

Berlak, Joachim; Dietert, Tilko; Götz, Knuth; Kullmer, Gunter; Schafran, Tommy

## Research Report

# Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung in der Fertigung

iaim Schriftenreihe der FOM, No. 1

## Provided in Cooperation with:

iaim Institute of Automation & Industrial Management, FOM Hochschule für Oekonomie & Management

*Suggested Citation:* Berlak, Joachim; Dietert, Tilko; Götz, Knuth; Kullmer, Gunter; Schafran, Tommy (2019) : Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung in der Fertigung, iaim Schriftenreihe der FOM, No. 1, ISBN 978-3-89275-092-5, MA Akademie Verlags- und Druck-Gesellschaft mbH, Essen

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/224457>

### Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

### Terms of use:

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

*Band  
1*

Thomas Russack / Rudolf Jerrentrup (Hrsg.)

*Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des  
Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung  
in der Fertigung*

~  
Joachim Berlak / Tilko Dietert / Knuth Götz /  
Gunter Kullmer / Tommy Schafran

**iaim** Schriftenreihe

Beiträge aus dem Engineering & Industrial Management

**FOM**  
Hochschule

**iaim**

Institute of Automation &  
Industrial Management  
FOM University of Applied Sciences

Joachim Berlak / Tilko Dietert / Knuth Götz / Gunter Kullmer / Tommy Schafran

*Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung  
in der Fertigung*

iaim Schriftenreihe der FOM, Band 1  
Beiträge aus dem Engineering & Industrial Management

Essen 2019

ISBN (Print) 978-3-89275-091-8    ISSN (Print) 2628-605X  
ISBN (eBook) 978-3-89275-092-5    ISSN (eBook) 2628-8184

Dieses Werk wird herausgegeben vom iaim Institute of Automation & Industrial Management  
der FOM Hochschule für Oekonomie & Management gGmbH

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

© 2019 by

**MA** Akademie  
Verlags- und Druck-  
Gesellschaft mbH  
MA Akademie Verlags-  
und Druck-Gesellschaft mbH  
Leimkugelstraße 6, 45141 Essen  
[info@mav-verlag.de](mailto:info@mav-verlag.de)

Das Werk einschließlich seiner  
Teile ist urheberrechtlich geschützt.  
Jede Verwertung außerhalb der  
engen Grenzen des Urhebergeset-  
zes ist ohne Zustimmung der MA  
Akademie Verlags- und Druck-  
Gesellschaft mbH unzulässig und  
strafbar. Das gilt insbesondere für  
Vervielfältigungen, Übersetzungen,  
Mikroverfilmungen und die Ein-  
speicherung und Verarbeitung in  
elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Oft handelt es sich um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht als solche gekennzeichnet sind.

***Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des  
Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung  
in der Fertigung***

Thomas Russack / Rudolf Jerrentrup (Hrsg.)

mit Beiträgen von

Joachim Berlak

Tilko Dietert

Knuth Götz

Gunter Kullmer

Tommy Schafran

## Vorwort

Wir freuen uns, Ihnen den ersten Band der iain-Schriftenreihe *Beiträge aus dem Engineering & Industrial Management* vorlegen zu können. Mit dieser Schriftenreihe möchten wir einen Beitrag zur Verbreitung der am iain sowie bei unseren Kooperationspartnern erzielten Erkenntnissen in Forschung und Praxis leisten sowie den Transfer in die interdisziplinäre Ingenieurausbildung fördern. Im ersten Band stellen wir ausgewählte Arbeiten aus den Bereichen „Innovative Fertigungsverfahren“ – additive Verfahren und Spritzgussverfahren – sowie „Produktionsplanung und -steuerung“ in unterschiedlichen praktischen Anwendungsfällen und Branchen vor. In zukünftig folgenden Bänden präsentieren wir Ihnen dann weitere Arbeitsergebnisse, u. a. aus den Forschungsfeldern Industrie 4.0, Robotik, Data Mining in der Produktion, interdisziplinäre Qualifizierung im Ingenieurwesen u. ä.

Dieser Band fokussiert innovative Ansätze zur Optimierung von Fertigungsprozessen. Im ersten Beitrag stellt *Joachim Berlak* ein Projekt zur Entwicklung und Erprobung einer ereignisorientierten Produktionsplanung und -steuerung vor. Hierbei werden cloud-basierte Services eingesetzt, um unter Erfüllung der Datensicherheitsanforderungen auch für KMU eine Termin- und Kapazitätsplanung in Quasi-Echtzeit zu ermöglichen und schnell auf Veränderungen in der Produktion reagieren zu können. Die Überprüfung des Konzepts erfolgt am Beispiel einer Brillenglasfertigung. Danach erläutert *Tilko Dietert* die Potenziale und erforderlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Fertigung von hochbelasteten Kunststoffbauteilen im Sandwich-Schäumverfahren mittels Ein-Komponenten-Spritzgießmaschine. Dabei kann das immer wichtiger werdende, geringe Bauteilgewicht mit der Großserientauglichkeit des Fertigungsverfahrens vereint werden. Als Fallbeispiel betrachtet er die Herstellung der Hartkomponente einer Federunterlage für ein PKW-Fahrwerk. Im dritten Beitrag beleuchtet *Knuth Götz* die bisherigen und zukünftigen Entwicklungen der additiven Fertigung von Elektronik am Beispiel der Automobilbranche, die eine integrierte Produktion von Träger und Schaltung zum Ziel hat. Er geht dabei auf den grundsätzlichen Nutzen sowie den Stand der Technik ein und betrachtet wesentliche Aspekte wie Strukturierung, Schichtaufbau, Stromtragfähigkeit, Haftfestigkeit, Lebensdauer sowie Aufbau- und Verbindungstechnik. Zum Abschluss beschreiben *Tommy Schafran* und

*Gunter Kullmer* den Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen anhand von zwei Fallbeispielen. Im ersten Fall kann durch den kombinierten Einsatz von Bionik und additiver Fertigung in ressourcenschonender Weise ein praxisgerechter Gelenkarmroboter in Leichtbauweise hergestellt werden. Im zweiten Fall können personal-, zeit- und kostenintensive Fertigungsprozesse in der Orthopädietechnik durch die Integration digitaler Techniken und der additiven Fertigung deutlich effizienter gestaltet werden, bei gleichzeitiger Wahrung der Individualität der Produkte.

Bei Fragen oder Anmerkungen zu den Beiträgen melden Sie sich bitte gerne bei den Autoren und / oder bei uns.

Münster, im Juni 2019

Prof. Dr.-Ing. Thomas Russack  
Direktor des iain Institute of Automation & Industrial Management  
E-Mail: [thomas.russack@fom.de](mailto:thomas.russack@fom.de)

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Jerrentrup  
Beiratsvorsitzender des iain Institute of Automation & Industrial Management  
E-Mail: [rudolf.jerrentrup@fom.de](mailto:rudolf.jerrentrup@fom.de)

**Inhalt**

Vorwort .....	III
---------------	-----

**Beitrag I: Konzeption, Realisierung und Validierung**

1 Einleitung .....	6
2 Ausgangssituation und aktuelle Herausforderungen für die PPS .....	8
3 Konzeption eines Service zur eventbasierten PPS .....	12
4 Validierung der eventbasierten PPS in der hochautomatisierte Unikatfertigung von Brillengläsern .....	17
5 Lessons Learned .....	24
6 Zusammenfassung und Ausblick .....	25
Literatur.....	26

**Beitrag II: Leichtbau bei hochbelasteten Kunststoffbauteilen**

1 Einleitung, Problemstellung .....	37
2 Stand der Technik .....	40
3 Hohe Festigkeit.....	42
4 FEM-Berechnungen .....	46
5 Herstellung mit Sandwich-Schäumverfahren .....	52
6 Erprobung .....	58
7 Resümee .....	59
Literatur.....	60

## Beitrag III: Additive Fertigung von Elektronik

1	Einleitung .....	68
2	Strukturierung .....	74
3	Ausblick ... ..	78
	Literatur.....	79

## Beitrag IV: Entwicklung eines bioinspirierten Gelenkarmroboters

1	Einleitung .....	90
2	Praxisbeispiele.....	91
3	Gesamtfazit.....	113
	Literatur.....	114

**Beitrag I**  
**Konzeption, Realisierung und Validierung**  
**eines cloud-basierten Service**  
**zur eventbasierten**  
**Produktionsplanung und –steuerung**

Joachim Berlak

Prof. Dr.-Ing. Joachim Berlak  
FOM Hochschule für Oekonomie & Management  
E-Mail: [joachim.berlak@fom.de](mailto:joachim.berlak@fom.de)

**Inhalt**

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Ausgangssituation und aktuelle Herausforderungen für die PPS.....	8
3 Konzeption eines Service zur eventbasierten PPS.....	12
4 Validierung der eventbasierten PPS in der hochautomatisierte Unikatfertigung von Brillengläsern.....	17
4.1 Beschreibung des Anwendungsfalls.....	17
4.2 Rahmenbedingungen für die PPS.....	19
4.3 Anwendung des Service zur eventbasierten PPS.....	20
5 Lessons Learned.....	24
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	25
Literaturverzeichnis.....	26
Internetquellen.....	29

**Abkürzungsverzeichnis**

APS	Advanced Planning and Scheduling
AWS	Amazon Webservices
Cloud	Über das Internet verfügbare IT-Infrastruktur
CPS	Cyber-physisches System
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
ERP	Enterprise Resource Planning
IT	Informationstechnologie
IoT	Internet of Things
J2EE	Java Platform Enterprise Edition
KMU	Kleine und mittelständische Industrieunternehmen
LMS	Lab Management System
On-premises	In den eigenen Räumlichkeiten, vor Ort oder lokal
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REST	Representational State Transfer
SaaS	Software as a service
SQL	Structured Query Language
VPN	Virtual Private Network
XaaS	Everything as a Service

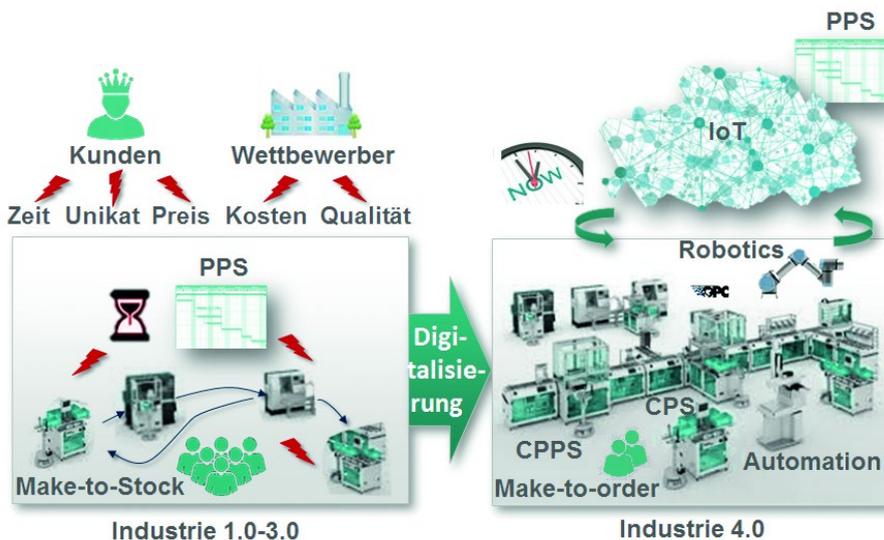
**Abbildungsverzeichnis**

<b>Abbildung 1:</b> Markseitige Veränderungen hin zu Industrie 4.0.....	6
<b>Abbildung 2:</b> IT-Unterstützung im Bereich Produktionsplanung.....	9
<b>Abbildung 3:</b> Regelkreis der eventbasierten PPS .....	10
<b>Abbildung 4:</b> Anforderungen an einen eventbasierten PPS-Service .....	12
<b>Abbildung 5:</b> Konzeption eines Service zur eventbasierten PPS.....	15
<b>Abbildung 6:</b> Rahmenbedingungen des Markts für Brillengläser .....	18
<b>Abbildung 7:</b> Produktionsprozess der Brillenglasfertigung.....	19
<b>Abbildung 8:</b> Herausforderungen für die Brillenglasproduktion.....	20

## 1 Einleitung

In der westlichen Industrie liegt der Fokus auf der schnellen, flexiblen Herstellung von kundenspezifischen Premiumprodukten anstelle von Kosten-/Preisführerschaft mittels Standardwaren (vgl. Brecher 2012). Diese Strategie wird jedoch durch den globalen Druck auf Preise, Kosten und Lieferzeiten sowie unvorhersehbare Dynamiken auf den Weltmärkten beeinflusst (vgl. Jeschke 2014). Abbildung 1 zeigt diese kunden- und wettbewerbsseitigen Auswirkungen für die heutigen Industrieunternehmen auf der linken Seite.

**Abbildung 1:** Marktseitige Veränderungen hin zu Industrie 4.0



Quelle: Eigene Abbildung

Um unter diesen Bedingungen wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen produzierende Unternehmen effizienter, flexibler und auf Marktveränderungen wandlungsfähiger reagieren (vgl. Abele und Reinhart 2011, Berlak und Weber 2004a). Da jedoch die derzeitige Produktionsplanung und -steuerung (PPS) noch mehr oder weniger auf kundenanonymer Fertigung basiert (vgl. Jeon und Kim 2016), können die oben genannten marktbedingten Herausforderungen nur unzureichend erfüllt werden (vgl. Tenhiälä und Helkiö 2016). Vor diesem Hintergrund wird die Informationstechnologie (IT) in den letzten Jahrzehnten als Schlüsseltechnologie zur Senkung der fixen und variablen Kosten sowie zur Verbesserung der Produktivität in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt

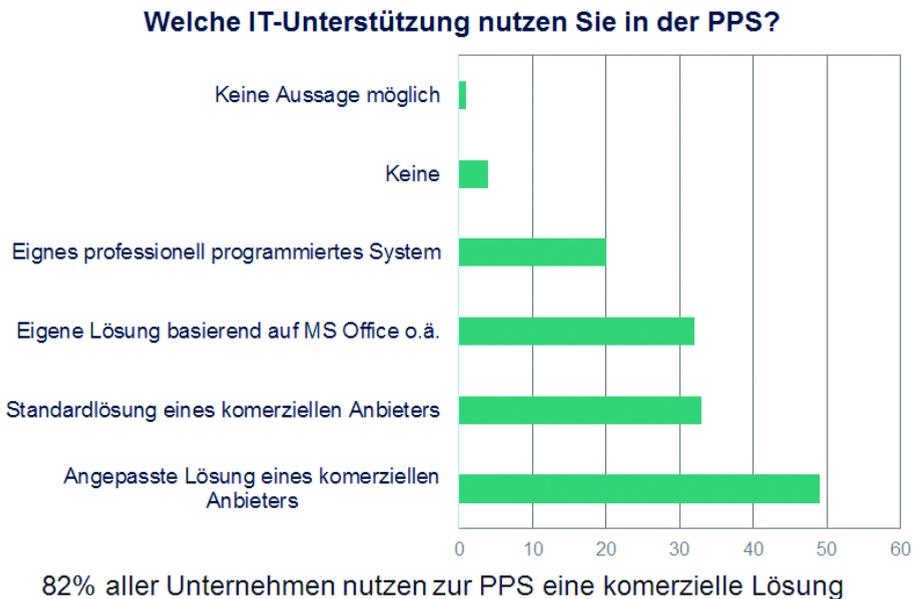
(vgl. Berlak und Deifel 2002, Berlak und Deifel 2003, Milberg und Berlak 2004, Berlak, Berlak und Weber 2004b, Berger und Reinhart 2016, Jeske et al. 2018). Dieser evolutionäre Prozess der Digitalisierung wird seit 2010 in Deutschland als Industrie 4.0 bezeichnet (vgl. Lasi et al. 2014). Einhergehend mit der Automatisierung von Geschäfts- und Wertschöpfungsprozessen (vgl. Schuh und Stich 2014) erfolgt dadurch eine Verlagerung in Richtung auftragsbezogener Fertigung (vgl. Kuo et al. 2016).

Aus technologischer Sicht gilt das Internet der Dinge (Internet of Things bzw. IoT) heute als der Haupttreiber von Industrie 4.0 (vgl. Shancang et al. 2015). IoT umfasst eine Vision, bei der jedes Gerät seine eigene IP-Adresse hat und alle intelligenten Geräte über cloud-basierte Lösungen miteinander verbunden sind und miteinander kommunizieren können (vgl. Bauernhansl et al. 2014). Produktionssysteme bestehen heutzutage aus Maschinen, Produktions- und Montagevorrichtungen, Industrie- und Servicerobotern sowie menschlichen Arbeitskräften, die mehr oder weniger intelligent miteinander zusammenwirken (vgl. Bauernhansl et al. 2014). Industrie 4.0 und IoT vernetzt diese heterogene Umgebung vertikal und horizontal. Damit entstehen sogenannte cyber-physische Systeme (CPS), die eine wesentliche Voraussetzung für Flexibilität und Produktivität in der Industrie 4.0 darstellen (vgl. Chen et al. 2012). CPS bestehen hierbei aus eingebetteten Systemen mit der Fähigkeit zur Kommunikation, vorzugsweise über Internettechnologien wie REST-Webservices (vgl. Broy 2010). Ein CPS kann über seine eigenen Systemgrenzen hinweg mit anderen CPS interagieren (Kolberg et al. 2016). Das bedeutet, dass alle Elemente eines CPS vernetzt sein müssen, um ein gesamtes cyber-physisches Produktionssystem (CPPS) aufbauen zu können (Schuh et al. 2014).

Aufgrund der oben genannten Marktveränderungen muss die bidirektionale vertikale und horizontale Kommunikation und der Informationsaustausch nahezu in Echtzeit stattfinden (Reinhart 2017, Kolberg et al. 2016). Dies stellt vor allem die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) vor neue und große Herausforderungen. Dieser Beitrag widmet sich dieser Thematik durch die Konzeption, Realisierung und Validierung eines cloud-basierten Service zur eventbasierten PPS.

## 2 Ausgangssituation und aktuelle Herausforderungen für die PPS

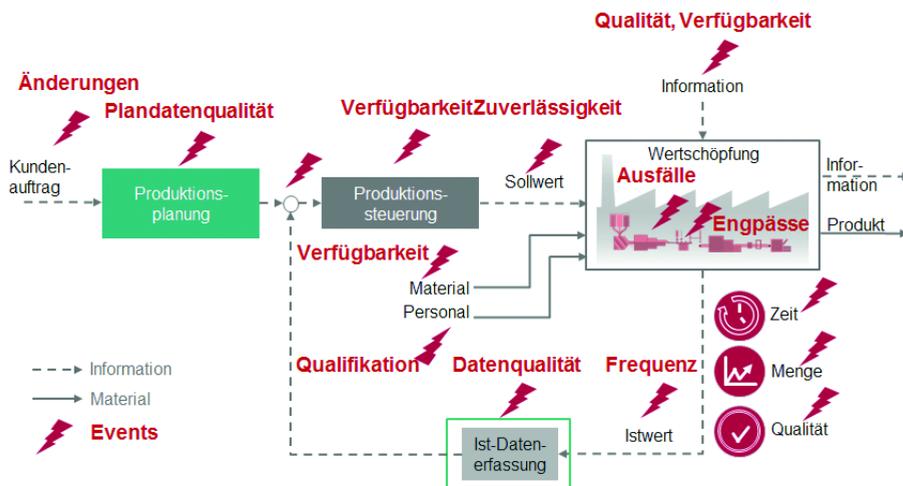
Unter der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) wird im Folgenden die operative Planung und Steuerung des gesamten Produktionsgeschehens in einem Produktionssystem verstanden. Klassischerweise beinhaltet eine PPS-Software, welche heute vornehmlich noch beim Industrieunternehmen vor Ort lokal installiert wird, einem Konzept der stufenweisen Sukzessivplanung mit zunehmendem zeitlichem Detaillierungsgrad (vgl. Kurbel 2003). Hierbei fließen Ergebnisse einer vorgelagerten Stufe i. d. R. als Vorgabe in die nächste Stufe ein, wobei heute keine oder nur eine sehr schwache Rückkopplung von nachgelagerten zu früheren Planungsstufen erfolgt. Damit ist der in Abbildung 2 skizzierte Regelkreis zwar geschlossen, aber es herrscht üblicherweise eine beträchtliche Latenz, die wenige Stunden bis mehrere Tage oder Wochen betragen kann (vgl. Nyhuis 2018). Dies stellt ein wesentliches Problem vor dem Hintergrund der voranschreitenden Dynamisierung von zeitlichen Kundenanforderungen dar, die eine PPS-Regelung in Quasi-Echtzeit bedingen. Advanced Planning and Scheduling Systeme (APS) erweitern die PPS-Funktionalität und ermöglichen durch höhere Transparenz eine bessere logistische Zielerreichung (vgl. Wiendahl und Kluth 2018). Andererseits werden APS auch noch on-premises betrieben und sind noch nicht so verbreitet: nur 18 Prozent der Produktionsunternehmen in Österreich nutzen ein APS (vgl. Jodlbauer und Reitner 2009). Abbildung 2 zeigt, dass 82 Prozent der befragten deutschen Unternehmen der PPS-Report 2017/18 IT-Systeme kommerzieller Anbieter zur Unterstützung der Produktionsplanung nutzen.

**Abbildung 2:** IT-Unterstützung im Bereich Produktionsplanung

Quelle: in Anlehnung an Nyhuis 2018, S. 15.

Die Unternehmen bemängeln die fehlende/unzureichende Genauigkeit, mit der die IT-Systeme Unternehmensprozesse abbilden. Insbesondere große Unternehmen mit mehr als 10.000 Mitarbeitern sehen bei den Schnittstellen zu anderen Systemen Verbesserungspotenziale. Mehr als 80 Prozent der befragten Unternehmen streben daher in den nächsten 1-2 Jahren Veränderungen in ihren Produktionsplanungssystemen an (Nyhuis 2018, S. 3).

**Abbildung 3:** Regelkreis der eventbasierten PPS



Quelle: Eigene Abbildung

Die in Abbildung 3 als rote Blitze symbolisierten Events, wie u. a. Änderungswünsche vom Kunden, Materialengpässe oder Maschinenausfälle, verändern die aktuelle Planung und führen ggf. zu negativen Einflüssen auf die Planungszuverlässigkeit. Damit wird für die PPS die gedankliche Vorwegnahme von Handlungsschritten, die zur Erreichung der logistischen Ziele notwendig sind, erschwert (vgl. Wiendahl 2011).

Die im Folgenden als eventbasierte PPS bezeichnete Produktionsplanung stellt sich dieser Herausforderung durch eine schnelle Terminierung quasi in Echtzeit und liefert damit einen schnell geschlossenen Regelkreis zwischen Planung und Ausführung. Hierbei wird zum einen das Sukzessivplanungskonzept zur APS-Simultanplanung erweitert. Hierbei laufen die zur PPS notwendigen Planungsschritte quasi simultan ab. Dies wird durch serviceorientierte IT-Architekturen sowie Cloud-Technologien mit der Skalierung von Rechenleistung ermöglicht (vgl. Wiendahl und Kluth 2018).

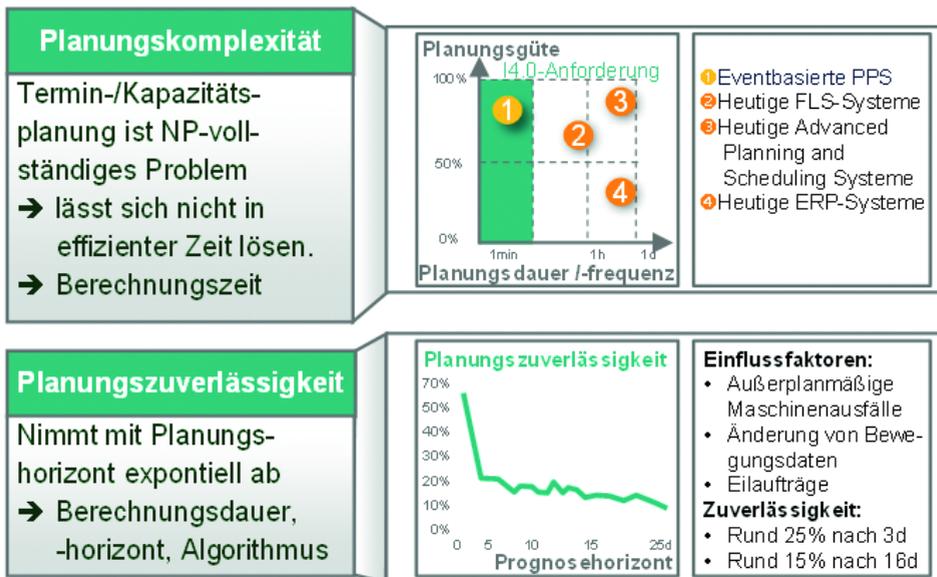
Zusammenfassend besteht für heutige Industrieunternehmen in vielen Branchen ein marktseitiger Druck in Hinblick auf Zeit, Qualität und Kosten, dem mit bestehenden PPS-Systemen aufgrund der langwierigen Sukzessivplanung nicht nachgekommen werden kann (vgl. Berlak 2015). Verstärkt wird dies durch die Notwendigkeit, die abnehmenden Planbarkeit durch unvorhersehbare Events in diesem Umfeld wettbewerbsentscheidend zu beherrschen. Ein in Quasi-Echtzeit,

also in einer deutlich kleineren Zeit als die marktseitig geforderte Durchlaufzeit, geschlossener Regelkreis zwischen Planung und Ausführung ist somit die logische Konsequenz zur Lösung dieser zentralen Herausforderung (vgl. Berlak und Deifel 2003, Berlak 2006). Diese Entwicklung wird auf Seiten der Industrieunternehmen durch verstärkte Investition in PPS-Lösungen verfolgt (vgl. Berlak 2003, Nyhuis 2018). Hierbei werden jedoch meist immer noch On-Premises-Lösungen beschafft und betrieben: während in vielen Geschäftsprozessen und nicht wertschöpfenden Bereichen cloud-basierte Lösungen für u. a. ERP immer größere Bedeutung erfahren, ist dies im Bereich der PPS immer noch die große Ausnahme (vgl. Berlak, Berger und Reinhart 2016). Grund hierfür ist im Wesentlichen in der Verlagerung der Daten in eine unternehmensexterne Plattform und den damit angenommenen Verlustängsten zu sehen (vgl. Lutz und Berlak 2014). Diese Akzeptanzprobleme galt es im Rahmen der Entwicklung eines Service zur eventbasierten Produktionsplanung und -steuerung technisch wie organisatorisch zu lösen.

### 3 Konzeption eines Service zur eventbasierten PPS

PPS-Systeme benötigen für die operative, zeitliche, mengenmäßige und eventuell auch räumlichen Planung, Steuerung und Kontrolle der Wertschöpfung entsprechende Daten (vgl. Kurbel 2003). Stand der Technik ist, dass diese Stamm- und Bewegungsdaten von einem übergeordneten ERP-System gehalten und an ein Subsystem zur PPS übertragen werden, da u. a. für die Termin- und Kapazitätsplanung umfangreiche und komplexe Datenbestände mit zahlreichen Wechselbeziehungen benötigt werden (vgl. Wiendahl 2011). Beispielhaft seien hier Kunden-/ Fertigungsauftrags-, Arbeitsplan-, Betriebsmittel-, Artikelstamm- oder Erzeugnisstrukturdaten genannt. Vor diesem Hintergrund stellt eine Anforderung an einen Service zur eventbasierte PPS die Bereitstellung von Schnittstellen für den bidirektionalen Datenaustausch dar. Aufgrund des skizzierten Schutzbedürfnisses für das gebundene Wissen und Kapital eines Unternehmens sind die Schnittstellen, der Service sowie die Datenbestände entsprechend vor Fremdzugriff zu schützen.

**Abbildung 4:** Anforderungen an einen eventbasierten PPS-Service



Quelle: Eigene Abbildung

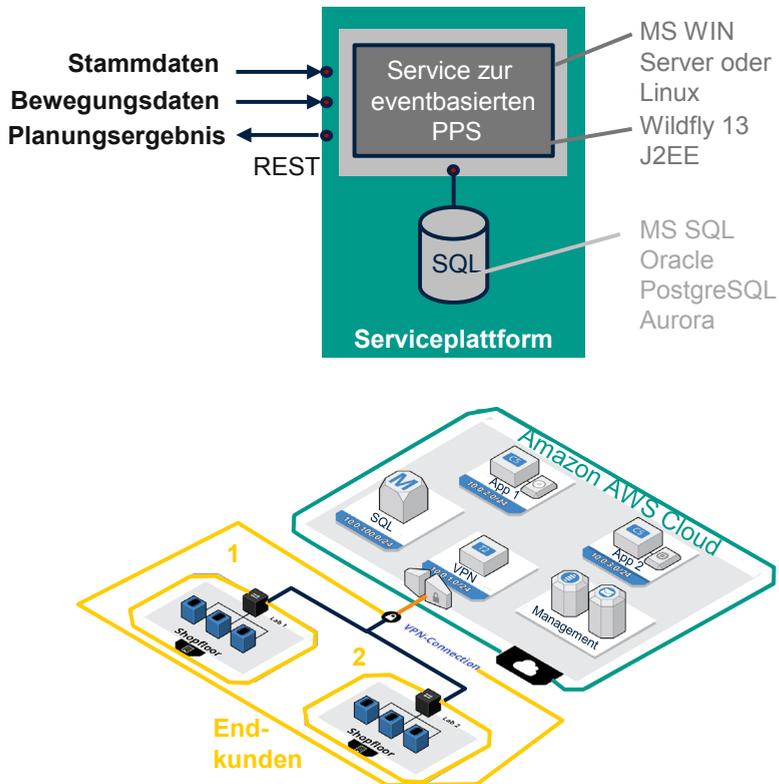
Der hier konzipierte und prototypisch realisierte Service übernimmt, wie später noch erläutert wird, die PPS-Teilaufgabe der Termin- und Kapazitätsplanung. Hierbei erhält der Service die oben erläuterten Stamm- und Bewegungsdaten als Input, erledigt die Planungsaufgabe und exportiert das Planungsergebnis als Output. Abbildung 4 verdeutlicht den sich hieraus ergebenden Gestaltungsrahmen. Wie eingangs erläutert, wird hier unter eventbasierter PPS ein quasi in Echtzeit geschlossener Regelkreis zwischen Planung und Ausführung verstanden. Vor diesem Hintergrund steht der Planungsservice unter der Herausforderung, die ihm gestellte Planungsaufgabe in möglichst kurzer Berechnungszeit zu erledigen. Andererseits ist die Termin- und Kapazitätsplanung ein NP-vollständiges Optimierungs-/ Entscheidungsproblem (Kurbel 2003). Dies bedeutet, dass sich diese Aufgabenstellung nicht effizient und optimal lösen lässt (Korte und Vygen 2008). Diesen Widerspruch zwischen notwendiger und zulässiger Berechnungszeit ist in der Abbildung 4 oben skizziert. Stand der Technik ist heute, dass die Planungssoftware im Bereich von Stunden terminieren, während die Industrie 4.0-Anforderungen sich im Bereich von wenigen Minuten bewegen (Lutz und Berlak 2014). Bei den Berechnungszeiten sei angefügt, dass entsprechende Hardware wie CPU und Hauptspeicher zwar zu einer Beschleunigung der Berechnung führen, aber die grundsätzliche Problematik aus Planungskomplexität und erwarteter Berechnungsdauer in Quasi-Echtzeit nicht ansatzweise lösen können. Andererseits ermöglichen Serviceplattformen wie Amazon Web Services (AWS) eine flexible skalierbare Hardwareperformance, die hier gegenüber statischer On-Premises-Serverhardware einen Terminierungslauf von wenigen Minuten bei dem benannten Datenvolumen zulässt. Aber selbst dies reicht nicht aus, um mit herkömmlichen Planungsansätzen oder -algorithmen eine kurzfristige Lösung der Planungsprobleme zu ermöglichen. Dies ist dem Umstand geschuldet, welcher in der Abbildung 4 unten dargestellt ist: der Anwender erwartet eine hohe Planungszuverlässigkeit, die aber längerfristig mit dem Prognosehorizont stetig abnimmt. Nichtsdestotrotz kann der Planungshorizont nicht beliebig reduziert werden, um durch Plandatenreduktion eine schnellere Berechnungsgeschwindigkeit zu erreichen. Es wird erwartet, dass auch größere Planungshorizonte und damit Planungsdaten und -komplexität zeitnah bei guter Planungszuverlässigkeit berechnungstechnisch gehandhabt werden.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Anforderungen an einen Service zur eventbasierten PPS:

- Bidirektionale Schnittstelle für den eventbasierten Austausch von Stamm-, Bewegungs- und Plandaten in Quasi-Echtzeit,
- Absicherung von Schnittstellen, Service und Datenhaltung,
- hohe Planungszuverlässigkeit und -qualität sowie
- schnelle Berechnungsgeschwindigkeit in wenigen Minuten.

Aufgrund der abgegrenzten Funktionalität, der Probleme heutiger ERP-Systeme und Industrieunternehmen bei der Lösung dieser Aufgabenstellung als auch aus Vermarktungsgründen wurde die PPS-Teilaufgabe der Termin- und Kapazitätsplanung als Fokus für den Service zur eventbasierten PPS festgelegt. Hierbei erhält der Service Stamm- und Bewegungsdaten als Input aus übergeordneten ERP-Systemen, erledigt die Planungsaufgabe und exportiert das Planungsergebnis an das übergeordnete System zurück.

Die technische Konzeption des Service zur eventbasierten Produktionsplanung ist der Abbildung 5 zu entnehmen.

**Abbildung 5:** Konzeption eines Service zur eventbasierten PPS

Quelle: Eigene Abbildung

Die Endkunden verbinden sich hierbei über eine verschlüsselte VPN-Verbindung zur Serviceplattform. Der PPS-Service wurde plattformunabhängig konzipiert. Der Service basiert auf einer serviceorientierten IT-Architektur (J2EE) auf Basis eines Wildfly 13. Als Betriebssystem kann hierbei MS WINDOWS Server oder LINUX zum Einsatz kommen. Als SQL-Datenbank und Datendrehscheibe können durch das verwendete Hibernateframework z. B. Oracle, PostgreSQL, MS SQLServer, Sybase oder SAP Hana zum Einsatz kommen. Um eine Skalierbarkeit des PPS-Service für eine größere Anzahl von Endkunden zu gewährleisten (in der Abbildung 5 sind beispielhaft zwei Endkunden aufgeführt), wird ein zentraler Datenbankserver mit jeweils einer Kundendatenbank und pro Endkunden ein Applikationsserver verwendet.

Als Schnittstellen für die Verarbeitung von den Stamm-, Bewegungs- und Planungsdaten wurden REST Webservices als Technologie ausgewählt, da diese Stand der IoT-Technik und einfach auf Kundenseite zu realisieren sind. Optional sind auch filebasierte oder datenbankgestützte Schnittstellen möglich, wobei hier das Zeitverhalten als auch das Thema Sicherheit als problematisch zu beurteilen ist.

Zusammenfassend muss ein Endkunde mindestens Kunden-/ Fertigungsaufträge mit Arbeitsplänen initial und dann bei jeder Datenänderung über REST senden. Des Weiteren werden die aktuellen Rückmeldung und Events wie Maschinenzustände, Störungen oder Ausschussmengen über eine manuelle Betriebsdatenerfassung oder automatische Maschinendatenerfassung übermittelt. Auf Basis dieser Events erfolgt automatisch eine neue Planung aller Aufträge unter Berücksichtigung real verfügbarer Kapazitäten. Diese Schichtmodelle können entweder auch über REST übergeben oder manuell in der Planungsdatenverwaltung verwaltet werden. Hier werden auch zentrale Planungsparameter wie u. a. Terminierungsarten administriert. Als Ergebnis jedes Planungslaufes werden die geplanten Start- und Endtermine der z. B. Fertigungsaufträge und Arbeitsgänge wieder über REST an den Endkunden bzw. sein ERP-System übermittelt.

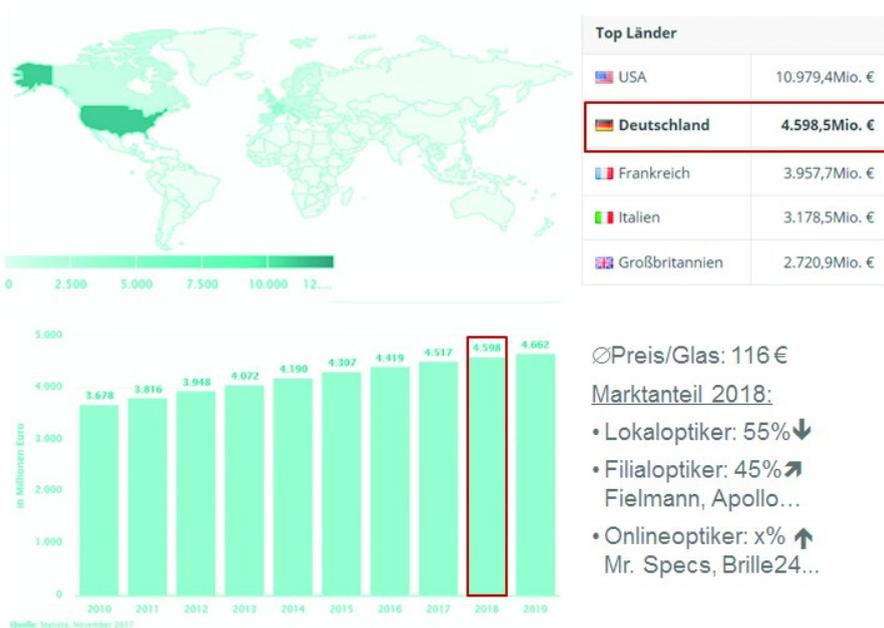
## **4 Validierung der eventbasierten PPS in der hochautomatisierte Unikatfertigung von Brillengläsern**

Im folgenden Kapitel wird die exemplarische Anwendung des eventbasierten PPS-Service in der Brillenglasfertigung erläutert.

### **4.1 Beschreibung des Anwendungsfalls**

Wie der folgenden Abbildung 6 und Berlak (2017) zu entnehmen ist, wächst der Markt für Brillengläser kontinuierlich. Von Seiten der Distribution wird das Brillengeschäft in Deutschland noch von lokalen Optikern geprägt, wobei diese aber einem immer stärkeren Druck durch Optiker mit Filialnetz oder Onlinevertrieb ausgesetzt sind. Durch einen Konzentrationsprozess großer Anbieter und die Globalisierung verschieben sich auch hier die Marktanteile. Optiker bestellen oft kundenspezifisch geschliffene Brillengläser und schleifen bzw. montieren diese dann in eine Fassung. Alternativ werden bereits montierte Brillen beschafft. Die Produktion von Brillen oder Brillengläserunikaten erfolgt bei vorgelagerten Herstellern (sogenannten Labs) und erstreckt sich über verschiedene Wertschöpfungsprozesse. Im ersten Schritt der Brillenglasproduktion werden Halbfabrikate aus Quarzsand oder Kunststoffen, entsprechende Brillenglasrohlinge (sogenannte semi-finished blanks) oder Brillengläser mit optischer Wirkung produziert.

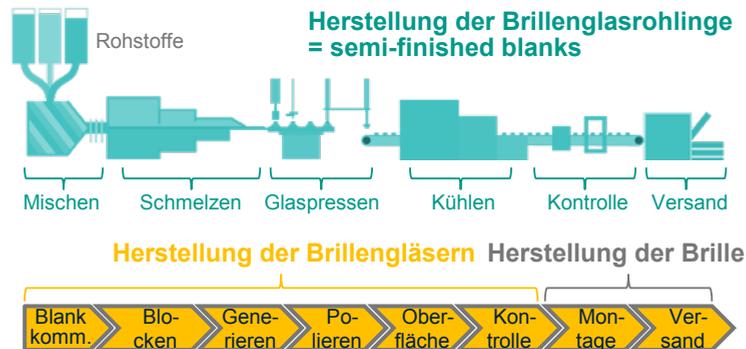
**Abbildung 6:** Rahmenbedingungen des Markts für Brillengläser



Quelle: Eigene Abbildung in Anlehnung an Statista (Ohne Jahresangabe)

Diese Blanks werden bei den meisten Labs zugekauft und im Anschluss in der Oberflächenschleiferei (Arbeitsgänge sind wie in der Abbildung 7 u. a. Blocken, Generieren und Polieren) aus den Rohlingen und Halbfabrikaten die Brillengläser mit den individuellen Glasstärken hergestellt. Abbildung 7 verdeutlicht hier den entsprechenden Produktionsprozess zur Brillenglasfertigung.

**Abbildung 7:** Produktionsprozess der Brillenglasfertigung



Quelle: Eigene Abbildung

Produktionslogistisches Ziel bei der Herstellung von Brillengläsern ist es hierbei, kurze Durchlauf- und Lieferzeiten (Stand der Technik ca. 3-5 Tage), hohe Ausbringung (kleine Labs ca. 100-500, mittlere Labs bis 5.000 und große Labs über 10.000 Gläser pro Tag) bei geringen Produktionskosten zu erzielen. Je nach Größe und Strategie des Labs kann die Wertschöpfungstiefe variieren.

Im Folgenden wurde als Anwendungsfall ein mittelgroßes Lab ausgewählt, welches 5.000 Brillengläser pro Tag mit höchster Wertschöpfungstiefe der oben in Gelb skizzierten Prozessschritte herstellt. Dies entspricht knapp 2.500 Kundenaufträgen, die im 3-Schichtbetrieb auf ca. 50 Maschinen mit Arbeitsgangdurchlaufzeiten von weniger als 30 Sekunden bis maximal 30 Minuten hergestellt werden. Dies erfolgt branchenuntypisch mit einem sehr hohen Automatisierungsgrad von über 80 Prozent, wodurch sich einmalige Industrie 4.0 Anforderungen bezüglich der Echtzeitplanung und -steuerung ergeben.

#### 4.2 Rahmenbedingungen für die PPS

Der hohe Automatisierungsgrad des Anwendungsfalls ist die Reaktion auf die aktuellen Marktanforderungen in der Brillenglasproduktion (siehe Abbildung 8). Markt- und kundenseitig sind Preisdruck, steigende Anforderungen an Qualität, Flexibilität und kurzen Lieferzeiten sowie ein stetig steigender Wettbewerb zu verzeichnen. Beschaffungsseitig steigen u. a. die Preise bei Blanks und Consumables. Innerhalb der Brillenglasproduktion begegnet man diesen

marktseitigen Herausforderungen durch Maßnahmen zur Steigerung der Produktivität und Minimierung von Ausschuss und Kosten. Andererseits herrscht ein Mangel an qualifizierten Produktionsmitarbeitern (vgl. Berlak 2017).

**Abbildung 8:** Herausforderungen für die Brillenglasproduktion



Quelle: Berlak (2017)

Des Weiteren wird auch auf Managementebene der Aufgaben- und Verantwortungsbereich des sog. Lab Managers hinsichtlich der erläuterten Ziele immer umfangreicher, wobei ihm geeignete IT-Werkzeuge fehlen. Insgesamt sind Labs heute noch stark vom Manufakturgedanken geprägt und setzen bisher nur rudimentär IT-Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung ein. Vor diesem Hintergrund werden die Automatisierung und Digitalisierung der Wertschöpfungsprozesse sowie deren Planung und Steuerung in Quasi-Echtzeit als Mittel der Wahl angesehen. Die systemimmanenten, zeitkritischen und dynamischen Produktionsbedingungen dieser Unikatfertigung stellen hierbei die größten Herausforderungen für die PPS dar.

### 4.3 Anwendung des Service zur eventbasierten PPS

In diesem Kapitel wird die prototypische Realisierung und Evaluierung des eventbasierten PPS-Service am Anwendungsfall der hochautomatisierten Unikatfertigung von Brillengläsern erläutert.

Die Brillenglasfertigung ist zur Evaluierung des PPS-Service aus unterschiedlichen Gründen prädestiniert:

- **Funktionalitätsmangel:** Unterhalb von ERP-Systemen werden in der Brillenglasfertigung sogenannte Lab Management Systeme (LMS) eingesetzt, die Spezialfunktionalitäten bereitstellen, die übergeordnete ERP-Systeme nicht besitzen. LMS erzeugen u. a. die spezifischen Technologiedaten für einen Auftrag, die zur Produktion der Linsen auf den Maschinen benötigt werden. LMS besitzen aber keine Funktionalität zur Termin- und Kapazitätsplanung auf Arbeitsebene: sie kennen lediglich den Fertigungsauftrag und dessen Technologien, aber deren konkrete Arbeitsgang- oder Prozessreihenfolge nicht. Aufgrund des Fehlens dieser Funktionalität bestehen hier ein Leidensdruck und damit das grundsätzliche Interesse an Produktionsplanung und -steuerung.
- **Komplexität:** sehr kurze Rüst- und Bearbeitungszeiten von wenigen Sekunden bis wenigen Minuten pro Arbeitsgang bei einem großen Plan- und Istdatenmengengerüst (Beispiel: ca. 2.500 Kundenaufträge bedeuten ca. 5.000 Fertigungsaufträgen und damit ca. 75.000 Arbeitsgänge pro Tag), daher muss die Produktion systemgestützt in Echtzeit geplant werden.
- **Events:** Maschinenausfälle und viele andere Events führen zu Produktionsstillständen, die es zu vermeiden gilt.
- **IT-Administration:** Labs setzen heute wenig IT ein und haben selten einen eignen Administrator. Vor diesem Hintergrund stellt ein externer Service hier einen Mehrwert dar, da eine Administration im Haus nicht notwendig ist.

Vor diesem Hintergrund adressiert das Nutzenversprechen des PPS-Service sehr gut die Bedürfnisse dieses Kundenklientels. Die technische Ausgestaltung der IT- und Serviceinfrastruktur ist der Abbildung 5 (S. 15) zu entnehmen.

Aus kommerziellen Gründen sowie der erwähnten Skalierbarkeit der Hardwareperformance wurde als Serviceplattform in diesem Anwendungsfall die Amazon AWS Cloud ausgewählt. Als SQL-Datenbank wird aufgrund der technischen Leistungsfähigkeit als auch des guten Preis-/ Leistungsverhältnisses Amazon Aurora verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung einer PostgreSQL-Datenbank. Der auf Wildfly 13 basierende Service zur eventbasierten PPS wurde auf einem Linux Betriebssystem installiert (siehe Abb. 5, S. 15). Die Verbindung des Labs mit der AWS bzw. dem Service erfolgt über

eine verschlüsselte VPN-Verbindung, wobei lokal im Netzwerk ein vorkonfigurierter VPN-Router als Gateway zum Einsatz kommt.

Der Service zur eventbasierten PPS verwendet zum Datenaustausch mit seiner Umwelt sieben Schnittstellen für Stamm- und Bewegungsdaten, die im Folgenden näher erläutert werden:

1. Zur Anbindung des LMS wurde ein spezieller LMS REST Webservice konzipiert und realisiert, welches zum Austausch von Kunden-/ Fertigungsaufträgen dient. Durch die Definition von Musterarbeitsplänen im PPS-Service werden bei Übergabe der Kundenaufträge aus dem LMS entsprechende Fertigungsaufträge mit u. a. Arbeitsgängen und Planzeiten automatisch erzeugt.
2. Über den Machine State Webservice werden Maschinenstatus wie z. B. On, Ready, WaitingForJobs, Processing, Error oder OFF von den Maschinen verarbeitet. Bei Eintritt eines solchen Events erfolgt der sofortige Versand von der Maschine per REST-Webservice zum Planungsservice.
3. Job State Events sind auf den Auftrag bzw. Arbeitsgang bezogen und Start, Aborted sowie Finished. Aborted wird gesendet, wenn ein Arbeitsgang auf einer Maschine abgebrochen werden muss.
4. Über die Prozessdaten werden beliebige Daten, die bei der Abarbeitung des Arbeitsgangs von der Maschine entstehen, an den Service gesendet. Diese enthalten Prozesswissen, welches für den Planungsservice
5. Befindet sich eine Maschine im Fehlerzustand Error, werden über dieses Interface entsprechende Detaildaten wie Fehlerbeschreibung, -klassifikation und -gruppe gesendet.
6. Über das Maintenanceinterface werden Wartungsevents gesendet. Hierbei kann die Wartung aktuell anliegen oder aber auch geplant in der Zukunft und damit planungsrelevant sein.
7. Nach erfolgter Terminierung werden für den Kunden-/ Fertigungsauftrag die geplanten Start- und Endzeiten zurückgegeben. Diese werden vom LMS benötigt, um die aktuelle Reihenfolge der Aufträge abbilden zu können.

Maschinenstammdaten und -kapazitäten werden im Service selbst verwaltet. Dies hat den Hintergrund, dass nur so entsprechende Eindeutigkeiten und Plausibilitäten zwischen dem realen und digitalen Zwilling für den Planungsservice möglich sind. Die eventbasierte Termin- und Kapazitätsplanung erfolgt nach Eintritt eines entsprechenden Events. Dies kann u. a. die Neuanlage, Änderung oder das Löschen eines Kundenauftrags, eine neue Start-/ Unterbrechung-/Ende-Meldung auf den Arbeitsgang, ein neuer

Maschinenzustand oder eine neue Wartungsschicht sein. Der Service speichert eingehende REST-Anfragen in einer Cachetabelle, die konfigurierbar alle fünf Sekunden die eingehenden Daten verarbeitet. Danach erfolgt die Terminierung aller zu verplanenden Kundenaufträge mit ihren Fertigungsaufträgen und Arbeitsgängen anhand von konfigurierbaren Terminierungslogiken. Im Anwendungsfall wird eine Vorwärtsterminierung ab dem aktuellen Zeitpunkt unter Berücksichtigung der durch die Schichtmodelle begrenzten Kapazitäten auf den Maschinen durchgeführt. Hierbei werden die vom LMS übergebenen Aufträge direkt verplant und auch gesetzte Prioritäten berücksichtigt. Neben der Vorwärtsterminierung findet eine Losbildung anhand der Rezeptur, also eine Verplanung von Aufträgen mit gleichem Kennzeichen direkt hintereinander statt.

Das Mengengerüst umfasst hierbei im Anwendungsfall:

- Stammdaten: 28 Maschinen und 10 Handarbeitsplätze,
- Bewegungsdaten: ca. 2.500 Kundenaufträge mit ca. 5.000 Fertigungsaufträgen, ca. 75.000 Arbeitsgänge und ca. 250.000 Rückmeldungen pro Tag sowie
- Planungshorizont: zwei Tage ab dem aktuellen Zeitpunkt, entspricht ca. 150.000 parallel zu verplanenden Arbeitsgängen.

Für einen Planungszyklus, bestehend aus Plandaten lesen, terminieren und Plandaten speichern, benötigt der Planungsservice nach Eintritt eines Events im Durchschnitt 2,5 Minuten. Durch die in der Amazon Cloud skalierende Rechenleistung wird ein konstantes Antwortverhalten für den Service garantiert. Die Evaluierung des Service zur eventbasierten PPS erfolgte im Zeitraum von vier Monaten im Echtbetrieb. Hierbei konnte die Termintreue der Kundenaufträge, die Durchlaufzeiten der Fertigungsaufträge als auch die Maschinenauslastung nachhaltig verbessert und damit das Nutzenversprechen des Service in der Praxis überprüft werden.

## 5 Lessons Learned

Der Service zur eventbasierte Produktionsplanung und -steuerung adressiert den Leidensdruck, dass heutige ERP/PPS-Systeme nicht in Quasi-Echtzeit eine Termin- und Kapazitätsplanung durchführen und damit nicht schnell auf eventbasierte Veränderungen in der Produktion reagieren können. In der exemplarischen Branche der Brillenglasfertigung kommt zum einen hinzu, dass eine Terminierung in den vorgestellten LMS-Systeme grundsätzlich fehlt. Zum anderen werden hier geringe interne IT-Administrationsaufwände übernommen, was zu einer höheren Akzeptanz von cloudbasierten Services führt. Dieser Aspekt der Technologieakzeptanz ist für Serviceanbieter nicht zu unterschätzen, da es heute noch sehr skeptisch eingestellte Branchen wie den Maschinen- und Anlagenbau gibt. Die vorgestellten Schutz- und Sicherungstechnologien für den Datentransfer zum und vom cloud-basierten Service in das Unternehmen entsprechen zwar dem aktuellen Stand der Technik, aber der gefühlte Hoheitsverlust für die Datenbestände stellt eine psychologische Hürde für die Akzeptanz dar, die es von den Serviceherstellern zu adressieren gilt. Technisch konnte durch die Anwendung des PPS-Service bewiesen werden, dass auch bei großen Datenmengen aufgrund neuer Planungsalgorithmen und skalierbarer Hardwareperformance in der Cloud entsprechend kurze Terminierungszeiten in Quasi-Echtzeit von wenigen Minuten ermöglicht werden. Die Herausforderung besteht hier aber, wie bei lokal installierten On-Premises-Planungslösungen, einen Trade-off zwischen Planungskomplexität, notwendiger und zulässiger Berechnungszeit zu garantieren. Auf Basis der Erkenntnisse aus der exemplarischen Anwendung wird dieser PPS-Service derzeit weiter modularisiert und in ein kommerzielles, servicebasiertes Geschäftsmodell überführt. Hierbei wurde ein monatliches Bezahlmodell, bestehend aus einer Grundgebühr und einer maschinen- bzw. plandatenabhängigen Nutzungspauschale, mit einer breiten potentiellen Kundenbasis diskutiert und als attraktiv identifiziert. Die Herausforderung besteht nun, einen globalen Partnervertrieb hierfür aufzubauen und die Services auf die lokalen Gegebenheiten hin zu adaptieren.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags zur Produktionsplanung und -steuerung wurde eingangs in die Thematik Industrie 4.0, CPS, CPPS sowie die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung eingeführt. Hierauf aufbauend wurden die aktuelle Ausgangssituation und die daraus resultierenden Herausforderungen für die PPS abgeleitet. Zur Lösung der PPS in Quasi-Echtzeit wurde ein cloudbasierter Service zur eventbasierten PPS entwickelt und vorgestellt. Die im Anschluss erläuterte Validierung in der Brillenglasfertigung verdeutlicht den Nutzen eines solchen Service zur eventbasierten PPS.

Der Bedarf zur weitergehenden Erforschung der hier skizzierten Thematik wird derzeit durch die Beantragung eines Forschungsprojekts „APS as a Service“ nachgekommen. Hier wird die Entwicklung einer modularen APS-Softwarestruktur auf Basis des Ansatzes „Everything as a Service (XaaS)“ angegangen. Dies soll die flexible anbieterübergreifende Kombination verschiedener APS-Services, die Reduzierung des Entwicklungs- und Implementierungsaufwands und das Anpassen des Funktionsumfangs an die Anforderungen des jeweiligen Anwenderunternehmens erlauben. Die Basis-Bausteine sollen besonders KMU erlauben, mit geringem finanziellem Aufwand standardisierte Planungsmethoden einsetzen zu können, die sich flexibel über die Zeit anpassen lassen. Damit wird die Einstiegsbarriere für KMU in automatisierte Planungsmethoden deutlich gesenkt. Deren Wettbewerbsfähigkeit steigt durch optimierte Planung und die daraus resultierende höhere Produktivität. Der Experten-Baustein ermöglicht die anwenderspezifische Anpassung beziehungsweise Erweiterung, um auch komplexe Planungszusammenhänge zu berücksichtigen. Ergebnis dieses geplanten Forschungsprojekts sind erprobte und marktfähige APS-Services.

## Literaturverzeichnis

- Abele, E., Reinhart, G. (2011): Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, München: Carl Hanser.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Berlak, J., Deifel, B. (2002): Activation Styles for Changeable Order Management Systems, in: Khosrow-Pour, M. (Hrsg.): Issues & Trends of Information Technology Management in Contemporary Organizations. Hershey: Idea Group Publishing, 2002, S. 70-74.
- Berlak J., Deifel, B. (2003): Challenging the Unpredictable: Changeable Order Management Systems, in: Grant, G. G. (Hrsg.): ERP and Data Warehousing: Issues and Challenges, Hershey: Idea Group Publishing, 2003, S. 22-52.
- Berlak, J. (2003): Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen, München: Utz.
- Berlak, J. (2006): Wandlungsfähige ERP/PPS-Lösungen für den Mittelstand, in: Gronau, N.; Lämmer, A. (Hrsg.): Wandlungsfähige ERP-Systeme: Entwicklung, Auswahl und Methoden, Berlin: GITO-Verlag, 2006, S. 57-74.
- Berlak, J. (2015): Dienst-basierte Multiressourcenplanung für die Industrie 4.0, in: Reinhardt, G., Scholz-Reiter, B., Wahlster, W., Wittenstein, M., Zühlke, D. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik: Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele in der Praxis, München: Fraunhofer Verlag, S. 165-178.
- Berlak, J. (2017): INDUSTRY 4.0/ AMP 2.0: What is it all about and how Labs can profit, in: Mafo 1 (2017), volume 13, S. 10-18.
- Berlak, J., Berger, C., Reinhart, G. (2016): Service-based Production planning and Control of Cyber-Physical Production Systems, in: Versendaal, C. J., Kittl, A. Pucihar, M. K. Borstnar (Eds.): Proceedings of the 29th Bled eConference Digital Economy June 19 - 22, 2016, S. 403-414.
- Berlak, J., Weber, V. (2004a): How to Configure Cyber Chains via Competence Networks, in: Business Process Management Journal 10 (2004), issue 3, S. 291-299.

- Berlak, J.; Weber, V. (2004b): How to make e-Procurement viable for SME suppliers, in: *Production Planning and Control* 15 (2004), issue 7, S. 671-677.
- Brecher, C. (2012): *Integrative production technology for high-wage countries*, Berlin: Springer.
- Broy, M. (2010): *Cyber-Physical Systems – Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung*, in: Broy, M. (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems: Innovation durch Software-Intensive Eingebettete Systeme*, Heidelberg: Springer, 2010, S. 17-31.
- Broy, M. (2010): *Cyber-Physical Systems: Innovation durch Software-Intensive Eingebettete Systeme*, Heidelberg: Springer.
- Chen, M., Wan, J., Li, F. (2012): *Machine-to-Machine Communications: Architectures, Standards and Applications*, in: *KSII Transactions on Internet and Information Systems* 6 (2012), no. 2, S. 480-496.
- Grant, G. G. (2003): *ERP and Data Warehousing: Issues and Challenges*, Hershey: Idea Group Publishing.
- Gronau, N., Lämmer, A. (2006): *Wandlungsfähige ERP-Systeme: Entwicklung, Auswahl und Methoden*, Berlin: GITO-Verlag.
- Jeon, S. M., Kim, G. (2016): *A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC)*, in: *Production Planning & Control* 27 (2016), issue 5, S. 360-377.
- Jeschke, S. (2014): *Automation, communication and cybernetics in science and engineering*, Berlin: Springer.
- Jeske, T., Weber, M.-A., Würfels, M., Lennings, F., Stowasser, S. (2018): *Opportunities of Digitalization for Productivity Management*, in: Nunes, I. (Hrsg.): *AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 781. Berlin: Springer, 2018, S. 312-331.
- Kolberg, D., Berger, C., Pirvu, B.-C., Franke, M., Michniewicz, J. (2016): *CyProF – Insights from a Framework for Designing Cyber-Physical Systems in Production Environments*, in: *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 32–37.
- Korte, B.; Vygen, J. (2008): *Kombinatorische Optimierung: Theorie und Algorithmen*. Berlin: Springer.

- Khosrow-Pour, M. (2002): *Issues and Trends of Information Technology Management in Contemporary Organizations*. Hershey: Idea Group Publishing.
- Kuo, Y., Yang, T., Parker, D., Sung, C.-H. (2016): Integration of customer and supplier flexibility in a make-to-order industry, in: *Industrial Management & Data Systems* 116 (2016), issue 2, S. 213-235.
- Kurbel, K. (2003): *Produktionsplanung und -steuerung: methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen*, 5. Aufl., München: Oldenbourg.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., Hoffmann, M. (2014): Industry 4.0, in: *Business and Information Systems Engineering* 6 (2014), issue 4, S. 239-42.
- Lutz, D., Berlak, J. (2014): Anspruch und Wirklichkeit in der mittelständischen Industrie 4.0, in: *VDI-Z* 3 (2014), S. 47-49.
- Milberg, J., Berlak, J. (2004): A Methodology for the Selection of Order Management Systems, in: *Annals of the German Academic Society for Production Engineering* XI 1 (2004), S. 5-10.
- Nyhuis, P. (Hrsg.) (2018): *PPS-Report 2017/18*, Hannover: PZH Verlag.
- Reinhardt, G., Scholz-Reiter, B., Wahlster, W., Wittenstein, M., Zühlke, D. (2015): *Intelligente Vernetzung in der Fabrik: Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele in der Praxis*, München: Fraunhofer Verlag.
- Reinhart, G. (2017): *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*, München: Hanser.
- Schuh, G., Stich, V. (2014): *Enterprise-Integration: Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*, Berlin: Springer, S. 23-35.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. R., Prote, J.-P. (2014): Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0, in: *Procedia CIRP* 19 (2014), S. 51-56.
- Shancang, L., Da, X. L., Shanshan, Z. (2015): The internet of things: a survey, in: *Information Systems Frontiers* 17 (2015), issue 2, S. 243-259.
- Tenhiälä, A., Helkiö, P. (2015): Performance effects of using an ERP system for manufacturing planning and control under dynamic market requirements, in: *Journal of Operations Management* 36 (2015), S. 147-164.

Wiendahl, H.-H. (2011): Auftragsmanagement der industriellen Produktion, Heidelberg: Springer.

Wiendahl, H.-H., Kluth, A. (2017): Vielfältige Planungs- und Steuerungsnetzwerkzeuge, SCM-, MES- und APS-Lösungen, in: IT-Matchmaker.guide Business Lösungen 2017, Aachen: Trovarit, S. 14-17.

### **Internetquellen**

Jodlbauer, H., Reitner, S. (ohne Erscheinungsjahr): Was macht eine gute Planung aus? Ergebnisse einer empirischen Umfrage in Produktionsunternehmen. <https://productivity-management.de/node/196> [Zugriff 30.03.2019]

Statista: Brillengläser Deutschland (ohne Erscheinungsjahr). <https://de.statista.com/outlook/12010000/137/brillenglaeser/deutschland> [Zugriff 30.03.2019]

**Beitrag II**  
**Leichtbau bei hochbelasteten Kunststoffbauteilen**  
**am Beispiel einer Federunterlage**

Tilko Dietert

Prof. Dr. Tilko Dietert

FOM Hochschule für Oekonomie und Management

Email: [tilko.dietert@fom.de](mailto:tilko.dietert@fom.de)

**Inhalt**

Abkürzungsverzeichnis.....	34
Abbildungsverzeichnis.....	34
Tabellenverzeichnis.....	35
Zusammenfassung.....	36
1 Einleitung, Problemstellung.....	37
2 Stand der Technik.....	40
3 Hohe Festigkeit.....	43
4 FEM-Berechnungen.....	46
5 Herstellung mit Sandwich-Schäumverfahren.....	52
6 Erprobung.....	58
7 Resümee.....	59
Literaturverzeichnis.....	60

## Abkürzungsverzeichnis

2K	2-Komponenten
CT	Computertomograf
FEM	Finite-Elemente-Methode
GIT	Gasinjektionstechnik
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Federbein im Federbeindom.....	37
<b>Abbildung 2:</b>	Federunterlage als 2-Komponenten-Bauteil .....	38
<b>Abbildung 3:</b>	konventionelle Federunterlage.....	40
<b>Abbildung 4:</b>	Morphologisches Modell für Schaumstruktur.....	44
<b>Abbildung 5:</b>	FEM-Simulation konventionelle Federunterlage, von-Mises- Vergleichsspannungen .....	47
<b>Abbildung 6:</b>	Spannungs-Dehnungs-Kurven des Elastomers für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten .....	49
<b>Abbildung 7:</b>	Wöhlerkurve für Polyamid PA66 GF35 Ultramid® A3WG7 ....	50
<b>Abbildung 8:</b>	SmartFoam-Heißkanal mit Fluidinjektor und Mischelement im Vergleich zu einem konventionellen Heißkanal .....	52
<b>Abbildung 9:</b>	Verfahrensablauf beim SmartFoam-Prozess.....	54
<b>Abbildung 10:</b>	Hartkomponente der Federunterlage, hergestellt mit dem SmartFoam-Verfahren .....	56
<b>Abbildung 11:</b>	Schnitt durch die geschäumte Hartkomponente, links korrekte Verteilung von Außenschicht und Schaum, rechts fehlerhaftes Teil mit Gasblase .....	57

**Tabellenverzeichnis**

<b>Tabelle 1:</b>	Maximale Verschiebungen und Vergleichsspannungen bei statischer Belastung gemäß FEM-Berechnung .....	48
<b>Tabelle 2:</b>	Maximale Verschiebungen und Vergleichsspannungen beim Dauerschwingversuch mit $10^8$ Lastwechseln gemäß FEM-Berechnung .....	51

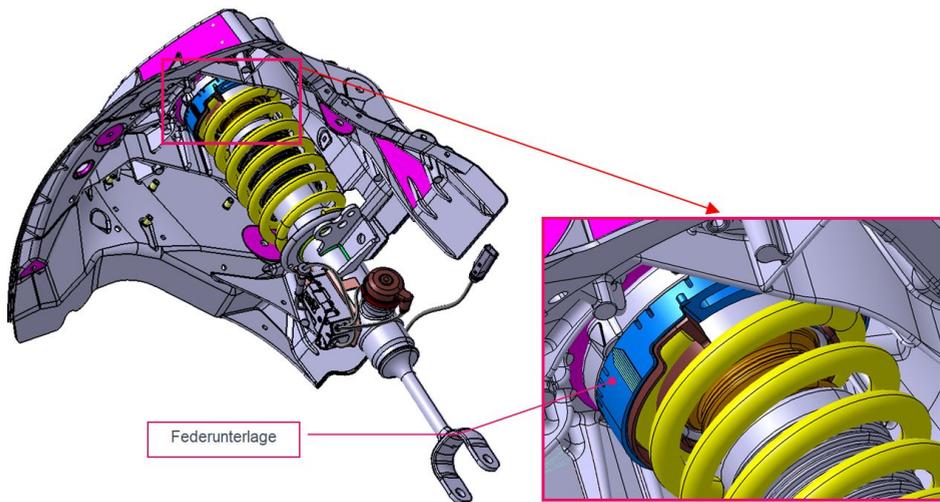
## **Zusammenfassung**

Hochbelastete Kunststoffbauteile erreichen die notwendige Festigkeit im Allgemeinen durch große Wandstärken und mit einem damit verbundenen hohen Gewicht. Dieses führt im Gebrauch in Fahrzeugen oder Flugzeugen zu erhöhtem Treibstoffverbrauch, und bei der Herstellung im Spritzgießverfahren wird unnötig Material und Energie verbraucht. Deshalb werden aus ökologischen und ökonomischen Gründen von den Kunden möglichst leichte Teile gefordert. Mit additiven Verfahren könnten hohle Strukturen erzeugt werden, die nur dort Material aufweisen, wo es zur Aufnahme von Belastungen notwendig ist, aber die Verfahren sind auf absehbare Zeit noch nicht großserientauglich. Am Beispiel einer PKW-Federunterlage wird gezeigt, dass es möglich ist, mit einem Sandwich-Schäumverfahren in einem einkomponentigen Spritzgießprozess eine Struktur zu realisieren, die außen aus kompaktem, festem Material zur Aufnahme der Belastungen besteht und innen, wo kaum Belastungen auftreten, aus einem leichten Schaum. Somit können bei gleicher Festigkeit Gewicht, Materialverbrauch und Herstellkosten signifikant reduziert werden.

## 1 Einleitung, Problemstellung

Idealerweise – im Sinne einer kunststoffgerechten Konstruktion – haben Kunststoffbauteile gleichmäßige und vor allem dünne Wandstärken. Die funktionalen und geometrischen Anforderungen lassen aber oft eine solche Bauteilgestaltung nicht zu. Bei hochbelasteten Bauteilen wird zudem eine gewisse Materialmenge zum Erreichen der notwendigen Festigkeit benötigt, was der Forderung nach dünnen Wandstärken zuwiderläuft. Ein Beispiel für ein solches Bauteil ist eine Federunterlage, die in einem PKW-Fahrwerk die Tragfeder formschlüssig in der oberen Lagerschale des vorderen Federbeins aufnimmt (s. Abbildung 1, Federunterlage in blau dargestellt). Mit der Lagerschale wird das Federbein dann im Federbeindom mit der Karosserie verschraubt. Im Inneren der spiralförmigen Tragfeder befindet sich der Stoßdämpfer. Das untere Ende wird mit dem gabelförmigen Befestigungselement mit der Vorderachse verbunden.

**Abbildung 1:** Federbein im Federbeindom

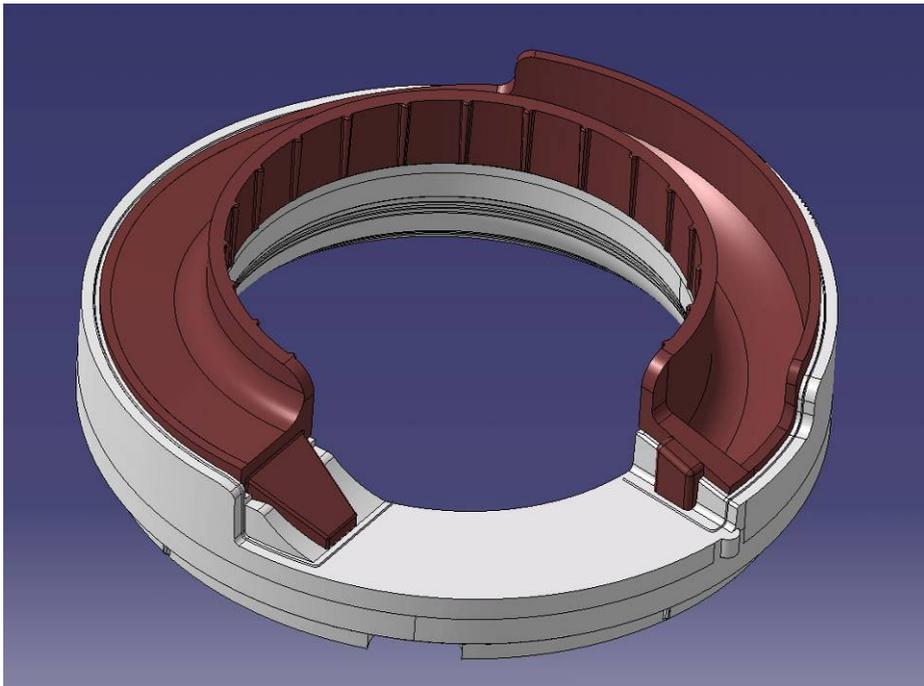


Quelle: [7]

Die Federunterlage besteht aus einer Hartkomponente aus einem hochfesten thermoplastischen Kunststoff, z. B. glasfaserverstärkten Polyamid PA66, und einer Weichkomponente aus einem Elastomer mit einem geringen Druckverformungsrest, z. B. einem Styrol-Butadien-Kautschuk SBR (s. Abbildung 2, Hartkomponente grau, Weichkomponente rot). Die

Oberflächengeometrie der Weichkomponente folgt der Steigung der Feder, ebenso die Geometrie der Hartkomponente, damit die Dicke des Elastomers überall gleich ist, was für optimale Fahreigenschaften zwingend notwendig ist. Da die Hartkomponente auf der anderen Seite flach sein muss, um in der Lagerschale anzuliegen, muss die Dicke der Hartkomponente von der Auflage des Tragfederendes beginnend entsprechend der Steigung der Tragfeder kontinuierlich ansteigen.

**Abbildung 2:** Federunterlage als 2-Komponenten-Bauteil



Quelle: [11]

Die Federunterlage muss enorme Kräfte aufnehmen, insbesondere im vorderen Federbein, weil vorne üblicherweise der Motor eingebaut ist. Für die dargestellte Federunterlage beträgt z. B. die statische Belastung durch das Fahrzeuggewicht über 8000 N (eingefederter Zustand), und im Betrieb können dynamische Belastungen bis zum Doppelten des statischen Wertes auftreten. Deshalb ist auch schon im flachsten Bereich der Hartkomponente eine erhebliche Wandstärke erforderlich, um diesen Belastungen standzuhalten. Durch die geometriebedingt ansteigende Materialdicke erreicht man im dicksten

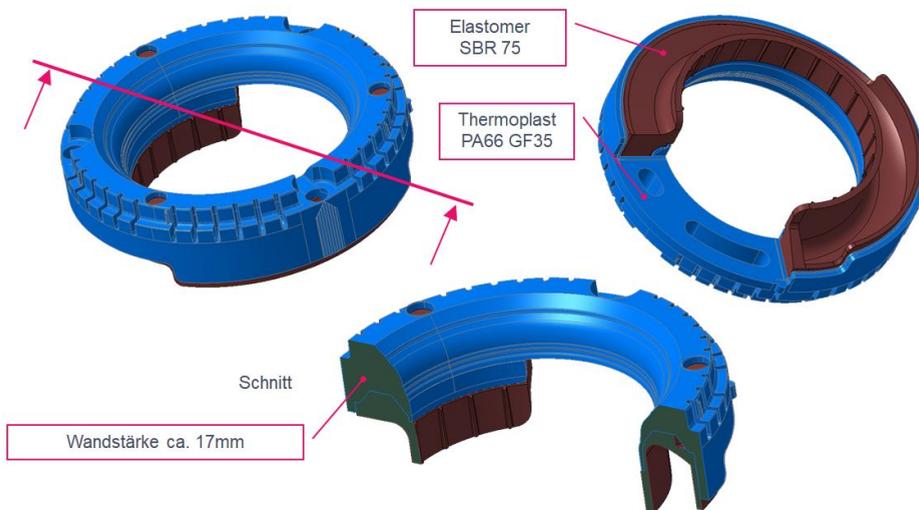
Bereich eine Masseanhäufung, die für die Herstellung im Spritzgießverfahren sehr ungünstig ist. Andere Verfahren, die toleranter gegenüber Masseanhäufungen sind, wie z. B. additive Verfahren, sind trotz rasanter Fortschritte in der letzten Zeit (s. z. B. [22]) für eine Großserienproduktion noch lange nicht wirtschaftlich.

Anlässlich einer Anfrage eines Automobilherstellers nach einer Federunterlage für eine neue Fahrzeugbaureihe der Ober- und Luxusklasse wurde deshalb nach innovativen Konzepten gesucht, um die Nachteile des konventionellen Konzepts zu vermeiden und ein attraktives Angebot machen zu können.

## 2 Stand der Technik

Die übliche Methode, um Masseanhäufungen zu reduzieren, besteht darin, in der funktional bedingten Geometrie Aussparungen anzubringen. Dieses kann nur von außen erfolgen, damit die resultierende Geometrie aus dem Werkzeug entformt werden kann. Ein Beispiel für eine konventionelle Ausführung der Hartkomponente der Federunterlage zeigt Abbildung 3. Im Folgenden wird nur noch die Hartkomponente betrachtet, da das Anspritzen der Elastomerkomponente ein gut beherrschter Standardprozess ist.

**Abbildung 3:** konventionelle Federunterlage



Quelle: [7]

Hier wurden radiale Nuten eingebracht, die aber nach den bekannten Gesetzen der technischen Mechanik (s. z. B. [25], Kap. 11) dazu führen, dass das für Biegung, Torsion oder ähnliche Belastungen in Umfangsrichtung wirksame Flächenträgheitsmoment, zu dem die Bereiche der Querschnittsfläche mit großem Abstand zur Biegelinie überproportional beitragen, und damit die Festigkeit deutlich reduziert wird. Auch die Zugfestigkeit wird reduziert, weil hierfür der minimale Querschnitt bestimmend ist; allerdings führen die typischen Lastfälle nicht zu Zugbelastungen in Umfangsrichtung. Zudem verbleiben trotz der Aussparungen in dem dargestellten Beispiel erhebliche Masseanhäufungen mit bis zu 17 mm Wandstärke, s. Abbildung 3. Dieses führt zu einem

erheblichen Bauteilgewicht und einer Zykluszeit im Spritzgießprozess in der Größenordnung von zwei Minuten, was entsprechende Kosten verursacht. Bekanntermaßen nehmen bei Biegung, Torsion o. ä. die außenliegenden Querschnittsbereiche die größten Kräfte bzw. Spannungen auf (s. z. B. [25], S. 311 ff), während in der Mitte (Flächenschwerpunkt) die neutrale Faser überhaupt nicht belastet wird. Deshalb ist eine Schwächung der außenliegenden Bereiche für die Festigkeit kontraproduktiv, im Gegenteil wäre es naheliegend, die Federunterlage hohl auszuführen und nur die Wandstärke des Hohlprofils so dick auszulegen, dass die auftretenden Spannungen aufgenommen werden können. Dieses soll am Beispiel eines kreisförmigen Querschnitts mit dem Radius  $r$  und der Fläche  $A = \pi r^2$  veranschaulicht werden: In diesem Fall sind die Flächenträgheitsmomente in den beiden Achsenrichtungen in der Querschnittsebene, die für Biegebelastungen relevant sind, untereinander gleich und betragen (s. z. B. [25], S. 300):

$$I_y = \int_A z^2 dy = \frac{1}{4} \pi r^4 = I_z.$$

Das für Torsionsbelastungen relevante polare Flächenträgheitsmoment  $I_p$  ist das Doppelte dieser Flächenträgheitsmomente, also

$$I_p = \frac{1}{2} \pi r^4.$$

Wenn man die Querschnittsfläche halbiert, in dem man ein Hohlprofil mit einem inneren Radius  $r_i = \frac{r}{\sqrt{2}}$  bei unverändertem Außenradius  $r$  betrachtet, halbiert sich auch die Zugfestigkeit, aber die Flächenträgheitsmomente sind mit (s. z. B. [25], Anhang A7.1)

$$I_y = \frac{1}{4} \pi (r^4 - r_i^4) = \frac{1}{4} \pi \left( r^4 - \frac{1}{4} r^4 \right) = \frac{3}{16} \pi r^4$$

nur um 25 Prozent reduziert. Dagegen würde eine Reduzierung des Querschnitts durch Abnahme des Materials von außen, also auf einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Radius  $r_i$ , zwar für die Zugfestigkeit denselben Effekt haben, aber die für Biegung relevanten

Flächenträgheitsmomente werden um 75 Prozent reduziert, d. h. auf ein Drittel des Wertes für das Hohlprofil, analog für Torsion.

### 3 Hohe Festigkeit

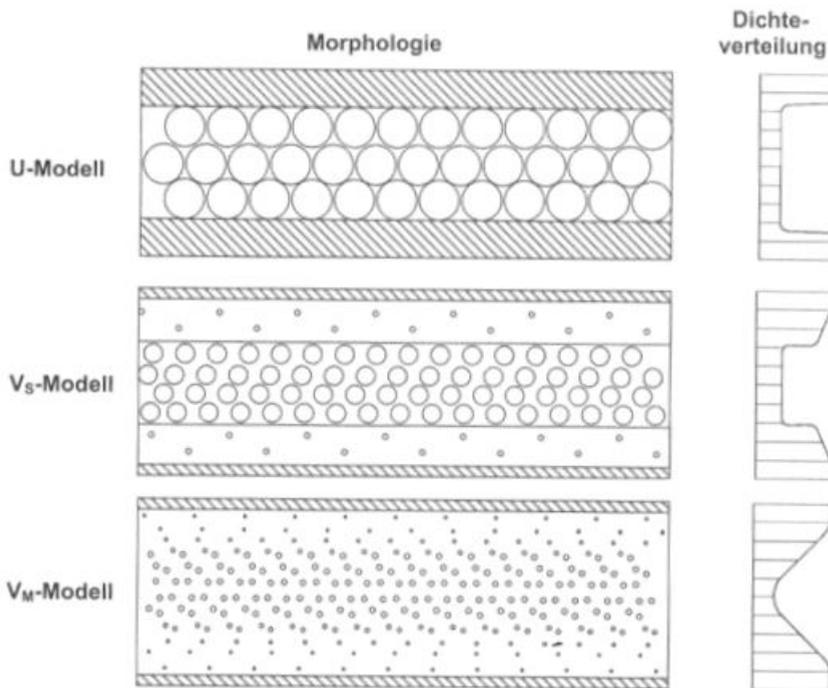
Bei einer Gestaltung als Hohlkörper besteht jedoch die Gefahr des Einknickens (s. z. B. [25], Kap. 14), d. h. die Wand weicht der Spannung seitlich aus. Deshalb ist die ideale Geometrie ein Profil mit einer außen kompakten und genügend tragfähigen Wand und einer leichten Struktur im Inneren, deren Aufgabe nur darin besteht, das Einknicken zu verhindern. Das könnte eine Rippenstruktur sein, die aber nur mittels additiver Verfahren herstellbar ist (s. z. B. [22], Bild 4), oder ein aufgeschäumter Kunststoff.

Ein Hohlprofil könnte man grundsätzlich mit der Gas- oder Wasserinjektionstechnik herstellen (s. z. B. [34], Abschnitt 1.11.3); wegen des Risikos des Einknickens wurde das aber nicht in Betracht gezogen, auch wenn die FEM-Berechnungen (s. u.) für Belastung in Wandrichtung Spannungen ergeben haben, die evtl. noch zulässig sind.

Mit dem üblichen chemischen Schäumverfahren (thermoplastischer Schaumguss TSG, s. z. B. [34], Abschnitt 1.11.11) oder dem als MuCell® bekannten physikalischen Schäumen (s. [14], [12]) wird die gesamte Schmelze aufgeschäumt, also auch das Material, das später die Außenwand bildet. Dadurch bekommt auch die Außenwand eine porenbehaftete Schaumstruktur. Zwar nimmt die Größe der Poren von außen nach innen zu, dennoch reduzieren auch die kleinen Poren im Außenbereich die Festigkeit der tragenden Wand. Gleiches gilt z. B. auch für die physikalischen Schäumverfahren ErgoCell® (s. [21], [30]) und Optifoam (s. [26], [27], [16]), die ähnlich feinporige Schäume erzeugen, aber ebenfalls die ganze Schmelze mit Gas beladen.

Der Einfluss der Poren wurde z. B. an der Universität Kassel quantitativ untersucht (s. [1], [23]). Dabei wurden verschiedene innere Strukturen modelliert und analysiert (s. Abbildung 4).

**Abbildung 4:** Morphologisches Modell für Schaumstruktur



Quelle: [23], S. 207.

Bei gleicher Reduzierung der Dichte, damit der resultierenden Querschnittsfläche und folglich der Zugfestigkeit, nimmt die Festigkeit gegen Biegebelastungen von oben nach unten ab. Mit den o. g. Schäumverfahren erhält man normalerweise eine Struktur, die dem VM-Modell entspricht, wobei die dort angenommene dünne, kompakte Randschicht praktisch nicht erreicht werden kann. Eine Struktur gemäß dem VS-Modell kann man erhalten, wenn man nach dem Einspritzen der gasbeladenen Schmelze das Werkzeug aufzieht („Präzisionsöffnen“, auch als „Dow-Verfahren“, „Negativ-Prägen“, „Öffnungsprägen OCM“ oder „Lüften“ bezeichnet, s. z. B. [12], [13], [18]) und damit die resultierende Wanddicke erhöht, während die schon eingefrorenen Randschichten den geringen Porenanteil behalten. Dieses Verfahren ist offensichtlich nur für flächige Teile sinnvoll einsetzbar, aber nicht für eine Geometrie wie die der Federunterlage.

Nach diesen Untersuchungen wäre also ein Sandwichbauteil mit einer kompakten Außenhaut und einem geschäumten Kern ideal, um die Anforderungen an hohe Festigkeit, niedriges Gewicht und günstige Herstellbarkeit zu erfüllen. Diese Erkenntnis findet man auch z. B. in [13]. Eine solche Struktur ist aber mit den konventionellen Schäumverfahren mit einem Spritzvorgang nicht erreichbar, sondern nur in einem aufwendigen 2K-Verfahren, wie es kürzlich z. B. mit dem Schäumverfahren Cellmould® am Kunststoff-Zentrum Leipzig (KUZ) zur Herstellung von flächigen „waffelförmigen“ Strukturbauteilen umgesetzt wurde (s. z. B. [20]).

## 4 FEM-Berechnungen

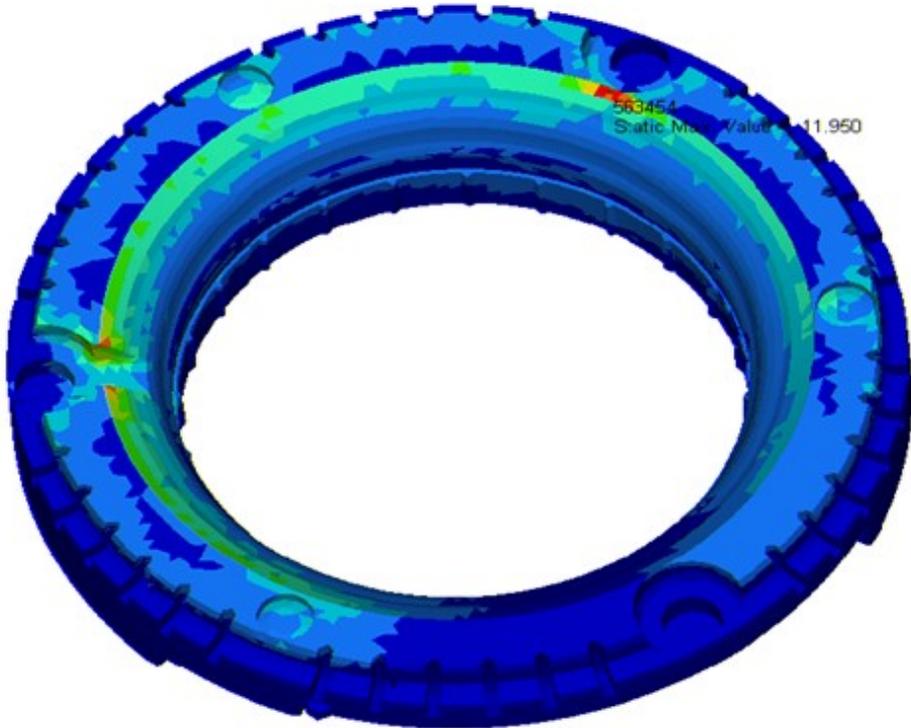
Zum Nachweis, ob dieser Ansatz zielführend ist, wurden von J. Muchazow FEM-Berechnungen mit dem Programm „Abaqus“ durchgeführt ([28]). Die Bauteilgeometrie wurde in verschiedenen Varianten mit jeweils über 100.000 Knoten modelliert und dabei verschiedene Annahmen über das Innere getroffen. Für die Berechnung von Hohlkörpern, die mittels Gas- oder Wasserinjektion hergestellt werden können, muss nur das Innere von Material befreit werden. Für ein aufgeschäumtes thermoplastisches Material ist es dagegen schwierig, geeignete Materialparameter für die Simulation zu bestimmen, deshalb wurde ersatzweise mit einem Elastomer gerechnet, das ebenfalls keine große Festigkeit hat, aber durch seine Anwesenheit das Einknicken der Wand verhindert. Natürlich ist ein solches Teil mit bekannten Fertigungsverfahren nicht wirtschaftlich herstellbar, aber das Elastomer soll auch nur das Verhalten des aufgeschäumten thermoplastischen Kunststoffs approximieren.

Zuerst wurde die statische Belastung mit dem ungefähr 1,5-fachen Wert der normalen statischen Belastung, eingeleitet über die Tragfeder, simuliert. Hierbei wurden die Verschiebungen sowie die einachsigen Vergleichsspannungen nach von Mises (s. z. B. [25], S. 366, [15], S. C7, Herleitung s. z. B. [17], S. 183 f), die eine dem tatsächlichen mehrachsigen Spannungszustand mit den Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  äquivalente Belastung des Materials bewirken, berechnet:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Das Ergebnis für das konventionelle, massive Bauteil ist in Abbildung 5 dargestellt.

**Abbildung 5:** FEM-Simulation konventionelle Federunterlage, von-Mises-Vergleichsspannungen



Quelle: [8]

Qualitativ findet man auch bei den anderen beiden Varianten die höchsten von-Mises-Spannungen am inneren Umfang an der Oberseite der Federunterlage, allerdings sind die Maximalwerte (in Abbildung 5 rot dargestellt) unterschiedlich. In der folgenden Tabelle sind die Werte (gerundet) im Vergleich dargestellt:

**Tabelle 1:** Maximale Verschiebungen und Vergleichsspannungen bei statischer Belastung gemäß FEM-Berechnung

Variante	Max. Verschiebung	Max. von-Mises-Spannung
Konventionell	10 $\mu\text{m}$	12 MPa
Hohl (GIT)	18 $\mu\text{m}$	16 MPa
Geschäumt	11 $\mu\text{m}$	11 MPa

Quelle: [8]

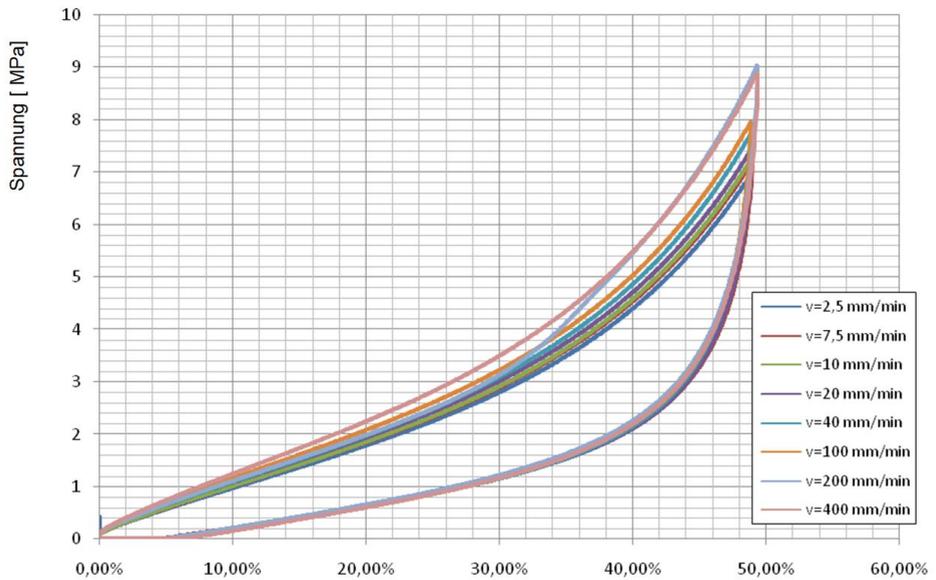
Die hohle Variante weist also deutlich höhere Verschiebungen und Materialbelastungen als die konventionelle Ausführung auf. Die Absolutwerte sind für das verwendete Material PA66 unproblematisch, z. B. weist einer der in Frage kommenden Materialtypen, nämlich Schulamid® 66 GF 35 H, eine minimale Bruchspannung von 140 MPa (konditioniert) und minimale Bruchdehnung von 2,5 Prozent (trocken) auf ([31]), und Vergleichstypen von anderen Anbietern liegen in ähnlicher Größenordnung.

Da die Federunterlage im Gebrauch aber ständigen Schwingungen und teilweise stoßartigen Belastungen ausgesetzt ist, muss eine ausreichende Sicherheitsreserve bei den Materialeigenschaften vorhanden sein, die bei der hohlen Ausführung deutlich reduziert ist. Dagegen weist das Modell für die innen geschäumte Variante Werte in derselben Größenordnung wie die konventionelle Ausführung auf, die maximale Vergleichsspannung ist sogar etwas geringer.

Wegen der o. g. Belastungen in der Praxis wird vom Automobilhersteller im Rahmen des Erprobungsplanes für die realen Teile auch ein Dauerschwingversuch mit einer Lastwechselzahl von 1.020.500 und einer frei wählbaren Prüffrequenz zwischen 0,5 und 10 Hz gefordert. Dieser Dauerschwingversuch wurde mit dem Programm „nCode“ simuliert ([29]). Dafür mussten zunächst geeignete Materialkennwerte für die Materialien ermittelt werden, insbesondere die geschwindigkeitsabhängigen Spannungs-Dehnungs-Kurven des Elastomers und die Wöhlerkurven des Thermoplasts, da diese in den Datenblättern der Hersteller nicht enthalten sind. Hierzu wurden aus den Materialien Prüfkörper gemäß DIN EN ISO 527-2:1996 angefertigt und die Messungen auf einer Schwingprüfmaschine MTS Mini Bionix 858 am Politechnika Wrocławska (Wrocław, Polen) durchgeführt. Bei den Spannungs-

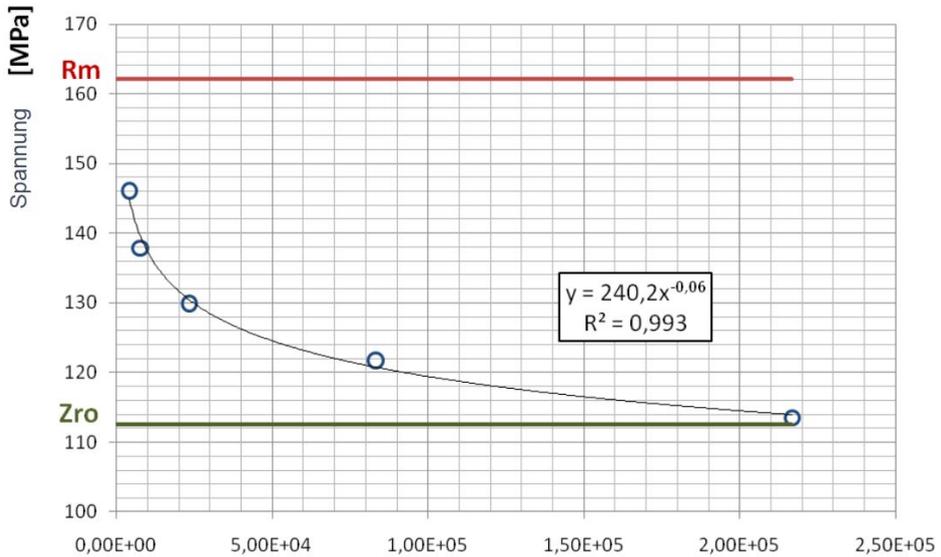
Dehnungs-Kurven (Abbildung 6) erkennt man, wie mit zunehmender Geschwindigkeit die Hystere immer mehr ausgeprägt wird.

**Abbildung 6:** Spannungs-Dehnungs-Kurven des Elastomers für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten



Quelle: [10]

**Abbildung 7:** Wöhlerkurve für Polyamid PA66 GF35 Ultramid® A3WG7



Quelle: [9]

Aus der Wöhlerkurve (Abbildung 7) ergab sich für das hierfür untersuchte Polyamid PA66 GF35 Ultramid® A3WG7 eine Dauerschwingfestigkeit von rund 112 MPa. Die Versuche ergeben mit sehr guter Korrelation den in Abbildung 7 angegebenen exponentiellen Zusammenhang zwischen der maximalen Spannung und der erreichten Lebensdauer (Anzahl Zyklen) bis zum Bruch.

In der Simulation wurden 10.000.000 Lastwechsel mit einer Frequenz von 10 Hz berechnet. Für die verschiedenen Varianten ergaben sich dabei die folgenden maximalen Verschiebungen und Vergleichsspannungen:

**Tabelle 2:** Maximale Verschiebungen und Vergleichsspannungen beim Dauerschwingversuch mit  $10^8$  Lastwechseln gemäß FEM-Berechnung

Variante	Max. Verschiebung	Max. von-Mises-Spannung
Konventionell	10 $\mu\text{m}$	12 MPa
Hohl (GIT)	18 $\mu\text{m}$	16 MPa
Geschäumt	11 $\mu\text{m}$	11 MPa

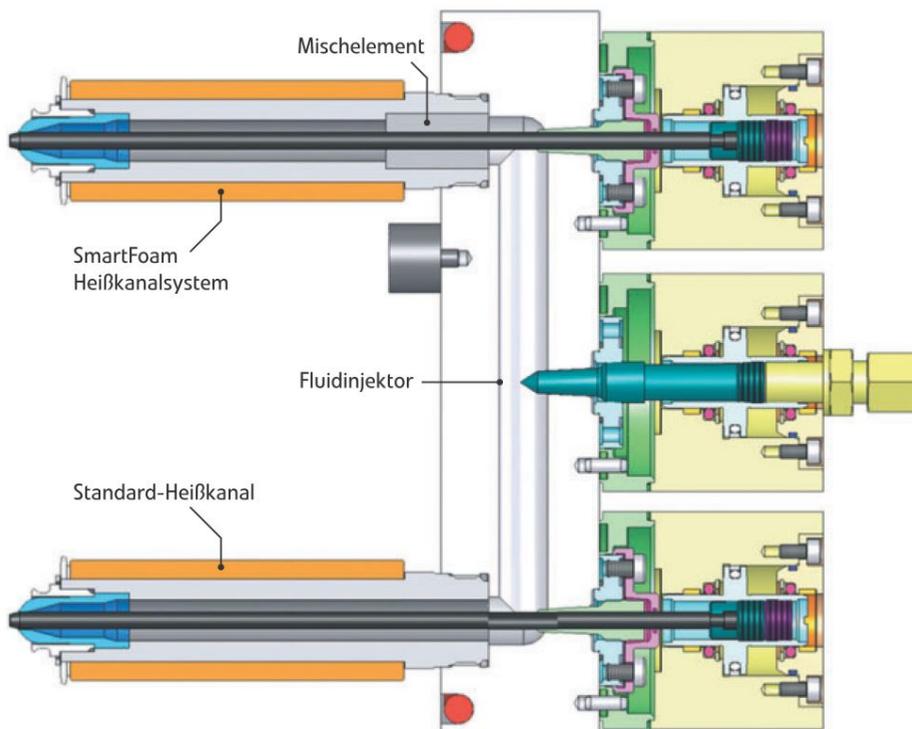
Quelle: [10]

In der Simulation bestehen also sowohl die hohle als auch die geschäumte Ausführung den verschärften Dauerschwingversuch (mit der 10-fachen Lastwechselzahl gegenüber dem Erprobungsplan und der höchsten Frequenz), während die maximale Belastung bei der konventionellen Ausführung etwas über der Dauerschwingfestigkeit des Materials von rund 112 MPa liegt. Hier machen sich die Aussparungen zur Reduzierung der Masseanhäufungen negativ bemerkbar. In der Praxis zeigt die Erfahrung, dass die konventionelle Ausführung ausreichend fest ist, aber die vorgeschlagenen leichteren Varianten sind jedenfalls nicht schlechter, sondern theoretisch sogar besser.

## 5 Herstellung mit Sandwich-Schäumverfahren

Für die Herstellung eines Thermoplast-Sandwich-Bauteils mit einer kompakten Außenschicht und einem geschäumten Kern kommen Zwei-Komponenten-Verfahren (s. z. B. [20]) in Frage, aber wenn man für den Kern dasselbe Material – nur aufgeschäumt – verwendet wie in der Außenschicht, kann ein solches Bauteil wesentlich kostengünstiger auf einer Ein-Komponenten-Spritzgießmaschine mit dem Stiel SmartFoam®-Verfahren hergestellt werden (s. [4], [5] und daraus abgeleitete Patentschriften in verschiedenen Ländern). Deshalb wurde entschieden, dieses Verfahren zur Herstellung der Leichtbau-Federunterlage einzusetzen.

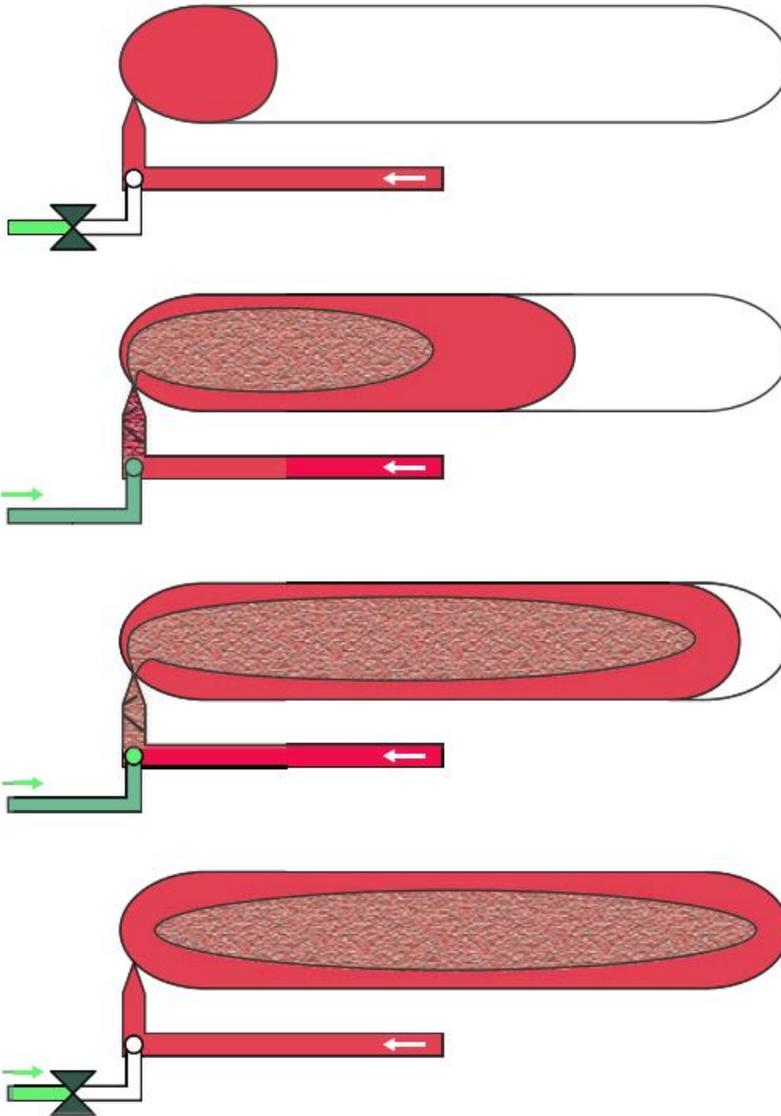
**Abbildung 8:** SmartFoam-Heißkanal mit Fluidinjektor und Mischelement im Vergleich zu einem konventionellen Heißkanal



Quelle: [32]

Beim Stieler SmartFoam®-Verfahren (s. [24], S. 64, [32], [33]) werden Fluidinjektoren in den Angusskanal im Werkzeug und im weiteren Verlauf vor dem Anschnitt statische Mischer eingesetzt, dieses kann sowohl in Heißkanal- als auch in Kaltkanalwerkzeugen angewendet werden (s. Abbildung 8). Als Fluide werden überwiegend Stickstoff  $N_2$  als Gas oder flüssiges Kohlendioxid  $CO_2$  eingesetzt, es kommt aber auch Wasser in Frage. Nur oxidierende Fluide sind grundsätzlich nicht geeignet, da sie das thermoplastische Material schädigen. Für die Federunterlage wurde Stickstoff gewählt. Neben einer konventionellen Spritzgießmaschine und dem mit Fluidinjektoren und Mischelementen ausgerüsteten Werkzeug benötigt man nur ein Fluidinjektionsaggregat, in dem das Fluid auf den notwendigen Druck verdichtet und geregelt den Fluidinjektoren zugeführt wird.

**Abbildung 9:** Verfahrensablauf beim SmartFoam-Prozess



© *Kunststoffe*

Quelle: [32]

In Abbildung 9 wird der Verfahrensablauf schematisch dargestellt. Der Einspritzvorgang startet zunächst ohne Fluidinjektion. Wenn eine genügende Materialmenge zur Bildung der kompakten Außenschicht eingespritzt ist, wird die Fluidinjektion zugeschaltet, dieses geschieht durch das Signal „Start Einspritzen“ von der Spritzgießmaschine an das Fluidinjektionsaggregat und einer dort passend eingestellten Verzögerungszeit. Das geschäumte Material treibt wie beim konventionellen Sandwich-Verfahren das kompakte Material, das jeweils an der Werkzeugwand durch Abkühlung erstarrt, vor sich her, so dass ein Bauteil mit einer kompakten Außenschicht und einem geschäumten Kern entsteht. Damit am Anspritzpunkt die Außenschicht auch kompakt ist, wird kurz vor dem Ende des Einspritzens die Fluidinjektion zeitgesteuert wieder abgeschaltet, so dass das letzte eingespritzte Material wieder nicht geschäumt ist. An der Spritzgießmaschine wird kein Nachdruck eingestellt, die Schwindung des thermoplastischen Materials wird durch den Gasdruck des Schaums kompensiert. Da dieser Druck im gesamten Bauteil gleich ist, ist das resultierende Bauteil (s. Abbildung 10) vollständig frei von Einfallstellen und Verzug, dieses ist ein weiterer Vorteil gegenüber dem Kompaktspritzguss. Durch die reduzierte, zu kühlende Wandstärke konnte die Hartkomponente mit einer Zykluszeit von rund 50 Sekunden produziert werden, also weniger als die Hälfte der Zykluszeit bei der konventionellen Ausführung.

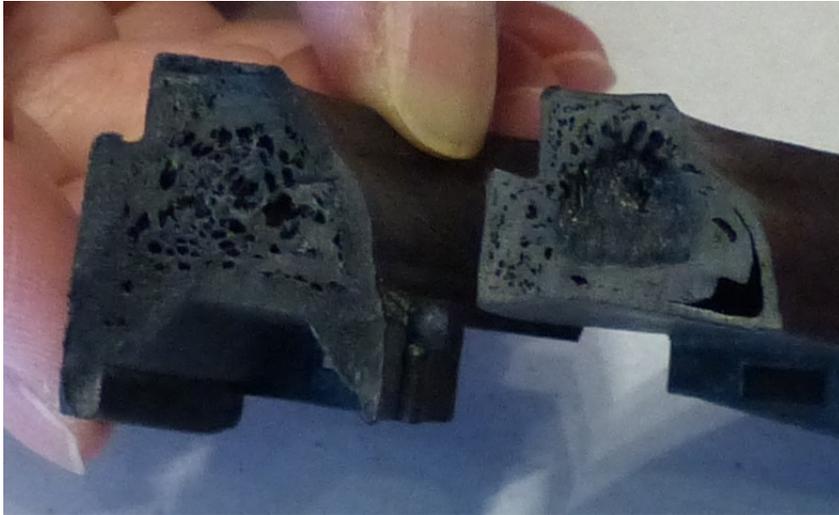
Bei falschen Einstellungen des Gasinjektionsprozesses oder Prozessschwankungen können allerdings mangelhafte Bauteile entstehen, denen man durch die Sandwichstruktur den Fehler von außen nicht ansehen kann. In Abbildung 11 ist links ein Schnitt durch ein korrekt hergestelltes Bauteil zu sehen, rechts dagegen ein Bauteil, bei dem sich das Gas nicht vollständig mit der Schmelze vermischt hat, so dass sich am rechten unteren Rand eine große Gasblase gebildet hat und auch die Außenschicht nicht mehr die erforderliche Dicke hat.

**Abbildung 10:** Hartkomponente der Federunterlage, hergestellt mit dem SmartFoam-Verfahren



Quelle: Eigene Abbildung

**Abbildung 11:** Schnitt durch die geschäumte Hartkomponente, links korrekte Verteilung von Außenschicht und Schaum, rechts fehlerhaftes Teil mit Gasblase



Quelle: Eigene Abbildung

In der Serienproduktion ist deshalb einerseits gut geschultes Personal notwendig, das die Besonderheiten dieses Prozesses versteht und die Parameter bei Bedarf zielgerichtet optimieren kann, andererseits eine laufende 100%-Prozessüberwachung mittels Werkzeuginnendrucksensoren und Gewichtsmessung. Es empfiehlt sich auch eine regelmäßige, stichprobenweise Prüfung der inneren Bauteilstruktur mit einem Computertomografen (CT).

Ferner weist die Oberfläche die für alle Schäumverfahren typischen Schlieren auf. Für die Federunterlage ist das nicht relevant, da sie im Gebrauch nicht sichtbar ist. Falls bei anderen, dekorativen Teilen hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität bestehen, kann die erforderliche Qualität durch einen variothermen Prozess (dynamische Werkzeugtemperierung) erreicht werden, d. h. während des Einspritzens wird das Werkzeug auf eine gegenüber dem normalen Prozess deutlich erhöhte Temperatur gebracht, um eine gute Abformung der Oberfläche zu gewährleisten; und in der Kühlphase auf eine deutlich niedrigere Temperatur, um eine wirtschaftliche Zykluszeit zu erreichen (s. z. B. [6], [19]).

## 6 Erprobung

Die mit dem SmartFoam®-Verfahren hergestellten Federunterlagen mussten allen Tests gemäß dem Lastenheft des Automobilherstellers unterzogen werden. Bei vielen Tests wie chemischer Beständigkeit, Salzsprühnebeltest, spezifischer Durchgangswiderstand usw. war zu erwarten, dass sie bestanden werden, weil sie im Wesentlichen von den verwendeten Materialien abhängen, die gegenüber der konventionellen Ausführung nicht geändert wurden. Ergebnisoffen war der Dauerschwingversuch gemäß eines detaillierten Erprobungsplans mit insgesamt 1.020.500 Lastwechseln und Einfederamplituden bis zu 100 Prozent der statischen Einfederung. Diese Versuche wurden bei der Fa. FFD Freudenberg Forschungsdienste KG durchgeführt, wobei die Musterteile der Federunterlage in vom Automobilhersteller beigestellten Original-Federbeinen eingebaut wurden.

Zunächst wurde der Versuch gemäß dem Erprobungsplan durchgeführt, hierbei traten keine Beschädigungen an den Musterteilen auf (s. [2]). Zur Sicherheit wurde derselbe Test nochmal durchlaufen, so dass die Musterteile insgesamt mit der doppelten als vom Kunden geforderten Lastwechselzahl belastet wurden. Auch nach 2.041.000 Lastwechseln waren die Musterteile völlig intakt (s. [3]). Daraufhin wurde vom Automobilhersteller die Baumusterfreigabe für den Serieneinsatz erteilt.

## 7 Resümee

Mit dem Stieler SmartFoam®-Verfahren ist es möglich, hochbelastete Bauteile leichter und mit geringeren Zykluszeiten herzustellen, so dass in der Produktion sowohl Material- als auch Fertigungskosten eingespart werden. Je nach Anwendungsfall und benötigten Stückzahlen muss kalkuliert werden, ob sich die höheren Investitionskosten in die Anlagentechnik, die sich im Maschinenstundensatz auswirken, und die Werkzeuge lohnen. Dabei kann man aber auch in die Waagschale werfen, dass unter Umständen Gewichtseinsparungen vom Kunden mit höheren Verkaufspreisen honoriert werden, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt, aber teilweise auch in der Automobilindustrie.

Für die betrachtete Federunterlage ergibt sich mit dem Sandwich-Schäumverfahren ein um rund 15 Prozent niedrigerer Teilepreis gegenüber der konventionellen Variante, und auch bei Berücksichtigung der höheren Anlagen- und Werkzeugkosten ergibt sich bei einem Gesamtbedarf von ca. 5 Mio. Stück eine Ersparnis von über 500.000 €.

Zusammenfassend kann man sagen: Je dicker und schwerer ein Bauteil ist, desto eher lohnt sich der Einsatz dieses Verfahrens, auch schon bei kleineren Stückzahlen. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass der Produktionsprozess schwerer beherrschbar ist und für eine Produktion mit gleichbleibender Qualität gut ausgebildetes Personal mit hohem Prozesswissen sowie eine wirksame, automatisch laufende Qualitätsüberwachung notwendig ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bledzki, A. K., Kirschling, H., Rohleder, M., Chate, A. (2008): Correlation between injection moulding parameters, morphology and properties of microcellular polycarbonate foams, in: Rapra Conferences (Hrsg.), Blowing Agents and Foaming Processes, Toronto: ChemTec Publishing, 2008, S. 23.
- [2] Buhl, E. (2010): Prüfbericht PP1000318-1, FFD Freudenberg Forschungsdienste KG, Weinheim, 2010.
- [3] Buhl, E. (2010): Prüfbericht PP1000318-2, FFD Freudenberg Forschungsdienste KG, Weinheim, 2010.
- [4] Dietert, T. (2012): Federunterlage und Verfahren zum Herstellen derselben; Deutsches Patent- und Markenamt, Patentschrift DE 10 2009 045 038 B4, 24.05.2012.
- [5] Dietert, T. (2014): Federunterlage und Verfahren zum Herstellen derselben, Europäisches Patentamt, Patentblatt 2014/21, Patentschrift EP 2 480 799 B1, 21.05.2014.
- [6] Doriat, C. (2015): Vorübergehend heiß – Wechseltemperierung als Problemlöser in der Kunststoffverarbeitung, in: Kunststoffe 01/2015, S. 23-28.
- [7] Dräxlmaier Group, Interne Präsentation, September 2009.
- [8] Dräxlmaier Group, Interne Präsentation, Oktober 2009.
- [9] Dräxlmaier Group, Interne Präsentation, Juni 2010.
- [10] Dräxlmaier Group, Interne Präsentation, November 2010.
- [11] Dräxlmaier Group, Interne Präsentation, November 2010.
- [12] Egger, P., Fischer, M., Kirschling, H., Bledzki, A. K. (2005): Ein Statusbericht für die Praxis (1): Serienfeste Vielseitigkeit beim MuCell-Spritzgießen, in: Kunststoffe 12/2005, S. 66-70.
- [13] Endlweber, R., Giessauf, J. (2014): Darf's etwas mehr sein? Verfahrenskombinationen öffnen dem Schaumspritzgießen neue Horizonte, in: Kunststoffe 12/2014, S. 30-34.
- [14] Endlweber, R., Markut-Kohl, R., Giessauf, J., Steinbichler, G., Das MuCell-Schaumspritzgießen (2013): Kleine Zellen, große Wirkung: Wer den

MuCell-Prozess versteht, dem stehen neue Optionen für Formteildesign und Zykluszeitverkürzung offen, in: Kunststoffe 11/2013, S. 36-40.

- [15] Grote, K.H., Bender, B., Göhlich, D. (2018): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, 25. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [16] Habibi-Naini, S. (2004): Nachrüstung: Keine Scheu vorm Schäumen, in: Kunststoffe 09/2004, S. 191-194.
- [17] Hahn, H.G. (1991): Technische Mechanik fester Körper, München: Carl Hanser Verlag, 1991.
- [18] Handschke, A. (2016): Schaumspritzgießen: Aktuelle Trends und neue Herausforderungen, in: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), Spritzgießen 2016, Düsseldorf, 2016; S. 183-194.
- [19] Hopmann, C., Lammert, N., Zhang, Y. (2016): Schaumspritzgießen dynamisch temperiert: Gezielte Verbesserung der Oberflächenqualität und der Schaumstrukturverteilung durch dynamische Werkzeugtemperierung, in: Kunststoffe 08/2016, S. 61-65.
- [20] Hüttl, A., Kremer, D., Ballach, F., Bloß, P. (2018): Sandwich in Waffelform: Physikalisches Schäumen beim 2K-Sandwichspritzgießen von Leichtbauteilen, in: Kunststoffe 10/2018, S. 209-212.
- [21] Johannaber, F. (2001): Sonderverfahren auf der K 2001: Ein Streifzug vorab: Die Zukunft des Spritzgießens, in: Kunststoffe 09/2001, S. 144-151.
- [22] Keßling, O. (2018): Additive Adoleszenz: Materialhersteller und Verfahrensentwickler begegnen steigenden Anforderungen im 3D-Druck, in: Kunststoffe 10/2018, S. 66-74.
- [23] Kirschling, H., Bledzki, A.K. (2009): Mikroschäume: Herstellung, Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, in: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), Spritzgießen 2009 - Innovation und Produktivität, Düsseldorf, 2009; S. 197-212.
- [24] Krassowski, G. (2008): Teil 2: Das Innenleben der Werkzeuge (Messebericht K 2007): Komplexer - schneller – intelligenter, in: Kunststoffe 01/2008, S. 62-66.
- [25] Mayr, M. (2012): Technische Mechanik, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2012.

- [26] Michaeli, W., Pfannschmidt, O., Habibi-Naini, S. (2002): Grundlagen zu Material und Prozessführung: Wege zum mikrozellulären Schaum, in: Kunststoffe 06/2002, S. 48-51.
- [27] Michaeli, W., Pfannschmidt, O., Habibi-Naini, S. (2002): Vergleich der Verfahrenskonzepte: Spritzgießen mikrozellulärer Schäume, in: Kunststoffe 08/2002, S. 56-60.
- [28] Muchazow, J. (2009): Interne Mitteilungen; 2009.
- [29] Muchazow, J. (2010): Interne Mitteilungen; 2010.
- [30] Resgren, U., Praller, A. (2004): GIT, Temperieren, Schäumen: Industriegase als Helfer beim Spritzgießen, in: Kunststoffe 12/2004, S. 136-139.
- [31] A. Schulman GmbH (2009): Datenblatt Schulamid® 66 GF 35 H; Kerpen, 2009.
- [32] Stieler, U. (2008): SmartFoam: Schäumen im Werkzeug, in: Kunststoffe 09/2008, S. 68-71.
- [33] Stieler, U. (2011): Fluidinjektion: Mehr als nur Hohlräume, in: Kunststoffe 11/2011, S. 48-50.
- [34] Stitz, S., Keller, W. (2004): Spritzgießtechnik, München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [35] VDI Wissensforum GmbH (Hrsg., 2009): Spritzgießen 2009 - Innovation und Produktivität; Düsseldorf: VDI Verlag, 2009.
- [36] VDI Wissensforum GmbH (Hrsg., 2016): Spritzgießen 2016, Düsseldorf: VDI Verlag, 2016.

## ***Beitrag III***

# ***Additive Fertigung von Elektronik am Beispiel der Anforderungen der Automobilbranche***

Eine Momentaufnahme

Knuth Götz

Dr. Knuth Götz

FOM Hochschule für Oekonomie & Management

E-Mail: [knuth.goetz@fom-net.de](mailto:knuth.goetz@fom-net.de)

**Inhalt**

Abkürzungsverzeichnis.....	66
Abbildungsverzeichnis.....	67
1 Einleitung.....	68
1.1 Zusammenfassung.....	68
1.2 Situation und Umfeld.....	68
1.3 Stand der Technik.....	69
1.4 Anforderungen und Herausforderungen.....	73
2 Strukturierung.....	74
2.1 Schichtaufbau und Stromtragfähigkeit.....	74
2.2 Haftfestigkeit und Lebensdauer.....	76
2.3 Aufbau- und Verbindungstechnik.....	77
3 Ausblick.....	78
Literaturverzeichnis.....	79
Internetquellen.....	82

**Abkürzungsverzeichnis**

EOS	End-of-Service
IMPkw	Kooperationsprojekt der Bayerischen Forschungsstiftung „Integration der MakroMID-Technologie im Pkw“, Phase I
IMTP	Kooperationsprojekt der Bayerischen Forschungsstiftung „Integration der MakroMID-Technologie im Pkw“, Phase II
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
LDS	Laser-Direkt-Strukturierung
MID	Moulded Interconnected Devices
OEM	Original Equipment Manufacturer – hier der Automobilhersteller oder 1st Tier
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

**Abbildungsverzeichnis**

<b>Abbildung 1:</b>	FLAMECON® auf Keramik .....	70
<b>Abbildung 2:</b>	FLAMECON® auf PA6/6 (Türgriff).....	71
<b>Abbildung 3:</b>	"Thermographieaufnahme der bestromten Leiterbahnen" aus dem IMTP-Projekt als Beispiel für systematische Qualifikation der Technologie .....	72
<b>Abbildung 4:</b>	REM-Aufnahmen einer Laserstrukturierung .....	74
<b>Abbildung 5:</b>	Schnitt durch eine Leiterbahn, klar erkennbar sind die Fehlstellen im Kupfer .....	75
<b>Abbildung 6:</b>	Kupfer auf PEEK.....	76
<b>Abbildung 7:</b>	Lötnaht plasmagesprühte Leitung .....	77

## **1 Einleitung**

### **1.1 Zusammenfassung**

Im Rahmen der Technologiefolgenabschätzung und Wettbewerbsanalyse des TAB (Caviezel, et al., 2017) wird die gleichzeitige Produktion von mechanischem Träger und elektronischer Schaltung kurz am Beispiel kleiner Komponenten aufgegriffen. Vertiefend soll nachfolgend auf die bestehenden und künftigen Herausforderungen an additiv gefertigte Elektronik anhand ausgewählter Aspekte der Automobilindustrie eingegangen werden.

### **1.2 Situation und Umfeld**

Die additive Fertigungstechnik erlebt im Zuge der Industrie 4.0 generell einen Boom (John, 2014). Automobilisten setzen durchgehend bereits auf die additive Fertigung, teilweise schon in erheblichem Umfang für Serien- oder Ersatzteile (Daimler AG, 2018).

Dies liegt nicht zuletzt in dem Umstand begründet, dass eine Lieferverpflichtung für Ersatzteile besteht, die 15 Jahre über die letzte Inverkehrbringung hinaus den Automobilhersteller verpflichtet, Ersatzteile bereit zu halten. Auch ohne gesetzliche Pflichten bringen der Wettbewerbsdruck und die gebotene Kundenbindung die OEMs dazu, mindestens 8 Jahre Gewährleistung anzubieten. So wirtschaftlich die Serienfertigung mit allen Raffinessen der JIT- oder JIS-Logistik, den Produktionsnetzwerken geworden ist, der After-Sales-Markt und die Obsoleszenz von Bauteilen betreffen alle OEMs gleichermaßen. So sind selbst existenzielle Bauelemente elektronischer Schaltungen bereits weit vor einem EOS nicht mehr lieferbar (Thehos, 2009).

So ist es nicht verwunderlich, gerade für das umsatztechnische Long Tail, die bewährten Konzepte der Streaming-Dienste zu nutzen: Gedruckt wird das, was gerade gebraucht wird, genau an dem Ort, an dem es gebraucht wird. Zeitgemäße Datennetze erlauben, quasi binnen Minuten, angeforderte Teile auf dem Drucker auszugeben. Kapitalbindende Endeinlagerungen, kostenintensive Nachentwicklungen und zeitraubende Neuzulassungen entfallen dadurch ebenso wie Kurierlieferungen in entlegene Teile der Welt. So ist zumindest die Vision.

Diese strategische Ausrichtung erklärt das hohe Interesse an additiven Fertigungstechnologien und auch die erheblichen Aufwände, die an sich langsamen und teuren Verfahren zu optimieren und konkurrenzfähig zu machen, sei es direkt in den Kosten oder in zusätzlichen Vorteilen wie etwa Gewichtsreduktion (Caviezel, et al., 2017) (Richter & Wischmann, 2017). Es erklärt aber auch die hohe Bewertung von Firmen durch den Kampf um Knowhow und Patente (rtr, 2016).

### **1.3 Stand der Technik**

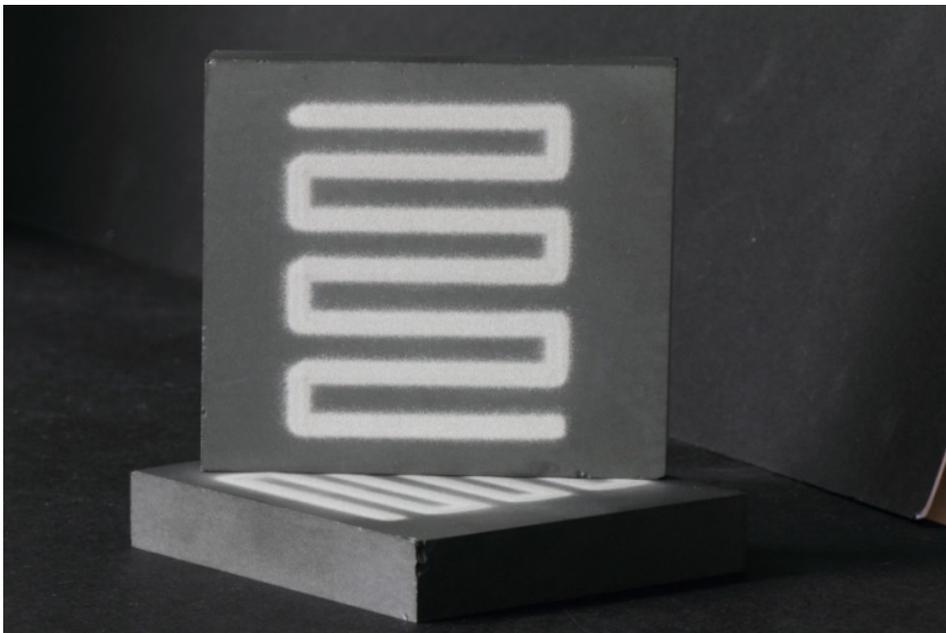
Sowohl in Kunststoff wie in Metall gibt es zahlreiche Anbieter von Produktionsanlagen oder Dienstleistungen. In der Kombination beider wirkt das Angebot begrenzt. (Plasma Innovations GmbH, 4800 Attnang-Puchheim, 2013) (Theophile, 2010) (Süß-Wolf, 2010). Dies ist von daher irreführend, als dass die Elektronikproduktion das Thema unter anderen Begriffen schon in den späten 1980ern aufnahm, und schon vor der Jahrtausendwende in Serie produzierte (Schulz, 2000) (3D-MID e.V.[H], 2018).

Auch in der Automobilindustrie wurden die MID-Verfahren (MID = Moulded Interconnect Devices) sehr frühzeitig eingesetzt, wobei weniger die rein additiven Verfahren zunächst im Vordergrund standen, sondern flexibilisierte Massenfertigungsverfahren. (LPKF, 2018) (Walkowiak & Reinicke, 2015) (Fedler, 2008) (Diepold, 2007). Während klassisch in der Automobilindustrie aufgrund des elektrischen Leitwertes fast ausschließlich auf Kupfer gesetzt wird, und so gewichtsmäßig der Kabelsatz und das Stanzgitter weit vor anderen Leitern dominieren, wird dies seit einiger Zeit differenzierter betrachtet (Heuermann & Ernst, 2014) (Heisler, et al., 2017).

Folgt man diesen Ansätzen (Heuermann & Ernst, 2014), betrachtet die Möglichkeiten von MIDs (3D-MID e.V.[H], 2018), deren Einteilung in Makro-, Meso- und Mini-MIDs (Süß-Wolf, 2010), (Feldmann, et al., 2007) und die Ausführungen z. B. zu Stanzgittern bzw. deren Ersatz (Fedler, 2008), so ergeben sich folgende Applikationsfelder und bevorzugte Materialien:

- Signalbereich: Durch die kleinen Ströme sind kleine Querschnitte oder schlechtere Leitwerte akzeptabel.
- Leistungsbereich: Hier ist aufgrund der Ströme (bis 800 A Kurzzeit z. B. für den Starter eines Motors) keine Alternative zu Kupfer in Sicht.
- Antennen: An sich können viele Materialien genutzt werden (Abbildung 1, Abbildung 2), jedoch gibt die Einbausituation gewisse Einschränkungen vor; auch Shieldings fordern häufig Kupfer.
- Heizelemente: Hier kommen klassische Widerstandslegierungen zum Einsatz. (Abbildung 3)

**Abbildung 1:** FLAMECON® auf Keramik

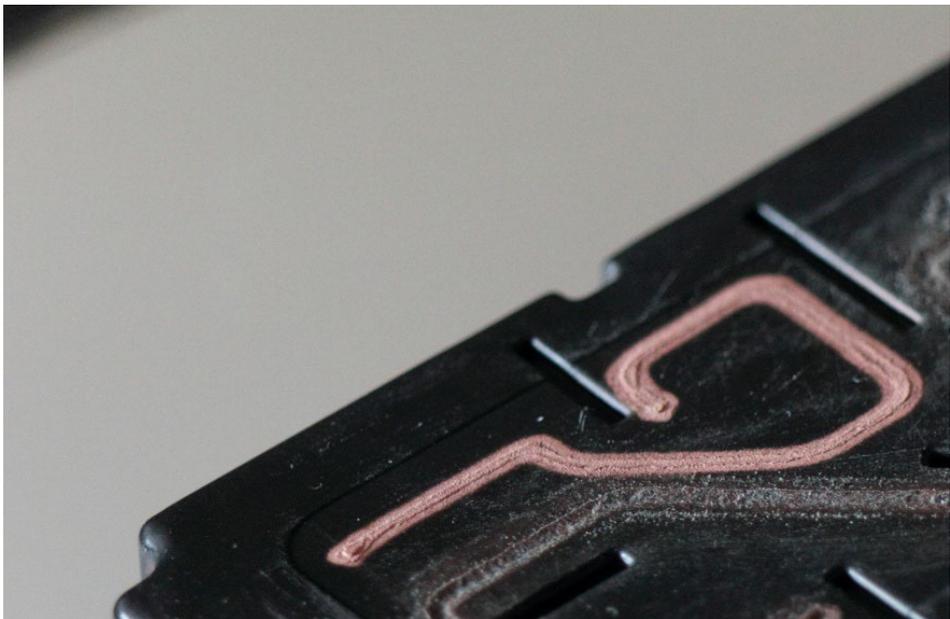


Quelle: Götz, 2016

Während auf der Komponentenebene für kleine Bauteile des Signalbereichs das LDS-Verfahren (Laser-Direkt-Strukturierung) bereits seit längeren und trotz zeitweiliger Rückschläge eingesetzt wird (LPKF, 2018) werden Verfahren der Leistungsklasse (3D-MID e.V.[F], 2018) (Plasma Innovations GmbH, 4800 Attnang-Puchheim, 2013) (Theophile, 2010) (Götz, et al., 2001) erst vergleichsweise kurz eingesetzt. Sie ermöglichen aber zusätzlich den

vollständigen Übergang auf eine rein additive Fertigung und sind unabhängig vom Substrat anwendbar, während das LDS-Verfahren sowohl speziell dotierte Kunststoffe als Substrat und eine Galvanik für die Herstellung der Leiterbahnen benötigt. Ihnen gemeinsam ist die Umstellung auf chemiefreie Prozesse zur Leiterbahnerzeugung. Dies bietet auch die Möglichkeit, für die Galvanik bedingt geeignete oder ungeeignete Substratmaterialien wie Keramik (Abbildung 1) oder PEEK (Abbildung 6) einzusetzen. Galvanikfreiheit spielt derzeit im Automobilbereich noch eine nachgeordnete Rolle, beim Einsatz im Sichtbereich wird dies aber wichtiger.

**Abbildung 2:** FLAMECON® auf PA6/6 (Türgriff)

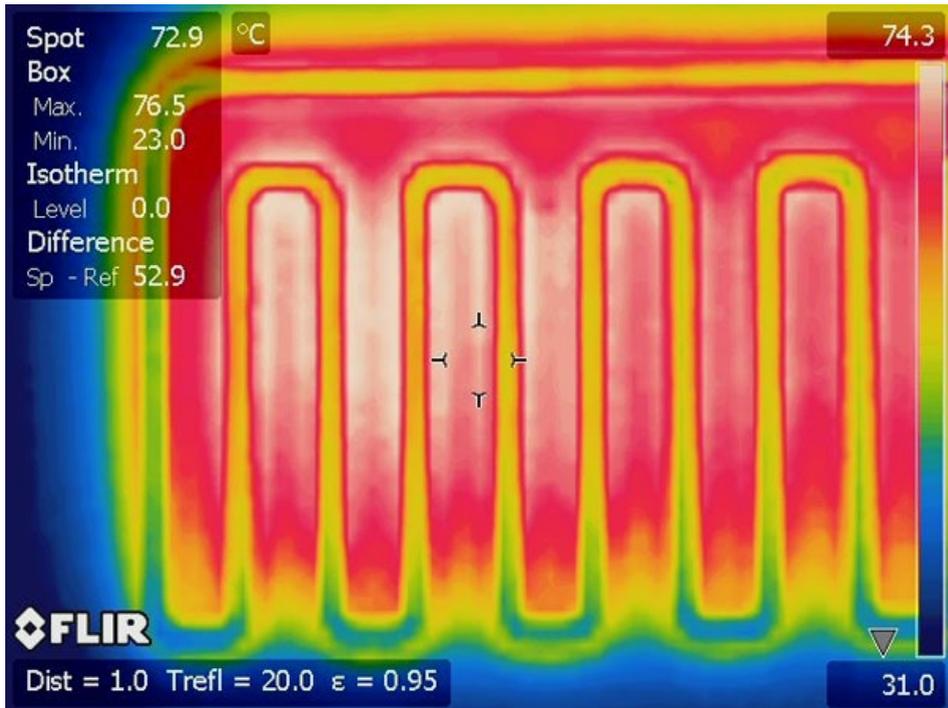


Quelle: Götz, 2015

Nach erfolgreicher Erprobung u. a. im Projekt IMPkw unter Beteiligung von Audi und BMW (Bayerische Forschungsstiftung, 2006) (Bayerische Forschungsstiftung, 2007) (Bayerische Forschungsstiftung, 2010) wurden erfolgreich Applikationen durch Zulieferer wie Bosch (Graner, et al., 2012), Magna (Sauer, et al., 2014), Osram (Falle, et al., 2008) und Brose (Herthan & Schneider, 2014) (Rücker, et al., 2011) eingeführt (Abbildung 2). Diverse OEMs sichern sich selbst Schutzrechte auf diesem Feld, u. a. Audi für Antennen (Spehl, et al., 2015) und andere Bauteile. Notwendige Grundlagen für die

Auslegung der Leitungen wurden frühzeitig erarbeitet (Süß-Wolf, et al., 2006/2017) (Fischer, et al., 2010) (Bayerische Forschungsstiftung, 2012) (Huang, G. Q., et al., 2010) (Abbildung 3).

**Abbildung 3:** "Thermographiaufnahme der bestromten Leiterbahnen" aus dem IMTP-Projekt als Beispiel für systematische Qualifikation der Technologie



Quelle: Bayerische Forschungsstiftung, 2010

## **1.4 Anforderungen und Herausforderungen**

Seitens der Automobilhersteller sind Strukturmaße, Stromtragfähigkeit und Lebensdauer neben Kosten und Flexibilität entscheidende Anforderungen an eine additive Technologie für die Elektronikproduktion.

Während Kosten und Flexibilität von den OEMs teilweise selbst vorangetrieben werden (Süß-Wolf, et al., 2006/2017), sind die technologischen Grundlagen ausgeprägter Gegenstand der Forschung. Hier gliedert sich die Forschung vor allem in die Aspekte Strukturierung, Schichtaufbau und Stromtragfähigkeit, Haftfestigkeit und Lebensdauer sowie Aufbau- und Verbindungstechnik.

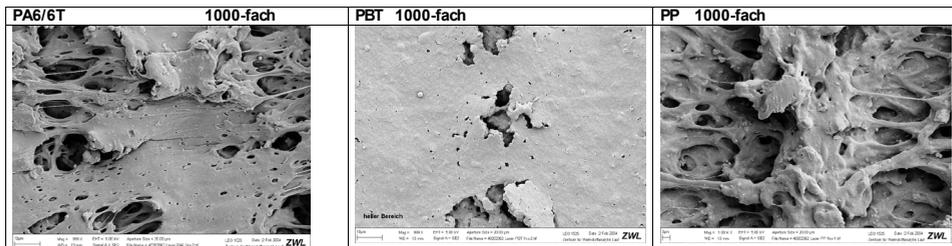
## 2 Strukturierung

Während zum Beispiel das LDS-Verfahren zwingend eine Strukturierung durch (vorzugsweise) einen Laser erfordert (LPKF, 2018), Plasma Innovations dies ebenfalls voraussetzt (Plasma Innovations GmbH, 4800 Attnang-Puchheim, 2013), erlauben die Verfahrensketten von Reinhausen Plasma (Theophile, 2010) und FLAMECON® (Götz, et al., 2001) andere Strukturierungsverfahren oder sogar die Selbststrukturierung (Götz, et al., 2002). Diese führt allerdings zu breiteren Strukturmaßen (Götz, et al., 2004) (Diepold, 2009).

Daher soll hier auch aufgrund der Forschungsschwerpunkte auf das Laserstrukturieren fokussiert werden (Bachy, et al., 2018[A]) (Bachy, et al., 2018[B]) (Wang, et al., 2018).

Entscheidend ist die Wirkung des Lasers hinsichtlich der Bildung einer Keimschicht. Abbildung 4 zeigt dies an Hand dreier Kunststoffe. Hier fällt das teilkristalline PBT auf, das keine durchgängig gleichmäßige Keimbildung erlaubt, da der Laser in Abhängigkeit von Werkstoffzustand (kristallin/amorph) einkoppelt.

**Abbildung 4:** REM-Aufnahmen einer Laserstrukturierung



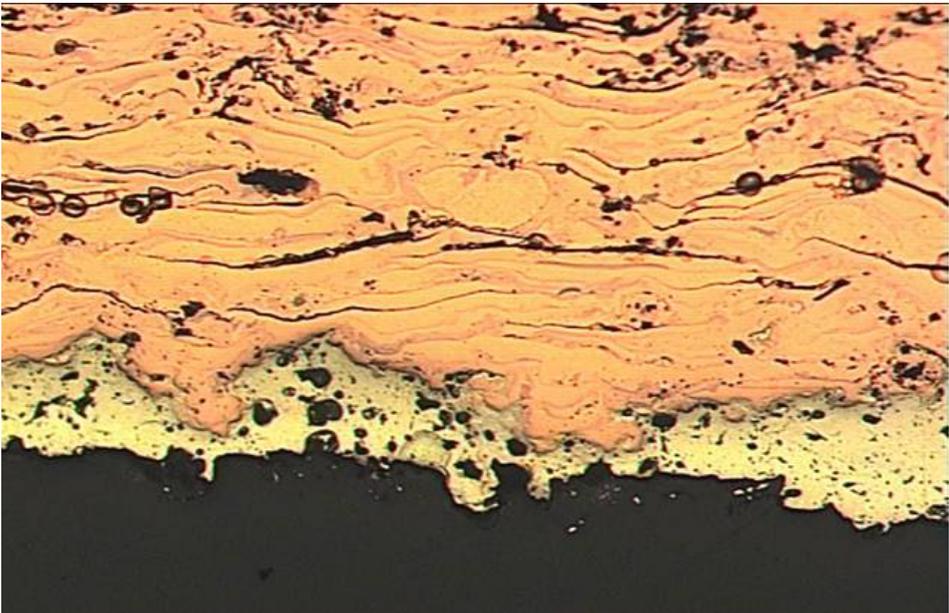
Quelle: Eigene Darstellung

### 2.1 Schichtaufbau und Stromtragfähigkeit

Anfänglich wurde der Schichtaufbau als Möglichkeit erachtet, die Stromtragfähigkeit, insbesondere den Leitwert durch Füllen der Fehlstellen (Abbildung 5) zu verbessern. Im Lauf der umfangreichen Versuchsreihen in vielen Kooperationsprojekten - (Bayerische Forschungsstiftung, 2007) (Götz, et al., 2004) (Süß-Wolf, 2010) u. a. - wurde deutlich, dass der Schichtaufbau hier wenig Einfluss hat. Andererseits werden die im Vergleich zum theoretischen

Leitwert nach IACS schlechtere Leitfähigkeit durch eine wesentlich bessere Wärmeableitung und andere Vorteile überkompensiert, zumal auch Konkurrenztechnologien (Fedler, 2008) (3D-MID e.V.[H], 2018) zumeist keine besseren Leitwerte erreichen. Hingegen erlauben die kinetischen Auftragsverfahren (Plasma Innovations GmbH, 4800 Attnang-Puchheim, 2013), (Theophile, 2010) und (Götz, et al., 2001) wesentlich dickere Leiterbahnen (bis zu 3mm wurden erprobt (Götz, et al., 2004) (Sover & Amend, 2018)) als die galvanischen (LPKF, 2018) oder Folien (Walkowiak & Reinicke, 2015) (Fedler, 2008).

**Abbildung 5:** Schnitt durch eine Leiterbahn, klar erkennbar sind die Fehlstellen im Kupfer

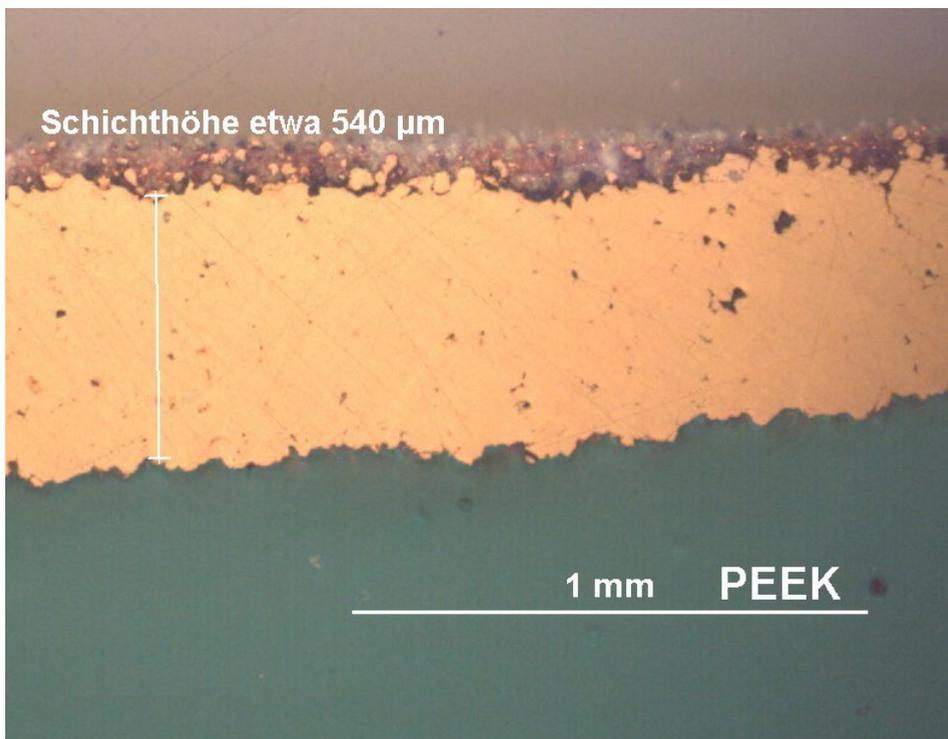


Quelle: Eigene Darstellung

## 2.2 Haftfestigkeit und Lebensdauer

Haftfestigkeit und Lebensdauer waren seit Anbeginn wichtige Kriterien für die verschiedenen Technologien. Bereits in (Götz, et al., 2004) wurden für ausgewählte Applikationen die Haftfestigkeiten nachgewiesen, ebenso die Lebensdauer. Umfangreichere Versuche bildeten den von (Bayerische Forschungsstiftung, 2010) und (Süß-Wolf, 2010) veröffentlichten Nachweis für automotiv Anwendungen. Diese Grundlagen werden weiterentwickelt zu Schadens- und Vorhersagemodellen zur Lebensdauerprognose (Friedlein, et al., 2017) (Friedlein, et al., 2017). Somit stehen weniger die prinzipielle Haltbarkeit als vielmehr die Ausreizung der Belastbarkeit der Leiterbahn im Fokus.

**Abbildung 6:** Kupfer auf PEEK

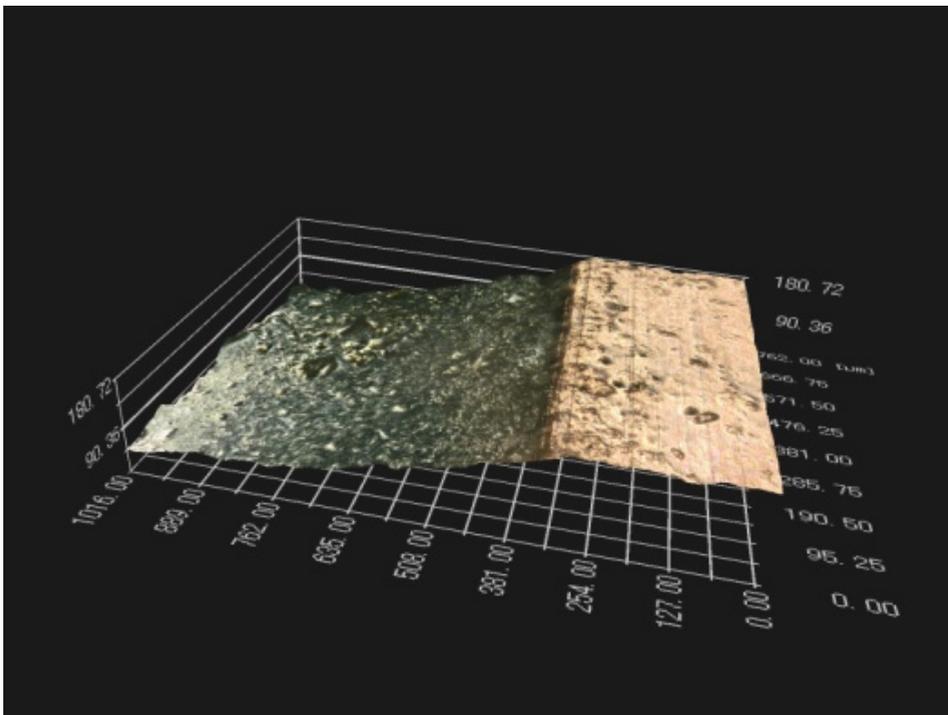


Quelle: Eigene Darstellung

### 2.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Sehr früh war die Eignung der plasmagesprühten Leitbahnen für die Aufbau- und Verbindungstechnik Forschungsthema (Götz, et al., 2004). So wurde insbesondere die Eignung für verschiedene Lötverfahren positiv validiert (Abbildung 7). Mittlerweile wird die Technologie aber, wie vorgesehen, auch als Ersatz für Verbindungstechniken wie Löten oder Laserschweißen eingesetzt (Süß-Wolf, 2010).

**Abbildung 7:** Lötnaht plasmagesprühte Leitung



Quelle: Eigene Darstellung

### **3 Ausblick**

Für die weitere Forschung und Entwicklung gibt es mehrere parallele Linien.

So werden in Zukunft sowohl die Planungssysteme gerade auf Basis des gesammelten Grundlagenwissen zu Lebensdauer und Stromtragfähigkeit weiter optimiert werden als auch die Palette eingesetzter Legierung und Substrate wachsen. Gerade hinsichtlich Keramik, die für die Leistungselektronik und damit für die Elektroantriebe relevant ist, besteht noch Nachholbedarf, da sie bislang nicht im Fokus der galvanisch dominierten Prozesse lag.

Die Automobilindustrie hat aber bereits den nächsten Meilenstein auf der Roadmap definiert und ins Auge gefasst: Es werden Anlagen gefordert und entwickelt, die sowohl den Träger (Kunststoff oder Keramik) wie die Schaltung (Kupfer, Legierung) in einer Aufspannung produzieren, um sowohl weiter zu integrieren als auch die Vision der Industrie 4.0 hinsichtlich cyber-physischer Systeme voranzutreiben.

## Literaturverzeichnis

- Bachy (1), B. et al. (2018): Novel Ceramic-Based Material for the Applications of Molded Interconnect Devices (3D-MID) Based on Laser Direct Structuring, in: *Advanced Engineering Materials* 20 (7): 1700824.
- Bachy (2), B., Suess-Wolf, R. & Franke, J. (2018): On the quality and the accuracy of the laser direct structuring, experimental investigation and optimization, in: *Journal of Laser Applications* 30 (2): 022006.
- Bayerische Forschungsstiftung (2006): IMPkw – innovative Montage- und Produktkonzepte für mechatronische Systeme im Pkw, in: *Jahresbericht 2006*. München: Bayerische Forschungsstiftung, S. 50.
- Bayerische Forschungsstiftung (2007): IMTP: Integration von MakroMID-Technologie im Pkw, in: *Jahresbericht 2007*. München: Bayerische Forschungsstiftung, S. 80.
- Bayerische Forschungsstiftung (2012): Funktionalisierung von Kunststoffen durch Inkjet- und Aerosoldruck, in: *Jahresbericht 2012*. München: Bayerische Forschungsstiftung, S. 75.
- Büro für Technikfolgen-Abschätzung (2017): *Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck) - Innovationsanalyse*. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), 2017.
- Falle, A., Kaiser, M. & Reuter, M. (2008): LED-Modul mit einem Kühlkörper. DE/US, Patentnr. DE102008031786B4/US8754437B2.
- Fedler, M. (2008). Alternativen zu metallischen Stanzgittern. s.l., s.n.
- Feldmann, F., Goth, C. & Kunze, A. (2007): Interdisziplinäre Zusammenarbeit zur spezifischen Förderung der MID-Technologie, in: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007), Nr. 9, S. 558-562.
- Fischer, C., Franke, J. & Feldmann, K. (2010): Two Approaches for the Design of Molded Interconnect Devices (3D-MID), in: Huang, G. Q, Mak, K.L., Maropoulos, P. G. (Hrsg., 2010): *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, Berlin, Heidelberg: Springer, S. 67-78.

- Friedlein, M., Spahr, M., Süß-Wolf, R. & Franke, J. (2017): Application and development of analytic accelerated test models for the lifetime prediction of a novel contacting method, in: RWTH Aachen 2017 – 7. WGP-Jahreskongress.
- Friedlein, M., Spahr, M., Süß-Wolf, R. & Franke, J. (2017): Failure dependent progression of contact resistance in thermal-shock testing of spring-clip contacts, in: 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Conference paper, Denver, CO, US, pp. 169-174.
- Götz, K. (2015): Bewertung von Anlagen und Maschinen. Starnberg: Management Forum Starnberg GmbH.
- Götz, K. (2016): Bewertung von Maschinen und Anlagen. Starnberg: Management Forum Starnberg GmbH.
- Götz, K., Reichinger, G., Ott, M. & Süß-Wolf, R. (2004): LEONI FLAMECON® - structured metallization for higher performance, in: 6. internationaler MID-Kongress 2004 Erlangen, Erlangen: 3D-MID e.V.
- Götz, K., Reichinger, G. & Zahradnik, F. (2001): Verfahren zum Herstellen eines Formbauteils mit einer integrierten Leiterbahn und Formbauteil. EP, Patentnr. EP1517597B1.
- Götz, K., Reichinger, G. & Zahradnik, F. (2002): Verfahren zum Erzeugen einer Leiterbahn auf einem Trägerbauteil sowie Trägerbauteil. DE, Patentnr. DE10390587D2.
- Graner, J., Maier, M. & Berg, A. (2012): Verfahren zur Herstellung eines Magnetventils. EP, Patentnr. EP2644879A1.
- Heisler, P. et al. (2017): Concept for Automated Fuse and Relay Assembly in the Field of Cable Harness Manufacturing, in: RWTH Aachen 2017 – 7. WGP-Jahreskongress.
- Herthan, B. & Schneider, K. (2014): Fahrzeugteil für den Aussenbereich eines Kraftfahrzeugs und Kraftfahrzeug. EP, Patentnr. EP3145762B1.
- Heuermann, M. & Ernst, M. (2014): Die wichtigsten Bordnetz-Trends, in: Elektronik automotive Sonderausgabe Bordnetz 2014, S. 20-23.
- Huang, G. Q, Mak, K.L. & Maropoulos, P. G. (Hrsg., 2010): Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

- John, T. (2014): Kampf um den Drucker der Zukunft, in: Handelsblatt, Issue 3.11.2014.
- Plasma Innovations GmbH (2013): PLASMACOAT 3D. Attnag-Ruchheim: s.n.
- Richter, S. , Wischmann, S. (2017): Additive Fertigungsmethoden - Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung. Berlin: Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0 iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI / VDE Innovation + Technik GmbH.
- Rücker, R., Herthan, B., Rosenthal, K.-H. & Schnetter, S. (2011): Türgriffeinheit für ein Fahrzeug. DE/WO, Patentnr. DE102011012687A1.
- Sauer, S. et al. (2014): Vehicle camera housing with tolerance compensating connector. US, Patentnr. US20150222795A1.
- Sover, A. & Amend, J. (2018): Direct metallization by a plasma coating process on thermal conductive polyamide, in: MATEC Web of Conferences 178, 03005 (2018), IManE&E 2018.
- Spehl, J., Riederer, M. & Reith, G. (2015): Bauteil für ein Kraftfahrzeug. DE, Patentnr. DE102015012888A1.
- Süß-Wolf, R. (2010): Thermokinetic process FLAMECON(R) for Large Scale MID. Fürth: 3D-MID e.V..
- Süß-Wolf, R. et al. (2006/2017): Method and device for spraying a conductive line. EP, Patentnr. EP2104750B1.
- Theophile, E. (2010): The plasmadust process: An innovative process for metal coatings on a wide variety of substrates. Fürth: 3D-MID e.V..
- Walkowiak, M., Reinicke, U. (2015): Hinterspritzen von Metallfolien: Verbesserung der mechanisch-thermischen Bauteileigenschaften durch hybrides Prägedesign, Lüdenschied: FOM.
- Wang, L., Süß-Wolf, R., Ulm, M., Franke, J. (2018): Investigation of the laser ablation threshold for optimizing Laser Direct Structuring in the 3D-MID technology, in: ICEP-IAAC 2018 Proceedings, Piscataway, NJ: IEEE, S. 426--429.

## Internetquellen

3D-MID e.V.[F] (2018): Manufacturing Process: Flamecon.

[https://3d-mid.de/cms/front\\_content.php?idcat=50](https://3d-mid.de/cms/front_content.php?idcat=50)

[Zugriff am 29.1.2019]

3D-MID e.V.[H] (2018): Herstellungsverfahren für MID.

[https://3d-mid.de/cms/front\\_content.php?idcat=12](https://3d-mid.de/cms/front_content.php?idcat=12)

[Zugriff am 29.1.2019]

Bayerische Forschungsstiftung (2010): IMTP: Integration der MakroMID-Technologie im Pkw.

<https://forschungsstiftung.de/Projekte/Details/IMTP-Integration-der-MakroMID-Technologie-im-Pkw.html>

[Zugriff am 29.1.2019]

Daimler AG (2018): Mercedes-Benz Lkw setzt wegweisende Zukunftstechnologie ein: 3D-Druck: Lkw-Ersatzteile „on demand“ lieferbar.

<https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Lkw-setzt-wegweisende-Zukunftstechnologie-ein-3D-Druck-Lkw-Ersatzteile-on-demand-lieferbar.xhtml?oid=12788778>

[Zugriff am 29.1.2019]

Diepold, K. (2007): Die Leiterplatte erobert den Raum.

<https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/die-leiterplatte-erobert-den-raum/>

[Zugriff am 6.2.2019].

Diepold, K. (2009): Leiterbahnen aus der Düse.

<https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/entwicklung/leiterbahnen-aus-der-duese/>

[Zugriff am 6.2.2019].

Grande, J. A. (2005): MIDs Make A Comeback.

<https://www.ptonline.com/articles/mids-make-a-comeback>

[Zugriff am 6.2.2019].

LPKF (2018): 3D-MIDs durch Laser-Direktstrukturierung (LDS).

<http://www.lpkf.com/de/branchen-technologien/elektronikfertigung/laser-direkt-strukturierung-lds-von-3d-mids/>

[Zugriff am 29.1.2019].

- rtr (2016): Concept Laser: GE übernimmt Mehrheit an 3D-Druck-Anlagenbauer.  
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/concept-laser-ge-uebernimmt-mehrheit-an-3d-druck-anlagenbauer/14746174.html?ticket=ST-387750-F9Qc9f3heUyBfvIGJWIg-ap1>  
[Zugriff am 29.1.2019]
- Schulz, W. (2000): 3D-Schaltungsträger erobern sich Nischen in der Elektronik-industrie.  
<https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/3d-schaltungstraeger-erobern-sich-nischen-in-der-elektronikindustrie/>  
[Zugriff am 29.1.2019]
- Thehos, K. (2009): Ewige Jugend für die Technik.  
<https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/2211>  
[Zugriff am 29.1.2019].

**Beitrag IV**  
***Entwicklung eines bioinspirierten  
Gelenkarmroboters und individueller medizinischer  
Produkte mittels additiver Fertigung***

Tommy Schafran, Gunter Kullmer

Tommy Schafran  
FOM Hochschule für Oekonomie & Management  
E-Mail: [tommy.schafran@fom.de](mailto:tommy.schafran@fom.de)

**Inhalt**

Abkürzungsverzeichnis.....	88
Abbildungsverzeichnis.....	89
Tabellenverzeichnis.....	89
1 Einleitung.....	90
2 Praxisbeispiele .....	91
2.1 Entwicklung eines biospirierten Gelenkarmroboters.....	92
2.1.1 Bionik: Von der Suche nach einem biologischen Vorbild bis hin zur technischen Lösung .....	92
2.1.2 Verfahren der additiven Fertigung und ihre Vorteile im bionischen Leichtbau .....	95
2.1.3 Der Gelenkarmroboter: Bioinspiriert und additiv gefertigt .....	97
2.2 Herstellung von individuellen, additiv gefertigten Orthesen .....	106
2.2.1 Verfahren der additiven Fertigung und ihre Vorteile in der Herstellung von individuellen Orthesen.....	107
2.2.2 Erfordernis einer digitalen Prozesskette: Von den orthopädischen Forderungen bis hin zum individuellen Hilfsmittel .....	108
2.2.3 Forschungsstand und Ausblick zur Erarbeitung einer allgemein- gültigen digitalen Prozesskette für individuelle Orthesen .....	111
3 Gesamtfazit .....	113
Literaturverzeichnis .....	114
Internetquellen.....	117
Bildquellen .....	117

**Abkürzungsverzeichnis**

AF	Additive Fertigung
Bionik	Akronym aus den Begriffen Biologie und Technik
CAD	Computer-Aided Design (Rechnerunterstütztes Konstruieren)
CAE	Computer-Aided Engineering (Rechnerunterstützung von Arbeitsprozessen in der Technik)
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CT	Computertomographie
DMU	Digital Mock-Up (Digitales Versuchsmodell)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
MJM	Multi Jet Modeling
MRT	Magnetresonanztomographie
OT/OTM	Orthopädietechniker/Orthopädietechniker-Meister
SLS/SLM	Selektives Lasersintern/ Selektives Laserschmelzen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Selbstreinigung der Lotosblume .....	93
<b>Abbildung 2:</b>	Top-Down-Prinzip .....	95
<b>Abbildung 3:</b>	Industrieller Gelenkarmroboter der Firma KUKA.....	98
<b>Abbildung 4:</b>	Freischnitt Kräfte am Hüftgelenkknochen.....	99
<b>Abbildung 5:</b>	Belastung des menschlichen Oberschenkelknochens .....	100
<b>Abbildung 6:</b>	Einordnung des Vorgehens nach VDI 2221 in die Arbeitsweise der Bionik .....	101
<b>Abbildung 7:</b>	Bionisches technisches Teilsystem: Bewegungskinematik..	104
<b>Abbildung 8:</b>	Bionisches technisches Teilsystem: Steuerung und Sensoren.....	104
<b>Abbildung 9:</b>	Bionisches technisches Teilsystem: Leichtbauprinzip.....	105
<b>Abbildung 10:</b>	Prototyp Gelenkarmroboter .....	105
<b>Abbildung 11:</b>	Konventionelle Herstellung einer Unterschenkelorthese aus CFK.....	106
<b>Abbildung 12:</b>	Additiv gefertigte Fußorthese.....	108
<b>Abbildung 13:</b>	Digitale Prozesskette für individuelle Orthesen mittels additiver Fertigung (Entwurf) .....	108
<b>Abbildung 14:</b>	Links konventioneller vs. rechts additiver Herstellungs- prozess einer individuellen Orthese.....	111

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Gegenüberstellung additiver Fertigungsverfahren .....	96
<b>Tabelle 2:</b>	Kräftebezeichnung am Hüftgelenkknochen.....	100
<b>Tabelle 3:</b>	Ergebnistabelle für den bioinspirierten Gelenkarmroboter (quer) .....	103

## 1 Einleitung

Mit der derzeitig sich im Wandel befindenden industriellen Produktion (der sog. vierten industriellen Revolution) nehmen Begriffe wie Leichtbau, Bionik<sup>1</sup> und individuelle Massenproduktion von Gütern in vielen Bereichen der Industrie an Relevanz zu [BrBe+13]. Der vorliegende Beitrag soll an zwei Beispielen aus unterschiedlichen Bereichen, zum einen aus der Industrie und zum anderen aus dem Gesundheitshandwerk, aufzeigen, wie die additive Fertigung (kurz AF) beispielhaft genutzt werden kann, um den zukünftigen bereichsspezifischen Herausforderungen entgegenzuwirken.

Beiden Beispielen ist gemein, dass die AF in den sehr unterschiedlichen Bereichen maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung beiträgt. Denn mit der AF geht eine Vielzahl von Vorteilen einher. Im Allgemeinen besteht durch den element- oder schichtweisen Aufbau, der charakteristisch für die AF ist [VDI3405], die Möglichkeit, komplexe Bauteile mit innenliegenden Strukturen zu realisieren. Individuelle Bauteile, Prototypen und Kleinserien sind ohne Erfordernis von formgebenden Werkzeugen möglich. Die gestalterische Freiheit, die mit diesem Fertigungsverfahren einhergeht, trägt zudem dazu bei, dass die Komplexität des Bauteils nur von geringer Bedeutung für den Fertigungsaufwand ist. Damit besteht die Möglichkeit der Herstellung „optimaler“ Geometrien, bei denen konventionelle Verfahren an ihre Grenzen stoßen [Adam15]. In erster Linie wird sich im Rahmen des vorliegenden Beitrags auf die pulverbasierten Verfahren, das *Selektive Lasersintern* bzw. *Laserschmelzen* (kurz SLS/SLM), die *Multi Jet Fusion Technologie* (kurz MJM) sowie das *Extrusionsverfahren Fused Filament Fabrication* (kurz FFF) bezogen.

---

<sup>1</sup> Bionik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft aus der **Biologie** und der **Technik**.

## 2 Praxisbeispiele

Durch den aktuellen Trend hin zur Automatisierung von Produktionsabläufen steigt in der Industrie die Nachfrage nach Industrierobotern stetig [IFR-01]. Im Hinblick auf die heutzutage starke Fokussierung auf Ressourceneffizienz in den Bereichen der Technik wird die prototypische Entwicklung eines bioinspirierten Gelenkarmroboters<sup>2</sup> zur biegespannungsreduzierten Lastaufnahme vorgestellt<sup>3</sup>. Neben der Bionik nimmt auch der technische Leichtbau hierbei und im Allgemeinen bei der Entwicklung technischer Produkte eine zentrale Rolle ein. Unabhängig von der spezifischen Motivation, ein Produkt „leicht zu bauen“, z. B. um die Dynamik eines Robotersystems zu verbessern, bestimmen die Konstruktionsweise, die Werkstoffwahl und die damit verbundenen Fertigungstechniken, wie z. B. die AF, die Leichtbaueigenschaften eines Produktes. Das Forschungsfeld der Bionik ist dabei oft ein Ideengeber für Verbesserungen und Innovationen im Leichtbau. Die Besonderheit des in diesem Beitrag vorgestellten Roboters liegt in der Auslegung und Konstruktion. Denn diese orientieren sich an einem bisher wenig erforschten Leichtbaumechanismus, welcher sich im Muskel-Skelett-System des Menschen befindet.

Darüber hinaus wird im Bereich des Handwerks, hier im Speziellen aus dem Orthopädietechniker-Handwerk, ein Ansatz zum Produktentstehungsprozess individueller Orthesen mittels AF vorgestellt. Die Orthopädietechnik beschäftigt sich bei der Entwicklung von Orthesen und Prothesen schon von Beginn an mit den Herausforderungen einer individuellen Produktion, biomechanischen<sup>4</sup> Gesichtspunkten und einer vorzugsweisen leichten Bauweise. Orthesen und Prothesen sind am oder im Körper getragene medizinische Hilfsmittel, um in erster Linie zu versuchen, biomechanisch korrekte Funktionen bei Patienten mit Aktivitätseinschränkungen (neuromuskulär oder muskuloskelettal bedingt) wiederherzustellen und die Lebensqualität zu erhöhen [JiPI+15] [JiHe+16]. Der Tragekomfort, welcher von den Patienten als eine der wichtigsten Eigenschaften gesehen wird, wird hierbei u. a. durch das Gewicht und die Passgenauigkeit beeinflusst [JiPI+15]. Eine optimale Passgenauigkeit erfordert jedoch auch eine

---

<sup>2</sup> Gelenkarmroboter gehören zur Klasse der Industrieroboter [GeGr06].

<sup>3</sup> Die schriftliche Darstellung zu diesem Beispiel bezieht sich auf die Masterarbeit des Autors an der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktentwicklung.

<sup>4</sup> Die Biomechanik kann im Folgenden als Teildisziplin der Bionik angesehen werden, welche u. a. primär die mechanische Funktionalität von Lebewesen untersucht.

individuelle Anpassung an den Patienten. Die AF bietet diesbezüglich bereits heutzutage, aber insbesondere zukünftig, ein großes Potential.

## **2.1 Entwicklung eines biosinspirierten Gelenkarmroboters**

Mit fortschreitendem Zeitalter nimmt die Bedeutung von Ressourceneffizienz durch Leichtbau in Bereichen der Technik kontinuierlich zu. Denn vor allem durch Energie- und Materialeinsparungen ergeben sich signifikante Vorteile im weltweiten Wettbewerb. Während der Leichtbau als Disziplin zur Steigerung der Ressourceneffizienz erst in den vergangenen Jahren bzw. Jahrzehnten Einzug in das Ingenieurwesen erhielt, ist in der Natur regelmäßig zu beobachten, dass vorhandene Ressourcen u. a. auf diese Art und Weise möglichst effizient genutzt werden. Im Laufe von Millionen von Jahren haben sich evolutionsbedingt die stets besser angepassten Prinzipien für unterschiedliche Aufgaben im Kampf ums Überleben durchgesetzt. Zu diesen Prinzipien kann auch die Hypothese gezählt werden, dass eine Biegespannung im Knochenapparat von Wirbeltieren vermieden wird, um so einen effektiven Leichtbau zu betreiben.

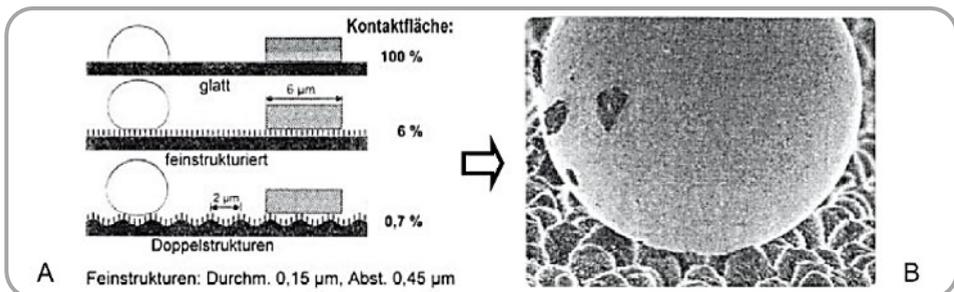
In Ergänzung zu dem hier vorgestellten Beispiel ist in [Bart19] eine detaillierte Untersuchung zum Transfer des muskuloskelettalen Leichtbaues auf offene kinematische Ketten, am Beispiel eines technischen Gelenkarmroboters, zu finden.

### **2.1.1 Bionik: Von der Suche nach einem biologischen Vorbild bis hin zur technischen Lösung**

Die Bionik ist durch eine interdisziplinäre Arbeitsweise von Biologie und Technik definiert. Durch die Biologie werden so beispielweise Vorbilder der Natur gesucht, welche für eine technische Umsetzung analysiert, abstrahiert und umgesetzt werden. Auf diese Weise lassen sich Konstruktionsprinzipien erkennen, die mitunter eine technische Anwendung finden [Nach10]. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass es sich die Bionik nicht zur Aufgabe macht, die Natur direkt zu kopieren, da die Abläufe in der Natur meist zu komplex sind, um sie in der Gesamtheit zu überschauen [Nach10]. *Werner Nachtigall*, Zoologe und einer der Begründer der Bionik in Deutschland, hat diesbezüglich das wissenschaftliche Arbeiten in der Bionik in die folgenden drei Schritte eingeteilt: Erkennen → Abstrahieren → Umsetzen.

Die erste Entdeckung und somit Treiber für die Bionik war der sog. *Lotuseffekt*<sup>®</sup>. Von der Entdeckung der hydrophoben<sup>5</sup> Eigenschaften der Lotosblumenblätter in den 1970er Jahren bis zur technischen Umsetzung dauerte es jedoch noch über zwanzig Jahre. Abbildung 1 zeigt im oberen Bild den technischen Effekt und beschreibt darunter grundlegend die durchgeführten bionischen Arbeitsschritte.

**Abbildung 1:** Selbstreinigung der Lotosblume



**Biologie**

Beobachtung, dass die Blätter der Lotosblume auch in Sumpfbereichen stets sauber sind.  
 Feststellung, dass die feingenoppten Blätter der Pflanze mit einer Wachsschicht überzogen sind (A).  
 Abrollende Wassertropfen nehmen zusätzlich Pilzsporen mit.

**Prinzip**

Schmutzpartikel besitzen auf solchen genoppt, strukturierten und gewachsen Oberflächen nur eine geringe Adhäsionskraft.  
 Die hydrophobe Oberfläche sorgt für kugelförmige Ausbildung der Wassertropfen.  
 Schmutzpartikel haften an den Tropfen und rollen gemeinsam ab (B).

**Abstraktion und Anwendung**

Mit Anwendung der Parameter der Lotosblume: feingenoppt und hydrophob, wurde erstmals eine selbstreinigend wirkende Fassadenfarbe entwickelt.  
 Eine gelegentliche Beregnung der gestrichenen Fläche sorgt für den Reinigungseffekt.

Quelle: In Anlehnung an: [NaWi13]

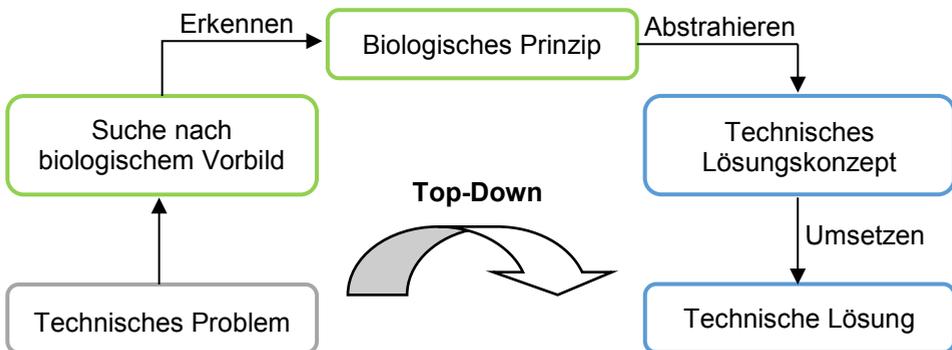
<sup>5</sup> wasserabweisenden

Für den bionischen Arbeitsprozess sind zwei grundlegende Lösungsansätze zu unterscheiden [MiSp+06].

Für den ersten Lösungsansatz veranschaulicht Abbildung 2 den Prozess für das Top-Down-Prinzip. Das Vorgehen nach dem Top-Down-Prinzip geht von einer technischen Problemstellung aus (in Grau dargestellt), wie beispielsweise der Findung einer technischen Lösung (Entwicklungsaufgabe) oder der Verbesserung eines bestehenden Produktes. Im nächsten Schritt wird nach einer geeigneten Lösung aus der Natur gesucht (in Grün dargestellt). Hierbei kann die Zusammenarbeit mit Biologen hilfreich sein, die bereits bestehende Erfahrung einbringen können. Ferner besteht auch die Möglichkeit, auf Online-Datenbanken wie beispielsweise *ELiSe*<sup>6</sup> zurückzugreifen. Nachdem eine vielversprechende Lösung gefunden ist, gilt es, gemäß der Arbeitsschritte in der Bionik *Nachtigalls*, diese in ein technisches Konzept zu abstrahieren, um die technische Lösung umzusetzen (in Blau dargestellt). Auch vermeintlich optimierte Produkte lassen sich oft noch weiter verbessern. Im Gegensatz hierzu steht das Bottom-Up-Prinzip. Ausgehend von einer ausgiebigen biologischen Forschung werden erkannte Prinzipien analysiert. Im Anschluss wird dieses Prinzip abstrahiert und erst abschließend nach einer möglichen technischen Anwendung gesucht. Der zuvor beschriebene *Lotuseffekt*<sup>®</sup> ist ein gutes Beispiel für das Vorgehen nach dem Bottom-Up-Prinzip. Denn erst nachdem die hydrophobe Blatteigenschaft entdeckt und abstrahiert wurde, ist eine technische Anwendung gefunden worden. Bei der Entwicklung des Gelenkarmroboters zur biegespannungsreduzierten Lastaufnahme liegt eine technische Problemstellung vor, weshalb der Lösungsfindung das Top-Down-Prinzip zugrunde liegt.

---

<sup>6</sup> *ELiSE* ist ein systematischer Produktentstehungsprozess für bionischen Leichtbau mit einer Online-Datenbank [Maie15]: <http://elise.de/>

**Abbildung 2:** Top-Down-Prinzip

Quelle: In Anlehnung an: [BuDi+15]

### 2.1.2 Verfahren der additiven Fertigung und ihre Vorteile im bionischen Leichtbau

Im Allgemeinen wird mit der AF ein physikalisches Objekt aus einer digitalen Datei erschaffen, wobei ein Materialabtrag nicht zwingend stattfindet. Im Idealfall wird nur so viel Material verwendet, wie für das gewünschte Objekt benötigt wird. Als Synonyme werden gebräuchlich auch generative Fertigung oder 3D-Druck verwendet. Die Geometriefreiheit liegt bei der AF deutlich höher als bei anderen Fertigungstechnologien, die oft dadurch gekennzeichnet sind, dass Material abgetragen wird. Aus diesem Grund erschließen sich, vor allem im Bereich der Bionik, völlig neue Anwendungsgebiete. Exemplarisch lassen sich somit biologisch inspirierte organische Formen fertigungstechnisch umsetzen.

Die AF unterteilt sich in verschiedene grundlegende Verfahren, die allerdings alle einen element- oder schichtweisen Aufbau von Objekten erfordern [VDI3405]. Die Durchführung einer additiven Fertigungstechnologie sieht generell und vereinfacht folgenden Ablauf vor:

3D-Entwurf (CAD-Modell) → Schichten-Modell → 3D-Druck

Tabelle 1 gibt eine einführende Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen der in der Einleitung genannten additiven Fertigungsverfahren.

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung additiver Fertigungsverfahren

Verfahren	Vorteil	Nachteil	Materialgruppe-Zustand
<b>FFF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• großes Filamentangebot</li> <li>• preisgünstige Drucker</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachkalibrierung erforderlich</li> <li>• Nachbearbeitung notwendig</li> </ul>	Kunststoffe (fest)
<b>SLS/SLM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Bauteilgüte</li> <li>• wenig Nachbearbeitung bei Kunststoffen notwendig (Stützstruktur durch Pulver)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Preis</li> <li>• Stützstruktur bei Metallen notwendig</li> </ul>	Kunststoffe und Metalle (pulverförmig)
<b>MJM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr hohe Genauigkeit, Oberflächengüte und Präzision möglich</li> <li>• mehrere Material(eigenschaften) kombinierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Preis</li> <li>• stark eingeschränkte Materialauswahl</li> </ul>	Kunststoffe (fest, flüssig, pulverförmig)

Quelle: In Anlehnung an: [Gebh13], [GeKe+16]

Unter Berücksichtigung der Vorteile bietet die AF zahlreiche Anwendungsfelder in der Luft- und Raumfahrtindustrie, der Automobilbranche, der Medizin und in weiteren hochtechnologischen Industriezweigen [VDI16]. Die Möglichkeit, das volle Potenzial eines biologisch inspirierten Bauteiles auszuschöpfen, stellt dabei einen wesentlichen Innovationstreiber dar. Durch die Integration additiv gefertigter Leichtbauteile im Flugzeug können im laufenden Betrieb exemplarisch die Betriebskosten und die daraus resultierenden Treibstoffkosten reduziert werden. Mit der AF lassen sich darüber hinaus umfassende Baugruppen schichtweise mit wenigen Einzelteilen realisieren, da komplexer konstruierte Geometrien möglich sind. Eine kostspielige Montage und potenzielle Fehlerstellen an Verbindungen (mit Dichtungen) können folglich auf ein Minimum reduziert werden. Wie beim Flugzeug ist es darüber hinaus möglich, weitere Kosten, etwa mit einem reduzierten Energieverbrauch durch gewichtsoptimierte Bauteile (vgl. bioinspirierter Gelenkarmroboter), einzusparen. Durch eine Funktionsintegration, wie beispielsweise einen integrierten Kühlkanal, kann nicht nur die Funktionssicherheit erhöht, sondern auch das Betriebsverhalten verbessert werden.

Vor allem im bionischen Leichtbau bietet die AF bereits jetzt schon erhebliche Vorteile. Denn durch den additiven Aufbau der gedruckten Objekte lassen sich exemplarisch die Ergebnisse einer biologisch inspirierten Topologieoptimierung fertigen, ohne dass sie in ein fertigungsgerechtes Design für konventionelle Fertigungsverfahren überführt werden müssen (siehe z. B. den *Light Rider*<sup>7</sup> der Fa. *APWorks*). Additiv gefertigte Bauteile können somit auch wirtschaftlich signifikante Vorteile gegenüber konventionell gefertigten Bauteilen aufweisen [BrBe+13]. Insgesamt bietet die AF, mit ihren charakteristischen Vorteilen, zukünftig ein großes Potential in Kombination mit der Bionik.

### 2.1.3 Der Gelenkarmroboter: Bioinspiriert und additiv gefertigt

Bei Gelenkarmrobotern (siehe Abbildung 3) tritt die Beanspruchung u. a. in Form von Biegung in den Bewegungsarmen auf, da durch Hebelwirkung hohe Biegemomente in den langen und beweglichen Armen erzeugt werden können. Biegemomente rufen dabei eine Biegespannung im Bauteil hervor. Diese kann z. B. durch das Widerstandsmoment verändert werden, welches von der Geometrie des Querschnittes abhängt. Die Dimensionierung des Querschnittes hat wiederum Einfluss auf das Gewicht von Bauteilen. In der industriellen Anwendung weist ein Gelenkarmroboter in der Regel eine dynamische Arbeitsweise auf. Der Roboter ist in der Anwendung somit mit steigendem Gewicht der beweglichen Komponenten auch einer höher werdenden dynamischen Belastung im gesamten Bewegungsablauf ausgesetzt. Um dauerhaft einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, dürfen die zulässigen Spannungen jedoch zu keinem Zeitpunkt überschritten werden. Eine ausreichende Festigkeit nur durch die Dimensionierung der Bauteile sicherzustellen, kann hingegen zu einer hohen bewegten Eigenmasse des Roboters führen. Mit Erhöhung der bewegten Masse nimmt sowohl die mechanische Beanspruchung als auch die benötigte Energie zu, um diese Masse in Bewegung zu versetzen. Im Gegensatz hierzu zeigen Beobachtungen in der Natur bei Pflanzen, Säugetieren oder Insekten bereits Prinzipien auf, um effektiven Leichtbau zu betreiben. Grundlegend wird mit der Biegespannungsreduzierung eine Reduzierung der gesamten Bauteilbeanspruchung verfolgt, um so die Masse des Systems zu verringern. Dementsprechend nimmt eine Leichtbauweise eine vorrangige Rolle ein.

---

<sup>7</sup> Elektrisches Motorrad mit bionisch optimiertem und additiv gefertigtem Rahmen (Gesamtgewicht: 35kg). Unter: <https://www.lightrider.apworks.de/>

**Abbildung 3:** Industrieller Gelenkarmroboter der Firma KUKA

Quelle: Firma KUKA

Der Aufbau von Industrierobotern (technisches System) besteht im Allgemeinen aus den folgenden Teilsystemen [GeGr06]:

- Bewegungskinetik
- Antrieb
- Werkzeug und/oder Greifer
- Steuerung und ggf.
- Sensoren

Um jedoch die gewünschte Umsetzung biologischer Prinzipien in eine technische Anwendung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 2), ist vorab eine grundlegende Untersuchung dieser Prinzipien notwendig. Im Folgenden wird jedoch nur auf ein Prinzip genauer eingegangen, dem Prinzip der Zuggurtung.

Im Rahmen der Entwicklung wurde der Hypothese nachgegangen, Biegespannungen zu vermeiden, um Leichtbaukonstruktionen zu realisieren. Treiber dieser Hypothese ist das so genannte Prinzip der Zuggurtung nach *Friedrich Pauwels*. Hierbei besteht die Annahme, dass eine Funktion von Muskeln und Ligamenten<sup>8</sup> darin liegt, Biegespannungen in den Knochen von Wirbeltieren zu kompensieren [SvWi09]. Der Muskelzug bewirkt ein Gegenmoment zu dem Lastmoment, so

---

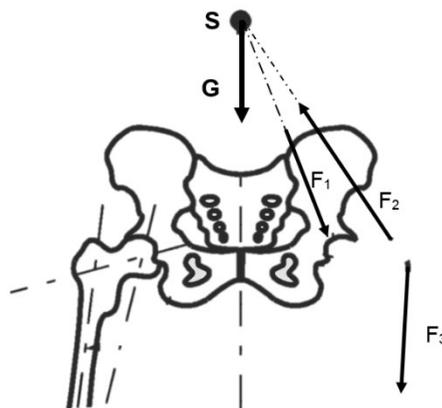
<sup>8</sup> Ein Ligament (bzw. Band) bezeichnet in der Anatomie einen dehnbaren Bindegewebs-strang, der sich zwischen Körperteilen aufspannt, z. B. zwischen zwei Knochen.

dass die Momente sich gegenseitig auf Kosten einer erhöhten Druckbelastung aufheben. Dementsprechend wird das Skelett auf Druck beansprucht, wenn hingegen die Beanspruchung der Muskulatur auf Zug erfolgt. Eine inhomogene Spannungsverteilung, wie sie bei Biegung einer balkenartigen Tragstruktur vorliegt, wird nahezu vermieden. Diesbezüglich haben Erkenntnisse aus der Orthopädie zusätzlich gezeigt, dass ausschließlich Druckkräfte für die Heilung einer Knochenfraktur benötigt werden [Pauw65]. In Kombination mit der anpassungsfähigen und lastadaptiven Strukturbildung (Umbauprozess) des Knochens (in der technischen Anwendung bereits allgemein als Topologieoptimierung bekannt), stellt das Skelett nach *Pauwels* einen idealen Leichtbau dar [Pauw65].

In Abbildung 5 - A wird exemplarisch der Spannungszustand im Oberschenkelknochen dargestellt, wie er nur durch die Kontaktkraft  $F_1$  im Hüftgelenk (siehe Abbildung 4) vorherrschen würde. Die Kontaktkraft ist durch die Körpergewichtskraft  $G$  und die Schwerpunktlage  $S$  des Körpers bestimmt. Der Knochen wird sowohl auf Druck als auch auf Biegung belastet, die Spannungsverteilung liegt also in Form von Zug- und Druckspannung ( $\sigma_Z$  und  $\sigma_D$ ) vor.

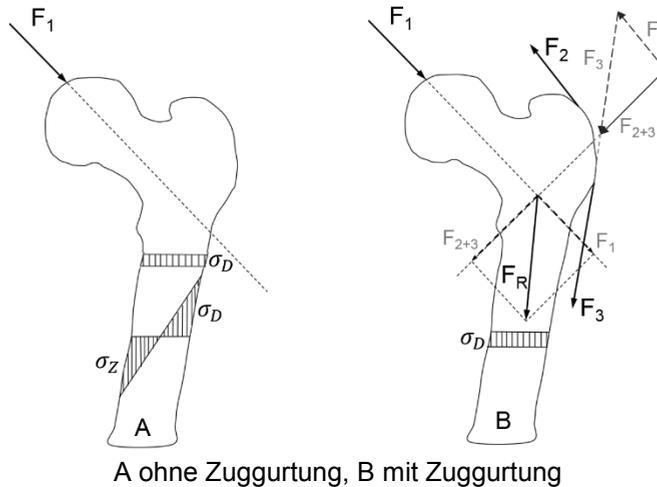
Durch Einbeziehung der aktiv wirkenden Muskelkräfte  $F_2$  und  $F_3$  verläuft die auf den Oberschenkelknochen wirkende Gesamtkraft vereinfacht genau durch die Schaftachse des Knochens (Abbildung 5 - B). Folglich liegt eine homogene Druckspannungsverteilung vor. Durch vektorielle Zerlegung der Teilkräfte der Muskeln lässt sich dieses Ergebnis nachvollziehen.

**Abbildung 4:** Freischnitt Kräfte am Hüftgelenkknochen



Quelle: Bearbeitet aus: [RiKu13]

**Abbildung 5:** Belastung des menschlichen Oberschenkelknochens



Quelle: Bearbeitet aus [GöHe+14]

**Tabelle 2:** Kräftebezeichnung am Hüftgelenkknochen

Schwerpunkt des Körpers	S
Körpergewichtskraft	G
Kontaktkraft im Hüftgelenk	$F_1$
Resultierende Muskelkraft der Abduktoren	$F_2$
Kraft des Iliotibialtrakt	$F_3$
Resultierende Gesamtkraft im Femur	$F_R$

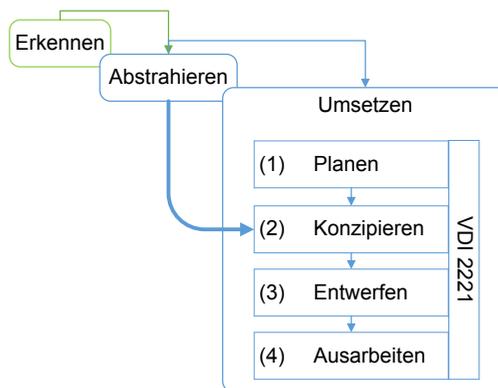
Quelle: Eigene Darstellung

Um im anschließenden konstruktiven Entwicklungsprozess einer möglichen Komplexität gerecht zu werden, wird auf die Arbeitsweise einer methodischen Produktenentwicklung verwiesen (siehe [EhMe13]). Im maschinenbaulichen Konstruktionsprozess können die folgenden vier Hauptphasen unterschieden werden [VDI2221]: (1) Planen – (2) Konzipieren – (3) Entwerfen – (4) Ausarbeiten.

Da es sich um eine bionische Konstruktion handelt und sich die Vorgehensweise nach der Bionik *Nachtigalls* richtet, ist es schwer, die VDI-Richtlinie gänzlich zu berücksichtigen. Folglich dient die VDI-Richtlinie somit nur der Orientierung und der Vollständigkeit für den Konstruktionsprozess. Im Folgenden sind die Inhalte der jeweiligen maschinenbaulichen Konstruktionsphasen aufgeführt. Hierbei wird

die Konzipierungsphase (2) allerdings nicht im Sinne der VDI-Richtlinie berücksichtigt, da sich der Entwurf der Konstruktion an den vorangeführten biologischen Erkenntnissen orientiert. In Abbildung 6 ist dargestellt, wie der Konstruktionsprozess nach VDI 2221 im letzten Arbeitsschritt der Bionik eingebunden ist. Hierbei wird das bionisch abstrahierte Modell als Ergebnis der Phase (2) verwendet.

**Abbildung 6:** Einordnung des Vorgehens nach VDI 2221 in die Arbeitsweise der Bionik



Quelle: Eigene Darstellung

In der beginnenden Planungsphase (1) muss unabhängig zur Bionik zunächst die genaue technische Aufgabenstellung geklärt werden. Das heißt, es werden Forderungen und Wünsche an den Gelenkarmroboter festgehalten und eine Anforderungsliste erstellt.

Mit der Ausführung der Anforderungsliste ist die Freigabe für die Konzipierungsphase (2) gegeben, dem eigentlichen Beginn des Konstruktionsprozesses. In dieser Phase sind i. d. R. verschiedenste Lösungsprinzipien zu erarbeiten und in Betracht zu ziehen. Im Anschluss werden mögliche Lösungsvarianten durch geeignete Bewertungsverfahren oder durch die Meinung erfahrener Maschinenbauer beurteilt, um so die geeignetste Variante für die vorliegende Aufgabenstellung zu finden [VDI2221]. Da durch die Ergebnisse des vorangeführten bionischen Arbeitsschritts, dem Abstrahieren, bereits die Lösungsvarianten existieren, wird in Anlehnung an diese Varianten ein erstes Modell konzipiert.

Die Entwurfsphase (3) beinhaltet eine Optimierung und weitere Ausarbeitungen des erstellten Konzeptes. Eine Nutzung von CAD und FEM-Programmen bietet die Möglichkeit einer detailgetreuen visuellen Betrachtung und Bewertung des entwickelten Entwurfs. So ist eine FEM-gestützte Topologieoptimierung ein Bestandteil dieser Phase. Für eine erfolgreiche Gestaltoptimierung und Auslegung der Bauteile ist es vorab erforderlich, den zu erwartenden Belastungszustand zu berechnen. Aus diesem Grund wurde eine mathematische Basis erstellt, welche sowohl den Bewegungs- als auch den Kraftverlauf beschreibt.

Für die letzte Phase (4) werden die Auswahl von eventuell benötigten Zukaufteilen sowie der Festigkeitsnachweis innerhalb des Konstruktionsprozesses herangezogen. Als Grundlage dienen hierbei das mathematische Bewegungs- als auch das Kraftmodell. Die Erstellung der finalen CAD-Modelle und die Fertigung des Endergebnisses schließen den Konstruktionsprozess ab.

Nach erfolgreicher Anwendung der Arbeitsschritte Erkennen, Abstrahieren und Umsetzen ist ein bioinspirierter Gelenkarmroboter zur Biegespannungsreduzierten Lastaufnahme prototypisch gefertigt worden (siehe Abbildung 10). Der konstruktive Aufbau sowie die zugehörige mathematische Modellbildung des Systems sind an diverse biologische Hypothesen und Erkenntnisse angelehnt. Zusammenfassend wird für die Bewegungsarme eine Biegespannungsreduzierung mit Hilfe des Prinzips der Zuggurtung realisiert. Für eine gewichtsoptimierte Konstruktion sind die Gelenkarme mit einer computer-gestützten Simulationmethode designt, die sich dabei der Erkenntnisse des lastadaptiven Wachstums von Knochen bedient und eine bioinspirierte Gestaltoptimierung ermöglicht (→ Topologieoptimierung). Da für die Fertigung der Bauteile das additive Fertigungsverfahren herangezogen wird, wurden vorerst keine weiteren Restriktionen bei der Optimierung der Topologie berücksichtigt.

Die relevanten Ergebnisse zu den technischen Teilsystemen sind in Tabelle 3 grob aufgelistet. Für ein vereinfachtes Verständnis dient die farbliche Kennung, wie in Abbildung 2 dargestellt, als Orientierung.

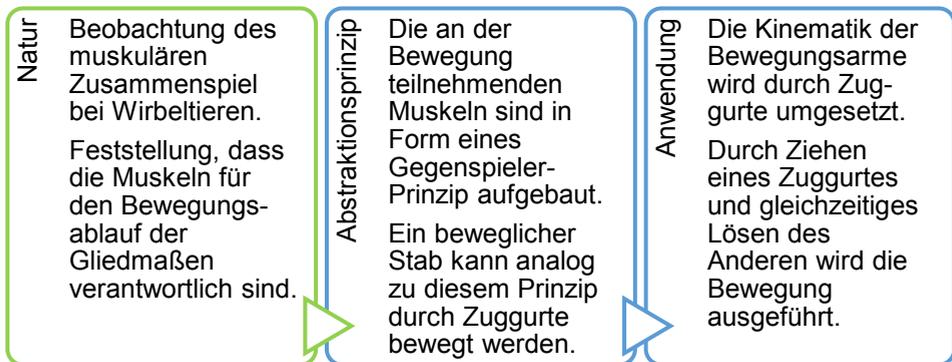
**Tabelle 3:** Ergebnistabelle für den bioinspirierten Gelenkarmroboter (quer)

Technisches Teilsystem	Biologisches Vorbild	Technische Abstraktion	Umsetzung
Bewegungskinematik	Muskuläres Zusammenspiel bei Wirbeltieren	Bewegungskinematik	✓
Antrieb	-	-	Elektromotor (Technische Lösung)
Werkzeug und/oder Greifer	-	-	Elektromagnet (Technische Lösung)
Steuerung und ggf. Sensoren	Wahrnehmungskette	Sensorfreie Steuerung	✓
Leichtbauprinzip	Zuggurtung	Biegereduzierung durch aktive Kraffteinleitung	✓
	Transformationsgesetz der Knochen	Gewichtsreduzierung durch Topologieoptimierung	✓

Quelle: Eigene Darstellung

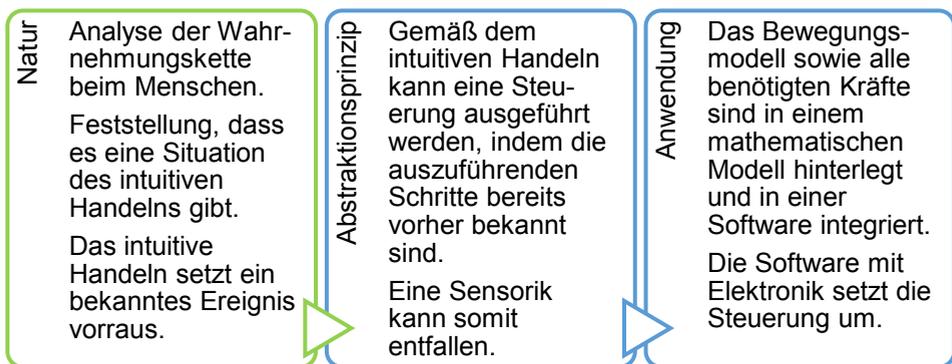
Eine kurze Zusammenfassung und Erläuterung der Ergebnisse innerhalb der durchgeführten Arbeitsschritte sind den Abbildungen 7 bis 9 zu entnehmen. Die Abbildungen beziehen sich jeweils auf ein bionisch umgesetztes technisches Teilsystem des Gelenkarmroboters. Die aufgeführten Teilsysteme bilden in Summe den gesamten Aufbau des technischen Systems. Die Auswahl dieser Teilsysteme richtet nach dem einführend vorgestellten technischen Aufbau von Industrierobotern. Als Besonderheit ist ergänzend zu dem Aufbau von Industrierobotern das Leichtbauprinzip mit in die Liste der technischen Teilsysteme aufgenommen worden.

**Abbildung 7:** Bionisches technisches Teilsystem: Bewegungskinematik



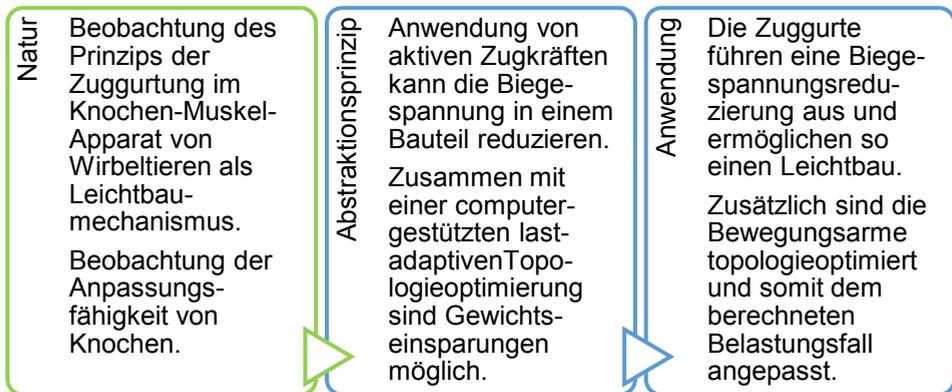
Quelle: Eigene Darstellung

**Abbildung 8:** Bionisches technisches Teilsystem: Steuerung und Sensoren



Quelle: Eigene Darstellung

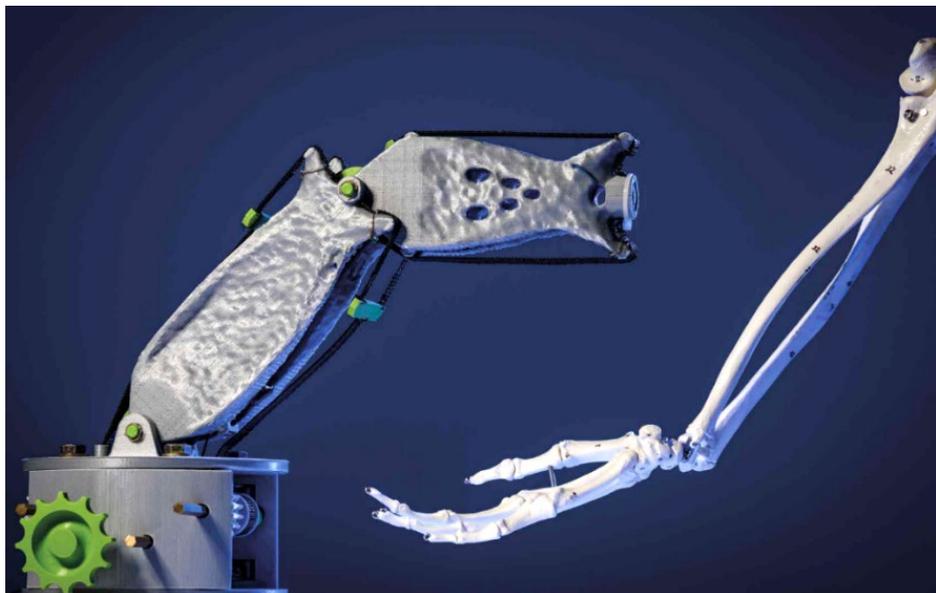
**Abbildung 9:** Bionisches technisches Teilsystem: Leichtbauprinzip



Quelle: Eigene Darstellung

Eine prototypische Umsetzung des Gelenkarmroboters ist in Abbildung 10 zu sehen. In der Abbildung ist der additiv gefertigte Prototyp ohne Aktoren dargestellt.

**Abbildung 10:** Prototyp Gelenkarmroboter



Quelle: Wissenschaftsmagazin Rubin 2/17

## 2.2 Herstellung von individuellen, additiv gefertigten Orthesen

Die Orthopädietechnik ist bei der Fertigung individueller Orthesen durchgängig von handwerklichen Prozessen dominiert. Bei der Anfertigung von individuellen Orthesen, beispielsweise für das Fußgelenk, wird traditionell zum Fertigungsbeginn auf ein Gips-Formverfahren zurückgegriffen, was wiederum mit mehrfachen Besuchen des Patienten sowie hohem Arbeits- und Fertigungsaufwand (z. B. Werkstattarbeiten) seitens des Leistungserbringers verbunden ist [ShPa+17], [JiPI+15]. Mit Hilfe des angefertigten Gips-Negativabdrucks wird anschließend ein Positivmodell, der sog. Leisten, aus PU-Schaum oder Gips erstellt. Durch erfahrene Orthopädietechniker oder Orthopädietechniker-Meister (kurz OT/OTM) wird dieses Modell händisch weitermodelliert und für die Orthesenfertigung präpariert. Für den anschließenden Fertigungsprozess hat sich, neben dem Verfahren des Tiefziehens, die Verwendung von carbonfaserverstärktem Kunststoff (kurz CFK-Material) zahlreich etabliert. Der beschriebene Herstellungsprozess ist in Abbildung 11 zur Veranschaulichung grob skizziert.

**Abbildung 11:** Konventionelle Herstellung einer Unterschenkelorthese aus CFK



Quelle: Eigene Darstellung

Bei genauer Analyse der einzelnen Prozessschritte ist festzuhalten, dass diese traditionell handwerklich geprägte Arbeitsweise punktuell äußerst zeit- und kostenintensiv sowie stark vom Know-how des OT/OTM abhängig ist. Zum Beispiel ist beim Gips-Formverfahren das Risiko einer mangelhaften Fertigung erhöht, der Erfolg stark von den Fähigkeiten des Anwenders abhängig, nicht reproduzierbar, und somit auch nicht prozesssicher [ToKo+17]. Darüber hinaus

sind die Arbeiten mit dem CFK-Material für den Fertiger nicht zuletzt gesundheitsgefährdend. Zusätzlich ist die Arbeitsweise in den Punkten einer individuellen Anpassung und der Umsetzung biomechanischer Gesichtspunkte/Potentiale durch Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren limitiert. Im Allgemeinen sind die Produktionskosten einer handwerklichen Produktentstehung deutlich höher als maschinell gefertigte Standardprodukte [BrBe+13]. Ein Umbruch ist im Orthopädietechniker-Handwerk, verstärkt mit der steigenden Digitalisierung und der Verbreitung der additiven Fertigungsverfahren, zu verzeichnen [OpTa+17], [RiSc+17]. Diese Verfahren bringen das Potential einer schnelleren und kostengünstigeren Fertigung von individuellen Orthesen und Prothesen mit sich [JiPI+15].

### **2.2.1 Verfahren der additiven Fertigung und ihre Vorteile in der Herstellung von individuellen Orthesen**

Durch den schichtweisen Aufbau von Werkstücken entfallen viele Restriktionen einer konventionellen Fertigung, die im vorherigen Teil beschrieben wurden, und ermöglichen somit auch neue Möglichkeiten für eine maschinelle Anfertigung. Eine erfolgreiche Anwendung der AF zur Herstellung von Orthesen und Prothesen wurde exemplarisch bereits vereinzelt von [OpTa+17], [RiSc+17], [ScRu+17], [ZuKa+15], [DoBa+14], [ChLe+17] et al. durchgeführt. Die gefertigten medizinischen Produkte wurden von den Autoren und Patienten in allen Fällen mindestens als gleichwertig im Vergleich zu Ergebnissen konventioneller Anfertigungen gewertet.

Auch wenn es bereits additiv gefertigte Orthesen gibt (siehe Abbildung 12), sind die Treiber eher vereinzelt und oftmals marktführende Unternehmen aus den Gesundheitshandwerken oder der Industrie. Für die technisch geprägten klein- und mittelständischen Unternehmen in der Orthopädietechnikbranche ist dieses Fertigungsverfahren noch nicht greifbar (siehe auch Kapitelpunkt 2.2.3).

**Abbildung 12:** Additiv gefertigte Fußorthese

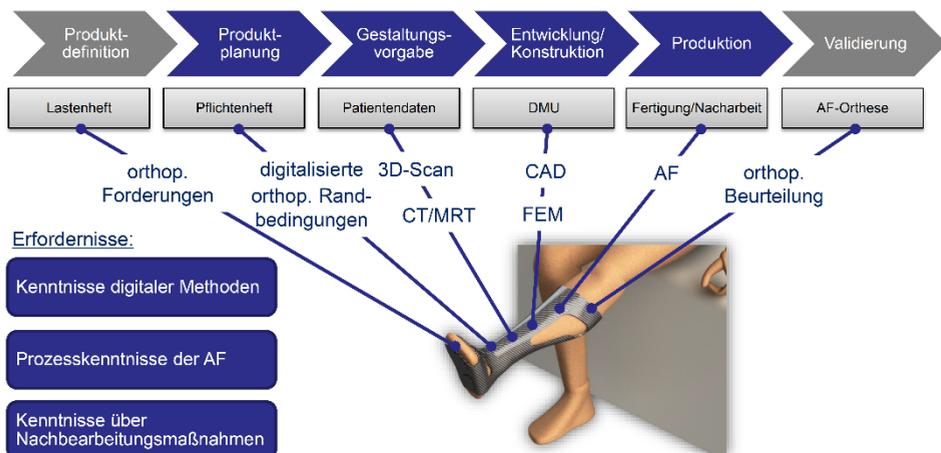


Quelle: Firma: plusmedica-OT

**2.2.2 Erfordernis einer digitalen Prozesskette: Von den orthopädischen Forderungen bis hin zum individuellen Hilfsmittel**

Abbildung 13 veranschaulicht, wie mithilfe einer digitalen Prozesskette die AF, speziell in den Werkstätten der Orthopädie- oder Sanitätshäusern, in den Produktentstehungsprozess von individuellen Orthesen erfolgsversprechend eingreifen könnte.

**Abbildung 13:** Digitale Prozesskette für individuelle Orthesen mittels additiver Fertigung (Entwurf)



Quelle: Eigene Darstellung

Hierzu ist, in Anlehnung an den Entwicklungsprozess aus dem Maschinenbau, in einem ersten Schritt die Aufstellung eines Lastenheftes vorgesehen, welche alle orthopädischen sowie medizinischen oder patientenspezifischen Forderungen zusammenfasst. Diese gilt es anschließend, ingenieurtechnisch aber auch biomechanisch korrekt, zu interpretieren und in Form eines Pflichtenheftes zu digitalisieren. In einem nächsten Schritt wird die aufwendige Gipstechnik durch eine digitale Modellerstellung der betroffenen Stelle des Patienten ersetzt. Auf diese Weise kann die angestrebte Prozesskette auch im Sinne der vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0) durchgängig digitalisiert werden. Durch bereits technologisch realisierbare mobile 3D-Scanner kann ein 3D-Modell in wenigen Minuten erstellt werden (z. B. 3D-Objektscanner EVA der Firma Artec).

Basierend auf den vorliegenden digitalen Daten wird im Anschluss die Orthese am Computer unter Einsatz von CAE-Software modelliert und optimiert. Zu nennen sind hier die beiden Methoden CAD und FEM. Zusätzlich zu den patientenspezifisch gestalterischen und physikalischen Anforderungen sind auch die langjährigen Erfahrungen und das Fachwissen der OT/OTM, z. B. in der Biomechanik, zu berücksichtigen. Das danach vorliegende digitale dreidimensionale Versuchsmodell (engl. Digital Mock-Up, kurz DMU) der Orthese wird mit einem additiven Fertigungsverfahren gefertigt und hinsichtlich Belastbarkeit und Tragekomfort getestet. Letztendlich ist nur durch Feldstudien in Zusammenarbeit mit dem Patienten ein Erfolg der additiv gefertigten Orthese denkbar. Eine medizinisch noch so gut angepasste und technisch machbare Orthese kann nur zum Erfolg führen, wenn diese auch vom Patienten angenommen wird.

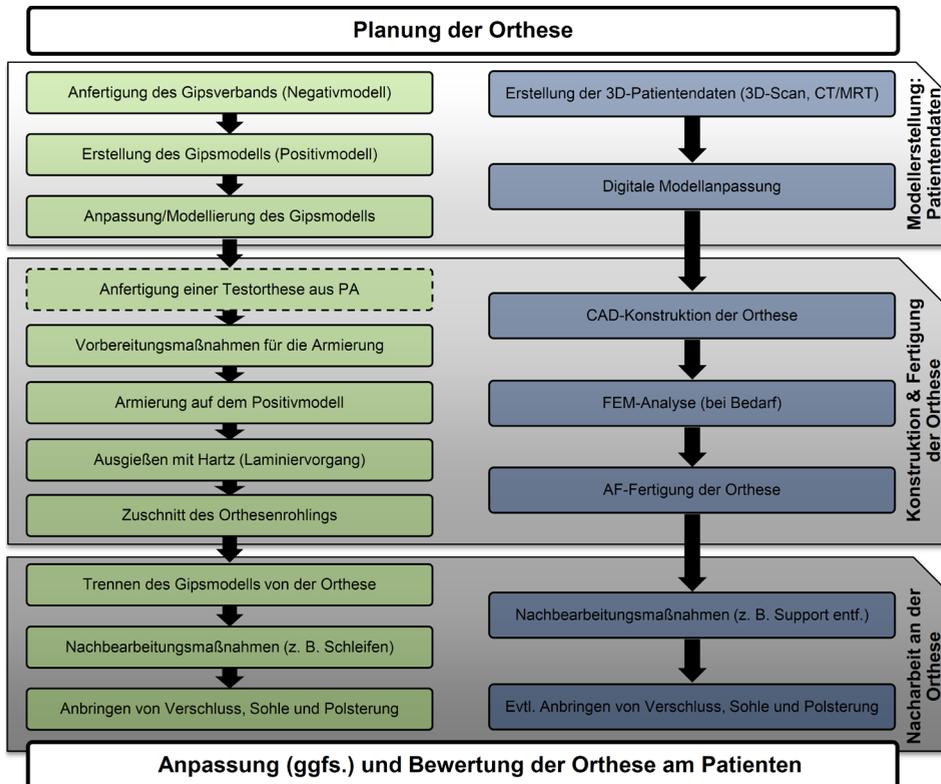
Eine erfolgreiche Anwendung der AF zur Herstellung solcher Produkte verlangt jedoch u. a. die im Folgenden genannten Kenntnisse (vgl. z. B. [OpTa+17], [RiSc+17]):

1. Kenntnisse in der Anwendung rechnergestützter Methoden (z. B. optische Aufnahme: 3D-Scan oder CT/MRT-Datenaufbereitung, CAD(-Datenvorbereitung), evtl. FEM-Simulation etc.).
2. Prozesskenntnisse des additiven Fertigungsverfahrens (z. B. Stützstrukturen, Anisotropie, Einflussparameter etc.).
3. Kenntnisse über erforderliche Arbeitsschritte, welche nach der AF durchzuführen sind (z. B. Entfernung der Stützstrukturen, chemische oder thermische Nachbehandlung etc.).

In [ChLe+17] werden insbesondere die Arbeitsschritte der Nachbearbeitung als Hürde einer erfolgreichen Anwendung der AF erwähnt. Den aufgeführten Literaturquellen ist jedoch zu entnehmen, dass eine individuelle Produktion von medizinischen Hilfsmitteln, wie Orthesen und Prothesen, mittels AF in Zukunft zu erwarten ist.

Mit der AF werden somit die ursprünglich vor allem handwerklich ausgeübten Tätigkeiten des OT/OTM (Gipsabdruck anfertigen, individuelle Anpassung der Orthese/Prothese an und mit dem Patienten usw.) verstärkt durch zu digitalisierende Prozessschritte bzw. eine im Ganzen digitale Prozesskette beeinflusst. Durch die Digitalisierung und der damit einhergehend ansteigenden Komplexität und Anzahl an Daten wird eine große Designfreiheit ermöglicht. Der eigentliche Konstruktionsprozess wird somit jedoch mitunter zeitaufwendiger, komplizierter und kann bei mangelnder Erfahrung und Kenntnis des Anwenders durchaus auch teurer als bei einer konventionell handwerklichen Anfertigung werden. Inwiefern die vorgestellte Prozesskette in der Praxis umsetzbar ist, muss in weiteren Forschungsarbeiten erst noch untersucht werden. Bezogen auf das einführende Beispiel einer Fußorthese, veranschaulicht Abbildung 14 vereinfacht den Unterschied einer konventionellen Fertigung zum vorgestellten Herstellungsprozess mittels AF. Voraussetzung ist hierbei, dass alle erforderlichen Kenntnisse vom Anwender beherrscht werden. Besonders deutlich wird, dass sich die Anzahl erforderlicher Arbeitsschritt signifikant reduziert, wodurch eine schnellere und kostengünstigere Patientenversorgung zu erwarten bzw. anzustreben ist.

**Abbildung 14:** Links konventioneller vs. rechts additiver Herstellungsprozess einer individuellen Orthese



Quelle: Eigene Darstellung

### 2.2.3 Forschungsstand und Ausblick zur Erarbeitung einer allgemeingültigen digitalen Prozesskette für individuelle Orthesen

Nach [SpKr17], [Lach17] steigt der Kundenwunsch nach einem individualisierten und vielfältigen Produktangebot auch in diversen weiteren Bereichen der Industrie, was i. d. R. mit einer steigenden Komplexität in allen Produktlebensphasen verbunden ist. Begründet werden kann dies dadurch, dass unter anderem unterschiedliche Prozesse und Arbeitsschritte beim Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten (in Anlehnung an [VDI2221]) berücksichtigt werden müssen.

Das medizinisch-technische Fachgebiet Orthopädietechnik wird vom Autor an dieser Stelle als möglicher und exemplarischer Vorreiter für einen effizienten Produktentstehungsprozess durchgängig individueller (technischer) Produkte

unter Zuhilfenahme einer standardisierten digitalen Prozesskette und der additiven Fertigungstechnologie angesehen. Der Bedarf und die Begründung fußt z. T. auf der momentan, allgemein in den Gesundheitshandwerken, teils teuren und nicht prozesssicheren handwerklichen Arbeitsweise. Hinzu kommt die gleichzeitig von Patienten gewünschte Leichtbauweise mit individueller Passform und korrekter biomechanischer Funktionsweise.

Der augenscheinlich gegensätzliche Ansatz, individuelle Produkte mit einer vereinfachten und standardisierten Prozesskette herzustellen, lässt sich mit der AF tatsächlich realisieren. Da die AF von formgebenden Werkzeugen entkoppelt ist und die gestalterische Formgebung der Produkte (hier von medizinischen Hilfsmitteln) lediglich in der digitalen Umgebung stattfindet, werden letztendlich eine hohe Variantenvielfalt und ein hoher Individualisierungsgrad bei gleichbleibenden Prozessschritten ermöglicht [Adam15].

Insgesamt ist mit einer hohen Kundenzufriedenheit zu rechnen, wenn schneller und/oder kostengünstiger eine anpassungsfähige Herstellung von Orthesen oder Prothesen (z. B. bei Verletzung oder Wachstum des Patienten) ermöglicht wird. Auf Grund der Tatsache, dass der Patient die digitale Entwicklung mitgestalten kann, ist durch eine „persönliche Identifizierung“ mit dem individuell gefertigten Hilfsmittel mit zusätzlich positiven Effekten zu rechnen. Erfahrungen des Unternehmens *Pohlig* aus Traunstein (Oberbayern) geben im Bereich der Technischen Orthopädie exemplarisch bereits einen praktischen Einblick in die erfolgreiche Anwendung der AF (siehe [ScKa+19], [KiSc18]).

Aktuell bleibt dennoch festzuhalten, dass die in einigen weiteren Unternehmen verfolgte Anwendung der AF zur Herstellung orthopädischer Produkte vielermaßen jedoch noch nicht überzeugt. Zu begründen ist dies z. B. damit, dass lediglich versucht worden ist, ein bewährtes Orthesendesign additiv zu fertigen oder der Fokus zu stark auf der großen Designfreiheit der AF liegt, wobei biomechanische Aspekte wenig bis gar keine Berücksichtigung finden [vgl. Hoch19]. Einen interdisziplinären Lösungsansatz gilt es somit langfristig und zielführend anzustreben.

Als Ausblick ist es übergeordnet denkbar, den vorgestellten Ansatz in Zukunft auf andere technische Produktklassen zur Entstehung individueller technischer Produkte zu übertragen oder zumindest Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

### 3 Gesamtfazit

Am Beispiel eines bioinspirierten Gelenkarmroboters wurde aufgezeigt, wie die additive Fertigung gemeinsam mit der Bionik ein Potential ermöglicht, um einen ressourceneffizienten Leichtbau betreiben zu können. Eine Vielzahl weiterer Beispiele ist im industriellen Umfeld bereits wahrzunehmen, da Forschung und Entwicklung häufig etabliert und eine zunehmende Digitalisierung längst zu verzeichnen ist.

Auf der anderen Seite hat das zweite Beispiel anhand der Orthopädietechnik gezeigt, wie die additive Fertigung zukünftig eine personalisierte Produktion in erhöhter Stückzahl ermöglichen kann. Die traditionell aufgestellten Gesundheitshandwerke geben hierfür eine gute Ausgangssituation, da bestehende handwerkliche Prozesse oft wie beschrieben sehr zeit- und kostenintensiv sind. Außerdem ist vor allem in den traditionell geprägten Gesundheitshandwerken bereits ein digitaler Wandel im Sinne der „Industrie 4.0“ verstärkt zu beobachten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich mit der steigenden Komplexität, die durch Faktoren wie Leichtbau, Bionik sowie Individualisierung erhöht wird, und einer intensiveren Anwendung der additiven Fertigung neue Herausforderungen in der Entwicklung ergeben werden. Es werden jedoch auch neue Möglichkeiten in der Produktgestaltung und Ansätze entstehen, um so Produkte effizienter und/oder multifunktionaler zu realisieren und zusätzlich dem Wunsch individualisierter Produkte nachzukommen. Die additive Fertigung wird somit zunehmend helfen, eine Vielzahl von Herausforderungen in der Zukunft zu bewältigen, sowohl in der Industrie als auch im Handwerk. Erfahrungen aus diesen beiden unterschiedlichen Bereichen können folglich auch genutzt werden, um Synergien zu entwickeln und sich gegenseitig zu inspirieren.

**Literaturverzeichnis**

- [Adam15] Adam, G. A. O. (2015): Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling, Forschungsbericht des Direct Manufacturing Research Centers, Paderborn: Dissertation Universität Paderborn, 2015.
- [Bart19] Bartz, M. (2019): Transfer des muskuloskelettalen Leichtbaus auf offene kinematische Ketten, München: Verlag Dr. Hut, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2019.
- [BrBe+13] Breuning, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S., Verl, A. (2013): Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, Berlin: Springer-Vieweg, 2013.
- [BuDi+15] Bukner, S., Dialami, F., Dinf, L., Matthews, J. (2015): Bio-inspired design to support reduced energy consumption via the 'Light Weight' of machine system elements, in: International Journal of Modeling and Optimization, vol. 5 (2015), no.1, S. 82-89.
- [ChLe+17] Cha, Y.H., Lee, K.H., Ryu, H.J., Joo, I.W., Seo, A., Kim, D.-H., Kim S.J. (2017): Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software, in: Applied Bionics and Biomechanics, vol. 2017, Article ID 9610468, S. 1-6. <https://doi.org/10.1155/2017/9610468>
- [DoBa+14] Dombroski, C. E., Balsdon, M. E., Froats, A. (2014): The use of a low cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study, in: BMC Research Notes 7 (2014), no. 443, S. 1-4. <https://doi.org/10.1186/1756-0500-7-443>
- [EhMe13] Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktenwicklung, 5. Aufl., München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [Gebh13] Gebhardt, A. (2013): Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, 4. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [GeGr06] Gevatter, H.-J., Grünhaupt, U. (2006): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

- [GeKe+16] Gebhardt, A., Kessler, J., Thurn, L. (2016): 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendung des Additive Manufacturing (AM), 2. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- [GöHe+14] Gössling, R., Herzog, M., Witzel, U., Bender, B. (2014): Compensation of bending moments as a nature-inspired design principle? In: Dorian, M., Storga, M., Neven, P., Nenad, B. (Hrsg.) (2014): DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference, Dubrovnik, 2014, S. 193-200.
- [Hoch19] Hochmann, D. (2019): 3D-Druck in der Technischen Orthopädie – Stand und Perspektiven, in: Orthopädie Technik 05/19, S. 18-24.
- [JiHe+16] Jin Y.A., He Y., Shih A. (2016): Process Planning for the Fuse Deposition Modeling of Ankle-Foot-Othoses, in: Procedia CIRP 42 (2016), S. 760–765.
- [JiPI+15] Jin Y.A., Jeff P., Chen R., Wensman J., Shih A. (2015): Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses – A Review, in: Procedia CIRP 36 (2015), S. 119-204.
- [KiSc18] Kienzle, C., Schäfer, M. (2018): Integration additiver Fertigungsverfahren (3D-Druck) in den orthopädiotechnischen Versorgungsalltag, in: Orthopädie Technik 05/18, S. 48-57.
- [Lach17] Lachmayer, R. (2017): Additive Manufacturing Quantifiziert, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Berlin: Springer-Vieweg, 2017.
- [Maie15] Maier, M. (2015): Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen: Dissertation Universität Bremen, 2015.
- [MiSp+06] Milwich, M., Speck, T., Speck, O., Stegmaier, T., Planck, H. (2006): Biomimetics and Technical Textiles: Solving engineering problems with the help of nature's wisdom, in: American Journal of Botany 93 (2006), is. 10, S. 1455-1465.
- [Nach10] Nachtigall, W. (2010): Bionik als Wissenschaft, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [NaWi13] Nachtigall, W.; Wisser, A. (2013): Bionik in Beispielen, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [OpTa+17] Opitz, M., Taubmann, C., Grundlack, F., Breuninger, J. (2017): Stabilität von additiv gefertigten Prothesen, in: Richard, H. A., Schramm, B., Zipsner, T. (Hrsg.): Additive

- Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2017, S. 87-104.
- [Pauw65] Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlung zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1965.
- [RiKu13] Richard, H.-A., Kullmer, G.: Biomechanik – Grundlagen und Anwendung auf den menschlichen Bewegungsapparat, Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [RiSc+17] Richard, H.-A., Schramm, B., Zipsner, T. (2017): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2017.
- [ScKa+19] Schäfer, M., Kapeller, B., Wagner, R., Schützinger, J., Schütz, R., Mader, K. (2019): „30 Reasons“ – Orthesenprojekt zur funktionellen Verbesserung der Handfunktion eines Fliegenfischers mit Tetraplegie, in: Orthopädie Technik 03/19, Sonderdruck, S. 46-49.
- [ScRu+17] Schramm, B., Rupp, N., Risse, L., Brüggemann, J.-P., Riemer, A., Richard, H.-A., Kullmer, G. (2017): Medizintechnische Anwendungen der additiven Fertigung, in: Richard, H. A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2017, S. 21-40.
- [ShPa+17] Shih, A., Park, D.W., Yang, Y.Y., Chisena, R., Wu, D. (2017): Cloud-based Design and Additive Manufacturing of Custom Orthoses, in: Procedia CIRP 63 (2017), S. 156-160.
- [SpKr17] Spallek, J., Krause, D. (2017): Entwicklung individualisierter Produkte durch den Einsatz Additiver Fertigung, in: Lachmayer, R. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Berlin: Springer-Vieweg, 2017, S. 69-83.
- [SvWi09] Sverdlova, N., Witzel, U. (2010): Principles of determination and verification of muscle forces in the human musculoskeletal system: Muscle forces to minimise bending stress, in: Journal of Biomechanics 43 (2010), S. 387-396.
- [ToKo+17] Totaha, D.; Kovalenko, I.; Saeza, M.; Bartona, K. (2017): Manufacturing Choices for Ankle-Foot Orthoses: A Multi-objective Optimization, Procedia CIRP 65 (2017), S. 145-150.

- [VDI16] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg., 2016): Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren, Fachbereich Produktionstechniken und Fertigungsverfahren, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2016.
- [VDI2221] Richtlinie VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1993.
- [VDI3405] Richtlinie VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [ZuKa+15] Zuniga, J., Katsavelis, D., Peck, J., Stollberg, J., Petrykowski, M., Carson, A., Fernandez, C. (2015): Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences, in: BMC Research Notes 8 (2015), no. 10, S. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1186/s13104-015-0971-9>

### Internetquellen

- [IFR-ol] International Federation of Robotics, unter: <https://ifr.org/>. (Zugriff am 04.04.2019)

### Bildquellen

- KUKA <https://www.kuka.com/> (Zugriff am 14.05.2019).
- plusmedica-OT <https://www.ottobock.com/de/> (Zugriff am 14.05.2019).
- Rubin 2/17 Wissenschaftsmagazin, Ruhr-Universität Bochum, ISSN: 0942-6639, Nr. 2, 2017. [https://news.rub.de/sites/default/files/rubin\\_2017\\_2.pdf](https://news.rub.de/sites/default/files/rubin_2017_2.pdf) (Zugriff am 14.05.2019)

ISBN (Print) 978-3-89275-091-8

ISSN (Print) 2628-605X

ISBN (eBook) 978-3-89275-092-5

ISSN (eBook) 2628-8184



Institute of Automation &  
Industrial Management  
FOM University of Applied Sciences

## FOM Hochschule

## iaim

FOM. Die Hochschule. Für Berufstätige.

Die mit bundesweit über 50.000 Studierenden größte private Hochschule Deutschlands führt seit 1993 Studiengänge für Berufstätige durch, die einen staatlich und international anerkannten Hochschulabschluss (Bachelor/Master) erlangen wollen.

Die FOM ist der anwendungsorientierten Forschung verpflichtet und verfolgt das Ziel, adaptionsfähige Lösungen für betriebliche bzw. wirtschaftsnahe oder gesellschaftliche Problemstellungen zu generieren. Dabei spielt die Verzahnung von Forschung und Lehre eine große Rolle: Kongruent zu den Masterprogrammen sind Institute und KompetenzCentren gegründet worden. Sie geben der Hochschule ein fachliches Profil und eröffnen sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als auch engagierten Studierenden die Gelegenheit, sich aktiv in den Forschungsdiskurs einzubringen.

Weitere Informationen finden Sie unter [fom.de](http://fom.de)

Das iaim ist ein Forschungsinstitut für die Bereiche Technologie, Ingenieurwissenschaften sowie Industrie- und Produktionsmanagement. Gemeinsam mit seinen Partnern erarbeitet es wissenschaftlich fundierte sowie anwendungsbezogene, innovative Lösungen – dazu zählen z. B.:

- die organisatorisch durchdachte Umsetzung von Industrie 4.0- und Smart Factory-Lösungen,
- die intelligente Vernetzung von Maschinen, Produkten, Infrastrukturen und Menschen in Wertschöpfungsketten und -netzwerken,
- die Einbindung additiver Fertigungsverfahren,
- die Gestaltung von Mensch-Maschine-Interaktionen bei der Nutzung von Robotersystemen
- sowie die Förderung einer zielgruppengerechten Qualifizierung im Bereich zukunftsorientierter Ingenieurwissenschaften.

Im Rahmen von Konferenzbeiträgen, wissenschaftlichen Publikationen, Forschungsvorhaben und Verbundprojekten unterstützt das iaim die Integration technologischer und technologiegetriebener Neuerungen in der unternehmerischen Praxis sowie der Bildung. Gefördert wird auch die wissenschaftliche Weiterentwicklung von Hochschulangehörigen und Kooperationspartnern.

Weitere Informationen finden Sie unter [fom-iaim.de](http://fom-iaim.de)



Unter dem Titel »FOM forscht« gewähren Hochschullehrende der FOM Einblick in ihre Projekte. Besuchen Sie den Blog unter [fom-blog.de](http://fom-blog.de)