge bei der Chargenbildung betrachtet, die zum Entscheidungszeitpunkt, der dem Freiwerden einer Maschine entspricht, vorliegen, sondern ebenfalls diejenigen Aufträge, die innerhalb eines festen Vorausschau-Horizonts liegen. Dabei besteht ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst großen Anzahl an Aufträgen in einer Charge und der rechtzeitigen Bearbeitung der Aufträge. (CHENG ET AL. 2008, CHIANG ET AL. 2008)

Die Chargenbildung wird dabei in drei Unterprobleme gegliedert (CHENG ET AL. 2008, CHIANG ET AL. 2008):

- Eigentliche Chargenbildung (engl. *batch forming*): Aufträge werden je nach Familienzugehörigkeit zu Chargen gruppiert.
- Maschinenbelegung (engl. *machine assignment*): Die Chargen werden Maschinen oder Arbeitssystemen zugeordnet.
- Reihenfolgebildung (engl. *batch sequencing*): Die den Maschinen zugeordneten Chargen werden nach ihrer Priorität sortiert.

Im Falle des lokalen Suchverfahrens wird ein Produktionsplan der Chargenarbeitssysteme dadurch erstellt, dass immer, wenn ein Chargenarbeitssystem für die Bearbeitung neuer Aufträge frei wird, diesem eine Charge zugeordnet wird. Dafür wird ein Verspätungsvektor definiert und die Chargen innerhalb einer Familie nach der Größe des Verspätungsvektors sortiert. Von allen Chargen mit familienspezifisch kleinsten Verspätungsvektoren wird diejenige Charge auf das Chargenarbeitssystem eingeplant, die den Auftrag mit dem frühesten Plan-Fertigstellungstermin bein-

haltet. Somit wird die Maschine implizit durch den Zeitpunkt ihres Freiwerdens der Charge zugeordnet. Der so erstellte Produktionsplan (Maschinenbelegungsplan) wird dann mit Hilfe eines lokalen Suchverfahrens optimiert, wobei die Chargen bestehen bleiben und nur noch die Reihenfolge sowie die Zuordnung zu den Chargenarbeitssystemen verändert werden. (CHIANG ET AL. 2008)

Der memetische Algorithmus baut auf dem in MÖNCH ET AL. (2005) beschriebenen *Batched Apparent Tardiness Cost*-Verfahren auf und generiert damit einen initialen, gültigen Maschinenbelegungsplan, der dann optimiert wird ohne die Chargenzusammensetzungen nochmals zu verändern. Es werden also nur die Zuordnungen der Chargen zu Arbeitssystemen sowie die Reihenfolge der Bearbeitung der Chargen verändert, um einen optimalen Maschinenbelegungsplan zu erhalten. Der memetische Algorithmus besteht aus einem Genetischen Algorithmus, mit dessen Hilfe auf bekannte Weise Populationen erzeugt werden. Für den Fall, dass das beste Individuum in einer aktuellen Generation besser ist als das beste Individuum der Vorgängergeneration, wird für dieses eine lokale Nachbarschaftssuche durchgeführt. (CHENG ET AL. 2008)

Beide Ansätze werden in Simulationsstudien gegenüber Referenzverfahren getestet. Dabei wird die Überlegenheit der entwickelten Verfahren hinsichtlich der Güte der Lösung und der Recheneffizienz nachgewiesen (CHENG ET AL. 2008, CHIANG ET AL. 2008). Im Falle des lokalen Suchverfahrens steigt der Grad der Überlegenheit mit der Problemgröße an (CHIANG ET AL. 2008). Die Autoren sehen in ihren Ansätzen das Potenzial, diese zu echtzeitfähigen Steuerungsverfahren auszubauen und sie damit in realen Produktionsumgebungen einsetzen zu können.

2.3.6 Berücksichtigung von Zustandsgrößen des Produkts in der Produktionssteuerung

2.3.6.1 Herausforderungen

Die industrielle Produktion steht derzeit zahlreichen Herausforderungen gegenüber. Trends zur steigenden Individualisierung von Produkten (ZÄH ET AL. 2003, DENKENA ET AL. 2010, LANZA & PETERS 2012) und kürzer werdenden Lieferzeiten (MCFARLANE ET AL. 2003, ZÄH ET AL. 2011, LANZA & PETERS 2012) führen zusammen mit einer Verkürzung von Produktlebenszyklen (HUANG ET AL. 2008A) und der Internationalisierung der Märkte (ZÄH ET AL. 2003, COLLEDANI & TOLIO 2006) zu einer steigenden herzustellenden Variantenvielfalt (MCFARLANE ET AL.

2003) sowie unverändert hohem Kosten- (ZBIB ET AL. 2008), Qualitäts- (COLLEDANI & TOLIO 2006) und Innovationsdruck (ZÄH ET AL. 2003) für die Unternehmen. Gleichzeitig sinkt die Prognostizierbarkeit des Verhaltens der Kunden (ZÄH ET AL. 2003, COLLEDANI & TOLIO 2006, LANZA & PETERS 2012). Gemeinsam formen diese Entwicklungen ein turbulentes Produktionsumfeld, das unternehmensintern eine gesteigerte Komplexität im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung zur Folge hat (SCHUH ET AL. 2007, ZÄH ET AL. 2010, SCHOLZ-REITER ET AL. 2010). Dabei findet eine Verschiebung der Bedeutung von der Produktionsplanung hin zur Produktionssteuerung statt (LÖDDING 2005, S. 2 f.).

Konventionelle Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme sind in der Regel diesen Herausforderungen nicht gewachsen (VALCKENAERS & VAN BRUSSEL 2005, BÖSE & WINDT 2007), da sie aufgrund ihres hierarchischen, zentralistischen Aufbaus zwar unter statischen Bedingungen sehr effizient sind (MCFARLANE ET AL. 2003, SCHOLZ-REITER ET AL. 2010), jedoch nicht flexibel (REINHART ET AL. 2011) und nur langsam (BÖSE & WINDT 2007) auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren können (SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007). Ebenfalls basieren sie auf Vergangenheitsdaten (SCHUH 2006B, REINHART ET AL. 2011) und verfügen über eine hohe Störanfälligkeit im turbulenten Umfeld (BONGAERTS ET AL. 2000, SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007), was dazu führt, dass Produktionspläne schon kurze Zeit nach Arbeitsbeginn nicht mehr aktuell sind (VALCKENAERS & VAN BRUSSEL 2005).

Aus diesem Grund wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, die auf dezentralen Elementen beruhen. Forscher sind sich darüber einig, dass so die Anforderungen an Flexibilität und Reaktivität erfüllt werden können (MCFARLANE ET AL. 2003, LIU ET AL. 2005A, SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007). Dabei nimmt der erhöhte Kundenauftragsbezug in der Produktion und Logistik (AURICH ET AL. 2006, ZÄH & OSTGATHE 2009) sowie das Verwenden intelligenter Objekte als Produkte eine Schlüsselrolle ein (CHEMNITZ ET AL. 2010). Insbesondere ist dies von Bedeutung, da die Logistikleistung ein entscheidender Wettbewerbsfaktor ist, der auf der Verwendung von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien beruht (WIENDAHL 1997, S. 249 ff. & S. 259).

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen für intelligente Produkte, z. B. nach MCFARLANE ET AL. (2003) oder SCHOLZ-REITER & FREITAG (2007). Hier soll die Definition von ZBIB ET AL. (2008) Anwendung finden, die mehrere Abstufungen intelligenter Objekte bzw. Produkte unterscheidet (vgl. Abbildung 14). Die einfachste Form eines intelligenten Produkts ist demnach durch ein eindeutiges Identifikationsmerkmal charakterisiert, wobei ZBIB ET AL. (2008) anmerken, dass diese

bereits sehr weit in der Industrie verbreitet sind. Intelligente Produkte der Klasse 2, zu denen mit RFID gekennzeichnete Objekte gehören, sind gerade dabei sich auszubreiten, wohingegen Produkte der Klasse 3 und 4 noch nicht in der industriellen Anwendung angekommen sind (ZBIB ET AL. 2008).


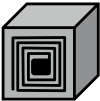
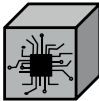
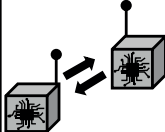
| Intelligente Objekte | | | | |
|----------------------|---|---|---|---|
| | Klasse 1 | Klasse 2 | Klasse 3 | Klasse 4 |
| |  |  |  |  |
| Fähigkeiten | Identifikation | Identifikation | Identifikation | Identifikation |
| | - | Speicherplatz | Speicherplatz | Speicherplatz |
| | - | - | Intelligente Datenverarbeitung | Intelligente Datenverarbeitung |
| | - | - | - | Interaktion/ Kommunikation |

Abbildung 14: Klassen eines intelligenten Produkts nach ZBIB ET AL. (2008), Darstellung: OSTGATHE (2012, S. 54), REINHART ET AL. (2013)

Mit Hilfe dieser intelligenten Produkte ist es möglich, als Grundlage der Produktionsplanung und -steuerung ein exaktes und echtzeitnahes, betriebsbegleitendes Abbild von Produkt-, Prozess- und Ressourcenzuständen zu generieren (ZÄH ET AL. 2010). Damit können Objekte auf ihrem Weg durch die Produktion verfolgt werden (ZÄH ET AL. 2011) und es wird so der Regelkreis der Produktionssteuerung geschlossen (ZÄH ET AL. 2009). In Verbindung mit der hohen Datenverfügbarkeit auf der Werkstattebene (DENKENA ET AL. 2005, ZÄH ET AL. 2010) und der damit befähigten dezentralen Entscheidungsfindung kann so eine wirtschaftliche Herstellung von individuellen Produkten (ZÄH ET AL. 2011) mit Hilfe einer robusten, adaptiven Produktionsplanung und -steuerung sichergestellt werden (SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007, ZÄH ET AL. 2010). Ebenfalls wird so eine Reduktion der Komplexität herbeigeführt (BONGAERTS ET AL. 2000).

2.3.6.2 Lösungsansätze

Aufgrund der Tatsache, dass heterarchische, dezentrale Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme bezüglich der Vorhersagbarkeit des Systemverhaltens und der Fähigkeit ein globales Optimum zu erreichen, hinter hierarchischen, zentralen Systemen zurückbleiben (BONGAERTS ET AL. 2000, ZÄH ET AL. 2011), werden hybride Systemarchitekturen vorgeschlagen, die die Vorteile der Dezentralität mit denen der Zentralität vereinen (REINHART ET AL. 2011, ZÄH ET AL. 2011). Das Themenfeld der intelligenten Produkte wird dabei in einer Vielzahl an Publikationen behandelt. Daher seien nachfolgend lediglich die für diese Arbeit relevanten Forschungsaktivitäten erläutert.

Ein weitverbreiteter Ansatz um Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme mit dezentralen Elementen zu realisieren, ist die Verwendung von sogenannten Software-Agenten (MONOSTORI ET AL. 2006). Diese sind als verteilte, interagierende Software-Module zu verstehen, die jeweils Produkten und Ressourcen des Fertigungsumfelds entsprechen (MCFARLANE ET AL. 2003). Die Entscheidungsfindung im Sinne der Produktionsplanung und -steuerung erfolgt dann durch die autonome Kooperation bzw. Verhandlungen zwischen diesen Agenten (BONGAERTS ET AL. 2000). PPS-Systeme, die auf Agenten beruhen, werden daher auch als Multi-Agenten-Systeme bezeichnet (MCFARLANE ET AL. 2003). Dabei können mit Hilfe von Agenten auch hybride Systeme unterschiedlichster Ausprägung gestaltet werden, indem zusätzlich zu den lokalen, objektbezogenen auch zentrale Agenten eingeführt werden, die eine Optimierung der globalen Leistungsfähigkeit des Fertigungssystems als Ziel haben (BONGAERTS ET AL. 2000). Somit kann mit Hilfe von Agenten sowohl eine gute Robustheit gegenüber unvorhergesehenen Ereignissen als auch eine globale Optimierung und Vorhersagbarkeit des Systemverhaltens erreicht werden (BONGAERTS ET AL. 2000). Ein derartiges Produktionssteuerungssystem wird bspw. von MCFARLANE ET AL. (2003) oder LIU ET AL. (2005A) vorgestellt.

Ebenfalls wird im Forschungsprojekt *Selbstorganisierende Produktion* (SOPRO) ein Multi-Agentensystem vorgestellt, das technologisch dadurch umgesetzt wird, dass sowohl Produkte als auch Fertigungsressourcen mit sogenannten Process-eGrains ausgerüstet werden und so in der Lage sind, mit anderen Partnern des Produktions-Netzwerks aktiv zu kommunizieren. Die Process-eGrains gehen in ihrem Funktionsumfang deutlich über die RFID-Technologie hinaus und stellen besonders robuste und kostengünstige, hochminiaturisierte Funksensorknoten mit autarker Energieversorgung dar. Sie können Informationen dezentral erfassen und speichern. Das Teilprojekt der produktgesteuerten Fertigung widmet sich der

Auftragssteuerung mit dem Ziel einer Flexibilisierung der Fertigungsabläufe sowie einer Selbststeuerung der Bearbeitungsprozesse an den Arbeitssystemen. Die entwickelten Steuerungsmethoden bauen maßgeblich auf der Nutzung der ProcessGrains auf. (CHEMNITZ ET AL. 2010)

Eng verwandt mit den Agenten-Systemen ist das Konzept der Holonen, die jedoch nur über einen gewissen Grad an Autonomie verfügen und gleichzeitig in ein Gesamtsystem eingebunden sind (BONGAERTS ET AL. 2000). Durch diesen hybriden Aufbau wird versucht, die Vorteile hierarchischer und heterarchischer Systeme zu vereinen und gleichzeitig die Nachteile zu vermeiden (BONGAERTS ET AL. 2000). Von anderen Autoren wie MCFARLANE ET AL. (2003) werden Holone als komplementär zum Agenten-Ansatz gesehen. Für sie ist das Konzept der Holonischen Produktion ein Ansatz des *Systems Engineering*, d. h. kein Produktionsplanungs- und -steuerungsansatz im eigentlichen Sinne (MCFARLANE ET AL. 2003).

Weiterführend stellt OSTGATHE (2012) ein „System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage“ vor, in dem das Produkt als zusätzliches Element zur Produktionssteuerung herangezogen wird. Die Systembestandteile

- „Datenmodell für adaptive Produktionssysteme“,
- „Wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement“ und
- „Organisationsstruktur für das System zur produktbasierten Steuerung“

machen es hier möglich, dass die mit passiven RFID-Transpondern ausgestatteten Produkte zustandsbezogen durch die Fertigung gesteuert werden. Die Forschungsarbeiten werden in einer Modellfabrik prototypisch umgesetzt und evaluiert. Die Leistungsfähigkeit des neuartigen Systems wird damit unter der Verwendung bekannter Steuerungsalgorithmen sowohl experimentell als auch simulativ nachgewiesen.

Im Sonderforschungsbereich (SFB) 637 der Universität Bremen zum Thema *Selbststeuerung logistischer Prozesse* soll das Paradigma der Selbststeuerung für Anwendungen in der Logistik nutzbar gemacht werden. Hierfür wird die dezentrale Koordination autonomer logistischer Objekte in einer heterarchischen Organisationsstruktur beschrieben. Die technischen Voraussetzungen für dieses Vorhaben werden durch den Einsatz neuartiger Informations- und Kommunikationstechnologien, wie bspw. RFID, bereitgestellt. Aufbauend auf deren Fähigkeiten soll der

Übergang von der Fremdsteuerung zur Selbststeuerung bzw. zur Kombination aus beidem gestaltet werden. (FREITAG ET AL. 2004).

Der SFB 653 *Genetik und Intelligenz – Neue Wege in der Produktionstechnik* der Universität Hannover hat sich zum Ziel gesetzt, die physikalische Trennung von Bauteilen und den zugehörigen Informationen zu beenden. Die Vision ist hier, sogenannte *gentelligente* (ein Kunstwort zusammengesetzt aus den Worten *genetisch* und *intelligent*) Bauteile zu schaffen, denen die notwendigen Informationen untrennbar eingeprägt sind (DENKENA ET AL. 2005). Neben Forschungsarbeiten zur Einbringung von Informationen in die Bauteile und der Erforschung neuartiger Sensortechnologien werden auf der Nutzung *gentelligenter* Bauteile aufbauende Methoden zur Produktionssteuerung und Zustandsüberwachung entwickelt (DENKENA ET AL. 2005, VAN THIEL 2013). In diesem Zusammenhang stellt NYHUIS ET AL. (2009) eine bauteilgetriebene Montagesteuerung vor, die auf gentelligen Bauteilen beruht. Die entwickelte Steuerungsmethode basiert dabei auf der Prioritätsregel der geringsten Schlupfzeit. Durch die Gentelligenz kann hier ein sogenannter realer Restschlupf erfasst werden, der es erlaubt die Reihenfolgebildung situationsgetrieben durchzuführen.

Darüber hinaus werden im Forschungsvorhaben „Intelligenter Container“ Transportbehälter mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, die es erlauben mit Hilfe von Modellvorstellungen, den Zustand des Inhalts zu erfassen. Aufbauend auf dieser neu geschaffenen Transparenz, die insbesondere durch Transporte verderblicher Ware wie z. B. Obst motiviert ist, werden Steuerungsmethoden vorgestellt, die es erlauben in Abhängigkeit des Zustands des Containerinhalts dem Transport unterschiedliche Ziele innerhalb der Supply-Chain zuzuordnen. Dabei entscheidet der Container zu weiten Teilen autonom, wobei insbesondere eine Abwägung zwischen einer möglichst raschen Auslieferung des Containerinhalts und einer Lagerung getätigt werden muss. Die Forschungsaktivitäten betreffen dabei das Erarbeiten von Zustandsmodellen des Containerinhalts sowie die Methoden zur autonomen Entscheidungsfindung. (LÜTJEN ET AL. 2013)

2.3.6.3 Bezug zur Herstellung von Bauteilen aus Prepregs

Die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs ist ebenfalls von den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Trends und Entwicklungen betroffen, sodass die zugehörigen Unternehmen den selben, bereits genannten Herausforderungen gegenüberstehen. Hinsichtlich der zu beachtenden Zustandsgrößen unterscheidet sich die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs von der Herstellung metallischer Bauteile

zusätzlich dadurch, dass Prepregs eine beschränkte Lager- und Verarbeitungszeit haben. Sind die zugehörigen Zeitkontingente abgelaufen, müssen die jeweiligen Bauteile entsorgt werden, da dann die mechanischen Eigenschaften nach der Bauteilaustrittshärtung nicht mehr garantiert werden können.

Bisherige Arbeiten im Themenfeld der PPS bei der Herstellung von Bauteilen aus FVK betreffen einerseits Verfahren zum Erstellen von Produktionsplänen, die explizit Rüstzeiten und Chargenprozesse berücksichtigen (LUH ET AL. 1997). Die Arbeiten sind dabei durch eine Fertigungsumgebung zur Herstellung von Helikopter-Teilen motiviert. Andererseits schlagen DIETRICH ET AL. (2012) eine Architektur für eine agentenbasierte Steuerung mobiler Tape-Lege-Roboter vor. Die Besonderheit dabei ist, dass diese Roboter dazu geeignet sind, parallel an einem Bauteil zu arbeiten und damit die Prozesszeiten zu verkürzen. Die oben genannten spezifischen Eigenschaften von Prepregs werden jedoch in keiner der beiden Arbeiten berücksichtigt.

Folglich besteht noch Forschungsbedarf für Verfahren der Produktionssteuerung, die die beschränkten Lager- und Verarbeitungszeiten bei der Herstellung von Prepreg-Bauteilen genauso berücksichtigen wie die dort vorkommenden Chargenprozesse. Aufgrund der oben genannten Herausforderungen kann dafür der Lösungsansatz der intelligenten Produkte gewählt werden. Dieser wurde durch die Arbeiten von BERNHARD ET AL. (2011) befähigt, die RFID-Transponder für eine Anwendung in und an Bauteilen aus FVK vorstellen (siehe auch Kapitel 2.4.3).

2.4 RFID-Technologie für die Produktionssteuerung

2.4.1 Grundlagen der RFID-Technologie

Die RFID-Technologie ist eine AutoID-Technologie, deren Funktionsweise auf der drahtlosen Datenübertragung mittels elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder beruht (FINKENZELLER 2006, S. 22). Weitere AutoID-Technologien, die in Produktion und Logistik verbreitet sind, sind der Barcode oder die Klarschriftenerkennung (engl. *Optical Character Recognition*) (FINKENZELLER 2006, S. 2).

In der Literatur werden RFID-Systeme unterschiedlich definiert. FINKENZELLER (2006, S. 7) bspw. versteht darunter mindestens einen RFID-Transponder und mindestens ein Schreib-/Lesegerät. GÜNTHER ET AL. (2008, S. 6 f.) erweitern diese

Definition um die Elemente RFID-Middleware und Applikation. In der vorliegenden Arbeit sei die sehr breit gehaltene Definition von VOGELER (2009, S. 36 ff.) genutzt, nach der ein RFID-System „sämtliche Elemente von den RFID-Transpondern über Strukturen zur Aufbereitung und Weiterleitung der Daten bis hin zu anzupassenden oder neu einzuführenden betrieblichen Anwendungssystemen umfasst“. Die zugehörigen Elemente sowie deren Integration in die IT-Systeme des Unternehmens sind in Abbildung 15 zusammengefasst.

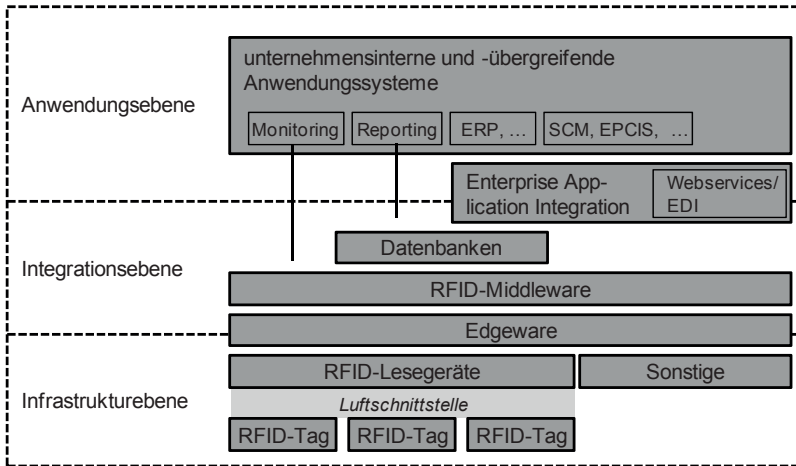


Abbildung 15: RFID-Systemelemente und Integration ins Unternehmen, in Anlehnung an VOGELER (2009, S. 37 ff.)

RFID-Tags, die auch RFID-Transponder genannt werden, sind mit den zu identifizierenden Objekten verbunden und bestehen im Wesentlichen aus einer Antenne und einem Mikrochip (Abbildung 16). In ihrem Speicher verfügen sie mindestens über eine eindeutig auslesbare Identifikationsnummer. Weitere Daten können je nach Anwendungsfall auf dem sogenannten *User Memory* abgelegt werden. RFID-Transponder existieren in unterschiedlichen Bauformen (FINKENZELLER 2006).

RFID-Schreib-/Lesegeräte, die teilweise auch Reader oder Lesegeräte genannt werden, sind Hardware-Komponenten des RFID-Systems, die die Kommunikation zum Transponder durchführen, wobei hier zusätzlich zum reinen Schreiben und Lesen auch Funktionalitäten wie bspw. Antikollisionsverfahren realisiert werden (KERN 2006, S. 33). Im Wesentlichen bestehen Schreib-/Lesegeräte aus einem

Steuerungsmodul und einem Hochfrequenz-Interface, das wiederum aus Sender und Empfänger besteht (FINKENZELLER 2006, S. 356).

Die Edgware stellt eine softwaretechnische Verbindungsschicht zwischen dem RFID-Schreib-/Lesegerät und der Middleware dar. Es werden dazu Kommunikationsprotokolle der Schreib-/Lesegeräte gekapselt sowie Daten vorgefiltert und gepuffert. Teilweise werden diese Funktionalitäten auch direkt von der Middleware übernommen. (VOGELER 2009, S. 41)

Die Middleware stellt die Schnittstelle zwischen der Infrastrukturebene, auf der sich die Geräte befinden, und der Anwendungsebene mit den entsprechenden Softwaresystemen dar und ist insbesondere bei komplexen RFID-Systemen notwendig, die z. B. in Lagerhäusern oder Lieferketten eingesetzt werden (KERN 2006, S. 183 f.). Die Middleware nimmt die Signale von den Schreib-/Lesegeräten auf und steuert diese, filtert Daten und bereitet sie zur Weiterverwendung auf, ist für den Ablauf von Teilprozessen verantwortlich und kommuniziert mit den übergeordneten Anwendungssystemen (KERN 2006, S. 183 f.). Diese sind bspw. aus dem Bereich der Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme oder der Manufacturing Execution Systeme (MES).

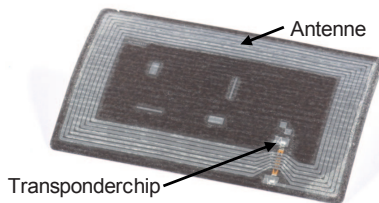


Abbildung 16: RFID-Transponder (Bild: G. Sigl, iwb)

Die RFID-Technologie zeichnet sich im Vergleich zu den übrigen AutoID-Technologien durch folgende Eigenschaften aus (FINKENZELLER 2006, S. 8):

- Großer Datenspeicher: Auf einem RFID-Transponder können bis zu 64 kByte Daten abgelegt werden. Ein Barcode verfügt lediglich über ca. 100 Byte Speicherkapazität.
- Sehr hohe Datendichte: Aufgrund der Verwendung von Halbleitern als Speicherelemente in RFID-Transpondern können vergleichsweise große Datenmengen auf kleinem Raum gehalten werden.

- Keine Sichtverbindung notwendig: Elektromagnetische Wellen bzw. elektrische oder magnetische Felder können eine große Bandbreite an Materialien ungehindert passieren. Damit können RFID-Transponder auch ohne Sichtverbindung zum Lesegerät erfasst werden.
- Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzung: Das Funktionsprinzip der RFID-Technologie, das ohne optische Elemente auskommt, bedingt eine Robustheit des Systems gegenüber Verschmutzung.
- Geringer Einfluss von Ausrichtung und Lage: Die Tatsache, dass die RFID-Technologie keine Sichtverbindung zur Kommunikation zwischen Transponder und Lesegerät benötigt, hat zur Folge, dass die Transponder in nahezu beliebiger räumlicher Lage gelesen werden können.
- Geringe Abnutzung und Verschleiß: Aufgrund des berührungslosen Funktionsprinzips und der Möglichkeit durch bestimmte Materialien hindurch zu lesen und zu schreiben, können die Elemente eines RFID-Systems so gestaltet werden, dass sie keiner Abnutzung oder Verschleiß unterliegen.
- Hohe Lesegeschwindigkeit: Die hohen Lesegeschwindigkeiten bei RFID-Systemen beruhen auf der einfachen Handhabung der Systeme und der Geschwindigkeit der Datenkommunikation über Radiowellen.
- Hohe Lesereichweite: Abhängig von der gewählten Betriebsfrequenz des RFID-Systems und vom Vorhandensein einer Energieversorgung im RFID-Transponder (z. B. Batterie) können Lesereichweiten von mehreren Metern erreicht werden. Bei einem Barcode-System ist die Lesereichweite auf ca. 50 cm beschränkt.

Für Anwendungen der RFID-Technologie kommen hauptsächlich vier Frequenzbereiche zum Einsatz. Diese sind (FINKENZELLER 2006):

- Low Frequency (LF), <135 kHz
- High Frequency (HF), 13,56 MHz
- Ultra High Frequency (UHF), 868 MHz bzw. 915 MHz
- Mikrowelle (MW), 2,5 GHz bzw. 5,8 GHz

Für weitere Informationen zur Funktionsweise der RFID-Technologie und deren Anwendungen sei auf die einschlägige Fachliteratur, z. B. FINKENZELLER (2006) oder KERN (2006), verwiesen.

2.4.2 Nutzenpotenziale der RFID-Technologie in der Produktion

Um die in Kapitel 2.3 beschriebenen Funktionen ausführen zu können, beinhaltet die Produktionsplanung und -steuerung umfangreiche Datenverwaltungs- und -aktualisierungsaufgaben (HACKSTEIN 1989, S. 5, MÜLLER 2004, S. 17 ff.). Voraussetzung für eine robuste und flexibel reagierende Produktionsplanung und -steuerung ist daher das Bereitstehen aussagekräftiger und aktueller Daten über den Zustand der betrachteten Produktion (KURBEL & ENDRES 2005, REINHART ET AL. 2011). Dies wird auch als Transparenz (REINHART ET AL. 2011) oder Sichtbarkeit (engl. *visibility*) (POON ET AL. 2007) bezeichnet.

Konventionelle Technologien der Datenerfassung, zu denen die manuelle Datenerfassung und der Barcode zählen, sind dabei verhältnismäßig langsam und fehleranfällig und aus diesem Grund nicht akkurat (DIEKMANN ET AL. 2007, HUANG ET AL. 2008B). Deshalb breitet sich die Anwendung der RFID-Technologie immer weiter auf den Bereich der Produktion aus (HUANG ET AL. 2008A, HUANG ET AL. 2009), wodurch die Transparenz gesteigert und somit ein sehr exaktes Datenabbild generiert werden kann (MCFARLANE ET AL. 2003, POON ET AL. 2007, DIEKMANN ET AL. 2007, REINHART ET AL. 2011). Es wird dabei auch von Tracking- und Tracing-Daten gesprochen, wenn Datensätze über die Identität von Objekten, deren Erfassungsort und die Erfassungszeit im zeitlichen Verlauf gemeint sind. Diese Daten werden dann für die Entscheidungsfindung in Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen genutzt, wodurch diese Zustandsänderungen in der Produktion schnell erkennen und adäquat Reaktionen einleiten können (MCFARLANE ET AL. 2003, HUANG ET AL. 2008B, HUANG ET AL. 2009). Ebenfalls wird so eine Optimierung der Produktionsabläufe möglich (JÜNEMANN & BEYER 1998, S. 11). Aus beidem resultieren bspw. reduzierte Bestände, kürzere Durchlaufzeiten, höhere Maschinenauslastungen und eine größere Termintreue (HUANG ET AL. 2009), also ein verbesserter Erreichungsgrad der logistischen Zielgrößen (vgl. Abbildung 10). Aus der Unternehmenssicht bedeutet dies eine Effizienzsteigerung, die sich in sinkenden Herstellungskosten auswirkt, wohingegen aus Kundensicht die Zufriedenheit steigt (POON ET AL. 2007). Weiterführende Nutzenpotenziale können HUANG ET AL. (2009) entnommen werden.

Wenn die RFID-Technologie neben der Identifikation auch als Element zur dezentralen Datenhaltung genutzt wird, stehen weitere Potenziale insbesondere hinsichtlich Reaktivität (BONGAERTS ET AL. 2000, POON ET AL. 2007), Flexibilität (BONGAERTS ET AL. 2000, MCFARLANE ET AL. 2003, HUANG ET AL. 2011) und Datenverfügbarkeit auf der Werkstattebene (REINHART ET AL. 2011) zur Verfügung.

Außerdem sinkt die Steuerungskomplexität (BONGAERTS ET AL. 2000). Des Weiteren wird der Einsatz von Elementen der Selbststeuerung in der Produktionsplanung und -steuerung befähigt (REINHART ET AL. 2011). Zahlreiche im Kapitel 2.3 genannte Produktionssteuerungsverfahren beruhen deshalb auf der technologischen Befähigung durch RFID.

2.4.3 RFID-Technologie im Umfeld der Faserverbundwerkstoffe

Was die Herstellung von Bauteilen aus FVK betrifft, so sind die im vorherigen Kapitel genannten Nutzenpotenziale weiterhin gültig. Damit die RFID-Technologie jedoch im Umfeld dieser Werkstoffe angewendet werden kann, sind zunächst die Wechselwirkungen zwischen der Identifikationstechnologie und den Materialien zu betrachten. Einflüsse auf die Funktion von RFID-Systemen können dafür nach REUTER (1994) oder VDI 4005 klassifiziert werden. Speziell für eine Anwendung der RFID-Technologie im Umfeld der FVW wurden von BERNHARD ET AL. (2011) Untersuchungen mit GFK und CFK vorgenommen.

Der Einfluss von Glasfasern, die nicht leitfähig sind, kann demnach mit dem von Dielektrika verglichen werden. Es wird folglich die Kommunikation von LF-RFID durch GFK nicht beeinflusst. Die Kommunikation von HF-RFID wird durch diese Materialien nur sehr wenig beeinflusst und verursacht eine geringfügige Verschiebung der Resonanzfrequenz. Aufgrund der Kopplung über elektromagnetische Wellen sind die Effekte auf die Kommunikation von UHF-RFID andere. Hier muss GFK als verlustbehaftetes Material, zu denen auch einige weitere Kunststoffsorten gehören, klassifiziert werden. Das Resultat ist ebenfalls eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. (BERNHARD ET AL. 2011)

Kohlenstofffasern sind im Gegensatz zu Glasfasern elektrisch leitfähig, sodass CFK in seinem Einfluss eher Metallen ähnelt. Die Leitfähigkeit von CFK ist zudem abhängig von der Struktur und Ausrichtung der Fasern. Insgesamt ist jedoch die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern geringer als diejenige von Metallen. Analog zu GFK sind die Effekte auf die Kommunikation von LF-RFID am geringsten. Trotz der Leitfähigkeit kann durch bis zu 16 Lagen CFK hindurch gelesen werden, was jedoch eine reduzierte Auslesereichweite zur Folge hat. Im Bereich des HF-RFID wird durch das CFK-Material die Induktivität der Antenne verringert, sodass deren Resonanzverhalten derart verstimmt ist, dass ein Auslesen nicht mehr möglich ist. Ebenfalls verschlechtert sich der Gütefaktor. Dieser Effekt kann jedoch durch eine entsprechende Verstimmung der HF-Antenne kompensiert werden. Mit dieser Maßnahme können HF-RFID-Transponder auf der Oberfläche

von CFK genutzt werden, wobei keine Ferrit-Abschirmung notwendig ist, sondern nur ein Abstand von ca. 1 mm. Bei entsprechender Einstellung der Antenne kann HF-RFID durch eine Schicht CFK hindurch gelesen werden. Bei UHF-RFID sind die Effekte aufgrund der Kommunikation über elektromagnetische Wellen wieder andere. CFK reflektiert und dämpft diese Wellen. Dadurch verhält sich ein UHF-RFID-Transponder, der mit einem Abstand auf eine CFK-Oberfläche aufgebracht wird, ähnlich wie auf einer Metalloberfläche, wobei der Transponder ohne den Abstand auf CFK nicht funktionsfähig wäre. Ebenfalls ist das Lesen durch CFK hindurch mit UHF-RFID nicht möglich. (BERNHARD ET AL. 2011)

Basierend auf den im vorherigen Kapitel genannten Grundlagen und der beschriebenen Motivation konnten im Forschungsprojekt „Einsatz von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen“, das von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert wurde (AZ-835-08), für die Frequenzbereiche LF, HF und UHF RFID-Transponder entwickelt werden, die speziell für eine Anwendung auf FVW optimiert sind. Der Autor war an diesen Forschungsaktivitäten beteiligt.

Für den Bereich LF-RFID präsentieren REINHART ET AL. (2012) einen Transponder, dessen Spulenantenne auf CFK oder GFK aufgenäht wird. Der zugehörige Transponderchip wird danach maschinell aufgesetzt und mit der Antenne galvanisch verbunden. Anschließend kann dieser Transponder im Sinne einer zusätzlichen Lage des CFK- oder GFK-Bauteils verarbeitet werden. Nach der Imprägnierung mit Harz und dem Aushärten sind Bauteil und LF-RFID-Transponder untrennbar miteinander verbunden (vgl. Abbildung 17). Es können Lesereichweiten von einigen cm erreicht werden. (REINHART ET AL. 2012)

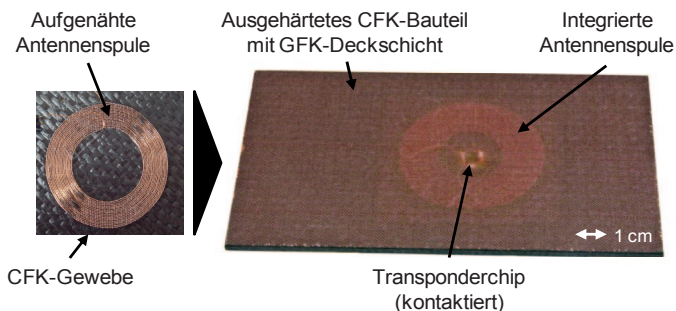


Abbildung 17: Integrierter LF-RFID-Transponder (REINHART ET AL. 2012)

Für den Bereich HF- und UHF-RFID stellen BERNHARD ET AL. (2011) in FVW integrierbare Transponder vor. Diese sind so in die Bauteile eingebettet, dass auf der Grundlage eines Bauteils aus CFK eine Schicht GFK als Abstandshalter aufgebracht wird, auf die der RFID-Transponder gesetzt wird. Als Deckschicht über dem RFID-Transponder wird ebenfalls eine GFK-Schicht genutzt. Mit den in Abbildung 18 dargestellten Transpondern sind Auslesereichweiten von ca. 1,5 cm (HF) bzw. 1,6 m (UHF) realisierbar. (BERNHARD ET AL. 2011)

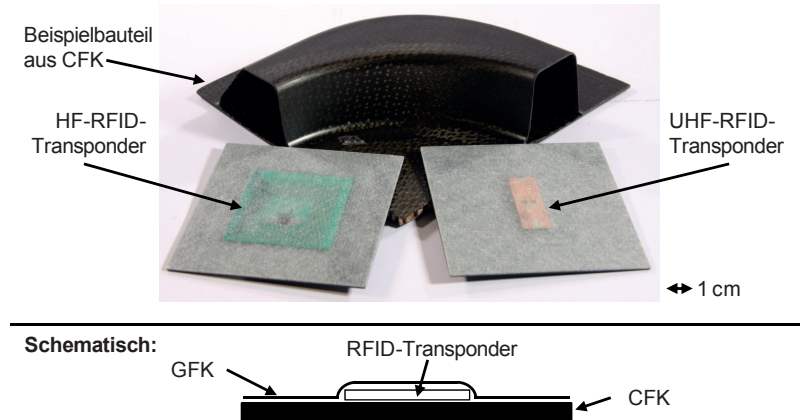


Abbildung 18: Integrierte HF- und UHF-RFID-Transponder
(BERNHARD ET AL. 2011)

Um die elektrische Sicht der Transponderintegration um die Sicht der Mechanik bzw. der Strukturfestigkeit zu erweitern, beschreiben ZETTLER ET AL. (2011) statische und dynamische 4-Punkt-Biegeversuche, die mit CFK-Platten, die über integrierte RFID-Transponder verfügen, durchgeführt wurden. Die Art der Integration entspricht dabei Abbildung 18. Das Fazit der Arbeiten von ZETTLER ET AL. (2011) besteht aus drei Teilen. Auf der einen Seite konnten sie qualitativ und quantitativ nachweisen, dass eine Integration des RFID-Transponders dem Bauteil zusätzliche Steifigkeit bringt und somit in keinem Fall das Bauteil schwächt. Auf der anderen Seite konnte bereits im Prototypenstatus, der den Untersuchungen zugrunde liegt, nachgewiesen werden, dass die RFID-Transponder ausreichend robust sind, sodass sie bei *normaler* mechanischer Beanspruchung der Faserverbund-Bauteile voll funktionsfähig bleiben. Als drittes Element leiten ZETTLER ET AL. (2011) Richtlinien ab, die die mechanische Integration von RFID-Transpondern betreffen.

Untersuchungen von Anwendungen der RFID-Technologie im realen Fabrikumfeld der Faserverbundherstellung werden in REINHART ET AL. (2010) sowie in der eingebundenen Publikation P1 beschrieben. Dabei werden passive HF- und UHF-RFID-Systeme in einer realen Fertigung getestet. Unterschiedliche Positionen der RFID-Transponder auf einem Musterbauteil werden dabei mit unterschiedlichen Ausleseszenarien kombiniert (Abbildung 19). Für die Versuche werden passive RFID-Transponder genutzt, die für eine Verwendung auf Metall optimiert sind, sogenannte On-Metal-Tags. Das Versuchsergebnis war eine Übersicht der Auslese-rate in Abhängigkeit von der Transponderposition und dem Ausleseszenario. Hier konnten die leistungsfähigsten Kombinationen Ausleseraten nahe 100 % erreichen. Zusätzlich wurde die Pulkauslesung untersucht. Als Fazit weisen die Arbeiten von REINHART ET AL. (2010) die prinzipielle Anwendbarkeit der RFID-Technologie im realen Umfeld der Faserverbundfertigung nach. Darauf aufbauend werden in P1 in einer Simulationsstudie die Nutzenpotenziale der RFID-Anwendung für die logistische Zielerreichung bei der Herstellung von Bauteilen aus FVW nachgewiesen.

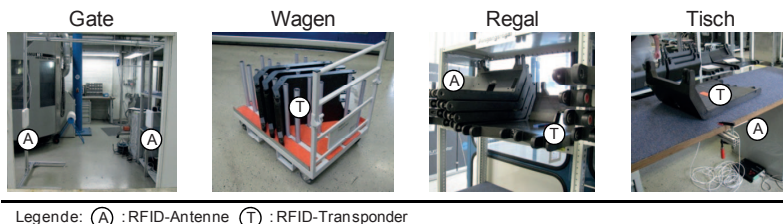


Abbildung 19: RFID-Ausleseszenarien im realen Umfeld
(REINHART ET AL. 2010, P1)

3 Konzeption der Produktionssteuerungsverfahren

3.1 Überblick

In diesem Kapitel wird das den entwickelten Produktionssteuerungsverfahren zugrundeliegende Konzept erläutert. Dafür werden in Kapitel 3.2 zunächst die Anforderungen an Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs in aggregierter Form dargestellt sowie der zugehörige Handlungsbedarf abgeleitet. Diese Inhalte basieren auf der in P2 dargestellten Anforderungsanalyse, den in P5 präsentierten Ergebnissen einer Umfrage zur Produktionssteuerung bei der Herstellung von Prepreg-Bauteilen und den in P1 beschriebenen Untersuchungen (vgl. Abbildung 1). Danach wird in Kapitel 3.3 eine Modellvorstellung der Produktion von Bauteilen aus Prepregs eingeführt. Dafür werden einerseits die Arbeitsstationen und zugehörige Puffer beschrieben (Kapitel 3.3.4) und andererseits Bauteile bzw. Aufträge (Kapitel 3.3.3) und Rohmaterialien in Form von Prepreg-Rollen (Kapitel 3.3.2). Zusätzlich werden die Systemgrenzen der Betrachtungen und relevante Parameter definiert. Für die Darstellung des Modells der Produktion von Bauteilen aus Prepregs wird im weiteren Verlauf die *Unified Modeling Language* (UML), genauer das *Klassendiagramm* und das *Zustandsdiagramm*, genutzt. Eine Einführung in die Diagramme der UML kann CZUCHRA (2010) entnommen werden. Darauf aufbauend werden im Kapitel 3.4 die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Produktionssteuerungsverfahren konzipiert. Für eine detaillierte Erläuterung dieser Verfahren wird auf die eingebundenen Publikationen P3, P4 und P5 verwiesen (vgl. Abbildung 1).

3.2 Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel wird die Herstellung von FVK aus der Sicht der Produktionssteuerung analysiert. Fokussiert wird dabei die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs. Es werden dafür zunächst in P2 im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche besondere Eigenschaften beschrieben, woraus Anforderungen an die Produktionssteuerung entstehen. Danach wird ebenfalls in P2 der Handlungsbedarf abgeleitet, der zu bedienen ist, um Produktionssteuerungsverfahren zu entwickeln, die speziell auf die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs angepasst sind. Diese Inhalte werden durch die in P5 präsentierten Ergebnisse einer Umfrage bei Unternehmen, die Bauteile aus Prepregs herstellen, bestätigt und ergänzt.

Es ergeben sich folgende Anforderungen, wobei lediglich diejenigen betrachtet werden, die spezifisch für die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs sind:

1. Berücksichtigung der temperatur- und zeitabhängigen Werkstoffeigenschaften in der Produktionssteuerung: Die aus diesen Werkstoffeigenschaften resultierenden beschränkten Lager- und Verarbeitungszeiten der Prepregs müssen während des gesamten Herstellungsprozesses eingehalten und dokumentiert werden. Aus diesem Grund bietet es sich an, den Werkstoffzustand als zusätzliche Einflussgröße in die Produktionssteuerung aufzunehmen, um so bspw. Reihenfolgen aufgrund ablaufender Verarbeitungszeiten ändern zu können.
2. Steuerung der Bereitstellung der Prepreg-Rollen: Der Übergang von auftragsneutralen Prepreg-Rollen in auftragsspezifische Zuschnitte muss explizit betrachtet werden. Durch die Tatsache, dass die Prepreg-Rollen unterschiedliche Eigenschaften haben, sind diese nur in begrenztem Maße für mehrere Aufträge nutzbar. Darüber hinaus ist deren Bereitstellung aufgrund des Auftauprozesses mit Totzeiten behaftet. Für diesen Prozess ist somit eine gewisse Vorausschau notwendig.
3. Integration der Zwischenlagerungsmöglichkeiten: Die in industriellen Fertigungsumgebungen vorhandenen Rück- und Zwischenlagerungsmöglichkeiten der Herstellung von Prepreg-Bauteilen müssen in die Produktionssteuerung integriert werden. Es können dabei sowohl Prepreg-Rollen als auch Zuschnitte und Laminare in gekühlte Räume zurückgelagert werden, wodurch die mit der Temperaturabhängigkeit assoziierten Verarbeitungszeiten eingehalten und Ausschuss vermieden werden. Aufgrund der Zeiten für das Kühlen und das erneute Auftauen muss hier ebenfalls eine Vorausschau stattfinden und stets über die gekühlte Zwischenlagerung als Alternative zum Belassen der Werkstoffe bei Raumtemperatur abgewogen werden.
4. Optimierung der Chargenbildung: Wie in P2 und P4 erwähnt, stellt der Autoklav den Engpass der Herstellung von Prepreg-Bauteilen dar und muss daher als kapazitätsbestimmendes Element der gesamten Fertigung im Detail betrachtet werden. Es gilt hier, die Chargenbildung derart zu optimieren, dass die dem Autoklaven vorgelagerten Fertigungsschritte, die in Losgröße eins ablaufen, in idealer Weise auf diesen abgestimmt sind. Es muss somit die Möglichkeit geschaffen werden, den Durchsatz zu maximieren und gleichzeitig bauteilbezogene Fertigungskosten zu minimieren. Zusätzlich ist der

Autoklav diejenige Arbeitsstation, die die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften der Prepregs beendet. Aus diesem Grund muss der Werkstoffzustand in Form der verbleibenden Lager- und Verarbeitungszeiten bei den Entscheidungen zur Chargenbildung berücksichtigt werden.

5. Aufwandsarme Fertigungsdokumentation: Die Dokumentation der Fertigungsabläufe im Bereich der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs ist von herausragender Bedeutung, weshalb dafür große Aufwände betrieben werden (vgl. P1). Insbesondere gilt dies für die in der Luftfahrtbranche vorherrschenden Dokumentationspflichten. Die Aufwände sind dabei durch den manuellen Charakter der Dokumentationsaufgaben begründet. Um hier neben dem Aufwand auch die Fehleranfälligkeit zu reduzieren, sollten diese Aufgaben automatisiert durchgeführt werden. Die so erfassten Daten können dann ebenfalls als Grundlage für die Entscheidungen in der Produktionssteuerung verwendet werden.

Da die erarbeiteten Anforderungen durch bestehende Verfahren und Methoden der Produktionssteuerung nicht abgedeckt werden (vgl. P2), ergibt sich der Handlungsbedarf als Differenz zwischen den Anforderungen der Herstellung von Prepreg-Bauteilen und den Eigenschaften bestehender Produktionssteuerungsverfahren. Dieser wird durch die Entwicklung neuartiger Produktionssteuerungsverfahren adressiert.

Die Anforderungen nach der Steuerung der Bereitstellung der Prepreg-Rollen (Nr. 2) sowie der optimierten Chargenbildung am Autoklaven (Nr. 4) betreffen dabei abgegrenzte Bereiche in der Fertigung. Sie können daher durch jeweils spezifische Verfahren adressiert werden. Diese werden im weiteren Verlauf *Verfahren zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen* und *Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven* genannt. Im Unterschied dazu können die Anforderungen nach der Berücksichtigung der temperatur- und zeitabhängigen Werkstoffeigenschaften, der Integration der Zwischenlagerungsmöglichkeiten sowie die aufwandsarme Fertigungsdokumentation nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Aus diesem Grund müssen sie auch durch ein einziges Fertigungssteuerungsverfahren adressiert werden, das im Folgenden als *Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung* bezeichnet wird. Die schwerpunktmäßige Umsetzung der Anforderungen ist in Abbildung 20 mit schwarzen Markierungen visualisiert.

Neben dieser schwerpunktmäßigen Umsetzung der Anforderungen müssen die zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften sowie die Anforderung zur aufwandsarmen Dokumentation auch für das *Verfahren zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen* und das *Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven* berücksichtigt werden. Dieser Umstand ist in Abbildung 20 durch graue Markierungen dargestellt.

| | | Verfahren... | | |
|---------------|---|---|---|--|
| | | ...zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen (P3) | ...zur kühnkettensüberwachenden Reihenfolgebildung (P5) | ...zur Chargenbildung am Autoklaven (P4) |
| Anforderungen | 1. Berücksichtigung temperatur- und zeitabhängiger Werkstoffeigenschaften | ● | ● | ● |
| | 2. Steuerung der Bereitstellung der Prepreg-Rollen | ● | | |
| | 3. Integration der Zwischenlagerungsmöglichkeiten | | ● | |
| | 4. Optimierung der Chargenbildung | | | ● |
| | 5. Aufwandsarme Fertigungsdokumentation | ● | ● | ● |

Legende: ● Schwerpunktmäßige Umsetzung der Anforderung
 ● Teilweise Umsetzung der Anforderung

Abbildung 20: Umsetzung der Anforderungen in Produktionssteuerungsverfahren

Damit die Produktionssteuerungsverfahren ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten können, ist eine detaillierte Datenbasis notwendig, die aktuelle und zukünftige Zustände in der Fertigung beschreibt. Nur so kann die Richtigkeit der Entscheidungen und Maßnahmen für die jeweils vorliegende Fertigungssituation garantiert werden. Um diese Datenbasis zu schaffen, bietet die RFID-Technologie Vorteile gegenüber anderen AutoID-Technologien (vgl. Kapitel 2.4), was in einem höheren Erfüllungsgrad der oben genannten Anforderungen resultiert. Die nachfolgend beschriebene Modellvorstellung sowie die Fertigungssteuerungsverfahren bauen daher auf mit Hilfe der RFID-Technologie generierten Tracking- und Tracing-Daten auf. Darüber

hinaus ist die RFID-Technologie für den Einsatz in FVW befähigt (vgl. Kapitel 2.4).

3.3 Modell der Produktion von Bauteilen aus Prepregs

3.3.1 Allgemeines

Die in diesem Kapitel beschriebene Modellvorstellung der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs dient als gemeinsame Grundlage für die entwickelten Produktionssteuerungsverfahren. Durch die abstrakte und anwendungsneutrale Gestaltung des Modells wird eine breite Einsetzbarkeit der Entwicklungen erreicht.

In Abbildung 21 wird dafür die Darstellung der Verfahrensschritte zur Herstellung von Bauteilen aus Prepregs erweitert (vgl. Abbildung 7). Zunächst wird eine Zeitskala eingeführt. Auf dieser werden in der Modellvorstellung einerseits zeitliche Planwerte und andererseits gemessene Ist-Werte bereitgestellt. Des Weiteren wird eine Temperaturskala eingeführt. Auf dieser sind zum einen die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen der Prepreg-Rollen bzw. -Bauteile in den gekühlten Lagern und in der Fertigung definiert. Zum anderen beinhaltet der Prozessschritt des Aushärtens Temperaturverläufe.

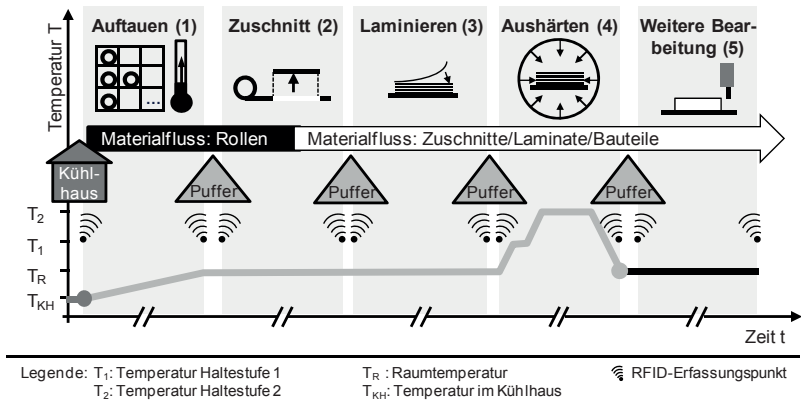


Abbildung 21: Übersicht der Modellvorstellung

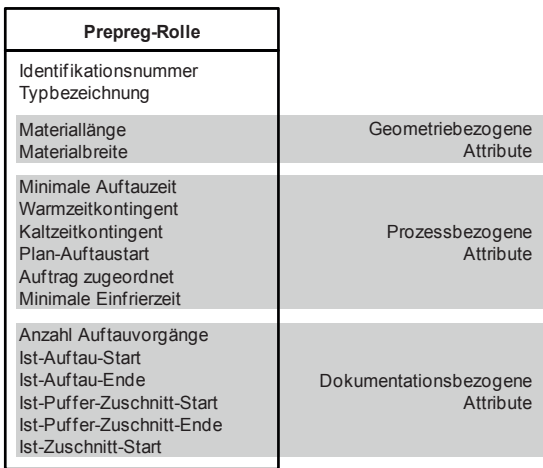
Den verschiedenen Temperaturniveaus werden später jeweils Zeitkontingente zugeordnet, die die begrenzten Lager- und Verarbeitungszeiten abbilden. Darüber

hinaus sind an den Übergängen zwischen den Fertigungsstationen bzw. Puffern oder Lagern RFID-Erfassungspunkte eingezeichnet. Diese dienen dem Generieren eines Echtzeitabbildes der Fertigungsabläufe.

Im Folgenden werden die Elemente der Modellvorstellung im Einzelnen erläutert.

3.3.2 Prepreg-Rollen

Bis zur Zuschmittsstation besteht der Materialfluss der Herstellung von Prepreg-Bauteilen aus Prepreg-Rollen. Jede dieser Rollen besitzt eine eindeutige Identifikationsnummer (Abbildung 22). Darüber hinaus verfügt jede Rolle über eine Typbezeichnung, die unterschiedliche Arten von Fasern, Harzen sowie deren Kombinationen bezeichnet. Aus geometrischer Sicht kann jede Rolle durch eine Materialbreite sowie eine auf der Rolle verbleibende Materiallänge beschrieben werden. Rollenspezifisch ist zudem eine individuelle Auftauzeit anzugeben, die die Rolle mindestens in der Auftaustation verbleiben muss, um für die Verarbeitung notwendige Materialeigenschaften zu garantieren.



Legende:

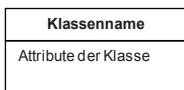


Abbildung 22: Attribute der Prepreg-Rolle

Um die temperatur- und zeitabhängigen Materialeigenschaften der Prepreg-Rollen berücksichtigen zu können, ist jeder Rolle ein Warmzeitkontingent sowie ein Kaltzeitkontingent zugeordnet. Je nach der Umgebungstemperatur, der die Prepreg-Rolle ausgesetzt ist, werden diese Zeitkontingente um die jeweiligen Aufenthaltsdauern reduziert. Dabei entspricht die dem Kaltzeitkontingent zugeordnete Temperatur dem Kühlhaus und die mit dem Warmzeitkontingent assoziierte Temperatur den Fertigungseinrichtungen außerhalb des Kühlhauses.

Beide Zeitkontingente dürfen bis zum Start des Aushärtevorgangs des Prepreg-Bauteils nicht ablaufen. Erreicht während des Fertigungsablaufes eines der Kontingente die Nulllinie, so ist das zugehörige Material als Ausschuss zu deklarieren, wobei die Prepreg-Rolle stets als Ganzes betrachtet wird. Ein Zustandswechsel der Rollen vom Kühlhaus in die Fertigung bzw. umgekehrt ist mehrfach möglich und muss explizit durch Produktionssteuerungsverfahren gesteuert werden (Abbildung 23). Dabei muss eine Zeit berücksichtigt werden, die die Rolle mindestens benötigt, um von der Temperatur der Fertigungsumgebung auf die Temperatur des Kühlhauses zu gelangen (minimale Einfrierzeit). Die mit den Zustandsübergängen der Rolle verbundenen Transportzeiten werden vernachlässigt.

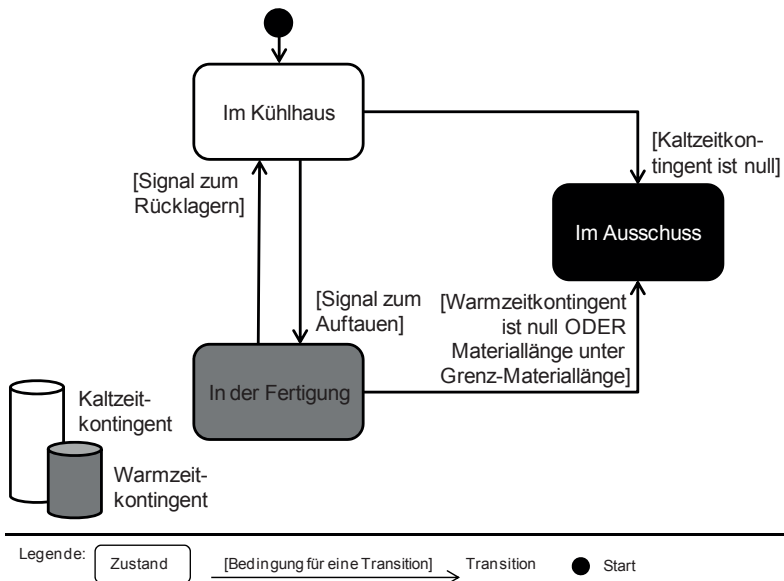


Abbildung 23: Zeitkontingente und Zustände der Prepreg-Rolle

Um den zeitlichen Verlauf der Verarbeitung der Prepreg-Rollen nachvollziehen zu können, werden außerdem die Start- und Endzeitpunkte der von den Rollen durchlaufenen Fertigungsstationen dokumentiert. Dies sind im Einzelnen die Auftaustation sowie der Puffer vor der Zuschnittsstation. Danach tritt die Prepreg-Rolle in die Zuschnittsstation ein, in der bauteilspezifische, zweidimensionale Geometrien aus dem Rollenmaterial hergestellt werden. Ebenfalls wird die Anzahl der durchlaufenen Auftauvorgänge rollenindividuell festgehalten. Des Weiteren wird der einer Rolle zugeordnete Auftrag sowie der Soll-Termin für den Start des Auftauvorgangs vermerkt.

3.3.3 Bauteile bzw. Aufträge

Ähnlich wie die Prepreg-Rollen besitzt jedes Prepreg-Bauteil eine eindeutige Identifikationsnummer. Dies ist notwendig, da aus einer Prepreg-Rolle mehrere Bauteile entstehen können. Dabei wird angenommen, dass jedes Bauteil ein-eindeutig einem Auftrag zugeordnet ist, weshalb die Identifikationsnummer des Bauteils auch als Auftragsnummer interpretiert werden kann. Aus diesem Grund wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr zwischen Auftragsdaten und Bauteildaten unterschieden. Jedem Auftrag sind zudem der notwendige Rollentyp und die benötigte Materiallänge zugeordnet. Ebenfalls werden für jeden Auftrag die notwendige Materialbreite sowie die Identifikationsnummer derjenigen Rolle festgehalten, von der das genutzte Material stammt. Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass Bauteile jeweils nur aus Prepreg-Material von einer einzigen Rolle bestehen (Abbildung 24).

Da die Bauteile bis zum Ende des Aushärtvorgangs über temperaturabhängige Materialeigenschaften verfügen, muss sichergestellt werden, dass die damit verbundenen Restriktionen eingehalten werden. Dafür sind jedem Auftrag drei Zeitkontingente zugeordnet. Das Kaltzeitkontingent wird dabei an der Zuschnittsstation von der Prepreg-Rolle übertragen. Gleiches gilt für das Warmzeitkontingent, das der Lagerung bei Raumtemperatur in der Fertigungsumgebung entspricht. Da häufig zusätzlich zum Kühllager noch ein gekühltes Zwischenlager direkt in der Fertigungsumgebung besteht, wird diesem ebenfalls ein Zeitkontingent zugeordnet, das sogenannte Zwischenkühlungskontingent. Wie bei den Prepreg-Rollen darf bis zum Beginn des Aushärtvorgangs keines dieser Kontingente erschöpft sein. Es wird hier angenommen, dass jedes Bauteil die Zwischenkühlung nur einmal durchlaufen kann. Das Einbringen eines Bauteils in die Zwischenkühlung sowie die Entnahme aus dieser muss dabei explizit gesteuert werden (Abbildung 25).

| Auftrag | |
|--|--|
| Identifikationsnummer | |
| Notwendiger Rollentyp Notwendige Materiallänge Notwendige Materialbreite Zugeordnete Rolle | Attribute zur Rollenzuordnung |
| Warmzeitkontingent Zwischenkühlungskontingent Kaltzeitkontingent | Prozessbezogene Attribute |
| Temperatur Haltestufe 1 Temperatur Haltestufe 2 Minimale Haltezeit Haltestufe 1 Maximale Haltezeit Haltestufe 1 Minimale Haltezeit Haltestufe 2 Maximale Haltezeit Haltestufe 2 Länge Breite | Attribute zum Autoklavenzyklus |
| Plan Zuschnitt Start Plan-Zuschnittszeit Plan-Laminierzeit Plan weitere Bearbeitungszeit Plan-Liefertermin Fertigungsfreigabe | Attribute zu Planzeiten |
| Ist-Auftau-Start Ist-Auftau-Ende Ist-Puffer Zuschnitt Start Ist-Puffer Zuschnitt Ende Ist-Zuschnitt-Start Ist-Zuschnitt-Ende Ist-Puffer Laminieren Start Ist-Puffer Laminieren Ende Ist-Laminieren-Start Ist-Laminieren-Ende Ist-Puffer Aushärten Start Ist-Puffer Aushärten Ende Ist-Aushärten-Start Ist-Aushärten-Ende Ist-Puffer weitere Bearbeitung Start Ist-Puffer weitere Bearbeitung Ende Ist-weitere Bearbeitung Start Ist-weitere Bearbeitung Ende Ist-Zwischenkühlung-Start Ist-Zwischenkühlung-Ende | Dokumentations- bezogene Attribute |
| Bauteilwert | |

Legende:

| |
|----------------------|
| Klassenname |
| Attribute der Klasse |

Abbildung 24: Attribute des Auftrags

Resultierend aus der geometrischen Gestaltung des Bauteils und dem verwendeten Harz ist jedem Bauteil ein Aushärtezyklus zugeordnet (BOGETTI & GILLESPIE 1991, NEITZEL & MITSCHANG 2004, S. 232 f.). Dieser wird zunächst durch zwei Temperaturniveaus der Haltestufen beschrieben, die spezifisch für das verwendete Harz sind. Abhängig von der geometrischen Gestaltung des Bauteils sind jedem dieser Temperaturniveaus minimale und maximale Haltezeiten zugeordnet, die ein vollständiges Aushärten des Bauteils sicher stellen, dabei jedoch einen Wärmebehandlungsschaden vermeiden (Abbildung 26). Die im Autoklaven beanspruchte Fläche wird durch die Kantenlängen des Bauteils in seiner Werkzeugform beschrieben. Dabei wird angenommen, dass alle Bauteile bzw. die zugehörigen Werkzeugformen über eine rechteckige Grundfläche verfügen.

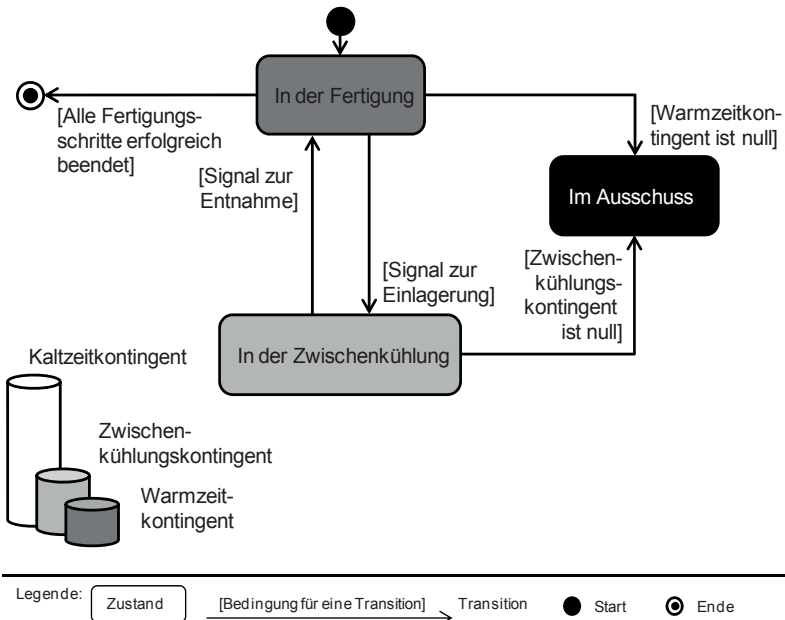
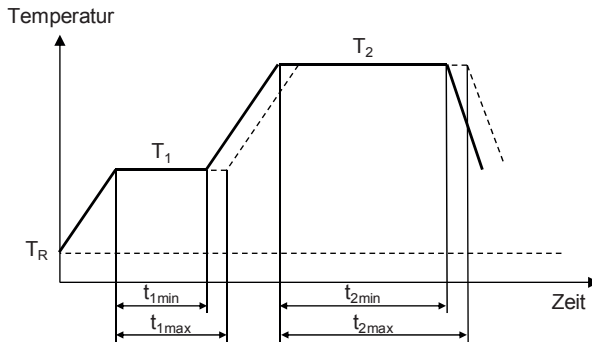


Abbildung 25: Zustände und Zeitkontingente des Auftrags

Als Eingangsgrößen für die in den eingebundenen Publikationen beschriebenen Produktionssteuerungsverfahren sind zudem auftragsspezifische Größen aus dem Produktionsplan wichtig. Es ist hier zunächst der geplante Startertermin für den Zuschnitt zu berücksichtigen. Ferner sind die geplanten Zeitdauern für den Zuschnitt, das Laminieren und die weitere Bearbeitung von Bedeutung. Der geplante Lieferer-

min ist ebenfalls definiert. Die Statusinformation, ob ein Auftrag für die Fertigung freigegeben ist, wird darüber hinaus in den entsprechenden Daten vermerkt. Analog der Beschreibung zu den Prepreg-Rollen ist auch für die Bauteile jeweils der tatsächliche Ein- und Austrittszeitpunkt für jede Fertigungsstation und jeden Puffer definiert. Neben diesen Kenngrößen zum Fertigungsablauf ist auch der Wert jedes Bauteils festgehalten.



Legende:

T_1 : Temperatur Haltestufe 1
 T_2 : Temperatur Haltestufe 2
 T_R : Raumtemperatur

t_{1min} : Minimale Haltezeit Haltestufe 1
 t_{1max} : Maximale Haltezeit Haltestufe 1
 t_{2min} : Minimale Haltezeit Haltestufe 2
 t_{2max} : Maximale Haltezeit Haltestufe 2

Abbildung 26: Aushärtezyklus eines Bauteils, in Anlehnung an CAMPBELL (2004, S. 181 ff.)

3.3.4 Fertigungsstationen, Puffer und Lager

Die Fertigungsstationen der Prepreg-Herstellung müssen in einer vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen werden, die dem Herstellungsprozess entspricht. Es befindet sich dabei stets ein Puffer zwischen den einzelnen Arbeitsstationen. Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, besitzt jedes Bauteil begrenzte Zeitkontingente, während derer es bei bestimmten Temperaturniveaus gelagert werden kann. Im Folgenden werden die einzelnen Bauteilzustände und die zugehörigen Fertigungsstationen bzw. Puffer mit Hilfe von Abbildung 27, die eine erweiterte Darstellung von Abbildung 25 darstellt, näher erläutert.

Die Prepreg-Rollen befinden sich vor einer Verwendung in der Fertigung im Kühlhaus, wobei ein Lagerplatz genau eine Prepreg-Rolle, unabhängig von deren Typ und der Menge an aufgewickeltem Material, aufnehmen kann. Auf ein Signal der Produktionssteuerung hin werden bestimmte Rollen in die Auftaustation umgela-

gert. Diese verfügt über eine konstante Temperatur, sodass für ein kontrolliertes Auftauen der Prepreg-Rollen lediglich die Verweilzeit in der Station überwacht werden muss. Die Temperatur der Auftaustation entspricht dabei derjenigen der übrigen Fertigungseinrichtungen. Somit ist diese durch das Warmzeitkontingent der Prepreg-Rollen abgedeckt. Auch hier kann jeder Auftauplatz exakt eine Prepreg-Rolle aufnehmen und ist unabhängig von deren Eigenschaften.

Vollständig aufgetaute Prepreg-Rollen werden dann in den Puffer vor der Zuschnittsstation gelagert. In der daran anschließenden Zuschnittsstation werden aus den Prepreg-Rollen zweidimensionale, bauteilindividuelle Geometrien gefertigt. Diese werden im Folgenden als Bauteile oder Aufträge bezeichnet, auch wenn zwischen diesen noch kein fester Zusammenhalt besteht. Spätestens an dieser Arbeitsstation ist das Prepreg-Material fest einem Kundenauftrag zugeordnet.

Vor der Laminierstation befindet sich ein weiterer Puffer, in dem jeweils nach Bauteilen gruppiert Zuschnitte gelagert werden. Die Anzahl der Lagerplätze entspricht dabei der Anzahl an Bauteilen, die aufgenommen werden können. In der Laminierstation werden dann die Zuschnitte in einer Form relativ zueinander positioniert. Dies geschieht so, dass die Fasermenge und -ausrichtung den jeweiligen Vorgaben der Konstruktion entsprechen. Die Anzahl der Plätze in der Station entspricht dabei der Anzahl zeitgleich bearbeitbarer Bauteile.

Die Zwischenkühlung zählt nicht zum regulären Fertigungsablauf, ist jedoch in den meisten industriellen Fertigungsumgebungen zu finden (vgl. P5). Es handelt sich dabei um einen gekühlten Puffer, in den Zuschnitte oder Laminare eingelagert werden, deren Warmzeitkontingent bereits in einem kritischen Bereich angelangt ist, der durch einen unternehmensspezifischen Schwellwert beschrieben wird. Somit wird erreicht, dass diese Bauteile den Aushärtvorgang vollständig durchlaufen können, ohne die Vorschriften zur Kühlung in Form der Zeitkontingente zu verletzen. Demnach können Bauteile von der Zuschnittsstation oder der Laminierstation in die Zwischenkühlung gelangen. Aus dieser heraus werden die Bauteile entweder in der Laminierstation weiterverarbeitet oder direkt der Aushärtstation zugeführt. Für diese Arbeit wird angenommen, dass jedes Bauteil die Zwischenkühlung nur einmal durchlaufen kann. Wie in den vorhergehenden Fertigungsstationen wird die Anzahl der vorhandenen Zwischenkühlungsplätze als Anzahl aufnehmbarer Bauteile verstanden. Die Temperatur in der Zwischenkühlung ist niedriger als in der Fertigungsumgebung und ist mit dem Zwischenkühlungskontingent verbunden. Vor der Weiterverarbeitung muss jedoch kein Auftauvorgang stattfinden.

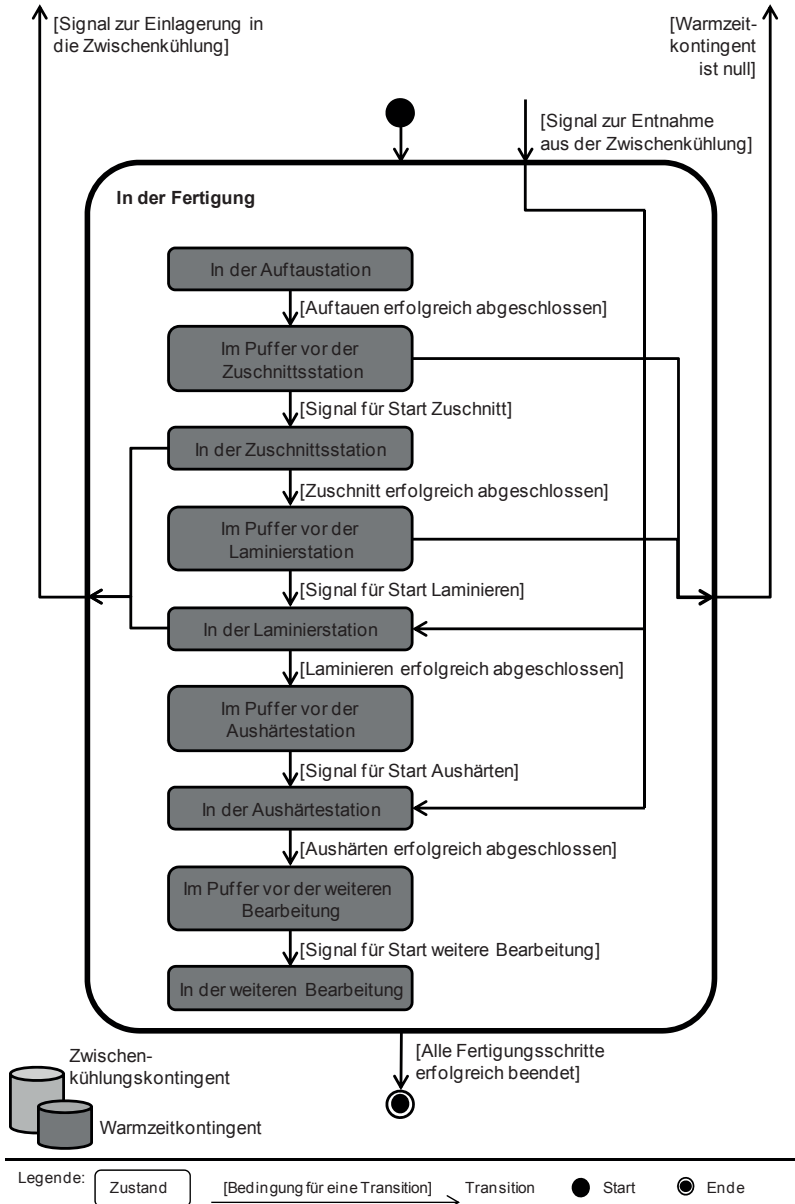


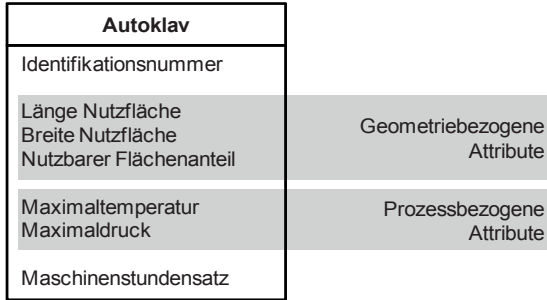
Abbildung 27: Detaillierter Fertigungsablauf des Auftrags

Im Puffer vor der Aushärtestation werden fertige Laminataufbauten zwischengelagert bis sie in geeigneten Autoklaven-Chargen der Aushärtestation zugeführt werden können. Die Pufferkapazität entspricht dabei der maximal lagerbaren Anzahl an Laminataufbauten. Da sich der Puffer vor der Aushärtestation am Übergang zum Chargenprozess befindet, wird in den in den eingebundenen Publikationen beschriebenen Produktionssteuerungsverfahren zusätzlich der Stundensatz des Puffers berücksichtigt, der abhängig von der beanspruchten Fläche im Puffer und der Verweildauer für jedes Bauteil die verursachten Kosten beschreibt. Die Aushärtestation ist sowohl aus organisatorischer als auch aus technologischer Sicht von hoher Wichtigkeit. Technologisch gesehen werden dort die Bauteileigenschaften durch die Vernetzungsreaktion des Harzes final festgelegt. Aus organisatorischer Sicht ist diese Station der Engpass der Fertigung, wobei die Aushärtestation aus mehreren Autoklaven bestehen kann. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass jeder Autoklav über eine rechteckige Nutzfläche verfügt, auf der Bauteile für den Aushärtvorgang positioniert werden können (Abbildung 28). Diese Fläche ist durch ihre Kantenlängen definiert. Eine weitere, vereinfachende Annahme ist, dass die Bauteile im Autoklaven nicht stapelbar sind. Da aufgrund der geometrischen Anordnung der Bauteile und des konvektiven Wärmetransports die Fläche des Autoklaven nicht vollständig genutzt werden kann, definiert der nutzbare Flächenanteil denjenigen Prozentsatz der Fläche, der erfahrungsgemäß durch Bauteile belegt werden kann. Eventuelle Probleme bei der geometrischen Anordnung der Bauteile bleiben dabei unberücksichtigt. Aufgrund dieser geometrischen Restriktionen muss demnach folgende Beziehung eingehalten werden:

$$\sum a_{B,i} \cdot b_{B,i} \leq r_j \cdot a_{AH,j} \cdot b_{AH,j} \quad (1)$$

| | |
|------------|--|
| $a_{B,i}$ | Länge des Bauteils i der Autoklavencharge |
| $b_{B,i}$ | Breite des Bauteils i der Autoklavencharge |
| $a_{AH,j}$ | Länge der Nutzfläche des Autoklaven j |
| $b_{AH,j}$ | Breite der Nutzfläche des Autoklaven j |
| r_j | Nutzbarer Flächenanteil des Autoklaven j |

Neben diesen geometrischen Eigenschaften verfügt jeder Autoklav über ein spezifisches maximal erreichbares Temperatur- und Druckniveau. Weiterhin kann jeder Autoklav durch einen Maschinenstundensatz sowie eine Identifikationsnummer beschrieben werden.



Legende:

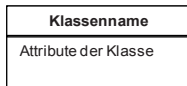


Abbildung 28: Attribute des Autoklaven

Eine weitere Restriktion bei der Kombination von Bauteilen zu Autoklavenchargen ist zeitlicher Natur. Da die Haltezeit auf jeder Temperaturstufe für jedes Bauteil innerhalb des vorgegebenen Intervalls liegen muss (vgl. Kapitel 3.3.3), müssen für eine gültige Autoklavencharge die folgenden beiden Beziehungen erfüllt sein:

$$\max_i(t_{1min,i}) \leq \min_i(t_{1max,i}) \quad (2)$$

$$\max_i(t_{2min,i}) \leq \min_i(t_{2max,i}) \quad (3)$$

- $t_{1min,i}$ Minimale Haltezeit der ersten Haltestufe für Bauteil i
- $t_{1max,i}$ Maximale Haltezeit der ersten Haltestufe für Bauteil i
- $t_{2min,i}$ Minimale Haltezeit der zweiten Haltestufe für Bauteil i
- $t_{2max,i}$ Maximale Haltezeit der zweiten Haltestufe für Bauteil i

Grafisch ist dies in Abbildung 29 veranschaulicht. Durch die vorgegebenen Randzeiten ergibt sich für jede Haltestufe eine Spanne möglicher Haltezeiten. Im Sinne kurzer Durchlaufzeiten und geringer Fertigungskosten wird innerhalb dieser Spanne die kleinste Zeit als Haltezeit gewählt.

Nach dem Aushärten der Bauteile im Autoklaven endet die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften. Ebenfalls ist das Aushärten der letzte prepregspezi-fische Fertigungsschritt. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung wird dieses Modell jedoch noch bis zur Auslieferung des Bauteils fortgeführt, wobei alle folgenden Bearbeitungsschritte unter dem Begriff *weitere Bearbeitung* zusammenge-

fasst werden. Darin ist bspw. die spanende Bearbeitung der fertig ausgehärteten Prepreg-Bauteile enthalten.

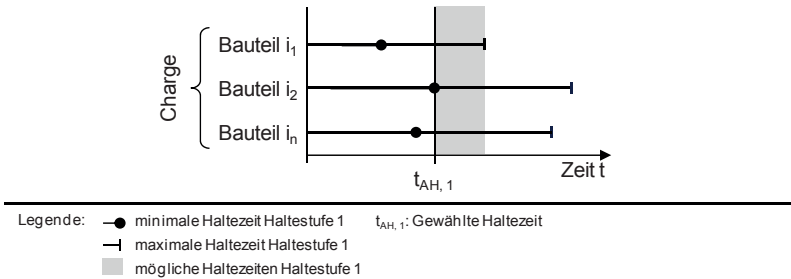


Abbildung 29: Randbedingungen hinsichtlich der Aushärtezeit auf Haltestufe 1 (P4)

Die in diesen Herstellungsprozess involvierten Arbeitsstationen, Puffer und Lager sind zusammenfassend mit ihren Attributen in einem Klassendiagramm in Abbildung 30 dargestellt. Um die Puffer, das Kühlhaus, das Zwischenlager und die Arbeitsstationen gemeinsam zu bezeichnen, wird der Oberbegriff der *Station* eingeführt.

3.3.5 Produktionsplan

Der Produktionsplan befindet sich außerhalb der Systemgrenze des hier beschriebenen Modells der Produktion von Bauteilen aus Prepregs. Er ist somit gegeben und kann nicht durch die in den Publikationen P3, P4 und P5 beschriebenen Produktionssteuerungsverfahren beeinflusst werden. Die für die Produktionssteuerung notwendigen Daten aus dem Produktionsplan sind als Attribute dem Auftrag zugeordnet, wobei die Freigabe von Aufträgen für die Fertigung durch das Setzen des booleschen Attributs *Fertigungsfreigabe* gesteuert wird (vgl. Abbildung 24). Es bilden somit alle Instanzen der Klasse *Auftrag*, deren Attribut *Fertigungsfreigabe* mit *false* belegt ist, die Gruppe an Aufträgen, die durch ein Verfahren zur Auftragsfreigabe betrachtet werden. Entsprechende Dringlichkeitslisten können durch die Auftragsdaten wie z. B. den Liefertermin generiert werden.

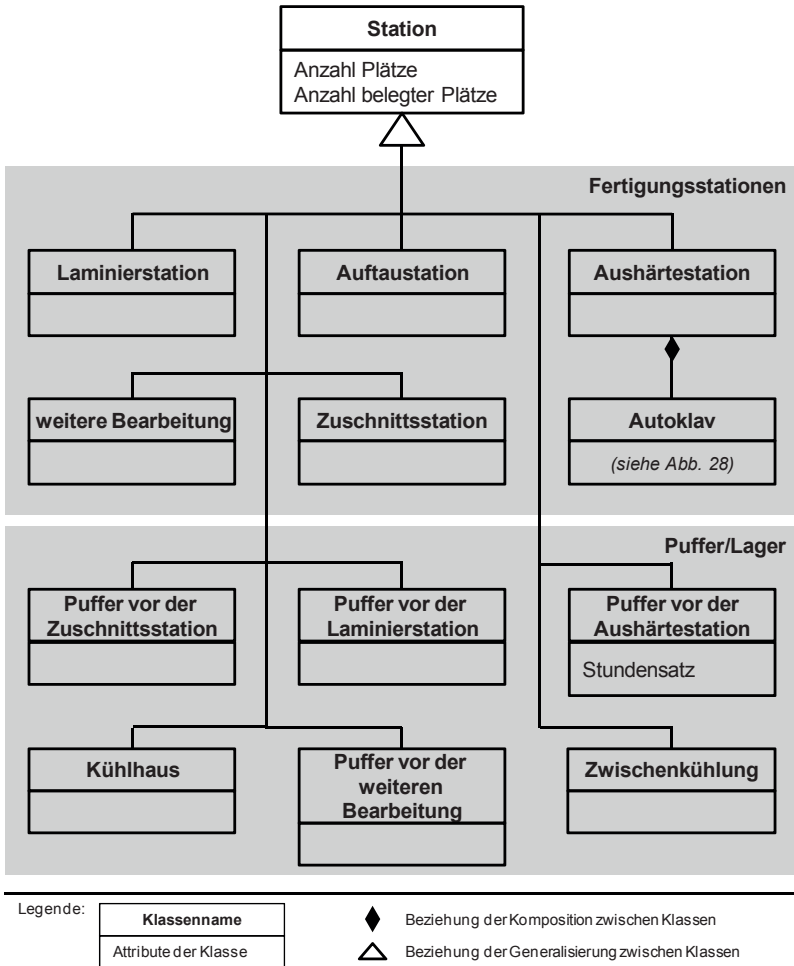


Abbildung 30: Überblick der Stationen

3.3.6 RFID-System

Um die Vorteile der Anwendung der RFID-Technologie bei der Herstellung von Prepreg-Bauteilen nutzen zu können, müssen die Wechselwirkungen der Modellvorstellung mit dem RFID-System beschrieben werden. Dem Fertigungsprozess gemäß Abbildung 21 folgend wird hier davon ausgegangen, dass die Prepreg-Rollen über RFID-Transponder verfügen und demnach zum einen eindeutig identi-

fizierbar sind und zum anderen einen aufwandsarmen Zugriff auf die rollenbezogenen Daten erlauben (vgl. Kapitel 3.3.2). Jede sich außerhalb des Kühlhauses befindende Prepreg-Rolle ist dabei bestimmten Fertigungsaufträgen bzw. Bauteilen zugeordnet. Erst jedoch durch das Herstellen der Zuschnitte wird diese Zuordnung irreversibel. Hier werden dann die jeweils für ein Bauteil notwendigen Zuschnitte mit einem RFID-Transponder assoziiert, der bspw. im Ladungsträger der Zuschnitte mitgeführt wird. Wichtig ist es an dieser Stelle, die notwendigen Daten der Prepreg-Rolle in die dem Bauteil zugeordneten Daten zu übertragen (vgl. Kapitel 3.3.3). Der bauteilindividuelle RFID-Transponder wird dann in der Station des Laminierens in den Lagenaufbau des Bauteils integriert und ist somit fest mit diesem verbunden. Ein Trennen von Bauteil und RFID-Transponder ist nunmehr nur noch zerstörend möglich (Abbildung 31).

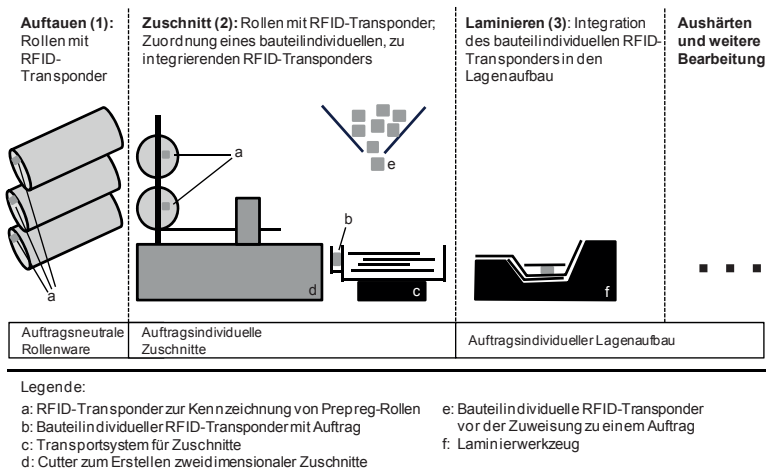


Abbildung 31: Anwendung der RFID-Technologie (P2)

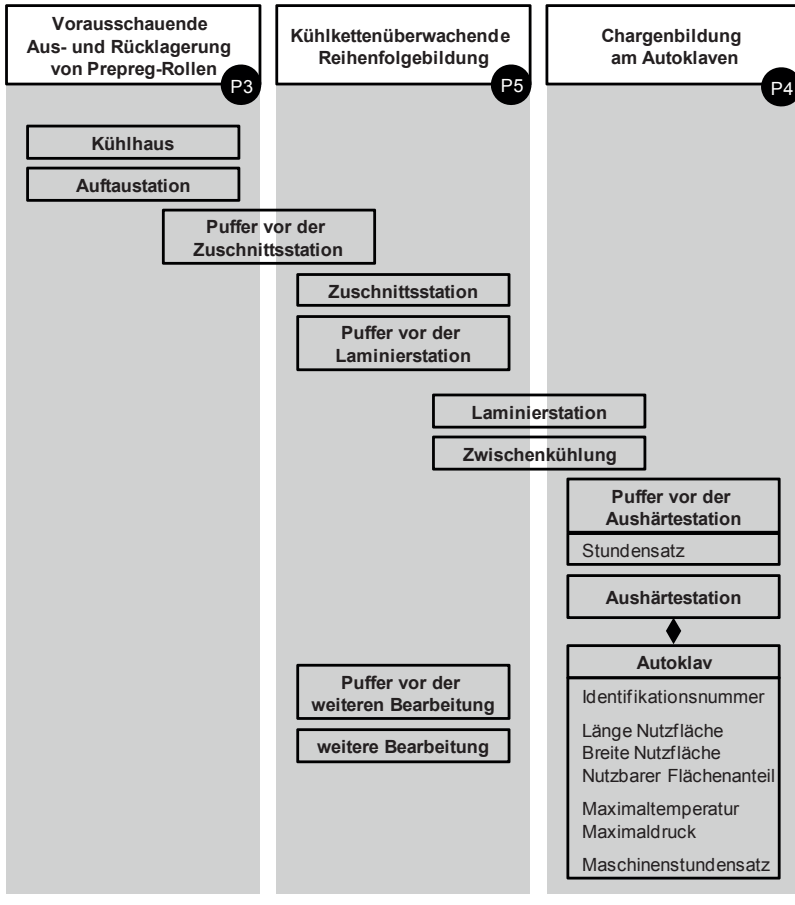
Für die Funktionalität der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren ist es unerheblich, ob das RFID-System mit einem Data-on-Tag- oder einem Data-on-Network-Ansatz betrieben wird. Die beschriebenen Datenstrukturen können in beiden Fällen realisiert werden. Weiterführende Informationen sowie die Vor- und Nachteile beider Ansätze können z. B. (DIEKMANN ET AL. 2007) entnommen werden.

3.4 Wirkungsbereich der Produktionssteuerungsverfahren

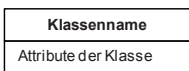
Wie in Kapitel 3.2 erläutert, soll der Handlungsbedarf für Produktionssteuerungsverfahren, die spezifisch auf die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs entwickelt sind, durch drei Bestandteile bedient werden. Die gemeinsame Grundlage dieser ist die Modellvorstellung, die im Kapitel 3.3 eingeführt wurde.

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.2 zeigt Abbildung 32 eine Übersicht, auf welche Stationen die einzelnen Produktionssteuerungsverfahren einwirken müssen. Dabei wird deutlich, dass das *Verfahren zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen* den Fertigungsablauf bis einschließlich zum Puffer vor der Zuschnittstation betrachten muss. Diese Fertigungsstation wird anschließend vom *Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung* berücksichtigt, da in dieser die Reihenfolge zur Weiterleitung in die Zuschnittstation bestimmt werden muss. Das Verfahren zur Reihenfolgebildung muss ab dieser Station den weiteren Fertigungsverlauf bis zur Station der weiteren Bearbeitung betrachten, wobei die Aushärtestation und der vorgelagerte Puffer eine Ausnahme darstellen. Diese werden im *Verfahren zur Chargenbildung* am Autoklaven berücksichtigt. Die Zwischenkühlungsstation wird dabei sowohl vom Verfahren zur Reihenfolgebildung als auch vom Verfahren zur Chargenbildung berücksichtigt, was in der Tatsache begründet liegt, dass in diese Station sowohl Zuschnitte als auch Laminare eingebracht werden können. Erstere werden durch das Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung betrachtet und zweite durch das Verfahren zur Chargenbildung. Ähnliches gilt für die Laminierstation, die im Rahmen einer Vorausschau zusätzlich vom Verfahren zur Chargenbildung betrachtet wird. Dieses berücksichtigt die Zustände der Prepreg-Bauteile in der Station, jedoch ohne sie zu modifizieren. Es sind folglich die Aktionsbereiche der Produktionssteuerungsverfahren voneinander unabhängig, wobei die Schnittstelle stets durch eine Pufferstation gebildet wird.

Um zielkonform Produktionssteuerungsentscheidungen aus dem aktuellen Zustand der Herstellung von Prepreg-Bauteilen ableiten zu können, sollen die Produktionssteuerungsverfahren auf die zuvor beschriebenen Daten der Prepreg-Rollen sowie der Aufträge zurückgreifen (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 24).



Legende:



Beziehung der Komposition zwischen Klassen



Verweis auf die eingebundenen Publikationen

Abbildung 32: Produktionssteuerungsverfahren und Stationen

Das Verfahren zum vorausschauenden Aus- und Rücklagern von Prepreg-Rollen hat zum Zweck, die für die Realisierung der anstehenden Fertigungsaufträge notwendigen Prepreg-Rollen rechtzeitig bereitzustellen. Dabei sollen die temperatur- und zeitabhängigen Werkstoffeigenschaften berücksichtigt werden, was einer Schonung der zugehörigen Zeitkontingente entspricht. Um diese Aufgabe auszuführen, muss

das Verfahren die rollenindividuellen Daten nach Abbildung 33 und die bauteilindividuellen Daten nach Abbildung 34 lesen bzw. schreiben. Das Ergebnis des Verfahrens muss die Zuordnung einer Prepreg-Rolle zu einem Fertigungsauftrag sowie das Zuweisen eines rollendindividuellen Plantermins für den Start des Auftauvorgangs sein, womit ebenfalls die Zustandsübergänge in Abbildung 23 gesteuert werden. Für weitere Informationen zum Verfahren des vorausschauenden Aus- und Rücklagerns sei auf die eingebundene **Veröffentlichung P3** verwiesen. Dort wird das Verfahren darüber hinaus evaluiert.

Das Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven hat das Ziel, den Engpass der Fertigung in optimierter Weise zu nutzen und fokussiert sich dabei auf den Übergang der Bauteile vom Puffer vor der Aushärtestation in die Aushärtestation. Es werden hier ebenfalls die Zeitkontingente der Fertigungsaufträge berücksichtigt. Das Verfahren nutzt dafür als Eingangsparameter die bauteilindividuellen Daten gemäß Abbildung 34. Dabei verursachen die Attribute des Bauteils, die den Autoklavenzyklus beschreiben, zahlreiche Restriktionen hinsichtlich der Kombinierbarkeit der einzelnen Bauteile zu Chargen. Da das Verfahren zur Chargenbildung analog zum Verfahren zum Aus- und Rücklagern von Prepreg-Rollen eine gewisse Vorausschau beinhalten soll, wird ebenfalls die planmäßige Zeit für das Laminieren der einzelnen Bauteile berücksichtigt. Detaillierte Informationen zum Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven sowie zu dessen Evaluation sind der eingebundenen **Publikation P4** zu entnehmen.

Im Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung sollen die beschränkten Lager- und Verarbeitungszeiten der Prepreg-Materialien für die Priorisierung der Aufträge innerhalb der Fertigung berücksichtigt werden. Ebenfalls soll dieses Verfahren eine Zwischenlagerungsmöglichkeit im Fertigungsumfeld explizit steuern. Da das Verfahren sowohl auf Prepreg-Rollen als auch auf Prepreg-Bauteile wirkt, berücksichtigt es rollenindividuelle Daten gemäß Abbildung 33 und bauteilindividuelle Daten nach Abbildung 34. Damit steuert das Verfahren die Zustandsübergänge zwischen der Fertigung und der Zwischenkühlung bzw. dem Ausschuss (Abbildung 25 und Abbildung 27). Darüber hinaus werden im Sinne einer Reihenfolgebildung die Zustandsübergänge der Bauteile zwischen den einzelnen Fertigungsstationen gesteuert. Im Detail sind das folgende:

- zur Zuschnittstation
- zur Laminierstation
- zur weiteren Bearbeitung

Das Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung ist Thema der eingebundenen **Veröffentlichung P5**. Dort sind detaillierte Erläuterungen sowie eine Evaluation der Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu finden.

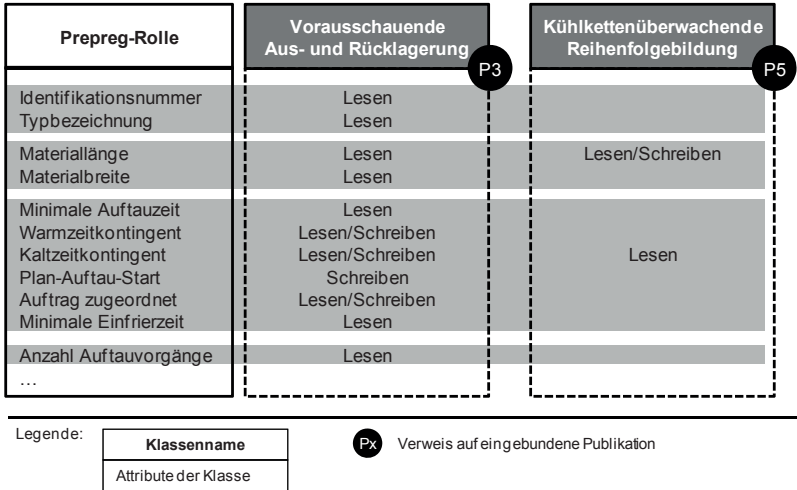


Abbildung 33: Nutzung rollenindividueller Daten

| Auftrag | Vorausschauende Aus- und Rücklagerung P3 | Chargenbildung am Autoklaven P4 | Kühlkettenüberwachende Reihenfolgebildung P5 |
|---------------------------------|--|---------------------------------|--|
| Identifikationsnummer | Lesen | | |
| Notwendiger Rollentyp | Lesen | | |
| Notwendige Materiallänge | Lesen | | |
| Notwendige Materialbreite | Lesen | | |
| Zugeordnete Rolle | Schreiben | | |
| Warmzeitkontingent | | Lesen | Lesen/Schreiben |
| Zwischenkühlungskontingent | | Lesen | Lesen/Schreiben |
| Kaltzeitkontingent | | | Lesen/Schreiben |
| Temperatur Haltestufe 1 | | Lesen | |
| Temperatur Haltestufe 2 | | Lesen | |
| Minimale Haltezeit Haltestufe 1 | | Lesen | |
| Maximale Haltezeit Haltestufe 1 | | Lesen | |
| Minimale Haltezeit Haltestufe 2 | | Lesen | |
| Maximale Haltezeit Haltestufe 2 | | Lesen | |
| Länge | | Lesen | |
| Breite | | Lesen | |
| Plan Zuschnitt Start | Lesen | | Lesen |
| Plan-Zuschnittszeit | | Lesen | Lesen |
| Plan-Laminierzeit | | | Lesen |
| Plan weitere Bearbeitungszeit | | | Lesen |
| Plan-Liefertermin | | | |
| Fertigungsfreigabe | Lesen | | |
| ... | ... | ... | ... |
| Bauteilwert | | Lesen | |

Legende:

| |
|----------------------|
| Klassenname |
| Attribute der Klasse |



Verweis auf eingebundene Publikation

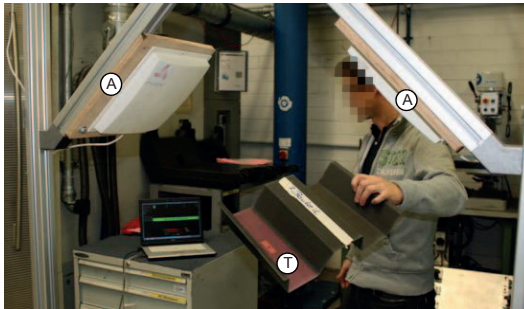
Abbildung 34: Nutzung bauteilindividueller Daten

4 Evaluierung

4.1 Technische Bewertung

Die technische Bewertung der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Prepreg-Bauteilen betrifft einerseits die Nutzung der RFID-Technologie in den entsprechenden Fertigungsumgebungen und andererseits die Anwendung der Verfahren selbst. In beiden Bereichen soll neben dem Aspekt der technischen Machbarkeit der resultierende Nutzen für die Produktionsabläufe beschrieben werden.

Was die Anwendung der RFID-Technologie im Umfeld von FVK betrifft, sei auf die Arbeiten von BERNHARD ET AL. (2011) sowie auf das Kapitel 2.4.3 verwiesen. Darüber hinaus werden in der eingebundenen Publikation P5 Ausleseversuche beschrieben, bei denen im realen Fabrikumfeld Prepreg-Bauteile mit integrierten UHF-RFID-Transpondern durch ein sogenanntes Gate hindurchgeführt werden (Abbildung 35). Es werden hier Erkennungsraten von bis zu 89 % erreicht, die angesichts des Prototypenstadiums der verwendeten RFID-Transponder zum Nachweis der technischen Machbarkeit als ausreichend gewertet werden. (P5)



Legende: (A) : RFID-Antenne (T) : RFID-Transponder

Abbildung 35: Ausleseversuche mit integrierten UHF-RFID-Transpondern (P5)

Die technische Umsetzbarkeit der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren wird ebenfalls als gegeben angesehen. Grund dafür ist die Tatsache, dass die Verfahren bereits im Rahmen der in den eingebundenen Publikationen P3, P4 und P5 beschriebenen Simulationsstudien in Programmcode umgesetzt wurden. Des Weiteren sind in kommerziell angebotenen und in der Praxis verwendeten Softwarepro-

dukten zur Produktionssteuerung Verfahren implementiert, die auf einer ähnlichen Datengrundlage arbeiten und auch bezüglich ihrer Komplexität vergleichbar sind. Dies gilt ebenso für die Anwendung von Optimierungsverfahren im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung.

Nach der Diskussion der technischen Machbarkeit sei nun auf den mit der Anwendung der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren einhergehenden Nutzen eingegangen. Da die Verfahren voneinander unabhängig sind, also auch jeweils einzeln angewendet werden können, und sich gleichzeitig auch nicht in negativer Weise gegenseitig beeinflussen (vgl. Kapitel 3.2 und Kapitel 3.4), werden diese im Folgenden einzeln evaluiert.

Für das Verfahren zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen wird in der eingebundenen Publikation P3 eine Simulationsstudie beschrieben, die über einen Simulationszeitraum von 300 Arbeitstagen eine um 7,5 % reduzierte Menge an Ausschussmaterial nachweist. Darüber hinaus wird eine gesteigerte Termintreue bei der Bereitstellung von aufgetauten Prepreg-Rollen zur weiteren Verarbeitung nachgewiesen. Dabei werden unter Anwendung des neu entwickelten Verfahrens 90 % der Prepreg-Rollen innerhalb eines Verspätungsintervalls von 10 Minuten bereitgestellt, wohingegen dieser Anteil bei Anwendung des Vergleichsverfahrens nur 80 % beträgt. Da das Auftauen den ersten Schritt der Herstellung von Prepreg-Bauteilen darstellt, hat eine Steigerung der Termintreue an dieser Stelle positive Effekte auf die gesamte Fertigung bis hin zur Termintreue beim Bauteilversand.

Das Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung wird in der eingebundenen Publikation P5 ebenfalls im Rahmen einer Simulationsstudie evaluiert. Diese kommt zu dem Ergebnis, dass durch Anwendung des Verfahrens der durch die Verletzung der begrenzten Lager- und Verarbeitungszeiten bedingte Ausschuss an Prepreg-Materialien um 15 % reduziert werden kann. Darüber hinaus wird dieser Ausschuss aufgrund der Tatsache, dass die erweiterte Schlupfzeitregel die Plan-Bearbeitungszeiten bei der Priorisierung der Fertigungsaufträge berücksichtigt, früher im Fertigungsverlauf erkannt. Die logistische Zielerreichung verändert sich durch die Anwendung des Verfahrens zu kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung im Wesentlichen nicht, weist jedoch eine leicht positive Tendenz auf.

Darüber hinaus wird das Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven in der eingebundenen Publikation P4 mit Hilfe einer Simulation evaluiert. Durch den Vergleich des entwickelten Verfahrens mit einem Referenzverfahren wird hier für

ein zufällig generiertes Programm von 10.000 Fertigungsaufträgen nachgewiesen, dass mit Hilfe des neuen Verfahrens knapp 12 % der Autoklavenchargen eingespart werden können, was in diesem Szenario einer Reduktion der Nutzungszeit der Autoklaven von gut 13 % entspricht. Dies kommt dadurch zustande, dass unter Anwendung des neuen Verfahrens durchschnittlich mehr Bauteile zu einer Autoklavencharge kombiniert werden können.

4.2 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung von Informationssystemen ist schwierig, da für solche Investitionen kein fest definierter Wirkungs- und Gestaltungsbereich existiert. Dies gilt im Allgemeinen und für RFID-Systeme im Besonderen (SCHÜTTE 1998, S. 220 f., VILKOV & WEIß 2008, S. 275 f.). Aus diesem Grund soll das wirtschaftliche Nutzenpotenzial, das aus der Anwendung der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren resultiert, hier lediglich qualitativ betrachtet werden. Für eine quantitative Bewertung sei auf das im Kapitel 4.3 beschriebene beispielhafte Anwendungsszenario verwiesen.

Die Kosteneinsparungen durch die Reduktion von Ausschuss bei der Anwendung des Verfahrens zum vorausschauenden Aus- und Rücklagern von Prepreg-Rollen können demnach als Produkt der vermiedenen Masse an Ausschussmaterial und des zugehörigen spezifischen Materialpreises ermittelt werden. Gleiches gilt für die Verringerung des Ausschusses durch das Verfahren zur kühlkettenüberwachenden Reihenfolgebildung. Da dieses Verfahren auch ein früheres Erkennen von Ausschuss im Fertigungsablauf beinhaltet, tritt als zweiter wirtschaftlicher Effekt eine spezifische Kostenreduktion für das als Ausschuss deklarierte Bauteil auf, da zum Zeitpunkt des Erkennens weniger Arbeits- und Maschinenleistung in das entsprechende Produkt geflossen sind. Abbildung 36 stellt dafür in der linken Bildhälfte vereinfacht und unter Annahme linearer Abhängigkeiten den Zusammenhang zwischen einer Verringerung der Masse verwendeter Prepregs und den Materialkosten dar. In der rechten Bildhälfte wird der Effekt sinkender spezifischer Bauteilkosten und dessen Auswirkungen auf die Bauteilgesamtkosten in vereinfachter Form visualisiert.

Was den Autoklaven betrifft, so können die Kosteneinsparpotenziale einer verringerten Betriebszeit, die aus der Anwendung des Verfahrens zur Chargenbildung resultieren, über den individuellen Maschinenstundensatz der Anlage berechnet werden. Die Höhe der Kosteneinsparungen ist dabei ebenfalls abhängig von den für

den Betrieb des Autoklaven zur Verfügung stehenden Zeiten über den Arbeitstag hinweg (Schichtkalender). Unter der Annahme linearer Zusammenhänge ist in Abbildung 37 dargestellt wie eine verringerte Betriebszeit der Autoklaven die zugehörigen Betriebskosten reduziert. Anstatt den Autoklav auszuschalten, kann die durch das Verfahren eingesparte Betriebszeit auch dafür genutzt werden, zusätzliche Fertigungsaufträge zu bearbeiten und damit den Umsatz zu steigern. Das damit verbundene erschließbare Potenzial hängt dabei von der Anzahl und vom Preis der zusätzlich herstellbaren Bauteile ab.

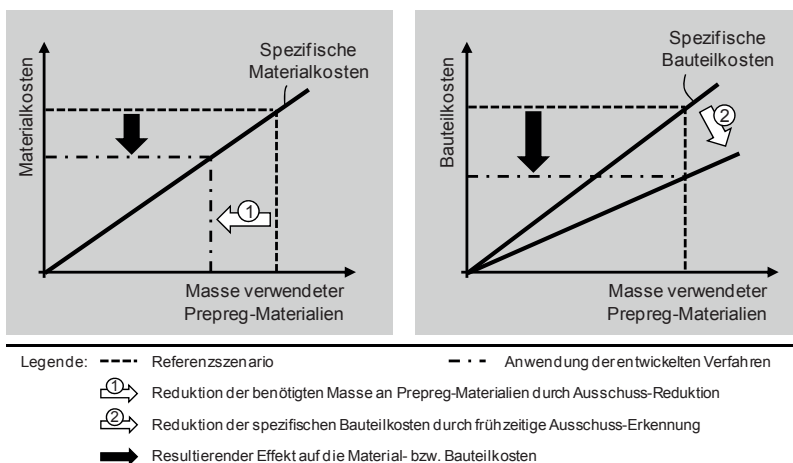
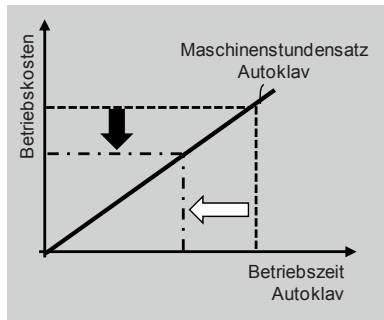


Abbildung 36: Illustration der wirtschaftlichen Effekte durch Ausschussreduktion

Um die wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Verfahren zu komplettieren, müssen dem beschriebenen Nutzen die jeweiligen Aufwände bzw. Kosten gegenübergestellt werden. Diese entstehen hauptsächlich durch RFID-Systeme und Software zur Produktionssteuerung. Solche Systeme müssen hochgradig individuell auf die entsprechenden Anwendungsfälle angepasst werden. Alternativ können ausgehend von den beschriebenen Nutzenpotenzialen der entwickelten Produktionssteuerungsverfahren Soll-Kosten ermittelt werden.

Ein wirtschaftlicher Einsatz der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden kann dafür bspw. mit Hilfe des statischen Verfahrens der Amortisationsrechnung bewertet werden (CARL ET AL. 2001, S. 147 ff.). Demnach liegt eine wirtschaftliche Anwendung der Methoden vor, wenn nach dem Ablauf der geforderten Soll-Amortisationszeit die durch die beschriebenen Nutzenpotenziale bedingten

Kapitalrückflüsse die Ausgaben für die Anschaffung und Implementierung der RFID-Systeme sowie der Software zur Produktionssteuerung übersteigen. Es können somit unter Vorgabe einer Soll-Amortisationsdauer die anwendungsfallspezifischen Zielkosten für die mit der Nutzung der entwickelten Methoden verbundenen Anschaffungs- und Implementierungskosten festgelegt werden. Diese entsprechen der Summe der monetären Nutzenpotenziale über die Amortisationszeit.



Legende: - - - Referenzszenario - · - Anwendung der entwickelten Verfahren
 ⇨ Reduktion der Betriebszeit des Autoklaven
 ⇩ Resultierender Effekt auf die Betriebskosten

Abbildung 37: Illustration der wirtschaftlichen Effekte am Autoklaven

4.3 Beispielhaftes Anwendungsszenario

Um die potenziellen wirtschaftlichen Auswirkungen, die durch die Anwendung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Produktionssteuerungsverfahren entstehen können, zu illustrieren, sei im Folgenden ein Rechenbeispiel skizziert. Die darin verwendeten Zahlenwerte sind realitätsnah, aber gerundet. Sie stammen teilweise aus Expertengesprächen mit Vertretern eines Unternehmens der Luftfahrtbranche, deren Anonymität gewahrt werden soll. Dementsprechend haben die hier angestellten Kalkulationen den Charakter einer Überschlagsrechnung und dienen damit lediglich der Illustration.

Im Jahr 2012 wurden im betrachteten Anwendungsszenario 120.000 Bauteile aus Prepregs hergestellt, deren Masse zwischen 0,5 kg und 23 kg lag. Dabei haben die günstigsten Bauteile einen Wert von ca. 200 Euro, wohingegen die teuersten Bauteile 30.000 Euro wert sind. Für die Bauteilherstellung stehen fünf Autoklaven zur Verfügung, die gemäß Tabelle 1 beschrieben werden können. Es wurden dabei zehn

unterschiedliche Harzsysteme eingesetzt und 230.000 m² Prepregs verbraucht. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Materialdichte von 2 g/cm³ und einer angenommenen durchschnittlichen Dicke eines Prepregs von 0,15 mm entspricht dies einer verarbeiteten Masse von 69 t. Insgesamt waren dafür 2.900 Autoklavenchargen notwendig. Anhand dieser Zahlenwerte wird bereits deutlich, dass die Chargenbildung eine entsprechend komplexe Aufgabe mit zahlreichen Randbedingungen ist.

Tabelle 1: *Eingangsdaten der Autoklaven im Anwendungsszenario*

| | Anschaffungskosten [Euro] | Nutzfläche [m²] | Betriebsstunden in 2012 [h] | Stromverbrauch in 2012 [kWh] |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Autoklav 1 | 450.000 | 35 | 4.600 | 213.000 |
| Autoklav 2 | 330.000 | 5 | 4.300 | 27.000 |
| Autoklav 3 | 400.000 | 15 | 4.200 | 89.000 |
| Autoklav 4 | 700.000 | 50 | 5.000 | 416.000 |
| Autoklav 5 | 650.000 | 45 | 4.900 | 400.000 |

Legende:

| | |
|-------------|------------|
| realer Wert | Schätzwert |
|-------------|------------|

Es sollen nun die wirtschaftlichen Effekte quantifiziert werden, die aus der Anwendung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren resultieren.

Zunächst wird in der eingebundenen Publikation P3 der Nutzen der Anwendung des Verfahrens zur vorausschauenden Aus- und Rücklagerung von Prepreg-Rollen durch eine Reduktion der als Ausschuss zu deklarierenden Prepreg-Materialien um 7,5 % beschrieben. Unter der Voraussetzung, dass dieser Wert auf das vorliegende Anwendungsszenario übertragen werden kann und unter der Annahme, dass in diesem Szenario die Ausschussquote von Prepreg-Rollen bei 3 % liegt, können somit im Jahr ca. 155 kg Prepreg-Material zusätzlich eingespart werden. Dies entspricht bei einem Materialpreis von 45 Euro pro Kilogramm einem Wert von 6.986 Euro. Des Weiteren wird in der eingebundenen Publikation P5 angegeben, dass der Ausschuss innerhalb der Fertigung durch die Verwendung des Verfahrens zur kühlkettenerüberwachenden Reihenfolgebildung um 15 % reduziert werden kann. Unter der Voraussetzung der Übertragbarkeit auf das vorliegende Anwendungsszenario sowie der Annahme, dass die Ausschussquote innerhalb der Fertigung 5 % beträgt,

bedeutet dies eine Einsparung von weiteren 518 kg Prepreg-Material. Dies resultiert bei einem Materialpreis von 45 Euro pro Kilogramm in einer Kosteneinsparung von 23.288 Euro. Hinzu kommt, dass für Prepreg-Rollen und -Bauteile, deren Lager- bzw. Verarbeitungskontingente erschöpft sind, zunächst Materialuntersuchungen durchgeführt werden, anhand derer über die Zulässigkeit einer Weiterverarbeitung entschieden wird. Diese Tests sind mit zusätzlichem Aufwand und Arbeitsverzögerungen in der Produktion verbunden, die durch die Anwendung der beiden Methoden ebenfalls reduziert werden.

Als weiterer Effekt wird in der eingebundenen Publikation P4 bei gleichbleibendem Produktionsprogramm eine Reduktion der Anzahl der notwendigen Autoklavenchargen um 12 % sowie eine Verringerung der notwendigen Betriebszeit der Autoklaven um 13 % beschrieben. Für den Fall, dass diese Werte auf die im Anwendungsszenario vorhandenen Autoklaven übertragen werden können, ergibt sich eine Reduktion der Anzahl der Autoklavenchargen von 2.900 auf 2.552. Was die Reduktion der Betriebszeiten der Autoklaven betrifft, so ist eine Abschätzung der damit verbundenen Einsparungen über die jeweiligen Maschinenstundensätze möglich. Diese beinhalten nach VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. (1983, S. 126 f.) die Fertigungsgemeinkosten je Stunde, die auf ein Betriebsmittel bezogen verrechnet werden. Im Einzelnen sind dies die Kosten für den Energieverbrauch, den Raumbedarf, die Instandhaltung sowie für die kalkulatorische Abschreibung und Zinsen (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. 1983, S. 126). Es ergeben sich damit die Werte in Tabelle 2, die unter Nutzung folgender Annahmen sowie von Werten aus Tabelle 1 berechnet wurden:

- Kosten einer Kilowattstunde Strom: 0,18 Euro
- Kosten eines Quadratmeters Hallenfläche: 15 Euro im Monat
- Flächenbedarf eines Autoklaven: Dreifache Nutzfläche
- Abschreibungsdauer der Autoklaven: Zwanzig Jahre
- Abschreibungsart: Lineare Abschreibung mit Restwert null.
- Aufwendungen für Instandhaltung: 5 % der Anschaffungskosten pro Jahr
- Kalkulatorischer Zinssatz: 5 % pro Jahr

Eine Reduktion der Betriebszeiten aller fünf Autoklaven um 13 % ergibt somit unter Zugrundelegung der Maschinenstundensätze aus Tabelle 2 eine Einsparung in Höhe von 78.436 Euro pro Jahr.

Zusammengefasst ergibt sich also im vorliegenden Anwendungsszenario durch die Nutzung der entwickelten Methoden eine Einsparung von 108.710 Euro im Jahr. Wird im Rahmen einer statischen Amortisationsrechnung ohne die Berücksichtigung von Zinseffekten eine Amortisationsdauer von maximal zwei Jahren zugrundegelegt, so können im Grenzfall der wirtschaftlichen Anwendung der entwickelten Methoden maximal 217.420 Euro in deren Umsetzung investiert werden. Umsetzungen, die mit einem Investitionsvolumen unterhalb dieser Grenze auskommen, können folglich als wirtschaftlich sinnvoll eingestuft werden.

Tabelle 2: Berechnung der Maschinenstundensätze der Autoklaven

| | Durchschnittliche Kosten pro Jahr [Euro] für... | | | | | Maschinenstundensatz [Euro] |
|-------------------|---|--------|--------------|----------------|--------|-----------------------------|
| | Energie | Raum | Abschreibung | Instandhaltung | Zinsen | |
| Autoklav 1 | 38.340 | 18.900 | 22.500 | 22.500 | 11.250 | 24,67 |
| Autoklav 2 | 4.860 | 2.700 | 16.500 | 16.500 | 8.250 | 11,35 |
| Autoklav 3 | 16.020 | 8.100 | 20.000 | 20.000 | 10.000 | 17,65 |
| Autoklav 4 | 74.880 | 27.000 | 35.000 | 35.000 | 17.500 | 37,88 |
| Autoklav 5 | 72.000 | 24.300 | 32.500 | 32.500 | 16.250 | 36,23 |

5 Schlussbetrachtung

5.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Verfahren zur Produktionssteuerung für die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs beschrieben. Dafür wird zunächst die Bedeutung von FVK im Allgemeinen sowie von Prepregs im Besonderen hergeleitet. Es handelt sich dabei um Leichtbauwerkstoffe, denen große Potenziale zur Gewichtsreduktion und damit zur Ressourceneffizienzsteigerung zugeschrieben werden. Bauteile aus Kohlenstofffaser-Prepregs werden dabei als Hochleistungsverbundwerkstoffe identifiziert, die einen Anwendungsschwerpunkt in der Luftfahrtbranche haben. Eine weitere Verbreitung dieser Werkstoffe wird jedoch durch die eingeschränkte Wirtschaftlichkeit der Bauteilherstellung verhindert. Diese Problematik wird in bestehenden Forschungsarbeiten vielfach aus Sicht der Fertigungsprozesse behandelt. Im Unterschied dazu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Perspektive der Fertigungsabläufe eingenommen.

Aufbauend auf dieser Motivation wird der Stand der Wissenschaft und Technik in den Themenfeldern der Herstellung von Bauteilen aus FVK, der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen sowie der Nutzung der RFID-Technologie als Befähiger für die situationsgerechte Produktionssteuerung analysiert. Zudem wird die Herstellung von Bauteilen aus FVK aus dem Blickwinkel der Produktionssteuerung charakterisiert, wobei der Fokus auf die Prepreg-Autoklav-Technologie gelegt wird. Neben Literaturrecherchen wird dafür auch eine Umfrage bei Unternehmen durchgeführt, die Bauteile aus Prepregs herstellen. Es folgt die Ableitung von Anforderungen an die zu entwickelnden Produktionssteuerungsverfahren. Aufgrund der resultierenden Problemstruktur wird zur Lösung der Aufgabenstellung ein Ansatz gewählt, der aus drei voneinander unabhängigen Produktionssteuerungsverfahren besteht, die als

- Verfahren zum vorausschauenden Aus- und Rücklagern von Prepreg-Rollen,
- Verfahren zur kühllkettenüberwachenden Reihenfolgebildung sowie
- Verfahren zur Chargenbildung am Autoklaven

entwickelt werden. Als gemeinsame Grundlage aller Verfahren wird darüber hinaus eine Modellvorstellung der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs eingeführt. Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Verfahren sei auf die in diese publikationsbasierte Dissertation eingebundenen Veröffentlichungen P3, P4 und P5 verwie-

sen. Der Bedarf an solchen Verfahren und die Potenziale der Anwendung der RFID-Technologie bei der Herstellung von FVK-Bauteilen werden darüber hinaus in den eingebundenen Publikationen P1 und P2 behandelt.

Die Evaluierung der neu erarbeiteten Produktionssteuerungsverfahren ergibt, dass durch die Anwendung des Verfahrens zum vorausschauenden Aus- und Rücklagern von Prepreg-Rollen die Menge an als Ausschuss zu deklarierenden Prepreg-Rollen reduziert und die Termintreue bei der Bereitstellung aufgetauter Rollen für die nachfolgenden Fertigungsschritte verbessert werden kann. Das Verfahren zur kühlkettenerüberwachenden Reihenfolgebildung trägt durch die Berücksichtigung der limitierten Verarbeitungszeiten der Prepreg-Materialien ebenfalls dazu bei, dass Ausschuss aufgrund der Verletzung der entsprechenden Zeitkontingente vermieden wird. Darüber hinaus wird eine Möglichkeit geschaffen, das potenzielle Auftreten von Ausschuss frühzeitig zu erkennen, was entsprechende Möglichkeiten zur fachgerechten Reaktion einschließt. Darüber hinaus bewirkt die Nutzung des Verfahrens zur Chargenbildung am Autoklaven eine Reduktion der notwendigen Chargenanzahl für ein festes Produktionsprogramm. Diesem Umstand kann entweder durch kürzere Betriebszeiten des Autoklaven oder durch die Herstellung zusätzlicher Bauteile begegnet werden. Letzteres impliziert eine Möglichkeit zur Umsatz- und Gewinnsteigerung, da der Autoklav als Engpass bei der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs die Ausbringungsmenge der gesamten Produktion determiniert. Hinsichtlich einer wirtschaftlichen Evaluierung der Entwicklungen werden aufgrund des hohen Einflusses unternehmensindividueller Umstände lediglich qualitative Angaben gemacht, die zusätzlich mit Hilfe eines Anwendungsszenarios illustriert werden.

Zusammenfassend wird nachgewiesen, dass die vorgenannten Produktionssteuerungsverfahren dazu geeignet sind, die Herstellungskosten von Bauteilen aus Prepregs zu senken. Somit können die entwickelten Verfahren zu einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit der Herstellung von Prepreg-Bauteilen beitragen. Damit wird ebenfalls der Ansatz bestätigt, zu diesem Zweck die Perspektive der Produktionsabläufe einzunehmen.

5.2 Ausblick

Der neu eingeführte Ansatz, der Wirtschaftlichkeitsproblematik bei der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs aus Sicht der Produktionsabläufe zu begegnen, ebnet den Weg für weiterführende Arbeiten. Zunächst ergibt sich daher weiterer For-

schungsbedarf bei der Kombination der bereits bestehenden Forschungsansätze aus Sicht der Produktionsprozesse sowie der neu eingeführten Sicht der Fertigungsabläufe. Am Beispiel des Autoklaven würde das bedeuten, Algorithmen zur Chargenbildung wie sie in dieser Arbeit vorgestellt werden, mit Verfahren zur optimierten Autoklavenbestückung aus Sicht des Aushärteprozesses, wie sie z. B. in DUMONT ET AL. (2012) vorgestellt werden, zu vereinigen.

Darüber hinaus eröffnen sich neue Handlungsfelder, wenn die Eigenschaften der Prepregs abstrahiert werden und für die vorgestellten Produktionssteuerungsverfahren die Anwendbarkeit auf andere Branchen geprüft wird. Fragestellungen hinsichtlich der Fertigungsabläufe bei Chargenprozessen und Gütern mit begrenzter Haltbarkeit bzw. temperatur- und zeitabhängigen Eigenschaften sind z. B. in der Lebensmittel- und Pharmabranche zu finden.

6 Literaturverzeichnis

AURICH ET AL. 2006

Aurich, J.; Drews, O.; Fuchs, C.; Wagenknecht, C.: Produktionssysteme für den Mittelstand. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 5, S. 302-307.

AURICH ET AL. 2010

Aurich, J.; Faltin, M.; Kempf, F.: Identifikation von RFID-Einsatzpotentialen im Fertigungsprozess. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 3, S. 206-210.

AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E. V. 2010

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.): *Handbuch Faser-verbundkunststoffe*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0881-3.

BÄUMER 1992

Bäumer, T.: *Verarbeitungs- und Anlagentechnik für die Herstellung langfaserverstärkter Faserverbundbauteile im Wickel- und Legeverfahren*. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1992). Aachen: Shaker 1992. ISBN: 3-86111-306-6.

BERNHARD ET AL. 2011

Bernhard, J.; Dräger, T.; Grabowski, C.; Sotriffer, I.; Philipp, T.: Integrating RFID in Fibre-Reinforced Plastics. In: *Wissendheit, U. (Hrsg.): RFID SysTech 2011*. Dresden, 17-18.05.2011. Berlin: VDE 2011. ISBN: 978-3-8007-3354-5.

BOGETTI & GILLESPIE 1991

Bogetti, T. A.; Gillespie, J. W., Jr.: Two-Dimensional Cure Simulation of Thick Thermosetting Composites. *Journal of Composite Materials* 25 (1991), S. 239-273.

BONGAERTS ET AL. 2000

Bongaerts, L.; Monostori, L.; McFarlane, D.; Kadar, B.: Hierarchy in Distributed Shop Floor Control. *Computers in Industry* 43 (2000), S. 123-137.

BÖSE & WINDT 2007

Böse, F.; Windt, K.: Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In: *Hülsmann, M. et al. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics*. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-47449-4.

BRECHER ET AL. 2013

Brecher, C.; Emonts, M.; Dubratz, M.; Kermer-Meyer, A.: Automated Manufacturing of Fiber-Reinforced Thermoplastic 3D-Lightweight Components. In: *Schuh, G. et al. (Hrsg.): Future Trends in Production Engineering*. Berlin: Springer 2013, S. 153-160. ISBN: 978-3-642-24490-2.

BRUCKNER 2012

Bruckner, W. (Red.): *Mit Kostensenken wächst der CFK-Markt*. VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Ausgabe vom 25.05.2012.

CAMPBELL 2004

Campbell, F. C.: Manufacturing Processes for Advanced Composites. New York: Elsevier 2004. ISBN: 1-8561-7415-8.

CARL ET AL. 2001

Carl, N.; Fiedler, R.; Jorasz, W.; Kiesel, M.: Grundkurs Betriebswirtschaftslehre. 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2001. ISBN: 3-528-05750-5.

CHEMNITZ ET AL. 2010

Chemnitz, M.; Krüger, J.; Patzlaff, M.; Tuguldur, E.-O.: SOPRO - Advancements in the Self-Organising Production. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Bilbao, Spanien, 13.-16.09.2010.

CHENG ET AL. 2008

Cheng, H.-C.; Chiang T.-C.; Fu, L.-C.: A Memetic Algorithm for Parallel Batch Machine Scheduling with Incompatible Job Families and Dynamic Job Arrivals. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Singapur, 12.-15.10.2008.

CHENG ET AL. 2010

Cheng, B.; Li, K.; Chen, B.: Scheduling a Single Batch-Processing Machine with Non-Identical Job Sizes in Fuzzy Environment Using an Improved Ant Colony Optimization. Journal of Manufacturing Systems 29 (2010) 1, S. 29-34.

CHERIF 2011

Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau. 1. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-17991-4.

CHIANG ET AL. 2008

Chiang, T.-C.; Cheng, H.-C.; Fu, L.-C.: An Efficient Heuristic for Minimizing Maximum Lateness on Parallel Batch Machines. In: Pan, J.-S. et al. (Hrsg.): Proceedings 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society 2008. ISBN: 978-0-7695-3382-7. S. 621-627.

COLLEDANI & TOLIO 2006

Colledani, M.; Tolio, T.: Impact of Quality Control on Production System Performance. Annals of the CIRP 55 (2006) 1, S. 453-456.

CZUCHRA 2010

Czuchra, W.: UML in logistischen Prozessen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0796-0.

DAMODARAN ET AL. 2006

Damodaran, P.; Manjeshwar, P. K.; Srihari, K.: Minimizing Makespan on a Batch-Processing Machine with Non-Identical Job Sizes Using Genetic Algorithms. International Journal of Production Economics 103 (2006) 2, S. 882-891.

DAVÉ & LOOS 2000

Davé, R. S.; Loos, A. C.: Processing of Composites. München: Hanser/Gardner Publications 2000. ISBN: 1-56990-226-7.

DENKENA ET AL. 2005

Denkena, B.; Hasenfuß, K.; Liedtke, C.: Gentelligente Bauteile - Genetik und Intelligenz in der Produktionstechnik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2005) 10, S. 569-572.

DENKENA ET AL. 2010

Denkena, B.; Henning, H.; Lorenzen, L.-E.: Genetics and Intelligence: New Approaches in Production Engineering. Production Engineering - Research and Development 4 (2010) 1, S. 65-73.

DIEKMANN ET AL. 2007

Diekmann, T.; Melski, A.; Schumann, M.: Data-on-Network vs. Data-on-Tag: Managing Data in Complex RFID Environments. In: Sprague, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 40th Annual Hawaii International Conference on System Science. Los Alamitos: IEEE Computer Society 2007. ISBN: 0-7695-2755-8

DIETRICH ET AL. 2012

Dietrich, F.; Löchte, C.; Jeschke, S.; Raatz, A.: An Agent-Based Concept for Planning and Control of the Production of Carbon Fibre Reinforced Plastics Aircraft Structures with Mobile Production Units. Production Engineering - Research and Development 6 (2012) 4-5, S. 531-539.

DUMONT ET AL. 2012

Dumont, F.; Frühlingsdorf, W.; Weimer, C.: Virtual Autoclave Implementation for Improved Composite Part Quality and Productivity. 4th European Conference on Materials and Structures in Aerospace. Hamburg, 07.-08.02.2012.

EHINGER 2013

Ehinger, C. A.: Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4233-5.

EHRENSTEIN 2006

Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. 2. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-44622-716-3.

ELMARAGHY 2011

ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-23859-8.

ENEWOLDSSEN 1998

Enewoldsen, P.: Einsatz von Industrierobotern für die flexible Fertigung von flächigen Bauteilen aus Faserverbundkunststoff. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1998). Aachen: Shaker 1998. ISBN: 3-8265-3845-5.

ESCHE 2001

Esche, R. vor dem: Herstellung langfaserverstärkter Thermoplastbauteile unter Zuhilfenahme von Hochleistungslasern als Wärmequelle. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-9171-2.

FANDEL ET AL. 2011

Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: Produktionsmanagement. 2. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-14591-9.

FEHER & THUMM 2003

Feher, L.; Thumm, M.: Hephaistos - ein neuartiges Mikrowellensystem für die Produktion von kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe 35 (2003) 3, S. 123-127.

FINKENZELLER 2006

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. 4. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 3-446-40398-1.

FREITAG ET AL. 2004

Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. Industrie Management 20 (2004) 1, S. 23-27.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 6. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-23246-X.

GÜNTHER ET AL. 2008

Günther, O. P.; Kletti, W.; Kubach, U.: RFID in Manufacturing. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76453-3.

GUO ET AL. 2010

Guo, C.; Jiang, Z.; Hu, H.: A Hybrid Ant Colony Optimization Method for Scheduling Batch Processing Machine in the Semiconductor Manufacturing. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Piscataway: IEEE 2010. ISBN: 978-1-4244-8503-1

GUO ET AL. 2012

Guo, C.; Zhibin, J.; Zhang, H.; Li, N.: Decomposition-Based Classified Ant Colony Optimization Algorithm for Scheduling Semiconductor Wafer Fabrication System. Computers & Industrial Engineering 62 (2012) 1, S. 141-151.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 3-18-400924-6.

HENNE ET AL. 2009

Henne, M.; Mueller, M.; Sutter, S.; Bender, K.; Weimer, C.; Spanner, H.: Reduction of Process Cycle Time and Improvement of Mechanical Properties of Composite Parts Manufactured in Resin Transfer Molding by Application of Grilon MS Binder Yarn. In: Erath, M. A. (Hrsg.): Composites - Innovative Materials for Smarter Solutions. Riechen: SAMPE Europe Conferences 2009. ISBN: 978-3-9522677-9-0

HENNING & MOELLER 2011

Henning, F.; Moeller, E.: *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HEUMER 2013

Heumer, W. (Red.): *Die Luftfahrt sucht neue Wege in die Zukunft*. VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Ausgabe vom 11.01.2013.

HUANG ET AL. 2008A

Huang, G. Q.; Zhang, Y. F.; Chen, X.; Newman, S. T.: RFID-Enabled Real-Time Wireless Manufacturing for Adaptive Assembly Planning and Control. *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (2008) 6, S. 701-713.

HUANG ET AL. 2008B

Huang, G. Q.; Zhang, Y. F.; Jiang, P. Y.: RFID-Based Wireless Manufacturing for Real-Time Management of Job Shop WIP Inventories. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2008) 7-8, S. 752-764.

HUANG ET AL. 2009

Huang, G. Q.; Wright, P. K.; Newman, S. T.: Wireless Manufacturing: A Literature Review, Recent Developments, and Case Studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2009) 7, S. 579-594.

HUANG ET AL. 2011

Huang, G. Q.; Qu, T.; Fang, M. J.; Bramley, A. N.: RFID-Enabled Gateway Product Service System for Collaborative Manufacturing Alliances. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 60 (2011), S. 465-468.

JÄGER & HAUKE 2010

Jäger, H.; Hauke, T.: *Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe*. München: *Moderne Industrie* 2010. ISBN: 978-3-86236-001-7.

JINTAO ET AL. 2010

Jintao, M.; Jun, Y.; Xiaoxu, L.: Parallel-Batching Scheduling Problem with Family Jobs for Minimizing Makespan. In: Tan, H. (Hrsg.): *2nd international Conference on Industrial and Information Systems*. Piscataway: IEEE 2010. ISBN: 978-1-4244-8217-7. S. 159-162.

JOLAI 2005

Jolai, F.: Minimizing Number of Tardy Jobs on a Batch Processing Machine with Incompatible Job Families. *European Journal of Operational Research* 162 (2005) 1, S. 184-190.

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen*. 2. Aufl. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-540-64514-4.

KEMPF ET AL. 1998

Kempf, K. G.; Uzsoy, R.; Qang, C.-S.: Scheduling a Single Batch Processing Machine with Secondary Resource Constraints. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (1998) 1, S. 37-51.

KERN 2006

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-27725-0.

KLEMMT ET AL. 2008

Klemmt, A.; Horn, S.; Weigert, G.; Hielscher, T.: Simulation-Based and Solver-Based Optimization Approaches for Batch Processes in Semiconductor Manufacturing. 2008 Winter Simulation Conference. Miami, USA, 07.-10.12.2008.

KLEMMT ET AL. 2009

Klemmt, A.; Weigert, G.; Almeder, C.; Mönch, L.: A Comparison of MIP-Based Decomposition Techniques and VNS Approaches for Batch Scheduling Problems. 2009 Winter Simulation Conference, Austin, USA, 13.-16.12.2009.

KUIK ET AL. 1994

Kuik, R.; Salomon, M.; Wassenhove, L. N.: Batching Decisions: Structure and Models. European Journal of Operational Research 75 (1994), S. 243-263.

KURBEL & ENDRES 2005

Kurbel, K.; Endres, A.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3-486-57578-3.

LANZA & PETERS 2012

Lanza, G.; Peters, S.: Integrated Capacity Planning over Highly Volatile Horizons. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 1, S. 395-398.

LI & QIAO 2008

Li, L.; Qiao, F.: ACO-Based Scheduling for a Single Batch Processing Machine in Semiconductor Manufacturing. 4th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Washington DC, USA, 23.-26.08.2008, S. 85-90.

LI ET AL. 2009

Li, L.; Qiao, F.; Wu, Y. D.: ACO-Based Scheduling of Parallel Batch Processing Machines to Minimize the Total Weighted Tardiness. 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Bangalore, India, 22-25.08.2009, S. 280-285.

LI & YUAN 2006

Li, W.; Yuan, J.: Single Machine Parallel Batch Scheduling Problem with Release Dates and Three Hierarchical Criteria to Minimize Makespan, Machine Occupation Time and Stocking Cost. International Journal of Production Economics 102 (2006) 1, S. 143-148.

LIU ET AL. 2005A

Liu, M. R.; Zhang, Q. L.; Ni, L. M.; Tseng, M. M.: An RFID-Based Distributed Control System for Mass Customization Manufacturing. In: Cao, J. et al. (Hrsg.): Parallel and Distributed Processing and Applications. Berlin: Springer 2005. ISSN: 0-30297-43.

LIU ET AL. 2005B

Liu, Q.-l.; Wang, W.; Zhan, H.-r.; Wang, Z.-g.; Liu, R.-g.: Optimal Scheduling Method for a Bell-Type Batch Annealing Shop and its Application. *Control Engineering Practice* 13 (2005) 10, S. 1315-1325.

LÖDDING 2005

Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-20232-3.

LUH ET AL. 1997

Luh, P. B.; Wang, J. H.; Wang, J. L.; Tomastik, R. N.: Near-Optimal Scheduling of Manufacturing Systems with Presence of Batch Machines and Setup Requirements. *Annals of the CIRP* 46 (1997) 1, S. 397-402.

LÜTJEN ET AL. 2013

Lütjen, M.; Dittmer, P.; Veigt, M.: Quality driven distribution of intelligent containers in cold chain logistics networks. *Production Engineering - Research and Development* 7 (2013) 2-3, S. 291-297.

McFARLANE ET AL. 2003

McFarlane, D.; Sarma, S.; Chirn, J. L.; Wong, C. Y.; Ashton, K.: Auto ID Systems and Intelligent Manufacturing Control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (2003), S. 365-376.

MERSMANN 2011

Mersmann, C.: Industrializing metrology - Machine vision integration in composites production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 1, S. 511-514.

MÖNCH ET AL. 2005

Mönch, L.; Balasubramanian, H.; Fowler, J. W.; Pfund, M. E.: Heuristic Scheduling of Jobs on Parallel Batch Machines with Incompatible Job Families and Unequal Ready Times. *Computers & Operations Research* 32 (2005) 11, S. 2731-2750.

MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Vancza, J.; Kumara, S. R.: Agent-Based Systems for Manufacturing. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 2, S. 697-720.

MÜLLER 2004

Müller, E. (Hrsg.): *Integration der Transpondertechnologie zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der operativen Produktionssteuerung*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz 2004. ISSN: 0947-2495.

NEITZEL & MITSCHANG 2004

Neitzel, M.; Mitschang, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. München: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22041-0.

NYHUIS 2006

Nyhuis, P.: Logistic Production Operating Curves - Basic Model of the Theory of Logistic Operating Curves. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 1, S. 441-444.

NYHUIS ET AL. 2009

Nyhuis, P.; Schulze, C. P.; Hartmann, W.; Schmidt, M.; Herde, F.: Bauteilgetriebene Montagesteuerung und Fabrikstrukturierung durch Nutzung Gentelligenter Technologie. *Industrie Management* 25 (2009) 2, S. 13-16.

ORTH 2008

Orth, A.: Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2007). Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-6983-8.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9.

PHILIPP ET AL. 2012A

Philipp, T. R.; Klein, T. P.; Reinhart, G.: Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites. *IEEE Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Hong Kong, China, 10.-13.12.2012.

PHILIPP ET AL. 2012B

Philipp, T. R.; Stockenberger, D.; Fischer, R.; Günthner, W. A.; Reinhart, G.: Kühlkettenüberwachung für Prepreg-Materialien. *Productivity Management* 17 (2012) 3, S. 27-30.

PHILIPP ET AL. 2013A

Philipp, T. R.; Schreiber, M.; Reinhart, G.: Vorausschauende Steuerung der Auftauprozesse für Prepreg-Materialien. *wt Werkstattstechnik online* 103 (2013) 4, S. 317-323.

PHILIPP ET AL. 2013B

Philipp, T. R.; Winkler, T.; Reinhart, G.: Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Setubal, Portugal, 29.-31.05.2013.

PHILIPP & REINHART 2011

Philipp, T. R.; Reinhart, G.: Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Berlin: Springer 2011, S. 263-268. ISBN: 978-3-642-23859-8.

POON ET AL. 2007

Poon, K. T.; Choy, K. L.; Lau, H. C.: A Real-time Manufacturing Risk Management System: An Integrated RFID Approach. In: Anderson, T. R. et al. (Hrsg.): *Portland International Center for Management of Engineering and Technology*. Piscataway: IEEE 2007. ISBN: 1-890843-15-6. S. 2872-2879.

POTTS & KOVALYOV 2000

Potts, C. N.; Kovalyov, M. Y.: Scheduling with Batching: A Review. *European Journal of Operational Research* 120 (2000), S. 228-249.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Philipp, T.; Ostgathe, M.: Einsatz von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 9, S. 785-790.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Genc, E.; Niehues, M.; Ostgathe, M.: Planung und Steuerung von Abläufen in der Automobilindustrie. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 5, S. 326-331.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Philipp, T. R.; Bernhard, J.; Dräger, T.; Grabowski, C.; Hoffmann, M.: Integrating RFID Transponders into Fibre-Reinforced Plastics by Using Textile Production Technology. 2012 European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (SmartSysTech). Garching bei München 12.-13.06.2012.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke, D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.; Pirvu, B.; Stephan, P.; Hodek, S.; Scholz-Reiter, B.; Thoben, K.-D.; Gorldt, C.; Hribernik, K. A.; Lappe, D.; Veigt, M.: Cyber-Physische Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2 (Sonderheft Industrie 4.0), S. 84-89.

REINHART & PHILIPP 2012

Reinhart, G.; Philipp, T. R.: Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 3, S. 138-144.

REITHOFER 2013

Reithofer, N.: Bilanzpressekonferenz Geschäftsjahr 2012. BMW Group. München, 19.03.2012. <https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/startpage.htm> - zuletzt geprüft 04.04.2013.

REUTER 1994

Reuter, G.: Experimentelle Untersuchung der Wirkung von Umgebungseinflüssen auf das Betriebsverhalten von Identifikations- und Kommunikationssystemen mit elektronischen Datenträgern. Diss. Universität Karlsruhe (1994). Karlsruhe: Institut für Fördertechnik Karlsruhe 1994. ISSN: 0171-2772.

RÜMENAPP 1996

Rümenapp, S.: Automatisierte Ultraschallprüfung von Faserverbundkunststoffen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1996). Aachen: Shaker 1996. ISBN: 3-8265-1885-3.

RUMMENHÖLLER 1996

Rummenholler, S.: Werkstofforientierte Prozessauslegung für das Fräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1996). Aachen: Shaker 1996. ISBN: 3-8265-1429-7.

SCHMIDT 1994

Schmidt, R.: Einsatz von Hochleistungslasern für die Fertigung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix im Wickelverfahren. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1994). Düsseldorf: VDI 1994. ISBN: 3-18-332102-5.

SCHMIDT 2005

Schmidt, F.: Fertigungs- und Maschinenkonzept zur kontinuierlichen Herstellung endloser faserverstärkter Thermoplastrohre. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2005). Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3-8322-4177-9.

SCHMITT ET AL. 2008

Schmitt, R.; Pfeifer, T.; Mersmann, C.; Orth, A.: A Method for the Automated Positioning and Alignment of Fibre-Reinforced Plastic Structures Based on Machine Vision. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 1, S. 501-504.

SCHMITT ET AL. 2009

Schmitt, R.; Schönberg, A.; Mersmann, C.; Damm, B.: Messtechnik in der automatisierten FVK-Fertigung. *wt Werkstattstechnik online* 99 (2009) 3, S. 157-162.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 2, S. 712-729.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2010

Scholz-Reiter, B.; Rekersbrink, H.; Görges, M.: Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 465-468.

SCHUH 2006A

Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHUH 2006B

Schuh, G.: Smart Logistics: Intelligent Networked Systems. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 1, S. 505-508.

SCHUH ET AL. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.: High Resolution Production Management. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 1, S. 439-442.

SCHÜRMAN 2007

Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-72189-5.

SCHÜTTE 1998

Schütte, R.: Analyse, Konzeption und Realisierung von Informationssystemen - eingebettet in ein Vorgehensmodell zum Management des organisatorischen Wandels. In: Ahlert, D. et al. (Hrsg.): *Informationssysteme für das Handelsmanagement*. Berlin: Springer 1998, S. 189-237. ISBN: 3-540-6384-X.

SIKORA 1996

Sikora, R.: A Genetic Algorithm for Integrating Lot-Sizing and Sequencing in Scheduling a Capacitated Flow Line. *Computers & Industrial Engineering* 30 (1996) 4, S. 969-981.

SIMPSON & ABAKAROV 2009

Simpson, R.; Abakarov, A.: Optimal Scheduling of Canned Food Plants Including Simultaneous Sterilization. *Journal of Food Engineering* 90 (2009), S. 53-59.

SOBEYKO & MÖNCH 2011

Sobeyko, O.; Mönch, L.: A Comparison of Heuristics to Solve a Single Machine Batching Problem with Unequal Ready Times of the Jobs. 2011 Winter Simulation Conference. Phoenix, USA, 11.-14.12.2011.

STEYER 2013

Steyer, M.: Laserunterstütztes Tapelegeverfahren zur Fertigung endlosfaserverstärkter Thermoplastlaminat. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2012). Aachen: Apprimus 2013. ISBN: 978-3-86359-105-2.

STRABER 2012

Straßer, G.: Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4161-1.

SUNG ET AL. 2002

Sung, C. S.; Choung, Y. I.; Hong, J. M.; Kim, Y. H.: Minimizing Makespan on a Single Burn-In Oven With Job Families and Dynamic Job Arrival. *Computers & Operations Research* 29 (2002), S. 995-1007.

TRECHOW 2012

Trechow, P. (Red.): CFK-Leichtbau: Chancen für Gründer. VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Ausgabe vom 14.12.2012.

VALCKENAERS & VAN BRUSSEL 2005

Valckenaers, P.; van Brussel, H.: Holonic Manufacturing Execution Systems. *Annals of the CIRP* 54 (2005) 1, S. 427-432.

VAN THIEL 2013

van Thiel, B.: Entwicklung einer Methodik zur Zustandsüberwachung von Bauteilen aus sensitiven Werkstoffen. Diss. Leibniz Universität Hannover (2012). Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum 2013. ISBN: 978-3-943104-83-7.

VENTURA & KIM 2003

Ventura, J. A.; Kim, D.: Parallel Machine Scheduling with Earliness-Tardiness Penalties and Additional Resource Constraints. *Computers & Operations Research* 30 (2003) 13, S. 1945-1958.

VDI 2385

VDI 2385: Leitfaden für die materialflußgerechte Planung von Industrieanlagen. Düsseldorf: Beuth 1989.

VDI 4005

VDI 4005: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse. Düsseldorf: Beuth 1981.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE ET AL. 1983

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.); VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (Hrsg.); REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI 1983. ISBN: 3-18400-605-0.

VILKOV & WEIB 2008

Vilkov, L.; Weiß, B.: Prozessorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Systemen anhand eines Referenz-Wirkungsmodells. In: Becker, J. et al. (Hrsg.): Wertschöpfungsnetzwerke. Heidelberg: Physica 2008. ISBN: 978-3-7908-2055-3.

VOGELER 2009

Vogeler, S.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Implementierung der RFID-Technologie in logistischen Systemen am Beispiel der Bekleidungsindustrie. Diss. Technische Universität Berlin (2009). Berlin: Univ.-Verl. der Techn. Univ. 2009. ISBN: 978-3-7983-2156-4.

WANG & TANG 2008

Wang, G.; Tang, L.: A Lagrangian Relaxation for Flexible Order Batching Problem in Iron and Steel Industry. In: IEEE (Hrsg.): 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE 2008. ISBN: 978-1-4244-1706-3

WANG & UZSOY 2002

Wang, C.-S.; Uzsoy, R.: A Genetic Algorithm to Minimize Maximum Lateness on a Batch Processing Machine. Computers & Operations Research 29 (2002), S. 1621-1640.

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 4. Aufl. München: Hanser 1997. ISBN: 3-446-18776-6.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WULFSBERG ET AL. 2010

Wulfsberg, J.; Clausing, N.; Neuhaus, F.; Schildt, R.: Sensorunterstützung in der automatisierten Montage von CFK-Bauteilen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 692-697.

ZÄH ET AL. 2003

Zäh, M.; Cisek, R.; Sudhoff, W.; Redelstab, P.: Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 4, S. 327-331.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M.; Beetz, M.; Shea, K.; Reinhart, G.; Bender, K.; Lau, C.; Ostgathe, M.; Vogl, W.; Wiesbeck, M.; Engelhard, M.; Ertelt, C.; Ruehr, T.; Friedrich, R.; Herle, S.: The Cognitive Factory. In: ElMaraghy, H.A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-066-1

ZÄH ET AL. 2010

Zäh, M.; Ostgathe, M.; Wiesbeck, M.: Ganzheitliches Datenmodell für kognitive Produktionssysteme. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 4, S. 309-315.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M.; Ostgathe, M.; Geiger, F.; Reinhart, G.: Adaptive Job Control in the Cognitive Factory. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-23859-8.

ZÄH & OSTGATHE 2009

Zäh, M.; Ostgathe, M.: A Multi-Agent-supported, Product-based Production Control. 7th IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch, Neuseeland. 9.-11.12.2009.

ZÄPFEL 2001

Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3-486-25618-1.

ZBIB ET AL. 2008

Zbib, N.; Raileanu, S.; Sallez, Y.; Berger, T.; Trentesaux, D.: From Passive Products to Intelligent Products: The Augmentation Module Concept. 5th International Conference on Digital Enterprise Technology. Nantes, Frankreich, 22.-24.10.2008.

ZENDER 1992

Zender, H.: Einsatz von Industrierobotern zur Fertigung von Faserverbundbauteilen im Wickel- und Tapelegeverfahren. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1992). Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 3-18-145002-2.

ZETTLER ET AL. 2011

Zettler, J.; Philipp, T. R.; Reinhart, G.; Arent, J.-C.; Dräger, T.; Grabowski, C.: Influence of Integrated RFID Transponders on Structural Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics. In: Degenhardt, R. et al. (Hrsg.): 6th International Conference "Supply on the wings 2011". Frankfurt/Main, 02.-04.11.2011. ISBN: 978-3-942939-01-0.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Aufbau der Arbeit | 5 |
| Abbildung 2: Übersicht des relevanten Stands der Technik | 7 |
| Abbildung 3: Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe (JÄGER & HAUKE 2010, S. 47) | 8 |
| Abbildung 4: Verwendung von FVW in der Luftfahrt (JÄGER & HAUKE 2010, S. 49, unter Nutzung von Daten der NASA sowie von Airbus und Boeing) | 9 |
| Abbildung 5: Kostenstruktur von CFK-Bauteilen (FEHER & THUMM 2003) | 10 |
| Abbildung 6: Definition der temperaturabhängigen Lager- und Verarbeitungszeiten für Prepreg-Materialien (PHILIPP ET AL. 2012B, unter Verwendung von Daten der Eurocopter Deutschland GmbH) | 13 |
| Abbildung 7: Bauteilherstellung im Prepreg-Verfahren in Anlehnung an CAMPBELL (2004), Darstellung: P5 | 14 |
| Abbildung 8: Autoklavenzyklus (CAMPBELL 2004, S. 181 ff.) | 16 |
| Abbildung 9: Einordnung der PPS ins Unternehmen (HACKSTEIN 1989, S. 4 f.) | 17 |
| Abbildung 10: Zielsystem der Produktionslogistik (WIENDAHL 1997, S. 251) | 19 |
| Abbildung 11: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (HACKSTEIN 1989, S. 5) | 22 |
| Abbildung 12: Modell der Fertigungssteuerung nach LÖDDING (2005, S. 7) | 24 |
| Abbildung 13: Unterscheidungsmerkmale bei Chargenbildungsproblemen | 26 |
| Abbildung 14: Klassen eines intelligenten Produkts nach ZBIB ET AL. (2008), Darstellung: OSTGATHE (2012, S. 54), REINHART ET AL. (2013) | 32 |
| Abbildung 15: RFID-Systemelemente und Integration ins Unternehmen, in Anlehnung an VOGELER (2009, S. 37 ff.) | 37 |
| Abbildung 16: RFID-Transponder | 38 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 17: Integrierter LF-RFID-Transponder (REINHART ET AL. 2012) | 42 |
| Abbildung 18: Integrierte HF- und UHF-RFID-Transponder (BERNHARD ET AL. 2011) | 43 |
| Abbildung 19: RFID-Ausleseszenarien im realen Umfeld (REINHART ET AL. 2010, P1) | 44 |
| Abbildung 20: Umsetzung der Anforderungen in Produktionssteuerungsverfahren | 48 |
| Abbildung 21: Übersicht der Modellvorstellung | 49 |
| Abbildung 22: Attribute der Prepreg-Rolle | 50 |
| Abbildung 23: Zeitkontingente und Zustände der Prepreg-Rolle | 51 |
| Abbildung 24: Attribute des Auftrags | 53 |
| Abbildung 25: Zustände und Zeitkontingente des Auftrags | 54 |
| Abbildung 26: Aushärtezyklus eines Bauteils, in Anlehnung an CAMPBELL (2004, S. 181 ff.) | 55 |
| Abbildung 27: Detaillierter Fertigungsablauf des Auftrags | 57 |
| Abbildung 28: Attribute des Autoklaven | 59 |
| Abbildung 29: Randbedingungen hinsichtlich der Aushärtezeit auf Haltestufe 1 (P4) | 60 |
| Abbildung 30: Überblick der Stationen | 61 |
| Abbildung 31: Anwendung der RFID-Technologie (P2) | 62 |
| Abbildung 32: Produktionssteuerungsverfahren und Stationen | 64 |
| Abbildung 33: Nutzung rollenindividueller Daten | 66 |
| Abbildung 34: Nutzung bauteilindividueller Daten | 67 |
| Abbildung 35: Ausleseversuche mit integrierten UHF-RFID-Transpondern (P5) | 69 |
| Abbildung 36: Illustration der wirtschaftlichen Effekte durch Ausschussreduktion | 72 |

8 Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Eingangsdaten der Autoklaven im Anwendungsszenario | 74 |
| Tabelle 2: | Berechnung der Maschinenstundensätze der Autoklaven | 76 |
| Tabelle 3: | Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P1 | 105 |
| Tabelle 4: | Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P2 | 106 |
| Tabelle 5: | Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P3 | 108 |
| Tabelle 6: | Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P4 | 109 |
| Tabelle 7: | Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P5 | 111 |

9 Anhang

9.1 Übersicht betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen der Forschungsarbeiten, die in der vorliegenden Dissertation und den eingebundenen Publikationen beschrieben werden, wurden unter intensiver inhaltlicher und methodischer Betreuung des Autors am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München Studienarbeiten angefertigt. Diese beschäftigen sich mit Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung im Anwendungsfeld der Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Erkenntnisse aus diesen studentischen Arbeiten sind teilweise in die vorliegende Dissertation eingeflossen. Der Autor dankt ausdrücklich allen Studierenden für ihr großes Engagement und die Unterstützung bei seinen Forschungsarbeiten. Folgende studentische Arbeiten stehen dabei in direktem Zusammenhang mit der vorliegenden Dissertation (alphabetische Reihenfolge):

- Klein, Thorsten: „Entwicklung eines Chargenbildungsalgorithmus für das Aushärten von Prepreg-Bauteilen im Autoklaven“ (Diplomarbeit); Abgabe am 09.03.2012; Thorsten Klein ist Koautor der eingebundenen Publikation P4.
- Schreiber, Martin: „Intelligente Auftausteuerung für die Herstellung von Prepreg-Bauteilen“ (Bachelor’s Thesis); Abgabe am 14.11.2012; Martin Schreiber ist Koautor der eingebundenen Publikation P3.
- Winkler, Thomas: „RFID-basiertes Produktionssteuerungskonzept für die Faserverbundherstellung in Prepreg-Technologie“ (Diplomarbeit); Abgabe am 24.09.2012; Thomas Winkler ist Koautor der eingebundenen Publikation P5.

Darüber hinaus wurden weitere Studienarbeiten im Rahmen der Forschungsarbeiten des Autors betreut, die thematisch im weitesten Sinne in das Feld der Dissertation einzuordnen sind. Diese sind im Einzelnen (alphabetische Reihenfolge):

- Berger, Matthias: „Datenmodell für die RFID-basierte Steuerung der Faserverbundproduktion“ (Diplomarbeit); Abgabe am 14.11.2012.
- Chowanetz, Patrick: „Wirtschaftlichkeitsbewertung des Einsatzes von RFID in der Faserverbundherstellung“ (Bachelor’s Thesis); Abgabe am 03.11.2011.

- Grundstein, Sebastian: „Sicherheitskonzept für die RFID-Anwendung in der Produktion“ (Semesterarbeit); Abgabe am 06.05.2011.
- Haux, Moritz Alexander: „Packungsalgorithmus für FVW-Bauteile im Auto-klaven“ (Diplomarbeit); Abgabe am 14.04.2013.
- Herrmann, Sebastian: „Steuerung von Ofenprozessen mittels bauteilindividueller Datenhaltung und Sensorik“ (Bachelor’s Thesis); Abgabe am 31.10.2011.
- Homan, Jessica: „Simulativer Vergleich von Produktionssteuerungsverfahren anhand eines Prepreg-Fertigungsprozesses für CFK“ (Semesterarbeit); Abgabe am 01.08.2011.
- Klein, Thorsten: „Konstruktive Anpassung einer Setzmaschine zum automatischen Aufbringen von RFID-Transponder-Elementen auf Faserverbundwerkstoffe“ (Semesterarbeit); Abgabe am 30.06.2011.
- Kostakev, Ivan: „Modeling and Simulation of a Resin Transfer Molding Process for Carbon Fiber-Reinforced Polymers“ (Semesterarbeit); Abgabe am 19.01.2011.
- Kuhnigk, Steffen: „Analyse von Fertigungssteuerungsverfahren bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen“ (Semesterarbeit); Abgabe am 23.02.2012.
- Mallach, Konrad: „Entwicklung eines rechnerunterstützten Werkzeuges zur Konfiguration von RFID-Anwendungen (RFID-Konfigurator)“ (Diplomarbeit); Abgabe am 15.07.2011.
- Sailer, Benedikt: „Machbarkeitsstudie zur automatischen Beschichtung von Fahrzeugchassis in der Nutzfahrzeugindustrie“ (Diplomarbeit); Abgabe am 31.10.2011.
- Staib, Markus: „Bewertungsschema für die zentrale oder dezentrale Haltung von Produktionsdaten“ (Semesterarbeit); Abgabe am 30.08.2012.
- Stefanziosa, Clemens: „Rahmenkonzept für den Einsatz von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen“ (Semesterarbeit); Abgabe am 21.12.2011.
- Tremmer, Jan: „Verfahren zur Produktionsplanung für die Herstellung von Prepreg-Bauteilen“ (Semesterarbeit); Abgabe am 19.09.2012.

-
- Wunschel, Nissanka: „Modellierung und Simulation von RFID-unterstützten Herstellungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe“ (Semesterarbeit); Abgabe am 27.09.2012.
 - Zinnecker, Victoria: „Analyse des Einsatzes von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen mit Hilfe der Unified Modeling Language“ (Semesterarbeit); Abgabe am 17.01.2012.

9.2 Genutzte Softwareprodukte

Für die Evaluation der Produktionssteuerungsverfahren im Rahmen der eingebundenen Publikationen wurde die Software *Plant Simulation* der Firma Siemens Industry Software GmbH & Co. KG (Franz-Geuer-Straße 10, 50823 Köln) genutzt.

Um die im Rahmen der Forschungsarbeiten genutzte Literatur zu verwalten, wurde die Software *Citavi* der Firma Swiss Academic Software GmbH (Florhofstr. 2, 8820 Wädenswil, Schweiz) herangezogen.

Darüber hinaus wurden für das Erstellen der vorliegenden Arbeit Produkte aus dem Softwarepaket *Microsoft Office* verwendet (Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, USA).

9.3 Zusammenfassungen der eingebundenen Publikationen

9.3.1 P1: „Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics“

Die eingebundene Publikation P1 mit dem Titel „Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics“ ist durch die herausragenden Materialeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen, die im Gegensatz zu denen sehr geringer Verbreitung stehen, motiviert. Dabei werden hohe Aufwände für die manuelle Qualitätssicherung und die zugehörigen Dokumentationsaufgaben als ein Hemmnis der wirtschaftlichen Fertigung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen gesehen. Entsprechend wird das Informationsmanagement als ein Handlungsfeld abgeleitet und die RFID-Technologie als ein grundsätzlicher Befähiger identifiziert.

Das Ziel der Veröffentlichung ist demnach die Zusammenführung der Produktion von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen und der RFID-Technologie. Dabei sollen die durch die RFID-Integration hervorgerufenen Effekte auf die logistischen Zielgrößen (Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung, Termintreue) verstanden und evaluiert werden. Die Untersuchungen werden anhand einer industriellen Fertigung der Luftfahrt vorgenommen.

In einem ersten Schritt werden dafür Versuche beschrieben, bei denen Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen mit sogenannten On-Metal-RFID-Transpondern ausgestattet werden. Für diese Bauteile wird in den drei Versuchsszenarien RFID-Gate, -Regal und -Tisch jeweils der Prozentsatz an durch die installierten RFID-Lese-/Schreibgeräte erfassten Bauteilen aufgenommen. Die Leseraten werden als ausreichend betrachtet, wodurch die prinzipielle Nutzbarkeit der RFID-Technologie bei der Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen als gegeben angesehen wird.

Weiterführend wird in einem zweiten Schritt ein Modell der Materialflusssimulation beschrieben, das ausgehend von der betrachteten industriellen Fertigung erstellt wurde. In diesem Modell sind sowohl die Material- als auch die Informationsflüsse der Fertigungsabläufe abgebildet. Nach einer Validierung des Modells hinsichtlich der Anzahl der produzierten Bauteile wird dieses um den Einsatz der RFID-Technologie erweitert. Dies hat eine vollständige Elimination papiergebundener Informationen sowie eine Reduktion von Zeiten für Dokumentationsaufgaben zur Folge. Beide Simulationsmodelle werden dann hinsichtlich der logistischen Zielgrößen verglichen, wobei sich das um die RFID-Technologie erweiterte Modell durch geringere Durchlaufzeiten, niedrigere Bestände sowie eine reduzierte Auslastung der Fertigungsressourcen auszeichnet. Ebenfalls konnte die Pünktlichkeit der Auslieferung verbessert sowie die Anzahl an produzierten Bauteilen gesteigert werden.

Es wird gefolgert, dass die Nutzung der RFID-Technologie bei der Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen dafür geeignet ist, die Material- und Informationsflüsse zu verbessern. Darauf aufbauend werden weiterführende Anwendungsfelder der RFID-Technologie im Bereich der Faserverbundwerkstoffe sowie zugehörige Forschungsfragen skizziert.

Autoren dieser Veröffentlichung sind Dipl.-Ing. Tobias R. Philipp und Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart. Die Arbeitsanteile von Tobias R. Philipp sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P1

| | |
|--|------|
| Erarbeitung der Forschungsfragestellung | 90 % |
| Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik | 95 % |
| Planung und Durchführung der Auslesetests | 90 % |
| Modellierung der Fertigungsumgebung in Tecnomatix Plant Simulation | 50 % |
| Auswertung der Simulationsläufe und Interpretation der Ergebnisse | 95 % |
| Verfassen der Publikation | 95 % |

9.3.2 P2: „Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung“

Die eingebundene Veröffentlichung P2 mit dem Titel „Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung“ gründet auf den hohen Herstellungskosten für Bauteile aus vorimprägnierten Faserhalbezeugen (Prepregs). Da die Verarbeitungstechnik als Schlüssel für die Ausweitung der Anwendungsmöglichkeiten dieser Werkstoffe und damit für die Vergrößerung des Marktpotenzials gesehen wird, besteht in diesem Bereich Handlungsbedarf. Vor diesem Hintergrund werden die Fertigungsabläufe im Fokus betrachtet.

Ziel der Veröffentlichung ist es folglich, die Herstellung von Bauteilen aus Prepregs aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung zu analysieren und daraus Anforderungen abzuleiten, die speziell für die Herstellung dieser Bauteile existieren. Darauf aufbauend soll ein System für eine anforderungsgemäße Produktionsplanung und -steuerung entworfen werden.

Nach einer Vorstellung der Herstellungsprozesse der Prepreg-Bauteile werden aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung folgende Charakteristika herausgearbeitet:

- Verbindung von Aufträgen in Losgröße eins mit Chargenprozessen
- Herausforderungen bei der Zuordnung von Rollen, Zuschnitten, Chargen und Bauteilen im Sinne einer Rückverfolgbarkeit der Materialien
- Beschränktheit der Lagerungs- und Verarbeitungszeiten der Prepreg-Materialien durch temperatur- bzw. zeitabhängige Werkstoffeigenschaften

- Hohe manuelle Arbeitsanteile in der Fertigung und der zugehörigen Dokumentation

Darauf aufbauend werden Anforderungen formuliert, die an ein für die Herstellung von Prepreg-Bauteilen angepasstes System zur Produktionsplanung und -steuerung gestellt werden. Diese werden dann genutzt, um einen Ansatz für eine prepregspezifische Produktionsplanung und -steuerung zu entwickeln. Ebenfalls wird ein zugehöriger Systemaufbau beschrieben, der aus den Elementen Auftausteuerung, Auftragsfreigabe mit Belastungsabgleich, Kapazitätssteuerung, Terminüberwachung, Chargenbildung, Temperaturüberwachung sowie Rücklagerung und Dokumentation besteht. Darüber hinaus wird auf dessen technische Umsetzung mit Hilfe der RFID-Technologie eingegangen. Dabei werden in Faserverbundwerkstoffe integrierbare RFID-Transponder beschrieben, die als Grundlage für die Generierung von echtzeitnaher Transparenz der Fertigungsabläufe dienen können.

Autoren dieser Veröffentlichung sind Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Dipl.-Ing. Tobias R. Philipp. Die Arbeitsanteile von Tobias R. Philipp sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P2

| | |
|--|------|
| Erarbeitung der Forschungsfragestellung | 90 % |
| Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik | 95 % |
| Analyse der Herstellung von Prepreg-Bauteilen | 95 % |
| Ableitung von Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung | 95 % |
| Entwurf des Systemaufbaus für die Produktionsplanung und -steuerung | 95 % |
| Konzeption der technischen Umsetzungsmöglichkeit für das System | 80 % |
| Verfassen der Publikation | 95 % |

9.3.3 P3: „Vorausschauende Steuerung der Auftausteuerung für Prepreg-Materialien“

Die eingebundene Veröffentlichung P3 mit dem Titel „Vorausschauende Steuerung der Auftausteuerung für Prepreg-Materialien“ leitet sich aus den hohen Herstellungskosten für Bauteile aus vorimprägnierten Faserhalbzeugen (Prepregs) ab. Aufgrund

eines allgemeinen Trends zum Leichtbau, der auch die Verwendung von Bauteilen aus Prepregs einschließt, werden die hohen Herstellungskosten als ein Hemmnis der weiteren Verbreitung dieser Materialien angesehen. Im Rahmen dieser Publikation wird dabei insbesondere auf die begrenzten Lager- und Verarbeitungszeiten der Prepreg-Materialien eingegangen, die für diese Werkstoffe spezifisch sind. Prepregs werden vor ihrer Verarbeitung zu Bauteilen tiefgekühlt gelagert und müssen daher zunächst aufgetaut werden.

Ziel der beschriebenen Arbeiten ist es, ein Verfahren zum vorausschauenden Auftauen von Prepreg-Materialien zu schaffen, das einerseits die Termintreue bei der Herstellung von Prepreg-Bauteilen verbessert und andererseits die anfallende Ausschussmenge aufgrund mangelhafter Einhaltung der Lager- oder Verarbeitungszeiten verringert.

Zu diesem Zweck wird zunächst eine Modellvorstellung eingeführt, die die vom Auftauen der Prepreg-Materialien betroffenen Material- und Informationsflüsse sowie die zugehörigen Fertigungsstationen einschließt. Diese sind das Kühlhauslager, die Auftaustation sowie der Pufferplatz für aufgetaute Prepregs, der die Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung darstellt. Ebenfalls ist eine Entsorgungsstation Teil der Modellvorstellung.

Darauf aufbauend werden drei Algorithmen beschrieben, die gemeinsam das Verfahren zum vorausschauenden Auftauen bilden. Der *Auftausalgorithmus* sendet dabei rollenindividuell und abhängig vom Produktionsplan sowie der aktuellen Situation in der Fertigung das Signal zur Umlagerung vom Kühlhauslager in die Auftaustation. Der *Rücklageralgorithmus* entscheidet darüber, ob bereits aufgetaute Prepreg-Rollen wieder ins Kühlhauslager zurückgeführt werden. Dabei wird ebenfalls der Produktionsplan betrachtet, aus dem hervorgeht, wann die betreffende Rolle wieder in aufgetautem Zustand benötigt wird. Der *Entsorgungsalgorithmus* dient dem Entfernen von Prepreg-Rollen, deren Lager- oder Verarbeitungszeit abgelaufen ist oder deren verbleibende Materiallänge unterhalb eines einzustellenden Schwellwertes liegt. In einer Simulationsstudie werden daraufhin diese Algorithmen auf ein Fertigungsszenario angewendet und es wird nachgewiesen, dass dies eine Verbesserung der Termintreue sowie eine Reduktion von Ausschuss bewirkt.

Autoren dieser Veröffentlichung sind Dipl.-Ing. Tobias R. Philipp, B. Sc. Martin Schreiber und Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart. Die Arbeitsanteile von Tobias R. Philipp sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: *Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P3*

| | |
|--|------|
| Erarbeitung der Forschungsfragestellung | 95 % |
| Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik | 95 % |
| Erarbeitung der Modellvorstellung des Auftausystems | 70 % |
| Entwicklung der Algorithmen des Verfahrens zur Auftasteuerung | 50 % |
| Modellierung der Fertigung und Implementierung der Algorithmen | 50 % |
| Auswertung der Simulationsergebnisse und deren Interpretation | 50 % |
| Verfassen der Publikation | 75 % |

9.3.4 P4: „Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites“

Die eingebundene Veröffentlichung P4 mit dem Titel „Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites“ ist durch die Tatsache motiviert, dass das Aushärten im Autoklaven bei der Herstellung von Bauteilen aus Prepregs sowohl aus technologischer als auch aus organisatorischer Sicht der kritische Fertigungsschritt ist. Dies ist dadurch begründet, dass beim Aushärten die Bauteilqualität final festgelegt wird. Darüber hinaus ist der Autoklav in der Regel der Engpass der Fertigung. Diese sogenannte Prepreg-Autoklaven-Technologie ist dabei in der Luftfahrtindustrie vorherrschend.

Da bisher Forschungsarbeiten zum technologischen Blickwinkel dominieren und den Autoren keine Arbeiten aus organisatorischer Sicht bekannt sind, wird im Rahmen der Veröffentlichung ein Chargenbildungsalgorithmus vorgestellt, der zum Ziel hat, das Engpassarbeitssystem besser zu nutzen und damit den Bauteilausstoß der Fertigung zu vergrößern. Um dieses Ziel zu erreichen, wird zunächst eine Modellvorstellung des Chargensystems präsentiert, die die Elemente Prepreg-Teil, Puffer vor der Aushärtestation und Autoklav beinhaltet. Darauf aufbauend wird das Problem der Auswahl einer optimalen Autoklavencharge mathematisch als Optimierungsproblem beschrieben. Als Zielfunktion wird dabei eine Kostenfunktion genutzt, die sich aus Kosten für den Betrieb des Autoklaven, für Ausschussteile, für eine verzögerte Fertigstellung von Bauteilen sowie für die Puffernutzung

zusammensetzt. Als Lösungsverfahren wird ein genetischer Algorithmus ausgewählt, der auf die vorliegende Problemstellung adaptiert wird.

Um die Leistungsfähigkeit der Entwicklungen darzustellen, wird daraufhin eine Simulationsstudie durchgeführt, in der ein festes Auftragsprogramm an Prepreg-Bauteilen einmal mit Hilfe des neu entwickelten Algorithmus abgearbeitet wird und einmal mit einem Vergleichsalgorithmus. Dabei wird nachgewiesen, dass der neu entwickelte Algorithmus in der Lage ist, die für eine feste Anzahl an zu fertigenden Bauteilen notwendige Anzahl an Autoklaven-Chargen um ca. 12 % zu reduzieren. Dementsprechend sinkt die notwendige Betriebszeit des Autoklaven und die Fertigungskosten werden verringert.

Autoren dieser Veröffentlichung sind Dipl.-Ing. Tobias R. Philipp, Dipl.-Ing. Thorsten P. Klein und Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart. Die Arbeitsanteile von Tobias R. Philipp sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P4

| | |
|--|------|
| Erarbeitung der Forschungsfragestellung | 90 % |
| Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik | 85 % |
| Erarbeitung der Modellvorstellung des Chargenbildungssystems | 60 % |
| Auswahl und Anpassung des Lösungsalgorithmus | 50 % |
| Modellierung der Fertigung und Implementierung des Algorithmus | 40 % |
| Auswertung der Simulationsergebnisse und deren Interpretation | 50 % |
| Verfassen der Publikation | 50 % |

9.3.5 P5: „Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing“

Die eingebundene Veröffentlichung P5 mit dem Titel „Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing“ ist einerseits durch die hohen Herstellungskosten für Prepreg-Bauteile motiviert, die ein Hemmnis für weitere Anwendungen dieser Werkstoffe darstellen und andererseits durch das turbulente Umfeld, in dem sich auch Hersteller von Prepreg-Bauteilen bewegen und das eine abnehmende Vorhersagbarkeit des Marktverhaltens impliziert. Aus der Kombination dieser beiden

Aspekte wird der Bedarf nach an die Herstellung von Prepreg-Bauteilen angepassten Fertigungssteuerungsverfahren abgeleitet.

Demnach ist die Zielsetzung der dieser Publikation zugrundeliegenden Arbeiten, ein Fertigungssteuerungsverfahren zu entwickeln, das speziell auf die Herstellung von Prepreg-Bauteilen angepasst ist. Um die Anforderungen an ein solches Verfahren abzuleiten, wird neben einer ausführlichen Literaturrecherche eine Umfrage präsentiert, die bei Unternehmen durchgeführt wurde, die Bauteile aus Prepregs herstellen. Dabei wird deutlich, dass die begrenzten Verarbeitungszeiten der Prepregs bisher noch keine Berücksichtigung in der Produktionssteuerung finden und für hohe Ausschussraten verantwortlich sind. Auf dieser Grundlage wird danach eine erweiterte Schlupfzeitregel vorgestellt, die neben der klassischen Schlupfzeit eine sogenannte Verarbeitungsschlupfzeit berechnet und die Priorität eines Fertigungsauftrags durch das Minimum beider Schlupfzeiten bestimmt. Darüber hinaus wird eine Zwischenlagerungsmöglichkeit für Prepregs explizit in die Produktionssteuerung mit einbezogen.

Um die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren zu zeigen, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, die nachweist, dass die Entwicklungen dazu geeignet sind, Ausschuss einerseits zu vermeiden und andererseits früher zu erkennen. Die übrigen Leistungskennzahlen einer Fertigung, insbesondere die logistischen Zielgrößen wurden dadurch nicht negativ beeinflusst.

Autoren dieser Veröffentlichung sind Dipl.-Ing. Tobias R. Philipp, Dipl.-Ing. Thomas Winkler und Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart. Die Arbeitsanteile von Tobias R. Philipp sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Arbeitsanteile des Kandidaten an der Veröffentlichung P5

| | |
|---|------|
| Erarbeitung der Forschungsfragestellung | 95 % |
| Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik | 95 % |
| Planung, Durchführung und Auswertung der Umfrage | 95 % |
| Entwicklung der Produktionssteuerungsverfahren | 80 % |
| Modellierung der Fertigung und Implementierung der Verfahren | 50 % |
| Auswertung der Simulationsergebnisse und deren Interpretation | 60 % |
| Planung, Durchführung und Auswertung der Tests mit integrierten RFID-Transpondern | 90 % |
| Verfassen der Publikation | 95 % |

9.4 Veröffentlichungen des Autors

Nachfolgend sind alle Veröffentlichungen in chronologischer Reihenfolge aufgelistet, an denen der Autor im Rahmen seiner wissenschaftlichen Arbeit beteiligt war:

- Gunther Reinhart, **Tobias R. Philipp**, Martin Ostgathe: „Einsatz von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen“, ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105 (2010) 9.
- Gunther Reinhart, **Tobias R. Philipp**: „Integration von RFID in Faserverbundwerkstoffe“, RFID im Blick – Sonderheft „RFID in der Region München“, 2011.
- Gunther Reinhart, Philipp Engelhardt, Florian Geiger, Emin Genc, Zeyad Mari, Michael Niehues, Martin Ostgathe, **Tobias R. Philipp**: „Sensorgestützte Produktionsplanung und -steuerung“, ProductivITy Management 16 (2011) 5.
- Josef Bernhard, Tobias Dräger, Christoph Grabowski, Ingo Sotriffer, **Tobias R. Philipp**: “Integrating RFID in Fibre-Reinforced Plastics”, 7th European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications (RFID SysTech), Dresden, 17.-18.05. 2011.

- Gunther Reinhart, Claudia Ehinger, **Tobias R. Philipp**, Johannes Schilp, Yi Shen, Rüdiger Spillner, Christian Thiemann: „Novel Automation Technologies for an Efficient Production of Fiber Reinforced Plastics (FRP) Structures at a Glance“, 6th International Technical Conference “Advanced Composites, the Integrated System” (Setec), Leiden (Niederlanden), 14.-16.09.2011.
- **Tobias R. Philipp**, Gunther Reinhart: „Evaluation of RFID Technology Application in Production of Fiber-Reinforced Plastics“, 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2011), Montreal (Kanada), 2011. Eingebundene Publikation der vorliegenden Dissertation.
- Joachim Zettler, **Tobias R. Philipp**, Gunther Reinhart, Jan-Christoph Arent, Tobias Dräger, Christoph Grabowski: „Influence of Integrated RFID Transponders on Structural Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics“, 6th International Conference “Supply on the wings 2011”, Frankfurt am Main, 02.-04.11.2011.
- Gunther Reinhart, **Tobias R. Philipp**: „Produktionssteuerung in der Faserverbundfertigung – Ansatz zur Produktionsplanung und -steuerung für die Herstellung von „Prepreg“-Bauteilen“, wt Werkstattstechnik online, 102 (2012) 3. Eingebundene Publikation der vorliegenden Dissertation.
- **Tobias R. Philipp**, Dominik Stockenberger, Roland Fischer, Willibald A. Günthner, Gunther Reinhart: „Kühlkettenüberwachung für Prepreg-Materialien – Effiziente Qualitätssicherung und Dokumentation sowie automatisierte Rückverfolgbarkeit in der Wertschöpfungskette“, ProductivITy Management 17 (2012) 3.
- Gunther Reinhart, **Tobias R. Philipp**, Josef Bernhard, Tobias Dräger, Christoph Grabowski, Martin Hoffmann: „Integrating RFID Transponders into Fibre-Reinforced Plastics by Using Textile Production Technology“, European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (Smart SysTech), Garching bei München, 12.-13.06.2012.
- **Tobias R. Philipp**, Thorsten P. Klein, Gunther Reinhart: „Batch Optimization Algorithm for Autoclave Curing of Fiber-Reinforced Composites“, The IEEE International Conference on Industrial Engineering

and Engineering Management, Hong Kong (China), 10.-13.12.2012.
Eingebundene Publikation der vorliegenden Dissertation.

- Gunther Reinhart, Philipp Engelhardt, Florian Geiger, **Tobias R. Philipp**, Wolfgang Wahlster, Detlef Zühlke, Jochen Schlick, Tilman Becker, Markus Löckelt, Bogdan-Constantin Pirvu, Peter Stephan, Stefan Hodek, Bernd Scholz-Reiter, Klaus-Dieter Thoben, Christian Gorltd, Karl A. Hribernik, Dennis Lappe, Marius Veigt: „Cyber-Physische Produktionssysteme“ wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2 (Sonderheft Industrie 4.0).
- **Tobias R. Philipp**, Martin Schreiber, Gunther Reinhart: „Vorausschauende Steuerung der Auftauprozesse für Prepreg-Materialien“, wt Werkstattstechnik online, 104 (2013) 4. Eingebundene Publikation der vorliegenden Dissertation.
- **Tobias R. Philipp**, Thomas Winkler, Gunther Reinhart: „Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing“, 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, 29.-30.05.2013, Setubal (Portugal), Eingebundene Publikation der vorliegenden Dissertation.

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlink im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehmer:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerbereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fährer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppler:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggeder:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patran:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickeneder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oerth:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Münzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Sharif Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sharif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer MikrokompONENTEN
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schweißnahtschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2

