



**HOCHSCHULE  
SCHMALKALDEN**  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Tag der Forschung 2022**

Nachwuchswissenschaftler/innen  
präsentieren aktuelle Forschungsergebnisse

**HSM-Prints 1/2022**

Schriftenreihe der  
Hochschule Schmalkalden

Tagungsband der Hochschule Schmalkalden

Tag der Forschung 2022

Nachwuchswissenschaftler/innen  
präsentieren aktuelle Forschungsergebnisse

Schmalkalden 2022  
HSM-Prints 1/2022

HSM-Prints  
Die Schriftenreihe der Hochschule Schmalkalden  
Herausgeber: Hochschule Schmalkalden,  
Der Präsident  
ISSN 0949-1767

Layout und Satz: DeinSatz Marburg | mg

Produktion: André Mock  
Referat Hochschulkommunikation  
Hochschule Schmalkalden  
Blechhammer 9  
98574 Schmalkalden  
Tel.: +49 (0) 3683 / 688-1021  
Fax: +49 (0) 3683 / 688-1999

# INHALT

## **Ressourcenschutz als Rechtsproblem**

*Emma Huber, LL. M.* ..... 4

## **Personalisierte Medizintechnik – Entwicklung eines individualisierbaren Dentalreinigungssystems**

*Lena Schneider, M. Eng.; Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul; Dr. Stefan Stübinger;  
Johannes Ullrich, M. Eng.; Madlen Himmel-Saar, M. Eng.* ..... 9

## **Additive Herstellung leitfähiger Strukturen auf Basis niedrigschmelzender Metalle mittels FDM-Verfahren**

*Joshua Voll, M. Eng.; Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth* ..... 15

## **Additiv gefertigte Werkzeuge für den Einsatz in der Extrusion**

*Samuel Werner, M. Eng.; Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth* ..... 23

## **Predictive Maintenance for Optical Amplifiers**

*Dominic Schneider, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Maria Schweigel; Dr. sc. techn. Lutz Rapp* ..... 29

## **Modellagnostische Erklärungen zur Qualitätsprognose im Kunststoffspritzgießprozess**

*Norbert Greifzu, M. Sc.; Manuel Schneider, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Andreas Wenzel* ..... 35

# RESSOURCENSCHUTZ ALS RECHTSPROBLEM

Emma Huber, LL. M.

## 1 Einleitung

Die drastische Entwicklung des Klimas kann von jedem Lebewesen des Planeten Erde beobachtet werden. Zu Beginn waren es kleine Rodungen des Regenwaldes, die sich mittlerweile zu extensiven Palmöl-Plantagen entwickelt haben und so den natürlichen Regenwald zu großen Teilen verdrängen. Zwar sieht auch eine solche Plantage auf den ersten Blick grün und lebendig aus, doch auf den zweiten Blick wird jedoch deutlich, dass es hier kein Leben gibt. Der Regenwald bietet vielen Tieren wie bspw. dem Orang-Utan Lebensraum und Zuflucht in seinen Baumkronen und liefert zusätzlich wichtige Nahrungsgrundlagen. Der natürliche Lebensraum in Form des Regenwaldes kann nicht durch eine Anlage zur Herstellung von Palmöl ersetzt werden. [1]

Nicht nur für die im Dschungel heimischen Lebewesen hat eine solche Rodung katastrophale Folgen. Wälder beeinflussen das Klima auf globaler Ebene. Neben den Weltmeeren speichern auch Wälder einen großen Teil der Treibhausgase. Werden diese zerstört, geht deren Funktion als Kohlenstoffsenke verloren. Der gespeicherte Kohlenstoff wird durch die Rodung freigesetzt und in Form von Treibhausgasen in die Atmosphäre entlassen, was eine Erwärmung des Klimas zur Folge hat. [2]

Die Folgen für den Klimawandel sind immens und führen auf lange Sicht dazu, dass die Klimaschutzziele nicht erreicht werden können. An diesem Beispiel wird also deutlich, was der Verlust von natürlichen Ressourcen bewirken kann. Die Relevanz der Thematik ist aktueller denn je und bedarf intensiver Betrachtung.

Spricht man von Klimaschutz, kommt man nicht mehr umhin, auch den Ressourcenschutz zu betrachten. Beide fungieren als Einheit, sodass das eine nicht auf Kosten des anderen erfüllt werden darf. [3]

Dessen war sich die Europäische Union bereits 2001 bewusst und formulierte im Rahmen des Grünbuchs zur integrierten Produktpolitik die ersten ressourcenbezogenen Handlungsfelder. [4] Als eigenständiges Thema wurde der Ressourcenschutz 2005 innerhalb der thematischen Strategie für nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen aufgegriffen. [5] Im Jahr 2008 wurde der Ressourcenschutz zum eigenständigen politischen Ziel, welches durch den Aktionsplan für Nachhaltigkeit in Produktion und Verbrauch für eine nachhaltige Industriepolitik gefördert worden ist. [6]

Eine umfassende Definition darüber, was zu den natürlichen Ressourcen gehört, wurde vom Umweltbundesamt aufgestellt. Alle Bestandteile der Natur gehören demnach zu den natürlichen Ressourcen. Konkret sind das alle biotischen sowie abiotischen Rohstoffe, der physische Raum, die Fläche, die Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), die strömenden Ressourcen und alle lebenden Organismen. [7]

Die natürlichen Ressourcen des Planeten sind endlich, was einen zukunftsfähigen und besseren Umgang mit ihnen erfordert. Der Earth Overshoot Day (EOD) der vergangenen Jahrzehnte zeigt eine deutliche Verschlechterung im Umgang mit den natürlichen Ressourcen. Der EOD bezeichnet den Tag des Jahres, an dem die Nachfrage der Menschheit nach der Natur die biologische Regenerationskapazität der Erde übersteigt. 2021 wurde dieser Tag bereits am 29. Juli erreicht. [8]

Erstmals im Jahr 1970 überschritt die Menschheit die verfügbare Biokapazität des Planeten. Seit diesem „Break-Even-Point“ hat es die Menschheit nicht wieder geschafft, den Ressourcenverbrauch zu verringern. Der EOD tritt von Jahr zu Jahr früher

ein, was eine Steigerung der benötigten Ressourcen bedeutet, die der Planet jedoch nicht herstellen kann. [9]

Würde die gesamte Weltbevölkerung leben wie die USA oder wie Deutschland, würden fünf bzw. knapp drei Erden benötigt, um den Bedarf an Ressourcen zu decken. Der globale ökologische Fußabdruck würde hingegen 1,7 Erden zur Befriedigung des Ressourcenbedarfs bedeuten. [10],[9]

## 2 Status-quo Betrachtung

Der Bundesregierung stehen diverse Möglichkeiten zur Implementierung geeigneter Instrumentarien zur Verfügung. Besondere Bedeutung werden den direkt und indirekt wirkenden Instrumentarien zuteil. Ökonomische Instrumente gehören zu den indirekt wirkenden, da diese ihre Wirkung durch bestimmte Anreizsysteme entfalten. [12] Regulative Steuerungsinstrumente finden sich hingegen in Geboten und Verboten wieder, welche durch Gesetze, Verordnungen, Satzungen, etc. direkte Wirkung haben. [13]

Beispiele für Anreizsysteme sind grundsätzlich finanzieller Art, welche in öffentliche Einnahmen und Ausgaben unterteilt werden können. Besonders im Bereich der Umwelt- bzw. Ökosteuer sowie dem Zertifikatehandel werden finanzielle Anreize durch Strafzahlungen bei nicht nachhaltiger Wirtschaftsweise gesetzt. Steuererleichterungen hingegen können dann greifen, wenn besonders nachhaltig gewirtschaftet wird. Auch Förderprogramme können hier von umweltfreundlichen Unternehmen wahrgenommen werden. [14],[15]

Viele der politischen Instrumentarien entfalten ihre Wirkung erst durch ihre Eingliederung in das deutsche Rechtssystem. Durch die Implementierung in geltendes Recht haben diese Instrumentarien einen direkt wirkenden Charakter. Anders als die Anreizsysteme werden sie jedoch als Zwang wahrgenommen. [13]

Ein Blick auf den bisherigen Stand der gesetzlichen Grundlagen in Bezug auf den Ressourcen-

Zur Lösung dieses Problems bedarf es eines übergeordneten Ressourcenschutzes, welcher als sparsamer und effizienter Umgang mit endlichen Ressourcen verstanden werden kann. [11] Um diesen Ansprüchen an den Umgang mit natürlichen Ressourcen gerecht zu werden, müssen konkrete Maßnahmen zum Tragen kommen, sodass eine Erreichung dessen, was von verschiedenen Seiten und vor allem vom Planeten gefordert wird, möglich wird.

schutz lässt deutliche Lücken erkennen. Auf europäischer Ebene werden sowohl in der Charta der Grundrechte (Art. 37 GRCh) wie auch im Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (Art. 11 AEUV) umweltpolitische Bestrebungen verdeutlicht, welche ein hohes Umweltschutzniveau und die Verbesserung der Umweltqualität zum Ziel haben. Zusätzlich wird der Umweltschutz als zentrales Ziel des EU-Vertrages (Art. 3 EUV) bezeichnet.

Auf nationaler Ebene verdeutlicht besonders Art. 20a GG die Relevanz des Ressourcenschutzes. Dieser verpflichtet den Staat zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen. Um diese Schutzpflicht in gesetzlichen Regelungen zu verankern, bedarf es jedoch wissenschaftlicher Erkenntnisse, um zu entscheiden, welche Bereiche unter die Schutzwürdigkeit fallen und welcher Umfang für den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen notwendig ist. [16]

Bislang haben vereinzelte ressourcenschutzrechtliche Ausprägungen im Umweltrecht ihren Platz. Beispielsweise im Planungsrecht findet der Ressourcenschutz in geringem Ausmaß Anwendung. Der nachhaltige Schutz von Ressourcen wird gem. § 2 (2) Nr. 1 ROG festgehalten. Im Bergbau werden große Mengen Ressourcen benötigt, jedoch schränkt das Bundesbergbaugesetz die Schonung natürlicher Ressourcen dahingehend ein, dass die Rohstoffversorgung gem. § 48 (1) S. 2 BbergG gesichert werden soll. Durch diese Hervorhebung der Rohstoffsicherung kann der Ressourcenschutz nur in geringem Umfang zum Tragen kommen.

Genehmigungsbedürftige Anlagen i. S. d. Bundes-Immissionsschutzgesetzes sollen gem. § 5 (1) im Rahmen des Umweltschutzes errichtet und betrieben werden. Auch sollen schädliche Umwelteinwirkungen nach § 1 (1) BImSchG vorgebeugt werden. Dass hierfür ein sparsamer und effizienter Einsatz von Ressourcen notwendig wäre, bleibt jedoch außer Acht. [17]

Deutlich wird die periphere Implementierung des Ressourcenschutzes in den o.g. Gesetzen. Das Klimaschutzgesetz wurde gem. § 1 mit dem Ziel erlassen, die Erfüllung sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten. Konkrete Maßnahmenvorschläge für eben jene Erreichung bleiben allerdings aus. Es wird lediglich

### 3 (Weiter-)Entwicklung

Zur Schaffung eines umfänglichen Rechtsrahmens kann sich konkreter (Weiter-)Entwicklungsmöglichkeiten bedient werden. Denkbare Optionen sind hier die Lückenfüllung bereits bestehender Gesetze sowie die Etablierung eines übergreifenden Stammgesetzes in Form eines Ressourcenschutzgesetzes.

Bereits das 2012 von der Bundesregierung beschlossene Ressourceneffizienzprogramm (Prog-Ress) hat unter anderem die Weiterentwicklung des deutschen Ressourcenschutzes zum Inhalt. [19],[20] In diesem Sinne sollen keine neuen Kodifikationen geschaffen, sondern Ressourcenschutzgedanken in bereits bestehenden Bestimmungen konkretisiert und weiterentwickelt werden. Einen wichtigen Ansatz bietet das Planungsrecht. Das Baurecht ist das rohstoffintensivste Gewerbe, [21] weshalb eine genaue Betrachtung des Ressourcenschutzes in diesem Gebiet erforderlich ist. Hierfür bieten sich verschiedene Ansatzpunkte.

Die Raumordnung hat die strukturelle Entwicklung und Gestaltung eines Gebietes zum Inhalt, weshalb es ein bedeutsames Instrument zur Integration verschiedener Umweltbelange darstellt. Besonders eignet sich hierfür das Raumordnungsgesetz, welches ressourcenschutzbezogene Regelungen in

zur Einhaltung und Erfüllung der Ziele, welche auf Grundlage des Übereinkommens von Paris beschlossen wurden, aufgerufen. [18]

Durch die dargestellte Betrachtung wird deutlich, dass es an einem speziellen Gesetz zum Schutz der natürlichen Ressourcen fehlt. Umweltschutz und Klimaschutz sind wichtige Aspekte in der Bekämpfung des Klimawandels. Fehlt es jedoch an speziellen Regelungen bei der Verwendung natürlicher Ressourcen, können die unterschiedlichen und dringlichen Bereiche, die für einen allumfassenden Klima- und Umweltschutz notwendig sind, nicht gewährleistet werden. Ein übergreifendes Ressourcenschutzrecht ist zur Erreichung der Klimaschutzziele folglich unabdingbar.

die Planungsgrundsätze implementieren sollte. Der Schutzaspekt i. S. d. § 2 (2) Nr. 1 ROG formuliert, dass „Ressourcen nachhaltig zu schützen“ sind. Konkretisiert wird dies jedoch lediglich in Bezug auf die Rohstoffsicherung nach § 2 (2) Nr. 4 S. 4 ROG. Vor allem mit Blick auf den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen gem. Art. 20a GG wird ein großer Spielraum und eine wichtige Funktion für das ROG gewährt. Um der Relevanz des Ressourcenschutzes jedoch Rechnung zu tragen, sollte die Rohstoffsicherung relativiert werden, indem die Sicherung, Aufsuchung und Gewinnung von Rohstoffen mit den ressourcenschutzbezogenen Belangen der Sparsamkeit sowie Schonung kombiniert werden, sodass diese ausreichend Berücksichtigung finden. [21]

Auch das Bauplanungsrecht hat einen enormen Einfluss auf den Ressourcenschutz. Mittels bauplanungsrechtlicher Instrumente wird über das Ob und das Wie der baulichen Nutzung von Grund und Boden entschieden. Positiv hervorzuheben ist, dass die wichtigen Umweltmedien Wasser, Luft und Boden, sowie Fläche und Biodiversität bereits in § 1 (6) BauGB als zu berücksichtigende Belange genannt werden. Rohstoffe bleiben jedoch unerwähnt. Um den Ressourcenschutzgedanken zu verstärken, wäre hier eine ausdrückliche Nennung

des sparsamen und effizienten Umgangs mit Rohstoffen notwendig.

Durch die Lückenfüllung jedes einzelnen Gesetzes mit Hinblick auf den Ressourcenschutzgedanken müssten sehr viele Gesetze geändert bzw. angepasst und erweitert werden. Eine weitere Option bietet die Schaffung eines eigenen Ressourcenschutzgesetzes. Ein solches Stammgesetz würde fachübergreifend für alle Rechtsgebiete geltende Regelungen enthalten, welche allein dem Schutz der natürlichen Ressourcen gewidmet sind.

Durch ein eigenes Stammgesetz kann dem Ressourcenschutz die Bedeutung zuteilwerden, die auf Grund seiner Relevanz angemessen ist. Eine Regelung übergeordneter Aspekte wäre hier von großer Bedeutung. Definitionen, Ziele sowie

Grundsätze des Ressourcenschutzes sind in diesem Zusammenhang wesentlich. Auch Vertiefungen des Umweltrechts sind dabei denkbar, sodass detailliertere Angaben zu schutzwürdigen Medien gemacht werden können. Mögliche Abgrenzungsprobleme sowie Kollisionen mit dem bereits bestehenden Fachrecht könnten durch etwaige Klauseln oder abschließende Regelungen im jeweiligen Fachrecht ausgeräumt werden. Zweck eines solchen Gesetzes soll die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, die nachhaltige Nutzung und der Schutz der natürlichen Ressourcen sein. Durch abstrakt-generelle Formulierungen der Vorschriften wird die Komplexität des Ressourcenschutzes deutlich und die umfassende Rahmensetzung kann gewährleistet werden. [21]

#### 4 Fazit und Ausblick

Gäbe es keine Unternehmen und Organisationen, die aus eigenem Antrieb gesellschaftliches Verantwortungsbewusstsein haben, würde der Ressourcenschutz kaum berücksichtigt werden. Nachhaltiger Ressourcenschutz muss also über die Unternehmensebene hinaus im deutschen Gesamtsystem verankert werden.

Zwar stehen der deutschen Umweltpolitik diverse Instrumentarien zur Verfügung, jedoch zielen diese nicht in ausreichender Weise auf verpflichtende Vorgaben ab. Es kann deutlich beobachtet werden, dass die wenigen Regelungen, die es in Bezug auf den Ressourcenschutz gibt, nicht ausreichen, um eine nachhaltige Entwicklung im Bereich des Ressourcenschutzes zu erreichen.

Einige der bereits bestehenden Regelungen bieten großes Potenzial zur Entwicklung eines ein-

heitlichen Regelungskonzeptes, um so den Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung sowie einer ressourcenschützenden Wirtschaftsweise zu ermöglichen. Dieses Potenzial könnte durch eine Lückenfüllung genutzt werden und so zu einer nachhaltigen Ressourcennutzung beitragen. Auch könnten diese Lücken durch ein übergeordnetes Stammgesetz geschlossen werden, sodass es lediglich eines neuen Gesetzes und nicht vieler einzelner Gesetzesänderungen bedarf.

Die Relevanz der Thematik nimmt stetig zu. Dass sich etwas an der bestehenden Gesetzeslage ändern muss, ist nicht zu bestreiten. Ob es auf dem Wege einer Lückenfüllung oder durch ein allgemeingültiges Ressourcenschutzgesetz erfolgt, ist weniger bedeutend als die Tatsache, dass es ohne Änderungen nicht geht.

## Literatur

- [1] WWF Deutschland (Hrsg.), Pongo pygmaeus mit seinem Latein am Ende, 2009.
- [2] WWF Schweiz/WWF Deutschland (Hrsg.), Die Wälder der Welt – Ein Zustandsbericht, 2. Auflage 2011.
- [3] Sanden/Schomerus/Schulze/Wegener, in: Umweltbundesamt (Hrsg.), Entwicklung eines Regelungskonzepts für ein Ressourcenschutzrecht des Bundes, 2012.
- [4] Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), KOM (2001) 68 endg., Grünbuch zur integrierten Produktpolitik, 2001.
- [5] Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), KOM (2005) 670 endg., Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen, 2005.
- [6] Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), KOM (2008) 397 endg., Aktionsplan für Nachhaltigkeit in Produktion und Verbrauch und für eine nachhaltige Industriepolitik, 2008.
- [7] Umweltbundesamt (Hrsg.), Die Nutzung natürlicher Ressourcen, 2018.
- [8] Lin/Wambersie/Wackernagel, Global Footprint Network (Hrsg.), Nowcasting the World's Footprint & Biocapacity for 2021, 2021.
- [9] Global Footprint Network (Hrsg.), National Footprint and Biocapacity Accounts, 2021, URL 1: <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?type=earth&cn=5001>.
- [10] Earth Overshoot Day (Hrsg.), How many earths?, 2021, URL 2: <https://www.overshootday.org/how-many-earths-or-countries-do-we-need/>.
- [11] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (Hrsg.), Ressourcenschutz ist mehr als Rohstoffeffizienz, 2015.
- [12] Stehling, Ökonomische Instrumente der Umweltpolitik zur Reduzierung stofflicher Emissionen, 1999.
- [13] Umweltbundesamt (Hrsg.), Rechtliche Instrumente zur Förderung des nachhaltigen Konsums, 2012
- [14] Sturm/Vogt, Umweltökonomik, 2. Auflage, 2018.
- [15] Umweltbundesamt (Hrsg.), Modellversuch Zertifikatehandel – Realitätsnahes Planspiel zur Erprobung eines überregionalen Handelssystems mit Flächenausweisungszertifikaten für eine begrenzte Anzahl ausgewählter Kommunen, 2019.
- [16] Fehling/Schings, § 9. Zulassung von Erzeugungsanlagen, in: Schneider/Theobald (Hrsg.), Recht der Energiewirtschaft, 5. Auflage 2021.
- [17] Roßnagel/Hentschel, Umweltbundesamt (Hrsg.), Rechtliche Instrumente des allgemeinen Ressourcenschutzes, 2017.
- [18] Wickel, Das Bundes-Klimaschutzgesetz und seine rechtlichen Auswirkungen, ZUR 2021, 332ff.
- [19] Herrmann/Sanden/Schomerus/Schulze, Ressourcenschutzrecht – Ziele, Herausforderungen, Regelungsvorschläge, ZUR 2012, 523ff.
- [20] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess), 2. Auflage 2015.
- [21] Umweltbundesamt (Hrsg.), Positionspapier Ressourcenschutzrecht, 2013.

# PERSONALISIERTE MEDIZINTECHNIK – ENTWICKLUNG EINES INDIVIDUALISIERBAREN DENTALREINIGUNGSSYSTEMS

Lena Schneider, M. Eng.<sup>1</sup>; Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul<sup>1</sup>; Dr. Stefan Stübinger; Johannes Ullrich, M. Eng.<sup>1</sup>;  
Madlen Himmel-Saar, M. Eng.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Angewandte Kunststofftechnik (AKT)/Hochschule Schmalkalden, Deutschland

## Zusammenfassung

Durchschnittlich verbringen 48 % der Menschen in Deutschland fünf bis zehn Minuten pro Tag mit dem Zähneputzen [URL14]. Bedingt durch Zahnfehlstellungen steht jeder Dritte vor dem Problem, dass die Reinigungswirkung mit konventionellen Handzahnbürsten nicht zufriedenstellend ist [URL22, URL20]. Um die Putzwirkung mit der Zahnbürste bei schwer erreichbaren Zähnen zu verbessern, wurde in diesem Entwicklungsprojekt eine neuartige Handzahnbürste entwickelt, mit dem Ziel die eingangs aufgeführten Problemstellung zu beheben. Hierzu wurde das Team der Angewandte Kunststofftechnik an der Hochschule Schmalkalden von der Universität Basel beauftragt ein entsprechendes individualisierbares Dentalreinigungssystem zu entwickeln.

Damit die Problemstellung beim Zähneputzen ersichtlich wird, wird in **Abbildung 1** durch ein Gebissmodell die Zahnfehlstellung – Engstand – dargestellt.

Der Zahnarzt untersucht die Zähne des Patienten und stellt fest, dass trotz vermeidlich richtigem sowie regelmäßigen Putzen die Reinigungswirkung mit einer konventionellen Zahnbürste nicht ausreichend ist. Er empfiehlt dem Patienten auf Grund seiner Zahnfehlstellungen und der mangelhaften Putzwirkung eine individuell anpassbare Zahnbürste, um die Reinigungswirkung zu verbessern.

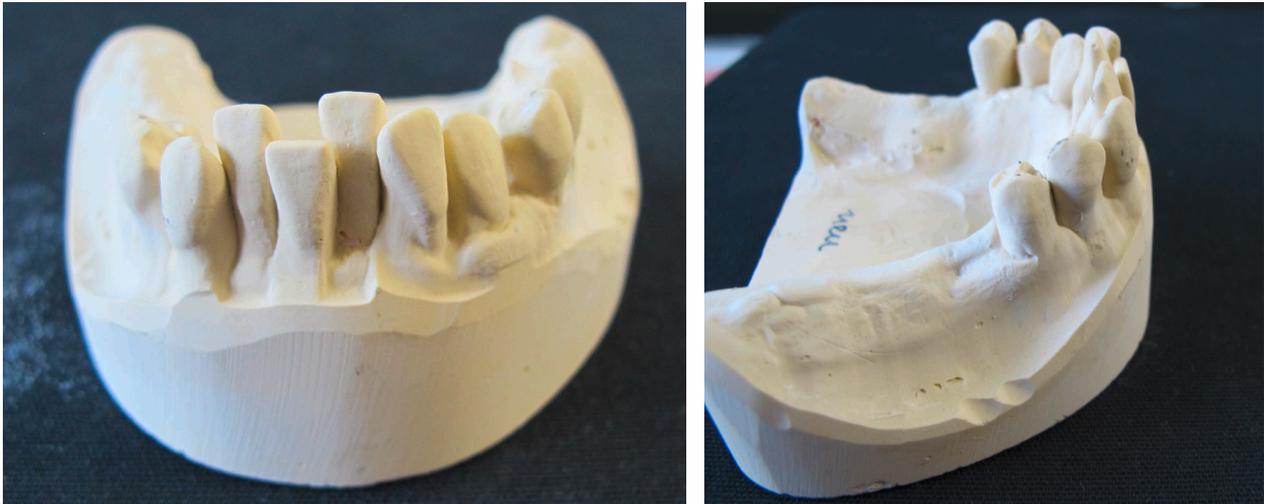
Der Grundkörper sowie die Einzelteile der Zahnbürste werden spritzgegossen. Anschließend erfolgt eine patientenindividuelle Anpassung beim Dentalhygieniker. Hierzu zählen die Auswahl und Kombination der Reinigungselemente sowie die Anpassung des Halsbereiches. Der Dentalhygieniker beachtet dabei die Vorgaben des Arztes bzw. die Anforderungen des Patienten. Nach der Übergabe der Zahnbürste obliegt es dem Patienten, durch eine Einstellung im Kopfbereich, seine schwer erreichbaren Zähne ohne Einschränkungen zu putzen.

Die Eignung der Konstruktion wurde im Projekt anhand von Prototypen erfolgreich nachgewiesen und zum Patent angemeldet.

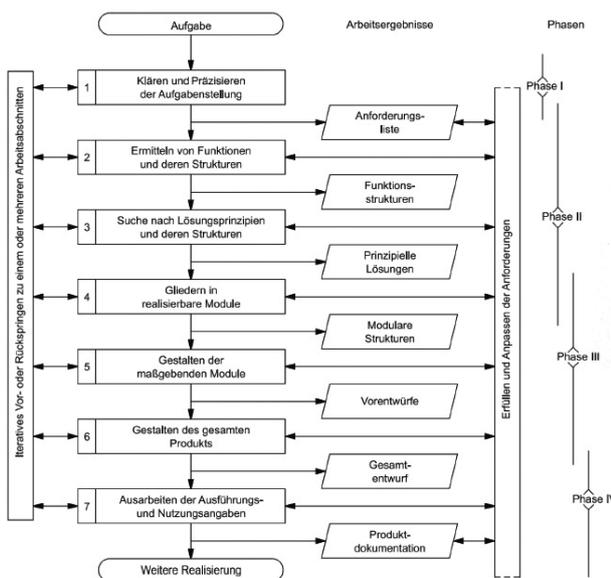
## Produktentwicklung des individualisierbaren Dentalreinigungssystems

Die nachfolgend beschriebene Produktentwicklung des Dentalreinigungssystems wird gemäß der VDI 2222 durchgeführt, welche den Entwicklungsprozess in vier Phasen „Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten“ untergliedert. Die Phasen zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffprodukten wird in **Abbildung 2** dargestellt.

In der Planungsphase wird zuerst die Aufgabe definiert und der Entwicklungsauftrag festgelegt. Zu der Konzeptphase zählt die Ausarbeitung der Anforderungsliste, Nutzwertanalyse sowie das Erstellen der Gesamtfunktionen, welche in Teilfunktionen untergliedert werden. Zusätzlich werden in dieser Phase unterschiedliche Konzeptvarianten



**Abbildung 1: Gebissmodell Zahnfehlstellung – Engstand**



**Abbildung 2: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2222 [Bri11]**

erarbeitet und bewertet. Daraufhin folgt die Entwurfsphase mit der Gestaltung eines maßstäblichen Entwurfes. In dieser Phase werden Iterationsschleifen zur Optimierung des Entwurfes durchgeführt. In der Ausarbeitungsphase wird spezielle auf die Funktionsfähigkeit der Einzelteile eingegangen. Sollten diese eine Optimierung benötigen wird eine letzte Anpassung durchgeführt und daraufhin die benötigten Dokumente wie Stückliste und Zeichnungen erstellt. Zuletzt wird ein Prototyp

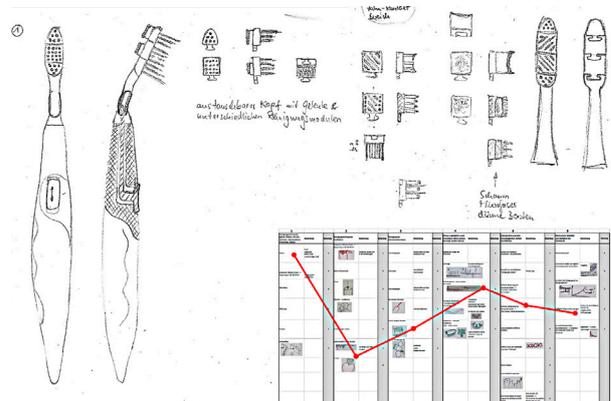
hergestellt und geprüft [Bri11]. Die Vorgehensweise zur Produktionsentwicklung des Dentalreinigungssystems richtet sich nach der zuvor beschriebenen VDI 2222.

Zu Beginn des Projektes wird in Phase I die Aufgabe präzisiert. In Phase II wird ein Lasten- und Pflichtenheft erstellt und vom Projektteam verabschiedet. Hier werden die Anforderungen an das Dentalreinigungssystem in einer Anforderungsliste festgehalten. Diese gliedert sich in allgemeine, mechanische, thermische, chemische Produktspezifikationen, wie z. B. die Größe des Zahnbürstenkopfes, Griffhöhe, Ergonomie der Zahnbürste, Gebrauchstemperatur, Anpressdruck beim Zähneputzen etc. Ebenfalls werden auf die Produktspezifikationen des Werkstoffes, die Normen sowie Richtlinien, die Verpackung und die Patientensicht in der Anforderungsliste eingegangen. Ausgehend von der Patientensicht ist es wichtig, das Zähneputzen so einfach und effektiv wie möglich zu gestalten. Des Weiteren soll ein angenehmes Putzgefühl erzeugt werden. Nachdem die Spezifikationen festgelegt sind, folgt die Erstellung einer Funktionsstruktur und die Durchführung einer Nutzwertanalyse, ebenfalls in Phase II. Parallel dazu führte das Projektteam vergleichende Feldversuche mit handelsüblichen Zahnbürsten durch. Nach diesen Versuchen wird ein Brainstorming mit den zuvor festgelegten Hauptkriterien, die sich

aus der Nutzwertanalyse ergeben haben, durchgeführt. Auf Grundlage des Brainstormings wird ein Morphologischer Kasten erstellt. Hier werden 6 Hauptkriterien definiert, welche im Folgenden aufgelistet sind:

1. Reinigungswirkung der glatten Flächen von Eck-, Schneide-, Backenzähnen
2. Reinigungswirkung der Kauflächen
3. Reinigungswirkung der Zahnzwischenräume
4. Schwer zugängliche sowie erreichbare Zähne müssen gereinigt werden können
5. Individualisierung beim Dentalhygieniker einfach durchführbar
6. Mechanische Stabilität und Steifigkeit der Zahnbürste

Den Hauptkriterien werden unterschiedliche Lösungsansätze zugeordnet, um im späteren anhand dieser Ansätze Umsetzungsideen zu entwickeln. Aus der durchgeführten Bewertung geht die in **Abbildung 3** dargestellte Variante 1 als Favorit hervor. Zu erkennen ist ein Stecksystem im Kopfbereich. Durch dieses Stecksystem, besteht die Möglich-



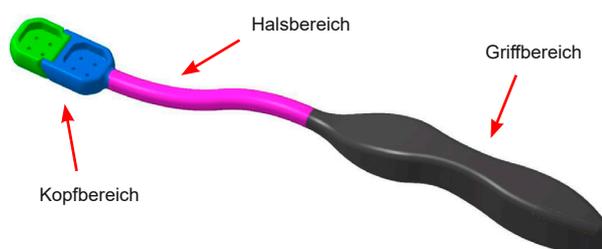
**Abbildung 3: Favorisierte Variante für die konstruktive Umsetzung der Zahnbürste**

keit unterschiedliche Elemente zu entwickeln und deren Kombination dem Patienten anzupassen. Zusätzlich befinden sich auf der Rückseite des Kopfes ein Mikrofaserschwamm, der bei der Endreinigung der Zähne zum Einsatz kommen kann. Durch einen Schiebemechanismus ist der Halsbereich abwinkelbar.

Nachdem Phase II abgeschlossen ist, wird in Phase III mit der Konstruktion des Dentalreinigungssystems begonnen.

## Ergebnisdarstellung der entwickelten Zahnbürste

In der konstruktiven Umsetzung entwickelte das Projektteam eine Zahnbürste, welche mit unterschiedlichsten Borstenkonfigurationen ausgestattet werden kann. Des Weiteren ist es möglich den Winkel des Kopfbereichs manuell während des Gebrauchs einzustellen. Der Halsbereich lässt sich

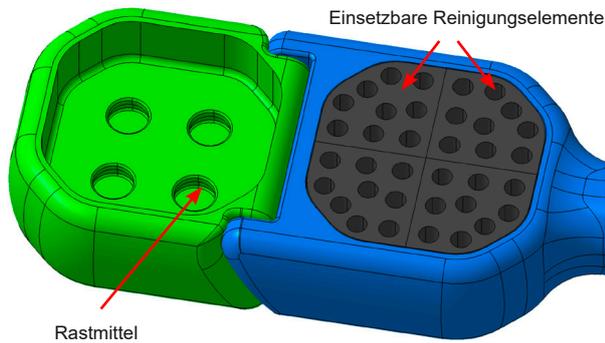


**Abbildung 4: Konstruktive Umsetzung der Zahnbürste, der Übersicht halber dargestellt ohne Borstenpaket**

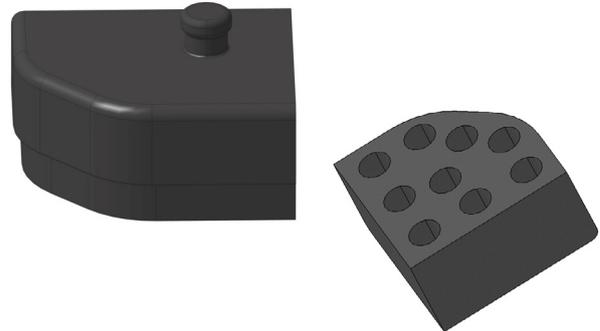
mittels Warmumformung an die Zahngeometrie des Nutzers anpassen. Somit wird garantiert, dass die Zahnbürste an den Patienten individuell angepasst werden kann (siehe **Abbildung 4**).

Im **Bürstenkopf** lassen sich Reinigungselemente mittels unlösbarer Ringschnappverbindung fixieren (siehe **Abbildung 5, Abbildung 6**). Durch den symmetrischen Aufbau des Bürstenkopfes lässt sich jedes Reinigungselement an einen der acht vorgesehenen Steckplätze integrieren.

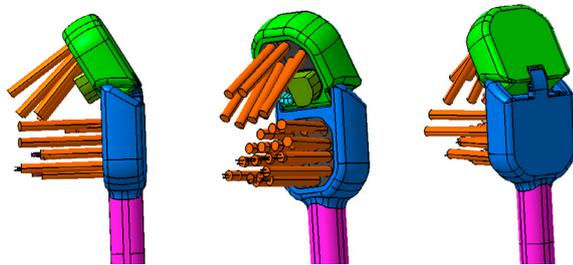
Der Bürstenkopf besteht aus zwei Teilen, die sich zueinander abwinkel lassen. Während des Putzens soll der Vorderteil des Kopfes durch den eingebrachten Rastmechanismus fixiert bleiben, sodass keine Bewegung stattfinden kann (siehe **Abbildung 7**). Die Winkeleinstellung des Kopfes erfolgt manuell. Somit können unterschied-



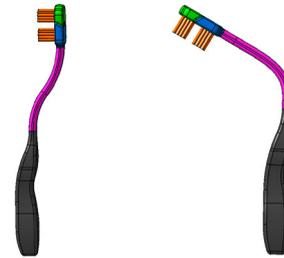
**Abbildung 5: Konstruktive Umsetzung des Kopfbereiches**



**Abbildung 6: Reinigungselemente – Rück- und Vorderseite**



**Abbildung 7: Abgewinkelter Bürstenkopf**

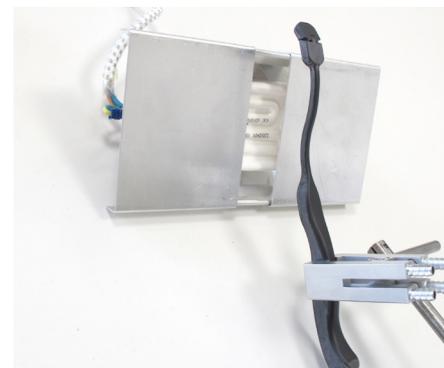


**Abbildung 8: CAD-Darstellung des verformbaren Halsbereiches**

liche Winkeleinstellungen am Kopf vorgenommen werden. Um den größtmöglichen Bedienerkomfort zu gewährleisten, erfolgt die Winkeleinstellung abhängig vom Reinigungserlebnis durch den Endnutzer.

In den neun Vertiefungen des Reinigungselementes werden verschieden kombinierte Borstentypen oder andere Putzelemente fest verankert gefügt. Die richtige Auswahl der Borstentypen erfolgt durch den Dentalhygieniker. Um die Teilevielfalt in der späteren Serienproduktion gering zu halten, sind die Reinigungselemente identisch aufgebaut. Die Elemente unterscheiden sich lediglich in ihrer Bestückung. Die Grundkörper können in ihrer Position im Bürstenkopf nach Belieben bzw. Funktionalität ausgewechselt werden.

**Der Hals der Zahnbürste** soll durch Warmumformung in die gewünschte Position gebracht werden. **Abbildung 8** veranschaulicht ein mögliches Ergebnis der Warmumformung des Halsbereiches. Bei den nachfolgend durchgeführten Versuchen handelt es sich um prototypische Versuche



**Abbildung 9: Versuchsaufbau mit IR-Strahler**

gemäß der Phase IV. Die Umformung des Halsbereiches erfolgt durch den Dentalhygieniker und ist nach der Übergabe an den Patienten nicht mehr erforderlich bzw. veränderbar.

Um den Halsbereich umzuformen wird die Prototypen-Zahnbürste mittels Erwärmung durch IR-Strahlung manuell umformbar (siehe **Abbildung 9**). Nach dem Abkühlen erstarrt der warmumgeformte Halsbereich in der gewünschten Position (siehe

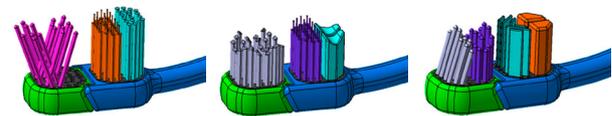
**Abbildung 10).** Der Halsbereich der Prototypen wird in unterschiedliche Positionen gebracht. Für den Machbarkeitsnachweis wird der Hals der Zahnbürste in sich verdreht, gesteckt und gebogen.

Die **Putzversuche** an den Prototypen zeigen, dass sich Auswahl und Kombination der Reinigungselemente erheblich auf das Reinigungsergebnis auswirken. Für die Zusammenstellung der Borstenanordnung werden Kombinationsmatrizen erstellt und analysiert. Für die Putzversuche werden drei verschiedene Borstenanordnungen konfiguriert (siehe **Abbildung 11**). In der ersten Borstenkombination (Variante 1) befinden sich an der Spitze der Zahnbürste X-förmige Borsten. Die nächsten zwei Reinigungselemente werden frei gelassen. Im hinteren Teil des Bürstenkopfes von Variante 1 sind gerade Borsten mit und ohne Interdentalborsten befestigt. Bei der zweiten Variante befindet sich im vorderen Bereich des Zahnbürstenkopfes unterschiedlich lange Borsten, die zur Mitte hin länger werden. Der hintere Teil der zweiten Variante ist ebenfalls mit Interdentalborsten und Standardborsten ausgestattet. Zusätzlich sind hier Schwämme integriert. Diese weisen eine Rundung auf und passen sich somit optimal an die Form der Zähne an. In der letzten Borstenkombination (Variante 3) werden abgewinkelte sowie gerade Borsten realisiert. Im hinteren Bereich des Zahnbürstenkopfes sind mehrere Schichten von Lamellen in einer V-Form angeordnet. Zusätzlich befinden sich Schwämme mit einer ebenen Oberfläche auf der hinteren Position des Bürstenkopfes. Die patientenindividuelle Auswahl und Zusammenstellung der Reinigungselemente erfolgt durch den Dentalhygieniker.

Bei der Durchführung der Putzversuche werden Gebissmodelle mit unterschiedlichen Fehlstellungen verwendet. In der **Abbildung 12** wird beispielhaft ein verwendetes Gebissmodell dargestellt. Bei diesen Versuchen werden die verschiedenen Gebisse definiert mit drei unterschiedlichen Lebensmitteln verschmutzt. Bei den Putzversuchen



**Abbildung 10: Unterschiedliche Halsformen – links: Ausgangszustand des Prototypen**



**Abbildung 11: Angepasste Borstenanordnungen für verschiedene Bereiche der Zähne (Variante 1 bis 3 von rechts nach links)**



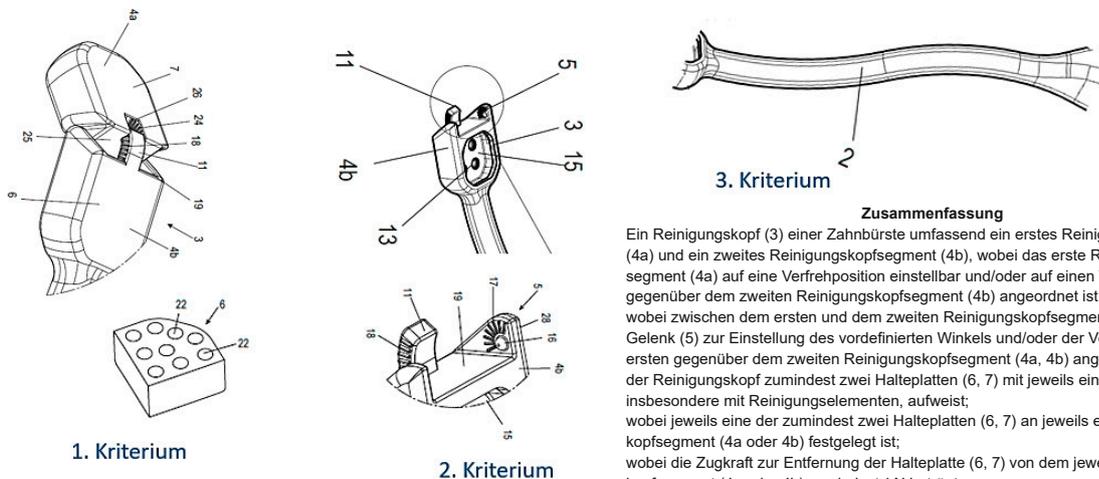
**Abbildung 12: Erstes Gebissmodell für die Putzversuche – Vorderansicht und Draufsicht**

werden Parameter wie Verschmutzungsgrad, Putzyklus sowie Bediener konstant gehalten, sodass vergleichbare Ergebnisse erreicht werden konnten. Die Ergebnisse der prozentualen Gewichtsreduktion bezogen auf das Gesamtgewicht der Verschmutzung liegen bei den getesteten Varianten im Bereich von 53 % bis zu einer maximalen Gewichtsreduktion von 69 %. Hierbei schneidet Variante 2 mit einer Gewichtsreduktion von 69 % am besten ab. Der Bediener beschreibt im Nachgang, dass die Handhabung von Variante 2 am angenehmsten ist.

## Fazit und Ausblick

Das Projektziel ein patientenindividualisierbares Dentalreinigungssystem zu entwickeln wurde erreicht. Die Individualisierung der Zahnbürste erfolgt durch Abwinkeln des Kopfes, Auswahl verschiedener Borstenkombinationen sowie durch Warmumformen des Halsbereiches. Die ersten Ergebnisse der Prototypen waren vielversprechend. Um die

Bauteilqualität sicherzustellen, sollten die Untersuchungen dennoch an der Zahnbürste, welche im Serienprozess hergestellt wird, wiederholt werden. Mit Abschluss des Projektes wurde das neu entwickelte individualisierbare Dentalreinigungssystem zum Patent angemeldet (siehe **Abbildung 13**).



**3. Kriterium**

**Zusammenfassung**

Ein Reinigungskopf (3) einer Zahnbürste umfassend ein erstes Reinigungskopfsegment (4a) und ein zweites Reinigungskopfsegment (4b), wobei das erste Reinigungskopfsegment (4a) auf eine Verdrehsposition einstellbar und/oder auf einen Winkel einstellbar gegenüber dem zweiten Reinigungskopfsegment (4b) angeordnet ist; wobei zwischen dem ersten und dem zweiten Reinigungskopfsegment (4a, 4b) ein Gelenk (5) zur Einstellung des vordefinierten Winkels und/oder der Verdrehposition des ersten gegenüber dem zweiten Reinigungskopfsegment (4a, 4b) angeordnet ist, wobei der Reinigungskopf zumindest zwei Halteplatten (6, 7) mit jeweils einer Reinigungsseite, insbesondere mit Reinigungselementen, aufweist; wobei jeweils eine der zumindest zwei Halteplatten (6, 7) an jeweils einem Reinigungskopfsegment (4a oder 4b) festgelegt ist; wobei die Zugkraft zur Entfernung der Halteplatte (6, 7) von dem jeweiligen Reinigungskopfsegment (4a oder 4b) zumindest 1 N beträgt.

**Abbildung 13: Patentanmeldung 21 182 098.0 in Europa: Reinigungskopf einer Zahnbürste, Anordnung und Handzahnbürste**

## Literatur

- [Bri11] Brinkmann, T.: Handbuch – Produktentwicklung mit Kunststoffen. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [URL14] N.N.: statista Research Department: Umfrage zur Zeitinvestition für die Zahnhygiene nach Geschlecht in Deutschland 2014 [online], 2014. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/449811/umfrage/umfrage-zurzeitinvestition-fuer-die-zahnhygiene-nach-geschlecht-in-deutschland/>, abgerufen am 08.03.2022.
- [URL20] N.N.: Uli Dönch: Schiefe Zähne – das muss nicht sein [online], 2020. URL: <https://www.muenchener-verein.de/ratgeber/zahngesundheit/schiefe-zaehne-zahnfehlstellung/>, abgerufen am 08.03.2022.
- [URL22] N.N.: Zahn- und Kieferfehlstellungen [online], 2022. URL: <https://www.smileart.at/praxis/zahn-und-kieferfehlstellungen>, abgerufen am 08.03.2022.

# ADDITIVE HERSTELLUNG LEITFÄHIGER STRUKTUREN AUF BASIS NIEDRIGSCHMELZENDER METALLE MITTELS FDM-VERFAHREN

Joshua Voll, M. Eng.<sup>1</sup>; Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Angewandte Kunststofftechnik (AKT)/Hochschule Schmalkalden, Deutschland

## 1 Einleitung

Mit einem Umsatz von circa 180 Mrd. € gehört die Elektroindustrie zu einem der umsatzstärksten Industriezweige Deutschlands [URL21a]. Der verstärkte globale Wettbewerb und kürzer werdende Produktlebenszyklen führen dabei zu einem zunehmenden Anteil komplexer, hochintegrierter elektrischer und elektronischer Baugruppen. Durch die Möglichkeit, kundenspezifische Änderungen in Prototypen zeitnah umzusetzen sowie der wirtschaftlichen Herstellung von Einzelteilen und geringen Losgrößen, gewinnen additive Fertigungsverfahren (AM) in diesem Bereich immer mehr an Bedeutung [Kai20]. Problematisch dabei ist, dass die aktuell am Markt verfügbaren AM-Technologien zur Herstellung elektrisch leitfähiger Strukturen sehr kostenintensiv sind und in vielen Fällen eine zeitaufwändige Nachbearbeitung durch beispielsweise Sintervorgänge benötigen [URL22a, DW17]. Des Weiteren ist das Umdrucken von leitfähigen Strukturen in Kunststoffbauteilen direkt im Herstellungsprozess nicht möglich.

Als kostengünstiges und effizientes Verfahren hat sich das additive Fertigungsverfahren Fused Deposition Modeling (FDM) etabliert. Bei diesem Verfahren wird ein vorgefertigter Kunststoffstrang (Filament), durch eine beheizte Düse extrudiert, dort aufgeschmolzen und anschließend anhand der eingelesenen Geometrie in X- und Y-Richtung, auf der Bauplattform abgelegt. Im Anschluss verfährt die Bauplattform um eine Schichtdicke in Z-Richtung und das Bauteil wird so sukzessive aufgebaut. Die Herstellung hochleitfähiger Struktu-

ren ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings, aufgrund nicht ausreichender Leitfähigkeiten der Filamente, noch nicht möglich. Zur Herstellung von stromleitfähigen Strukturen bedarf es einer Leitfähigkeit von mindestens  $10^4$  S/m. Um diese Leitfähigkeiten bei Kunststoffen zu erreichen, müssen diese mit leitfähigen Materialien ausgerüstet werden. Leitfähig ausgerüstete Kunststoffe stellen Zwei- oder Mehrkomponentensysteme dar, in denen nur der Füllstoff für die Ausbildung eines leitfähigen Netzwerks zuständig ist. Je ausgeprägter die Netzstruktur ist, desto höher ist auch die erreichbare Leitfähigkeit [Pfe09, Fra14]. Die Vorteile von leitfähig ausgerüsteten Thermoplasten liegen vor allem in der direkten Verarbeitung dieser Materialien zu einem komplexen elektrisch leitfähigen Bauteil.

In zahlreichen Veröffentlichungen wurden bereits verschiedene Mehrkomponentensysteme hinsichtlich ihrer maximalen Leitfähigkeit und Verarbeitbarkeit im Spritzgießverfahren untersucht. Die vielversprechendste Rezeptur konnte dabei auf Basis niedrigschmelzender Metalle in Verbindung mit Kupferfasern erzielt werden. Das dabei entstandene elektrisch leitfähige Kunststoffcompound (ELK) erreicht Leitfähigkeiten von  $8,7 \cdot 10^5$  S/m und eignet sich infolge dessen zur Herstellung stromleitfähiger Strukturen [Pfe09]. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit dieser Füllstoffkombination bieten sich diese ebenfalls zur Herstellen von elektrisch leitfähiger Bauteilen durch das FDM-Verfahren an.

Im Rahmen des Promotionsvorhabens sollen zwei Forschungsschwerpunkte untersucht werden:

zum einen materialseitig die Filamententwicklung und zum anderen verarbeitungsseitig die Analyse der Verarbeitungseigenschaften im Hinblick auf die zu erzielende Leitfähigkeit im Bauteil. Es soll ein leitfähiges Filament entstehen, welches mit konventionell verfügbaren FDM-Druckern verarbeitbar ist. Dabei liegt der Fokus auf der Maximierung der Leitfähigkeit. Zudem soll eine Analyse der Verarbeitungseigenschaften durchgeführt werden. Die Verarbeitung von ELKs auf Basis von niedrigschmelzenden Metallen mittels FDM-Verfahrens ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erforscht. Es gilt, im ersten Schritt das Verarbeitungsfenster zu

bestimmen und das FDM-Verfahren für die zu entwickelten, hochleitfähigen Compounds zu adaptieren. Darauf aufbauend soll die Wechselwirkung der sich ausbildenden leitfähigen Morphologie innerhalb des entstehenden Bauteils in Kontext zum FDM-Verfahren gesetzt werden. Insbesondere die Wechselwirkung der beispielsweise im Vergleich zur Verarbeitung im konventionellen Spritzgießverfahren deutlich unterschiedlichen strömungsmechanischen Zustände im FDM-Druck und der sich daraus ergebenden Einflüsse auf Morphologie und Leitfähigkeit sind von Interesse und bisher so nicht Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten gewesen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes, wie verlustfrei dieser elektrischen Strom leiten kann. Sie ist damit ein Maß für die Beweglichkeit von Ladungsträgern im Werkstoff. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit eines

Materials wird in S/m (Siemens pro Meter) angegeben. Vielfach findet ebenfalls der Kehrwert, der spezifische Widerstand in  $\Omega \cdot m$ , Verwendung. Für Leiter wird oftmals eine spezifische Leitfähigkeit von größer als  $10^4$  S/m gefordert [Har14, Pfe09, Fra14].

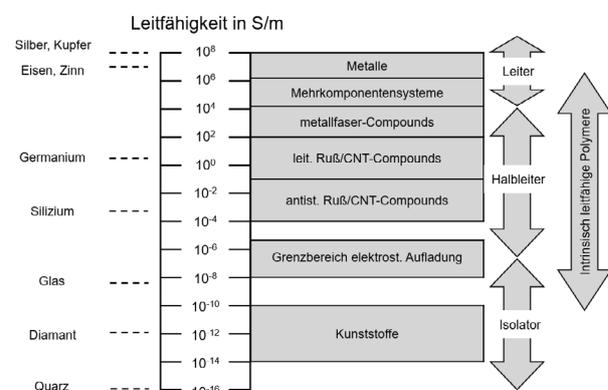
### 2.2 Leitfähig gefüllte Kunststoffe

Um elektrisch leitfähige Polymere herzustellen, muss ein Kunststoff durch die Einarbeitung von leitfähigen Füllstoffen, ausgerüstet werden. Als Füllstoffe werden u. a. Graphit, Fasern, Flakes oder Pulver aus Kohlenstoff und Metall, Leitfähigkeitsruße und Carbon-Nanotubes (CNT) eingesetzt. Für spezielle Anwendungen werden metallisierte Glas- und Kohlefasern, metallisierte Glaskugeln, Metalloxidpulver oder Partikel aus intrinsisch leitfähigen

Polymere verwendet [Leu15, Pfe09]. **Abbildung 1** bietet einen Einblick über typische Werte der elektrischen Leitfähigkeit bei einigen ausgerüsteten Kunststoffen.

### 2.3 Perkulationsverhalten

Bei Zwei- oder Mehrkomponentensysteme ist lediglich der Füllstoff für die Ausbildung eines leitfähigen Netzwerks verantwortlich. Dabei korreliert die Ausbreitung der Netzstruktur mit der Leitfähigkeit des Kunststoffcompounds, d. h. je ausgeprägter die Netzstruktur, desto höher ist die Leitfähigkeit.



**Abbildung 1: Elektrische Leitfähigkeit unterschiedlicher Materialien im Vergleich [Kno96, Pfe09, Fra14]**

Allerdings besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Füllstoffanteil, sondern ein für leitfähig ausgerüstete Kunststoffe typisches Perkulationsverhalten. Bei geringen Füllgraden dominiert die isolierende Wirkung des Matrixkunststoffes, da die Füllstoffe untereinander nur punktuell kontaktiert sind. Bei weiterer Zugabe der leitfähigen Füllstoffe, nimmt die Anzahl und Intensität der Kontaktierungsstellen zu. Bereits ab Füllstoffabständen von kleiner als ca. 10 nm können Elektronen die isolierende Kunststoffmatrix überwinden. Infolge dessen steigt die spezifische elektrische Leitfähigkeit mit zunehmendem Füllstoffanteil sprunghaft um mehrere Dekaden an. Das hierbei notwendige Volumen der Füllstoffe wird als Perkulationschwelle bezeichnet. Die weitere Zugabe von Füllstoff erhöht die Leitfähigkeit nur geringfügig, aufgrund der bereits ausgebauten leitfähigen Netzstruktur [Leu15, Pfe09, Fra14]. In **Abbildung 2**, linke Seite, wird ein typischer Perkulationsverlauf dargestellt.

Des Perkulationsverhalten wird im Wesentlichen vom Füllstofftyp und -geometrie beeinflusst.

## 2.4 Elektrisch leitfähige Füllstoffe

Zur Erzielung maximaler Leitfähigkeiten stellte sich in zahlreichen Veröffentlichungen die Füllstoffkombination aus Kupferfasern und niedrigschmelzen-

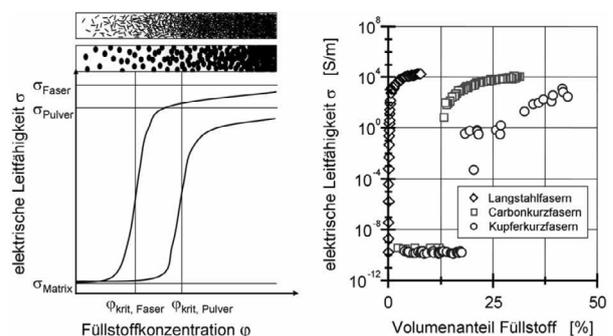
### 2.4.1 Kupferfasern

Heutzutage werden vor allem Carbon-, Stahl- oder nickelbeschichtete Carbonfasern für elektrisch leitfähige Kunststoffe eingesetzt [NN22b]. Zur Erzielung maximaler Leitfähigkeiten, zeigte sich allerdings Kupfer als vielversprechendstes Fasermaterial [Pfe09, Fra14]. Neben der hohen Leitfähigkeit von ca.  $5,8 \cdot 10^7$  S/m, lässt sich Kupfer, aufgrund seiner guten Duktilität, sehr gut aufbereiten und im Spritzgießverfahren weiterverarbeiten [Sta19,

### 2.4.2 Niedrig schmelzende Metalllegierung

Niedrig schmelzende Metalle sind Metalle mit einem Schmelzpunkt von ca. 50 bis 350 °C, welche auf Zinn, Zink oder Wismut basieren [NN22a]. Am

Die finale Leitfähigkeit des Compounds hängt ebenfalls auch vom Matrixkunststoff und dessen Benetzbarkeit zum Füllstoff, sowie der Aufbereitung und der Weiterverarbeitung ab. Dabei begünstigen langfaserige Füllstoffe die Ausbildung der leitfähigen Netzstruktur eher als pulverförmige. Dies liegt in der höheren Kontaktierungswahrscheinlichkeit zweier Partikel, wodurch eine Kettenbildung gefördert wird [Pfe09, Fra14].



**Abbildung 2: Prinzipielles Perkulationsverhalten faser- und pulvergefüllter Kunststoffe (link) sowie gemessene Perkulationskurve für unterschiedliche Fasern (rechts) [Pfe09]**

den Metallen als am vielversprechendsten heraus. Infolge dessen werden lediglich diese Füllstoffe hier dargestellt.

Pfe09]. Hinsichtlich der Faserlänge konnte für das Spritzgießverfahren ein Optimum der Verarbeitungs- und Leitfähigkeitseigenschaften bei einer durchschnittlichen Faserlänge von F08 ( $L < 0,8$  mm) erzielt werden [Pfe09]. Die signifikantesten Nachteile von Kupferfasern sind dabei die vergleichsweise hohe Dichte mit  $8,9$  g/cm<sup>3</sup>, sowie die geringe Korrosionsbeständigkeit. Infolge einer Korrosion, sinkt die elektrische Leitfähigkeit wesentlich.

IKV in Aachen wurden niedrigschmelzende Metalle als Füllstoff für leitfähige Kunststoffe im Spritzgießverfahren bereits umfangreich untersucht.

Die beste Verträglichkeit zum Kunststoff lieferte hierbei die Metalllegierung MCP 200, welche aus 91 Gew.-% Zinn und 9 Gew.-% Zink besteht. Die Legierung weist eine gute Duktilität, sowie einen positiven Einfluss auf die zu erzielenden mechanischen Eigenschaften, wie der Ermüdungsbeständigkeit und der Bauteilfestigkeit auf. Allerdings führt der Zinkanteil zu einer stärkeren Oxidationsneigung [SNSN98]. Neben der Legierung MCP200 erzielte Reinzinn ähnlich positive Ergebnisse. Durch den Einsatz von Reinzinn können höhere Leitfähigkeiten als mit MCP200 erreicht werden. Auf der anderen Seite neigt Zinn aufgrund der hö-

### 2.5 Matrixpolymere

Die Auswahl des Kunststoffs, bzw. die Benetzbarkeit der leitfähigen Füllstoffe zum Kunststoff, hat einen Einfluss auf das Perkulationsverhalten. Aufgrund der geringen Schmelzpunktemperaturen der Metalle, stehen für die Entwicklung des Mehrkomponentensystems theoretisch, die gesamte Breite der marktüblichen Kunststoffe zur Verfügung. Die Füllstoffverteilung kann maßgeblich durch den Schmelzbereich des Kunststoffes beeinflusst werden. Untersuchungen zeigten eine feine homogene Verteilung des niedrigschmelzenden Metalls, wenn Polymer und Füllstoff einen ähnlichen Erstarrungsbereich aufweisen. Ferner hat die Viskosität der Kunststoffschmelze einen Einfluss auf die Ausrichtung des Fasermaterials, während die Verteilung der niedrigschmelzenden Metalle

### 2.6 Mehrkomponentensysteme

Die IKV in Aachen konnten in Zusammenarbeit mit der Fa. Siemens AG, Erlangen, ein elektrisch leitfähiges Compound auf Basis von Polyamid 6, Kupferfasern sowie der niedrigschmelzenden Metalllegierung (MCP200) entwickeln. Dieses Mehrkomponentensystem erreicht Leitfähigkeiten von  $10^5$ – $10^6$  S/m. Im Vergleich zu ausschließlich mit Kupferfasern gefüllter Kunststoffe, konnte mit dieser Rezeptur eine um zwei Größenordnungen höhere Leitfähigkeit erreicht werden. Aufgrund der geringen Grenzflächenspannung der Werkstoffe unterei-

heren Oberflächenspannung zur stärkeren Bildung von Agglomeraten. Durch die geringe Viskosität im Aufbereitungs- und Spritzgießprozesses eignen sich die genannten, niedrig schmelzenden Metalle sehr gut als Füllstoff. Dabei konnte in Kombination mit Thermoplasten Leitfähigkeiten von  $10^3$ – $10^4$  S/m erzielt werden. Aufgrund der großen Viskositätsunterschiede zwischen der Kunststoffschmelze und der niedrigschmelzenden Metalllegierung neigt die Metalllegierung zu Separationseffekten. Infolge dieser Problematik ist der Volumenanteil auf max. 15 % begrenzt [Pfe09].

unverändert bleibt. Zwischen amorphen und teilkristallinen Kunststoffen, konnte hinsichtlich der Leitfähigkeit kein Unterschied festgestellt werden. Allerdings zeigen hochgefüllte amorphe Kunststoffe eine deutliche Versprödung, die maßgeblich durch eine geringe Bruchdehnung bemerkbar wird [Pfe09]. Abschließend wird die Auswahl des Kunststoffes durch die verwendete Verarbeitungstechnologie beeinflusst. Im FDM-Verfahren können prinzipiell alle üblichen Kunststoffe verarbeitet werden, wobei PLA und ABS zu den meistgenutzten zählt. Infolge dessen, werden für die späteren Versuche, die Kunststoffe PA, PLA und ABS untersucht, da diese sich sowohl für das FDM-Verfahren eignen, als auch eine gute Verträglichkeit zu niedrigschmelzenden Metallen versprechen.

inander, lagert sich ein Großteil der Metalllegierung an den Kupferfasern an und umhüllt diese [HMF11a, Pfe09]. Dies führt zu einer Verbesserung der Kontaktierung zwischen den Fasern und zur Erhöhung der Leitfähigkeit im Kunststoff (vgl. **Abbildung 3**)

Darüber hinaus wurden in zahlreichen Veröffentlichungen und speziell am IKV in Aachen weitere Füllstoffkombination hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit untersucht. Hierbei lag der Fokus auf Fasermaterial (Carbon, Stahl und Kupfer) und Nanofüllstoffen (Ruß und Carbon-nanotu-

bes) [Fra14]. Im Vergleich zum Mehrkomponentensystem, welches auf Basis von Kupferfasern und MCP200 besteht, erreichten diese Füllstoffe eine weitaus geringere Leitfähigkeit.

## 2.7 Fused Deposition Modeling (FDM)

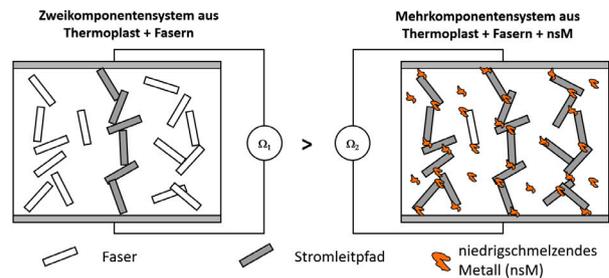
Als kostengünstiges und effizientes Verfahren hat sich das additive Fertigungsverfahren Fused Deposition Modeling (FDM) etabliert. Bei diesem Verfahren wird ein vorgefertigter Kunststoffstrang (Filament), durch eine beheizte Düse extrudiert, dort aufgeschmolzen und anschließend anhand der eingelesenen Geometrie in X- und Y-Richtung, auf der Bauplattform abgelegt. im Anschluss verfährt die Bauplattform um eine Schichtdicke in Z-Richtung und das Bauteil wird so sukzessive aufgebaut. **Abbildung 4** zeigt das grundlegende Prinzip einer FDM-Anlage.

### 2.7.1 Einsatz leitfähiger Filamente für das FDM-Verfahren

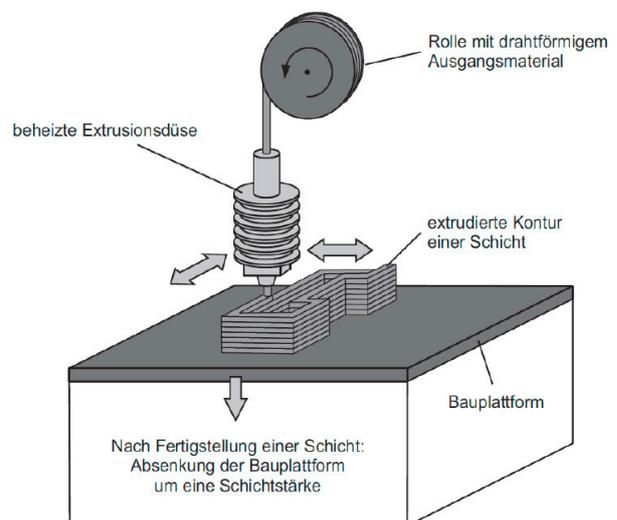
Zum jetzigen Zeitpunkt existieren wenige Veröffentlichungen, welche sich mit der Herstellung von leitfähigen Strukturen im FDM-Verfahren befassen. In einer der wenigen Veröffentlichungen wurde ein leitfähiges Filament auf Basis von Polypropylen in Verbindung mit Ruß als Füllstoff untersucht. Das dabei entstandene Material erreicht im verarbeitet Zustand eine Leitfähigkeit von ca. 200 S/m [KGT17]. In einer weiteren Veröffentlichung wurden Filamente auf Basis der Füllstoffe Kupfer, Ruß und Graphen untersucht. Dabei konnten die Leitfähigkeiten 7100 S/m (Kupfer), 120 S/m (Graphen) und 10 (Ruß) erzielt werden. Als Matrixkunststoff wur-

## 3 Vorgehensweise

In **Abbildung 5** sind die geplanten Arbeitsschritte des Promotionsvorhabens dargestellt. Im ersten Schritt findet die Vorauswahl der Materialien statt. Diese werden auf Basis der recherchierten Veröffentlichungen der leitfähigen Mehrkomponentensysteme für das Spritzgießen sowie der aktuell ver-



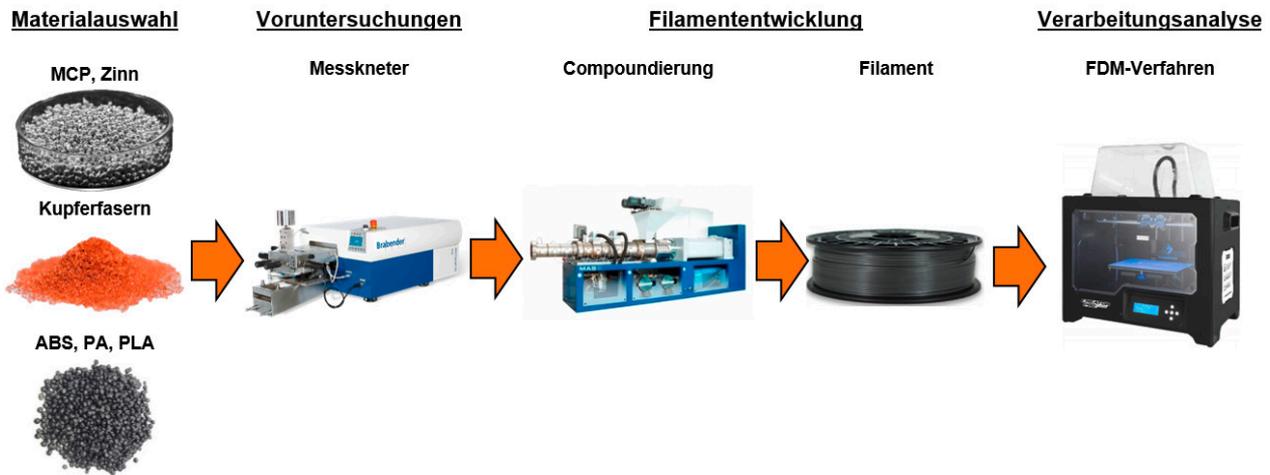
**Abbildung 3: Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit durch die Kombination von elektrisch leitfähigen Fasern und niedrigschmelzenden Metallen [Fra14]**



**Abbildung 4: Prinzip des Fused Deposition Modeling [Awi20]**

de PLA (polylactic acid) verwendet [FRY17]. Zur Herstellung stromtragfähiger Strukturen wird eine Leitfähigkeit von mindestens  $10^4$  S/m benötigt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die aktuell am Markt verfügbaren Filamente nicht zur Herstellung elektrisch leitfähiger Bauteile eignen.

fürbaren leitfähigen Filamente durchgeführt. Dabei konnten folgende Materialien abgeleitet werden: als niedrigschmelzendes Metall wird die Legierung MCP200 und Reinzinn, als Fasermaterial Kupfer und als Matrixkunststoff wird ABS, PA und PLA verwendet. Im nächsten Schritt erfolgt die Vorunter-



**Abbildung 5: geplante Vorgehensweise [NN21a], [Sta19], [URL22b], [NN19a], [URL22c], [URL22d], [URL22e]**

suchung dieser Materialien durch Aufbereitung in einem Messkneteter. Ziel der Voruntersuchungen ist die Identifikation des Verarbeitungsverhaltens, sowie die Bestimmung der Füllstoffanteile, die benötigt werden, um die Perkolationschwelle zu überschreiten. Darauf aufbauend folgt die Filamententwicklung mittels Compounding. Abschlie-

ßend findet die Analyse der Verarbeitungseigenschaften mit der FDM-Technologie statt, welches die Korrelation von Rezeptur und Morphologie zur Verarbeitung und der sich daraus ergebenden Bauteileigenschaften, sprich der Leitfähigkeit im Bauteil, miteinschließt.

## 4 Fazit und Zielstellung der Arbeit

Die additiven Fertigungsverfahren rücken bei der Herstellung elektrisch leitfähiger Bauteile immer mehr in den Fokus und gewinnen fortlaufend an Relevanz. Die aktuell verfügbaren AM-Technologien zur Herstellung leitfähiger Strukturen gehen entweder mit zeitaufwändiger Nachbearbeitung durch bspw. Sintervorgänge oder mit einer sehr kostenintensiven Anlagentechnologie einher. Vor diesem Hintergrund bietet sich das kostengünstige und effiziente FDM-Verfahren zur Herstellung elektrisch leitfähiger Bauteile an. Allerdings existieren noch keine Filamente am Markt, um stromtragfähige Bauteile herzustellen zu können. Anhand der aufgeführten Veröffentlichungen wird das Potential des Mehrkomponentensystems auf Basis von Kupferfasern und niedrigschmelzenden Metallen ersichtlich. Aktuelle Untersuchungen beziehen sich allerdings nur auf den Spritzgießprozess. Eine umfassende Material- und vor allem Prozessanalyse

dieser Füllstoffe im Bezug zum FDM-Verfahren wurde noch nicht durchgeführt.

Auf den bisherigen Erkenntnissen aufbauend werden daher in dieser Arbeit zunächst elektrisch leitfähige Filamente auf Basis niedrigschmelzender Metalle und Kupferfasern entwickelt und für das FDM-Verfahren adaptiert. Darauf aufbauend soll die Wechselwirkung der sich ausbildenden leitfähigen Morphologie innerhalb des entstehenden Bauteils in Kontext zum FDM-Verfahren gesetzt werden. Insbesondere die Wechselwirkung der beispielsweise im Vergleich zur Verarbeitung im konventionellen Spritzgießverfahren deutlich unterschiedlichen strömungsmechanischen Zustände im FDM-Druck und der sich daraus ergebenden Einflüsse auf Morphologie und Leitfähigkeit sind von Interesse und bisher so nicht Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten gewesen.

## Literatur

- [Awi20] Awiszus, B.; Blast, J.; Hängel, T.; Kusch, M.: Grundlagen der Fertigungstechnik. 7. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [DW17] Diegel, O.; Wohlers, T.: Costs and considerations when investing in a metal Additive Manufacturing system. In: Metal AM, 2017, Vol. 3. No. 4 (Winter), S. 93–97.
- [Fra14] Fragner, J.: Elektrisch leitfähige Kunststoffcompounds auf Basis von Füllstoffkombinationen. Dissertation. 1. Auflage (2014).
- [FRY17] Flowers, P.; Reyes, C.; Ye, S.; et. al.: 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. Department of Chemistry, Duke University, In Additive Manufacturing, 2017.
- [Har14] Harten, U.: Physik – Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (2014).
- [HMF11a] Hopmann, C.; Michaeli, W.; Fragner, J.: Analyse und Optimierung der Werkzeug- und Verfahrenstechnik zum Spritzgießen hoch gefüllter Thermoplast-Compounds auf Basis niedrig schmelzender Metalle. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 15259 N, 2011.
- [Kai20] Kaiser, V.: Additive Fertigung in der elektrischen Verbindungstechnik: Potenziale und Anforderungen. Leitfaden. Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V. Frankfurt. 2020.
- [KGT17] Kwok, S.; Henry Goh, K.; Tan, Z.; et. al.: Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. Institute of Materials Research and Engineering, Singapore, In Applied Materials Today, 2017.
- [Kno96] Knothe, J.M.: Elektrische Eigenschaften von spritzgegossenen Kunststoffformteilen aus leitfähigen Compounds. RWTH Aachen, Dissertation. 1. Auflage (1996).
- [Leu15] Leute, U.: Elektrisch leitfähige Polymerwerkstoffe: Ein Überblick für Studierende und Praktiker. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer-Verlag (2015).
- [NN19a] N.N.: Brabender Messknetter für Materialentwicklung und Qualitätskontrolle. Broschüre, Brabender GmbH, Duisburg, 2020.
- [NN21a] N.N.: Product Specification Sheet Tin. Firmeninformation, 5N Plus Lübeck GmbH, Lübeck, 2021.
- [NN22a] N.N.: Properties of 12 MCP-Alloys. Firmeninformation, 5N Plus Lübeck GmbH, Lübeck, 2022.
- [NN22b] N.N.: EMI Shielding Plastic Compounds. Firmeninformation, RTP Company Corp., Winoah, USA, 2022.
- [Pfe09] Pfefferkorn, T.: Analyse der Verarbeitungs- und Materialeigenschaften elektrisch leitfähiger Kunststoffe auf Basis niedrig schmelzender Metalllegierungen. Dissertation: 1. Auflage (2009) Mainz.
- [Roh06] Roth, S.: Spritzgegossene Abschirmgehäuse aus stahlfasergefüllten Thermoplasten – Materialeigenschaften, Verarbeitung und Gestaltung. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2006.
- [SNSN98] Suganuma, K.; Niihara, K.; Shoutoku, T.; Nakamura, Y.: Wetting and interface microstructure between Sn-Sn binary alloys and Cu. Journal of Materials Research 13 (1998) 19, S.2859-2865.
- [Sta19] Stax: Materialdatenblatt STAX Kupferfasern Cu99. Datenblatt, Deutsches Metallfaserwerk Dr. Schwabbauer GmbH + Co, Neidenstein, 2019.
- [URL21a] Statisa: Umsatz der Elektroindustrie in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020. unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75570/umfrage/deutsche-elektroindustrie-geschaeftsentwicklung-gesamtumsatz-seit-2008/>, Abgerufen am: 03.12.21.
- [URL22a] Ampower: Metal additive Manufacturing technology landscape. [online], 2022. unter: <https://ampower.eu/tools/metal-additive-manufacturing/>, Abgerufen am: 28.01.22.
- [URL22b] kunststoffrecycling-omnicycle: Startseite Bild. [online], 2022. unter: <https://kunststoffrecycling-omnicycle.de/>, Abgerufen am: 03.02.22.
- [URL22c] Plastverarbeiter: Recycling-Compounder (Abbildung). [online], 2021. unter: <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/recycling-compounder.html>, Abgerufen am: 03.02.22.

- [URL22d] Dasfilament: PLA Filament (Abbildung). [online], 2022. unter: <https://www.dasfilament.de/filament-spulen/pla-1-75-mm/363/pla-filament-1-75-mm-schwarz-matt/>, Abgerufen am: 03.02.22.
- [URL22e] Indiamart: Stratasys Makerbot Replicator 3D Printer (Abbildung). [online], 2022. unter: <https://www.indiamart.com/proddetail/makerbot-replicator-3d-printer-16553147248.html>, Abgerufen am: 03.02.22.
- [Woh09] Wohlmann, B.: Kohlenstoff-Fasern. AKV – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.). 3. Auflage (2009) Mainz, S. 139–147.

# ADDITIV GEFERTIGTE WERKZEUGE FÜR DEN EINSATZ IN DER EXTRUSION

Samuel Werner, M. Eng.<sup>1</sup>; Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Angewandte Kunststofftechnik (AKT)/Hochschule Schmalkalden, Deutschland

## 1 Einleitung und Motivation

Die Extrusion ist ein Hauptverfahren der kontinuierlichen Verarbeitung von Kunststoffen und bedient vielfältige Anwendungsgebiete von Fensterprofilen bis hin zu Infusionsschläuchen für den medizinischen Einsatz. Im Extrusionsprozess wird Kunststoff plastifiziert und durch das Werkzeug gefördert. Passiert die Schmelze das Werkzeug, nimmt sie dabei die entsprechende Form der Werkzeugöffnung an. Beim Passieren des nachgelagerten Kühlbades erstarrt die Schmelze, wodurch die endgültige Form des Extrudates fixiert ist [EEH05, S. 225 ff., S. 241 ff.].

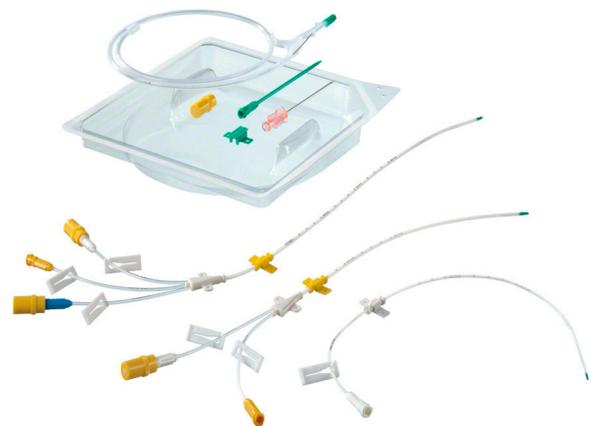
Bei der Verarbeitung im Extrusionsprozess wird die Kunststoffschmelze mit steigender Extruderdrehzahl bzw. steigendem Materialausstoß immer stärker thermisch und mechanisch beansprucht. Mit steigender Materialschädigung werden die mechanischen Eigenschaften herabgesetzt und auch spezielle Bauteilanforderungen wie Zytotoxizität bzw. Biokompatibilität werden negativ beeinflusst. Materialabhängig können mehrere Effekte auftreten. Bei der Materialdegradation werden durch thermische oder mechanische Belastungen Teile der Polymere abgespalten. Durch die verkürzte Kettenlänge können mechanische Belastungen im Material nicht mehr ausreichend aufgenommen werden und Kennwerte wie die Zugfestigkeit sinken. Ebenfalls können durch thermische Überbeanspruchungen toxische Abbauprodukte im Material entstehen [Sch13, S.7f.].

Bei der Fertigung von Medizinprodukten gibt es zahlreiche Anforderungen an die Produktsicherheit. Beispielhaft seien hier Katheter zur Verabreichung von Medikamenten zu nennen [JKW08,

S. 493]. Bei diesen Kathetern werden hohe Anforderungen an die biologische Verträglichkeit gestellt. Ein Beispiel für einen solchen Katheter wird in **Abbildung 1** dargestellt.

Die hohen Anforderungen finden sich auch im Fertigungsprozess wieder. In Europa sind die Anforderungen für Medizinprodukte durch die Medizinprodukterichtlinie [EU17] vorgegeben. Prozesse zur Herstellung von Medizinprodukten müssen danach validiert sein. Dadurch wird nachgewiesen, dass der Prozess im Rahmen der in einem Prozessfenster vorgegebenen Parameter die Herstellung des Produktes mit den spezifizierten Eigenschaften ermöglicht [Han21], [JKW08, S. 489f.].

Gerade bei der Verarbeitung von Materialien, welche sensibel auf einen Anstieg der Scherrate reagieren, kann sich die molekulare Materialschädigung durch einen Anstieg der Zytotoxizität bemerkbar machen. Dies ist besonders bei Medizin-



**Abbildung 1: Katheter-Besteck zur Katheterisierung der Hohlvene [URL22]**

produkten als kritisch zu beurteilen [Mül21]. Durch eine rheologisch optimierte Auslegung der Extrusionswerkzeuge sollen die im Werkzeug auftretenden Schergeschwindigkeiten reduziert und die damit zusammenhängende Materialschädigung minimiert werden. Additiv gefertigte Werkzeuge bieten hier insbesondere aufgrund der Freiheitsgrade in der Geometriegestaltung Vorteile, wie beispielsweise die Gestaltung rheologisch optimierter Schmelzkanäle.

Im Rahmen des Promotionsvorhabens sollen die Zusammenhänge von Verarbeitungsparametern und Produkteigenschaften speziell auf das Verfahren der Extrusion bezogen betrachtet werden.

Darüber hinaus wird untersucht inwieweit die Gestaltung der Schmelzkanäle einen positiven Beitrag zur Sicherung der Produkthanforderungen bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität leisten kann. Zum Einsatz kommen dabei CFD-Simulationen zur Bewertung der auftretenden Strömungssituationen im Schmelzkanal und praktische Untersuchungen. Zusätzlich sollen Vergleiche zwischen konventionellen Werkzeugaufbauten und additiv hergestellten Werkzeugen erfolgen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Grundlagen der Kunststoffextrusion

Bei der Extrusion handelt es sich um ein Urformverfahren zur kontinuierlichen Verarbeitung von Kunststoff. Das Verfahren ist dazu geeignet, Profile mit gleichbleibenden Querschnittsformen herzustellen. Darunter zählen Rohre, Schläuche, Profile und Folien. Dazu wird Kunststoffgranulat im Extruder aufgeschmolzen und durch die Drehbewegung der Extruderschnecke durch das Extrusionswerkzeug gefördert. Die Kunststoffschmelze nimmt dabei die Form der Düsenöffnung an. Nach der Düse passiert das noch warme Profil die Kallibriereinheit. Hier wird das Extrudat unter Formzwang abgekühlt und erhält so seine endgültige Form [Chu19].

Durch dieses kontinuierliche Vorgehen kann der Massedurchsatz je nach Anlagengröße bis zu 5000 kg/h betragen. Die Wirtschaftlichkeit einer Extrusionsanlage wird signifikant von dem erreichten Durchsatz bestimmt, sodass es stets die Bestrebung gibt, bei gleichbleibender Größe der Anlage einen höheren Durchsatz zu erzielen. Neben dem Ziel, einen möglichst hohen Materialdurchsatz zu erreichen, werden noch folgende Kriterien zur Qualitätsbewertung des Extrudates berücksichtigt [Sch13, S.8f.]:

- gleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt des Extrudats (thermisch Homogenität),
- homogene Verteilung von Füllstoffen und Additiven (mechanische Homogenität),
- Stabilität des Masseausstoßes (Durchsatzkonstanz),
- möglichst geringe Änderung der Massetemperatur über die Zeit.

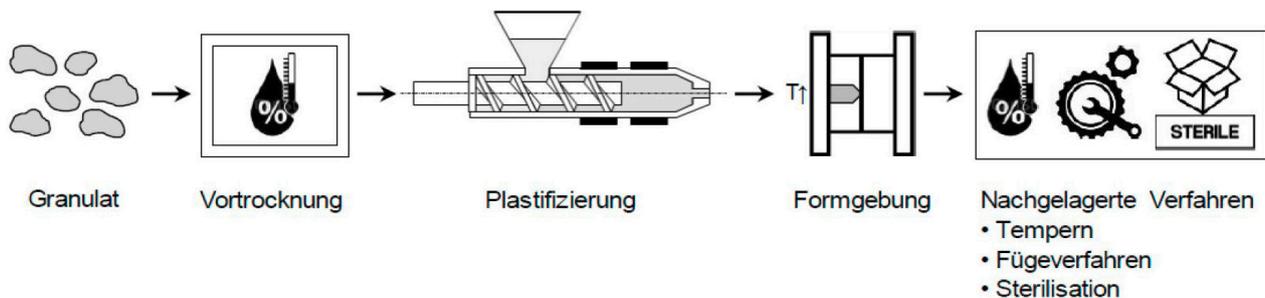
Um die Produktivität von Extrusionsanlagen zu erhöhen, muss der Massedurchsatz gesteigert werden. Sind die Anforderungen an die Maßgenauigkeit nur von untergeordneter Bedeutung, können Mehrfachdüsen eingesetzt werden, mit denen mehrere Profile gleichzeitig extrudiert werden können. Diese Möglichkeit der Produktivitätssteigerung ist bei der Herstellung von Katheterware auf Grund der Anforderungen an die Maßgenauigkeit aber nicht möglich. In diesem Fall kann die Erhöhung des Massedurchsatzes nur durch die Einflussfaktoren des Werkzeuges und der Kalibrierung erreicht werden [Sch13].

## 2.2 Zusammenhang zwischen Prozessführung und Produkteigenschaften bei der Kunststoffverarbeitung

Der Einfluss der Prozessführung auf die biologische Verträglichkeit ist bereits untersucht. Für den Spritzgießprozess konnte [Mül21] einen Zusammenhang zwischen gewählten Verarbeitungsparametern und der Materialschädigung anhand einer erhöhten Zytotoxizität des Materials nach der Verarbeitung nachweisen. In **Abbildung 2** werden die einzelnen Teilschritte dargestellt, welche die polymere Degradation und somit auch die Biokompatibilität von Medizinprodukten beeinflussen [Mül21].

Bezogen auf die Herstellung von medizinischer Schlauchware im Extrusionsprozess ist von der HS

Schmalkalden in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück ein Forschungsprojekt mit dem Akronym BioMat\_PUR beantragt. Ziel ist die Vorhersage der Biokompatibilität und Materialeigenschaften von thermoplastischen Polyurethanen unter Berücksichtigung der Verarbeitung. Besonders bei der Verarbeitung von Polyurethansystemen spielt die Materialschädigung wegen der möglichen Entstehung von toxischen Abbauprodukten eine entscheidende Rolle für den Einsatz in der Medizintechnik [HWM08, S. 237].



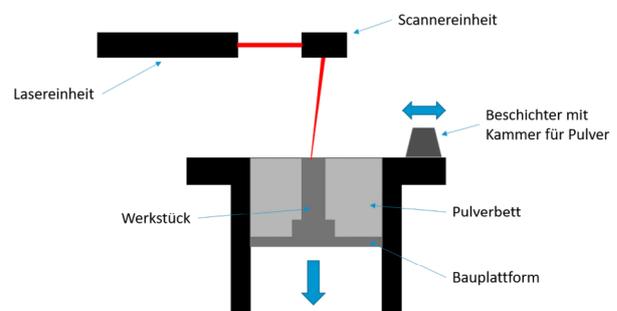
**Abbildung 2: Teilschritte des Spritzgießprozesses und Nebenprozesse, die einen Einfluss auf die polymere Degradation haben [Mül21]**

## 2.3 Grundlagen der Additiven Fertigung

Unter dem Begriff „Additive Fertigung“ wird ein Prozess zum Erzeugen von physischen Bauteilen verstanden, bei dem kein bauteilspezifisches Werkzeug benötigt wird. Der Aufbau der Bauteile erfolgt direkt auf Basis der konstruierten Bauteilgeometrie [Geb16, S. 3].

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren für die Erzeugung von metallischen Bauteilen ist das Selektive Laser Schmelzen (SLM). Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Schichtbauverfahren. Hierbei wird die konstruierte Geometrie innerhalb einer Software (Slicer) in Schichten unterteilt und an die additive Fertigungsanlage übergeben. Ein Raker trägt eine Pulverschicht auf eine Bauplatte. Diese Schicht wird mittels Laser je nach Geometrie selektiv aufgeschmolzen. Anschließend wird die Bauplatte um eine Schichtdicke abgesenkt

und eine neue Pulverschicht wird aufgetragen. Ab jetzt wiederholt sich der Vorgang bis das gesamte Bauteil schichtweise aufgebaut ist. In **Abbildung 3** wird der Aufbau einer SLM-Anlage schematisch dargestellt [Geb16, S. 164].



**Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer SLM-Anlage [URL22a]**

### 3 Vorgehen und erste Ergebnisse

Die Promotion unterteilt sich in drei Hauptbereiche: Material, Prozess und Produkt. In Vorbereitung der geplanten Arbeiten werden die Produkthanforderungen an Katheterware für den medizinischen Einsatz definiert. Hierbei werden besonders die Anforderungen an die biologische Sicherheit fokussiert. Dabei wird auf die EU-Verordnung 2017/745 [EU17] sowie das Vorgehen zur Bestimmung der Biokompatibilität von Medizinprodukten nach [ISO 10993] Bezug genommen.

In **Abbildung 4** wird dargestellt, auf welche Weise sich die Produkteigenschaften durch die Möglichkeiten der additiven Werkzeugherstellung beeinflussen lassen. Die additive Fertigung ermöglicht eine auf das zu verarbeitende Material zugeschnittene Werkzeuggestaltung. Über die angepasste Werkzeuggestaltung lässt sich der Verarbeitungsprozess beeinflussen bzw. soll untersucht werden inwieweit sich das Produktionsfenster vergrößern lässt. Letztendlich resultieren alle Eingriffe in den Produkteigenschaften.

Auf Grundlage der zuvor festgelegten Anforderungen und den am Markt bereits eingesetzten Kunststoffen wird die Materialauswahl durchgeführt. Dabei wird auch die Frage berücksichtigt; bei welchen Materialien sich der Einsatz eines additiv gefertigten Extrusionswerkzeugs als besonders vorteilhaft erweisen kann. Im Vorfeld werden Simulation durchgeführt, um Vorhersage bzw. Abschätzung des Prozesseinflusses auf das Material



**Abbildung 4: Zusammenhang der Forschungsbereiche der Promotion [URL22b], [URL22c], [URL22d], [URL22e]**

liefern zu können. Als Demonstrator wird ein geeigneter Profilquerschnitt gewählt, der den Markt der medizinischen Schlauchware sowie deren Anforderungen abbildet. Anschließend werden die Verarbeitungseigenschaften im Extrusionsprozess mit konventionell gefertigter als auch mit additiv hergestellter Extrusionsdüse ermittelt.

Unter Zuhilfenahme von statistischer Versuchsplanungswerkzeuge werden Extrusionsversuche durchgeführt. Der hergestellte Katheter wird abschließend ausführlichen Materialuntersuchungen unterzogen, um Aussagen über die mechanischen Eigenschaften sowie über die Einsatzfähigkeit als Medizinprodukt treffen zu können. Final werden die ermittelten Eigenschaften den Verarbeitungsbedingungen gegenübergestellt und Zusammenhänge identifiziert. Im Vorfeld der Promotion wurden im Rahmen einer Masterarbeit bereits erste Düsen additiv gefertigt und konnten erfolgreich in Betrieb genommen werden.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Extrusion ist ein Verfahren, welches bereits seit Jahren zur Herstellung von Kathetermaterial für den Einsatz in der Medizintechnik eingesetzt wird. Bislang gab es im Bereich der Extrusion wenige Untersuchungen, hinsichtlich des Zusammenhangs der Prozessparameter und der daraus resultierenden Produkteigenschaften bezogen auf die Biokompatibilität.

Der Extrusionsprozess als solches ist hinlänglich untersucht. Auch die Eigenschaften der verarbeiteten Materialien sind bekannt. Allerdings fehlt der Zusammenhang bzw. Untersuchungen zur Beeinflussung der Materialeigenschaften durch den Prozess.

Der Zusammenhang von Prozessparametern beim Spritzgießen und der Produkteigenschaften von Medizinprodukten wurde bereits untersucht.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen soll erarbeitet werden inwieweit sich dieser Zusammenhang in der kontinuierlichen Verarbeitung von Kunststoff wiederfindet und ob sich durch gezielte Anpassung der Werkzeuggeometrie der Verarbeitungsraum bezogen auf eine verbesserte Biokompatibilität vergrößern lässt.

Momentan ist das Vorgehen der Promotion konzipiert und bereits Anträge für Forschungsvorhaben gestellt. Erste Voruntersuchungen sind abgeschlossen. Im nächsten Schritt werden Prozesssimulatio-

nen für verschiedene Werkzeuggeometrien durchgeführt und weiterte Prototypen angefertigt.

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist es, den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und den späteren Produkteigenschaften herzustellen sowie die Möglichkeiten der additiven Fertigung von Extrusionswerkzeugen zur Prozessoptimierung in der Extrusion von medizinischer Katheterware zu untersuchen. Die Erkenntnisse sollen Sicherheit bei der Prozessführung geben und weitere Potentiale zur Prozessoptimierung aufzeigen.

## 5 Förderung

Die für die Erstellung des Beitrags erforderliche Extrusionsanlage wurden vom Freistaat Thüringen gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regio-

nale Entwicklung (EFRE) kofinanziert (Vorhabensnummer: 2019 FGI 0012).

Wir bedanken uns beim Fördermittelgeber für die Unterstützung.

## Literatur

- [Chu19] Chung, C.: Extrusion of Polymers, Theory and Practice, München: Carl Hanser Verlag, 2019.
- [EEH05] Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth, T.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [EU17] EU Verordnung 2017/745 Des Europäischen Parlaments und des Rates über Medizinprodukte, zur Änderung der Richtlinie 2001/83/EG, der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 und der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 und zur Aufhebung der Richtlinien 90/385/EWG und 93/42/EWG des Rates vom 5. April 2017.
- [Geb16] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. 5. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- [Han21] Handorn, B.: Die Medizinprodukte-Verordnung (EU) 2017/745, 1. Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- [HWM08] Ha, S.-W.; Wintermantel, E.; Maier, G.: Polymere. In: Wintermantel, E.; Ha, S.: Medizintechnik, Life Science Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [ISO 10993] Norm DIN EN ISO 10993: 2010: Biologische Beurteilung von Medizinprodukten.
- [JKW08] Jumpertz, I.; Krampe, E.; Wintermantel, E.: Kunststoffverarbeitung für die Medizintechnik. In: Wintermantel, E.; Ha, S.: Medizintechnik, Life Science Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [Mül21] Müller, A.: Einfluss der Spritzgießverarbeitung auf die biologische Sicherheit von Medizinprodukten, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, Chemnitz, 2021.
- [Sch13] Prof. Dr.-Ing. Schöppner, V.: Einschnackextruder. In: Limper, A. (Hrsg.): Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 1 – 39.
- [URL22] B. Braun SE: Einlumige Cavakatheter-Bestecke zur Katheterisierung der Hohlvene nach der Seldinger-Methode [online], 2022. URL: <https://www.bbraun.de/de/products/b227/certofix-mono-econoline.html>, Abgerufen am: 12.03.2022.
- [URL22a] wbk – Institut für Produktionstechnik: Selektives Laserschmelzen SLM 280 HL [online], 2022. URL: [https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/produktionstechnisches\\_labor\\_de/?p=379](https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/produktionstechnisches_labor_de/?p=379), Abgerufen am: 01.03.2022.

[URL22b] Mark3d GmbH: Metal X – Komplette Metall 3D-Druck-Lösung von Markforged [online], 2022. URL: <https://www.mark3d.com/de/metalx/>, Abgerufen am: 26.02.2022.

[URL22c] TRUMPF SE + Co. KG (Holding): Laser Metal Fusion – Vorteile, Funktionsprinzipien und Anwendungen der additiven Technologie [online], 2022. URL: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion/](https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion/), Abgerufen am: 26.02.2022.

[URL22d] INEXCO Europe GmbH: Extrusionswerkzeuge XPS-Profilen [online], 2022. URL: <http://www.inexco.tech/de/extrusion>, Abgerufen am: 26.02.2022.

[URL22e] EXTRUDEX Kunststoffmaschinen GmbH: Extrusionswerkzeuge für höchste Anforderungen [online], 2022. URL: <https://extrudex.de/de/extrusionswerkzeuge>, Abgerufen am: 26.02.2022.

# PREDICTIVE MAINTENANCE FOR OPTICAL AMPLIFIERS

*Dominic Schneider, M. Sc.<sup>1,2</sup>; Prof. Dr.-Ing. Maria Schweigel<sup>1</sup>; Dr. sc. techn. Lutz Rapp<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Schmalkalden University of Applied Sciences, Faculty of Electrical Engineering, Embedded Diagnostic Systems, Blechhammer 9, D-98574 Schmalkalden, Germany

<sup>2</sup>ADVA Optical Networking SE, Märzenquelle 1–3, D-98617 Meiningen-Dreissigacker, Germany  
E-mail: d.schneider@hs-sm.de, dschneider@adva.com

**Abstract** – Optical amplifiers are key elements of today’s optical networking technology. Failures of these components lead to interruption of the complete traffic transmitted over an affected link and potentially lead to a high financial loss of the carrier. Predicting failures that are likely to happen in the near future helps to avoid these severe consequences. Current techniques monitor parts of the amplifiers, such as pump lasers and their aging, but many performance degrading effects are not captured by the monitoring. Therefore, an extension of the existing approaches to a comprehensive predictive maintenance system is necessary to make accurate predictions of the remaining lifetime and thus to avoid long system downtimes. For this purpose, a reference model for determining the amplification characteristics of an erbium-doped fiber amplifier on steady-state conditions is presented that serves as a reference system.

**Keywords** – Erbium-doped fiber amplifiers, Optical communications, Predictive maintenance

## I Introduction

Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) are a well-known variant of optical fiber amplifiers that are nowadays deployed in large quantities in worldwide fiber optical networks. In recent decades, the capacity of fiber optical networks has grown exponentially with 35 million kilometers being installed in Europe already by the end of 1997. The global increase in that year was estimated to amount to approximately 38 million kilometers. Submarine cables are a significant part of this, contributing with 366,000 kilometers of cable by the end of 1997 [1].

Optical amplification technologies play a major role in long-distance links in order to overcome reach limitations caused by fiber attenuation. For that purpose, optical amplifiers are installed in the link for amplifying the light transmitted through the optical fiber. With further development, higher transmission rates have become available and

wavelength multiplexing allows multiple wavelength channels (> 100 channels) to be transmitted simultaneously per fiber. However, this important task of optical amplifiers in fiber optic networks entails a serious problem if these key elements fail.

In case an optical amplifier fails, the entire communication channels over the link are interrupted. Since many time-critical data are transmitted over fiber optical links (banking communication, software as a Service, etc.), even short-term failures can lead to damages in the seven-digit range. It is therefore of major importance to monitor the status of a link in order to keep downtimes small and thus to avoid cost-intensive transmission losses.

Optical amplifiers used for commercial applications are almost exclusively making use of erbium for signal amplification. The main components of such amplifiers are erbium-doped fibers

(EDFs), pump lasers and some additional optical components. Typically, EDFAs do not only consist of the mentioned components, but are also embedded in a control system, which controls the gain to a set value [2].

At the current state, some approaches exist for modeling degradation effects in EDFAs. This can be a simple supervision of the injection current of the pump lasers, where its increase during operation may indicate some degradation. [3] However, the accuracy of these techniques is limited due to the complexity of EDFAs and continuous control interactions with a strong dependence of key parameters on the operating point. Consequently, variables such as the number of channels and the target amplifier gain must also be taken into ac-

count in the failure prediction system. A further extension providing better monitoring as compared with the simple pump laser monitoring is the monitoring of the complete optical path [4].

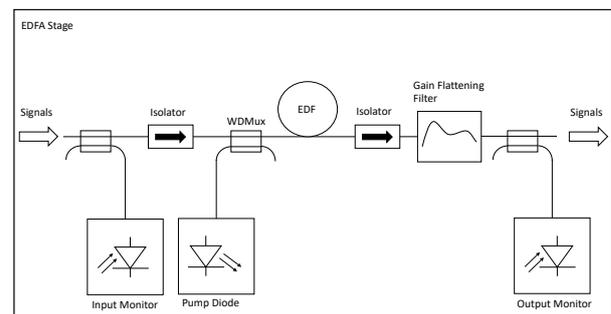
In order to avoid sudden failures, a predictive maintenance mechanism is optimal, which, in addition to monitoring the EDFA, can make a prediction of the remaining usable lifetime (RUL) and perform a self-diagnosis of the system. Predictive maintenance models are based on a reference model, which can be analytical or data-driven in nature. Independently of this, there is a requirement for a “zero error” model, which can always represent the correct state of the system. [5] In this paper, a proposal for modeling a restricted reference model of EDFAs will be given.

## II Modeling of the Reference System

Generally, EDFAs for commercial applications consist of multiple amplifier stages. They operate in a cascade and are typically gain controlled. Such multi-stage amplifiers can provide high performance over a wide gain range [6].

For simplified modeling of an EDFA, a single amplifier stage as shown in **Fig. 1** and consisting of a pump laser and measuring units for input and output signals will be considered here. These measuring units are realized, for example, by photodiodes. Furthermore there are components like an isolator, a gain-flattening filter (GFF) and of course the erbium-doped fiber (EDF). An isolator suppresses reverse propagating lightwaves that might originate from reflections at the output of the amplifier [7]. In addition, GFFs are used to reduce the wavelength dependence of the amplification and thus the gain [8]. However, the simplified model presented in the following does not comprise isolators and GFFs, and for better clarity amplified spontaneous emission (ASE) is neglected.

Amplification in fiber amplifiers doped with rare-earth ions is provided by transitions between different energy levels. In order to achieve good noise performance, amplifier stages in commercial



**Fig. 1: Schematic of single EDFA Stage**

designs typically comprise at least one pump laser with an emission wavelength around 980 nm which involves population of the third energy level. However, the lifetime of the third energy level is by orders of magnitude smaller as compared with the second energy level, the so-called metastable level. Thus, it is sufficient for many operating conditions to consider only the two lowest energy levels in a mathematical model. However, this simplified model does not include the effect of pump excited state absorption and does not provide the required accuracy when pump excited state absorption becomes noticeable. In this overview article, population of the third energy level will be neglected in fa-

vor of an easier understanding of the mathematical structure of the model.

The mathematical model comprises coupled differential equations describing variations of signal power and pump power along the axis of the erbium-doped fiber and the population probabilities  $N_1$  and  $N_2$  of the ground level  $^4I_{15/2}$  and the metastable level  $^4I_{13/2}$ , respectively. Since higher energy level are assumed to be not populated, the population probabilities of the two lowest energy levels are linked to each other by

$$N_1 + N_2 = 1 \quad (1)$$

Energy level transitions induced by stimulated emission of absorption do not only affect the population of the involved energy levels, but also increase or decrease the power of the stimulating lightwave. Key physical parameters in the model are the wavelength dependent cross-sections for absorption  $\sigma_a$  and for emission  $\sigma_e$ , which are measures for the probability of an interaction of incident radiation and an ion during absorption and emission. Further important parameters are the cross-sectional area  $A_{\text{erb}}$  of the doped core and the overlap factor  $\Gamma$  describing the overlap between the lightwave and the area doped with erbium. With these parameters, power distribution of each signals or pumps can be described by the differential equation

$$\frac{\partial \phi_{p,s}}{\partial z} = \{[\sigma_a(\lambda_{p,s}) + \sigma_e(\lambda_{p,s})]N_2(z) - \sigma_a(\lambda_{p,s})\} \phi_{p,s} \quad (2)$$

with the photon fluxes  $\Phi_{p,s}$ , wherein the index refers to the pump or to a signal and  $\lambda$  is the respective wavelength.

Since energy level transitions may be introduced by any photon propagating in the doped fiber, population of the metastable level is governed by the sum of all photon fluxes weighted by the respective probabilities. This leads to the following equation describing the population of the metastable level:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sum_{k=1}^M \sigma_k^a(\lambda_{p,s}) \frac{\phi_{p,s}}{\zeta^*} - N_2 \sum_{k=1}^M [\sigma_k^a(\lambda_{p,s}) + \sigma_k^e(\lambda_{p,s})] \frac{\phi_{p,s}}{\zeta^*} - \frac{N_2}{\tau_2} \quad (3)$$

with  $M$  representing the number of lightwaves and

$$\zeta^* = \zeta \cdot \tau_2 = \rho_{\text{erb}} \cdot A_{\text{erb}} \quad (4)$$

being a saturation parameter introducing the impact of the erbium concentration  $\rho_{\text{erb}}$ , the area  $A_{\text{erb}}$  doped with erbium and the lifetime  $\tau_2$  in the metastable level.

The equations presented so far include dynamics of the amplification process. However, this aspect can currently be neglected so that steady-state conditions are assumed in the following. With

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \quad (5)$$

and introducing the variables

$$A = \sum_{k=1}^M \sigma_k^a(\lambda_{p,s}) \frac{\phi_{p,s}}{\zeta^*} \quad (6)$$

$$B = \sum_{k=1}^M \sigma_k^e(\lambda_{p,s}) \frac{\phi_{p,s}}{\zeta^*} \quad (7)$$

the steady-state population probability of the metastable level is given by

$$N_2 = \frac{A}{A + B + \frac{1}{\tau_2}} \quad (8)$$

Each wavelength channels represents a signal. The propagation of the photon flux and the population in the energy levels can be understood as a function of summation over the signals.

In this paper, inversion is used as a measure for the population probability of the excited state and is decisive for the behavior of the photon flux and the resulting power and gain. In the literature, it is often referred to as average inversion modeling. This approach shall be derived and briefly considered here.

Starting point is the ordinary differential equation according to equation (2). Via the mathematical mechanism of separation of variables and some constraints, this differential equation can be solved. The initial value problem of the differential equation that arises while solving can be handled with the approach that there is an input signal at the fiber in-

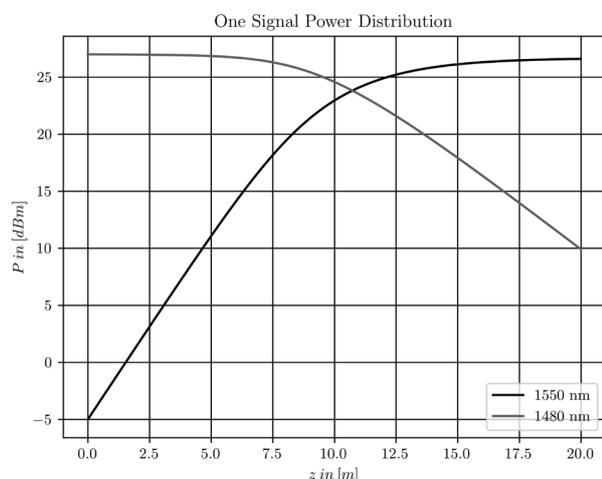
put with the photon flux  $\Phi_{p,s}(0)$  at  $z = 0$ , which leads to the following equation for the gain:

$$G = \frac{\Phi_{p,s}(z)}{\Phi_{p,s}(0)} = e^{\{[\sigma_a(\lambda_{p,s}) + \sigma_e(\lambda_{p,s})]N_2 - \sigma_a(\lambda_{p,s})\} \cdot z} \quad (9)$$

## II Results

In considering the results, we will limit ourselves to the most important physical quantities. The differential equations describe changes of the photon flux, which, however, can be converted into power by multiplication with the photon energy. Furthermore, results will be presented in terms of the gain, which can be derived from input and output powers. Reference quantities within the graphs will be the length of the fiber and the wavelength. The dependent quantities are represented logarithmically for improved readability.

Within **Fig. 2**, we see two power distributions along the fiber axis. Here, the 1480 nm power represents the pump power emitted by the pump laser and coupled into the EDF. The other curve shows a signal power at a signal wavelength of 1550 nm. A fiber length of 20 m was assumed. It can be seen that the pump power is absorbed along the fiber and thus produces an excitation of the erbium ions with transition from the ground level to the meta-

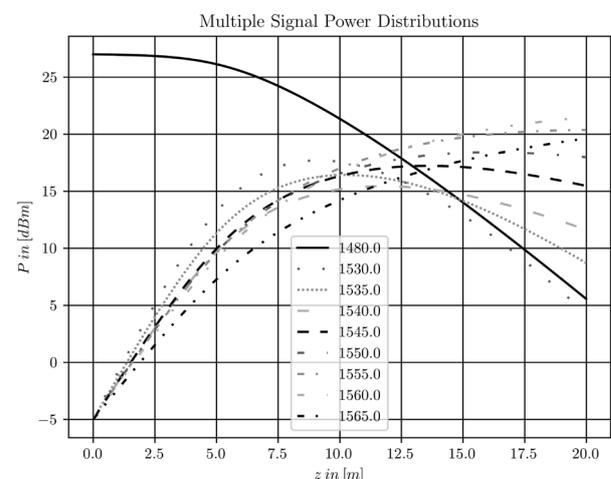


**Fig. 2: One Signal and Power Propagation through Fiber**

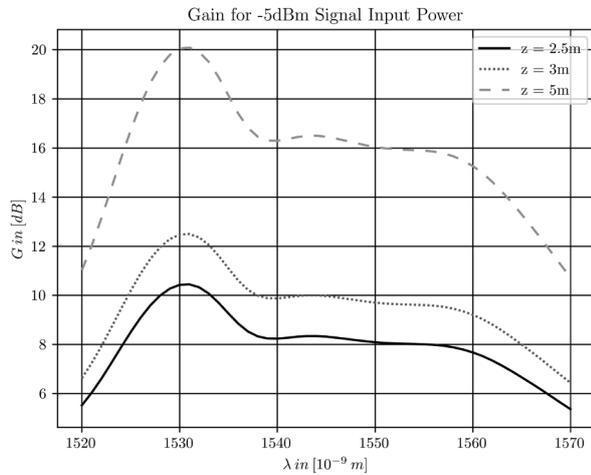
With the mathematical equation (9) given, studies for the behavior of the gain of an simplified EDFA can be provided.

stable level. This excitation can cause amplification of the input signal up to a certain saturation. Technically, this can be understood as a single stage C-band amplifier.

Typical C-band amplifiers are operated in the wavelength range from 1530 nm to 1565 nm. In **Fig. 3**, an amplifier with eight wavelength channels is modeled. Each input signal has the same input power and the pump power is the same as in **Fig. 2**. It is easy to see how the gain behavior of the individual signals is strongly wavelength dependent. For example, at a fiber length of 20 m, a gain can be achieved at 1565 nm, whereas at 1530 nm gain is only achieved up to 9m. Likewise, a closer look reveals that the absorption of the pump power is stronger for eight signals with amplification than for one signal. With the thought that commercial amplifiers work with up to 100 channels, it is understandable why the fiber lengths are shortened and built up in multiple stages. In the following, the



**Fig. 3: Multiple Signals and one Power Propagation through Fiber**



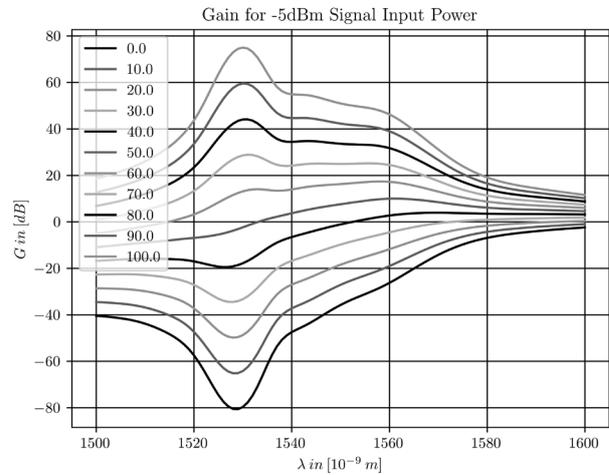
**Fig. 4: Gain for different Wavelengths**

dependence of the gain on the signal wavelength and the fiber length is investigated. **Fig. 4** shows an extended spectrum with respect to the C-band. For modeling purposes, it must be said that only a signal with an input power of -5 dBm and a pump power of initial 27 dBm at 1480 nm was used here. This references the behavior shown in **Fig. 2**. It is obvious that the gain is strongly wavelength dependent, as already seen in **Fig. 3**. Beyond the limits of the C-band, greatly reduced gain is evident. Furthermore, the necessity of a gain flattening filter can be deduced from the graph in order to obtain a uniform gain of all signals. A change of the wavelength shows an increase of the gain. It should be noted that the influence of the back-propagating ASE is decisive for the noise of the amplifier. This affects mainly less powerful signals and pump powers. Thus, the model without ASE is sufficiently accurate. With this modeling, no dynamic components are contained and also the ASE was is considered.

Now the influence of the inversion on the gain shall be investigated. With the derivation of an average inversion over the length of the fiber, this

### III Conclusions

The goal of this paper was to define a reference model for use within a predictive maintenance model. With the reference model a consideration



**Fig. 5: Gain for different Wavelengths and Inversion**

modeling can be achieved for different values of  $N_2$ . The gain over the wavelength of the signal was determined. With this variant of the modeling, since no differential equation must be solved, no consideration of a pump laser and an associated pump power is aimed at. The input signal was assumed to have -5 dBm input signal power over the entire range of the modeling. In **Fig. 5** it can be seen how an inversion of 20 % or less generates no gain over the entire spectral range. The further the inversion increases, the more gain is achieved. It can also be seen that the wavelength dependency increases strongly with increasing inversion. This explains the need for gain-flattening filters. The modeling shows that complex behavior of an EDFA can be represented despite simplifications in the model and assumed restrictions. The dependency of the behavior on the quantity of signals should be emphasized at this point. With the approach of several signals also their different wavelengths are to be listed, which have noticeable influence on the behavior within the fiber and also on the gain.

of the physical behavior of the erbium-doped ions within the fiber and thus to describe the photon flux through the fiber can be achieved. A multi-channel

simulation of an EDFA for steady-state is thus possible. This entails a calculation of the power behavior of the signals and pumps. This in turn can be used to make statements about the gain of a single-stage amplifier. Nevertheless, clear restrictions are to be listed. So this model does not contain any dynamics and also a modeling of the ASE into the system was not aimed at. For significantly large input powers of the signal the back-propagating ASE has a neglectable effect on the inversion

and the noise of an amplifier. Despite this, the ASE has a considerable influence on the effect of EDFAs for small signal input powers. The impact of this effects will be considered in subsequent work. An extension of the model to several amplifier stages and the incorporation of a model for the optical gain control will be aimed at in the following, so that a reference system can be formed that is as accurate as possible. This will be necessary for further analyses.

## V Appendix

All necessary and used parameters are shown in *table I*.

### References

- [1] C.K. Corporation, Newport, RI, 1997.
- [2] S. Becker, Olsson, Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Academic Press, 1999.
- [3] C. Merkle, "Degradation Model for Erbium-Doped Fiber Amplifiers to Reduce Network Downtime", IFIP International Federation for Information Processing, no. 198–208, 2010.
- [4] L. Rapp, "Quality Surveillance Algorithm for Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Design of Reliable Communication Networks, 2005.
- [5] S.-M. Lughofer, Predictive Maintenance in Dynamic Systems, Springer, 2019.
- [6] J.-M.P. Delavaux, E. Chausse, J.A. Nagel, D.D. Giovanni, "Multistage EDFA-circulator-based designs", in Optical Fiber Communications Conference, p. TuJ6, Optica Publishing Group, 1995, doi: 10.1364/OFC.1995.TuJ6.
- [7] S. Yamashita, T. Okoshi, "Performance improvement and optimization of fiber amplifier with a mid-way isolator", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4, no. 11, pp. 1276–1278, 1992, doi: 10.1109/68.166967.
- [8] L. Kaixian, D. Juan, "Research of EDFA gain flattening based on chirped fiber Bragg grating", in 2009 2nd IEEE International Conference on Broadband Network Multimedia Technology, pp. 418–421, 2009, doi: 10.1109/ICBNMT.2009.5348511.

**Table I: Important Parameters**

| Power levels           |  |
|------------------------|--|
| $P_s$                  | Signal power                               |
| $P_p$                  | Pump power                                 |
| Photon fluxes          |  |
| $\varphi_s$            | Signal photon flux                         |
| $\varphi_p$            | Pump photon flux                           |
| EDF related parameters |  |
| $N_1$                  | Population propability of ground level     |
| $N_2$                  | Population propability of metastable level |
| $N_3$                  | Population propability of excited level    |
| $\tau_2$               | Lifetime of metastable level               |
| $\tau_3$               | Lifetime of excited level                  |
| $\sigma_a$             | Cross section for absorbtion               |
| $\sigma_e$             | Cross section for emmision                 |
| $\rho_{erb}$           | Concentration of erbium-doped ions         |
| $A_{erb}$              | Cross-sectional area of erbium-doped fiber |
| $\zeta$                | Saturation parameter                       |
| $\zeta^*$              | Modified saturation parameter              |
| $\Gamma$               | Overlap factor                             |
| General parameters     |  |
| $t$                    | Time                                       |
| $z$                    | Fiber axis                                 |
| $\lambda_p$            | Wavelength of pump power                   |
| $\lambda_s$            | Wavelength of signal power                 |
| $M$                    | Signal quantity                            |
| $G$                    | Gain                                       |

# MODELLAGNOSTISCHE ERKLÄRUNGEN ZUR QUALITÄTSPROGNOSE IM KUNSTSTOFFSPRITZGIESSPROZESS

Norbert Greifzu, M. Sc.<sup>1,2</sup>; Manuel Schneider, M. Sc.<sup>1</sup>; Prof. Dr.-Ing. Andreas Wenzel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Schmalkalden, Forschungsgruppe Eingebettete Diagnosesysteme,  
Blechhammer 9, 98574 Schmalkalden

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Am Vogelherd 90, 98693 Ilmenau

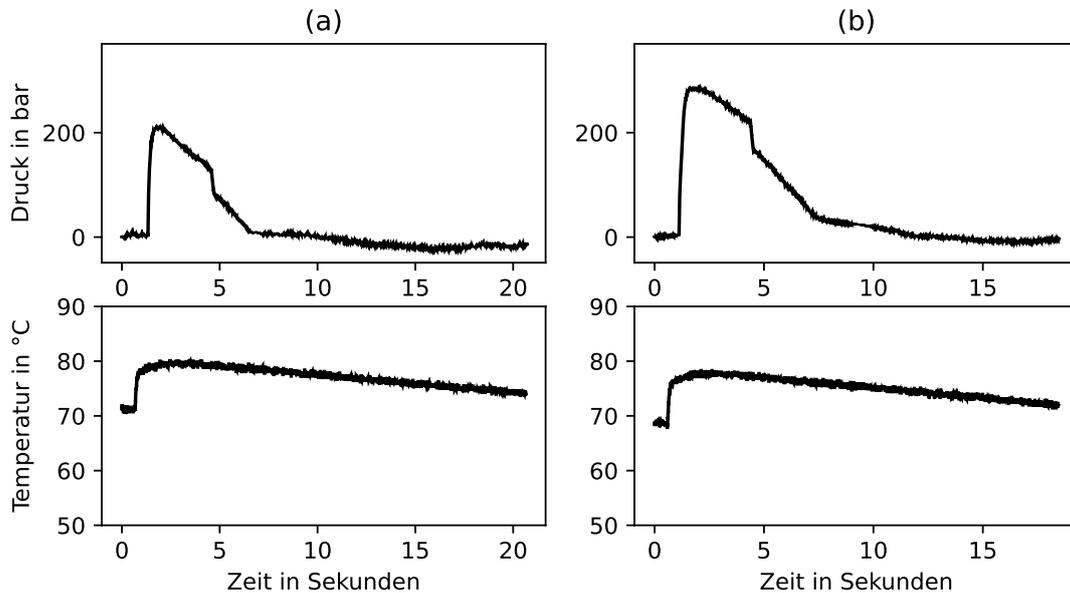
## Zusammenfassung

Erklärungen für die Entscheidungsfindung von KI-Modellen sind eine wichtige Voraussetzung, um die Akzeptanz von KI-Systemen in der industriellen Produktion zu steigern. Moderne Modelle zur Qualitätsprognose werden tendenziell komplexer und leistungsfähiger, erlauben aber nur selten eine direkte Erklärung der Entscheidungsfindung. Modellagnostische Ansätze können helfen, dennoch eine Erklärung zu geben. Bestehende Ansätze zur lokalen modellagnostischen Entscheidungsfindung werden im Folgenden vorgestellt. Ein Ansatz wird auf ein CNN-Modell zur Produktqualitätsprognose angewendet und die Ergebnisse diskutiert.

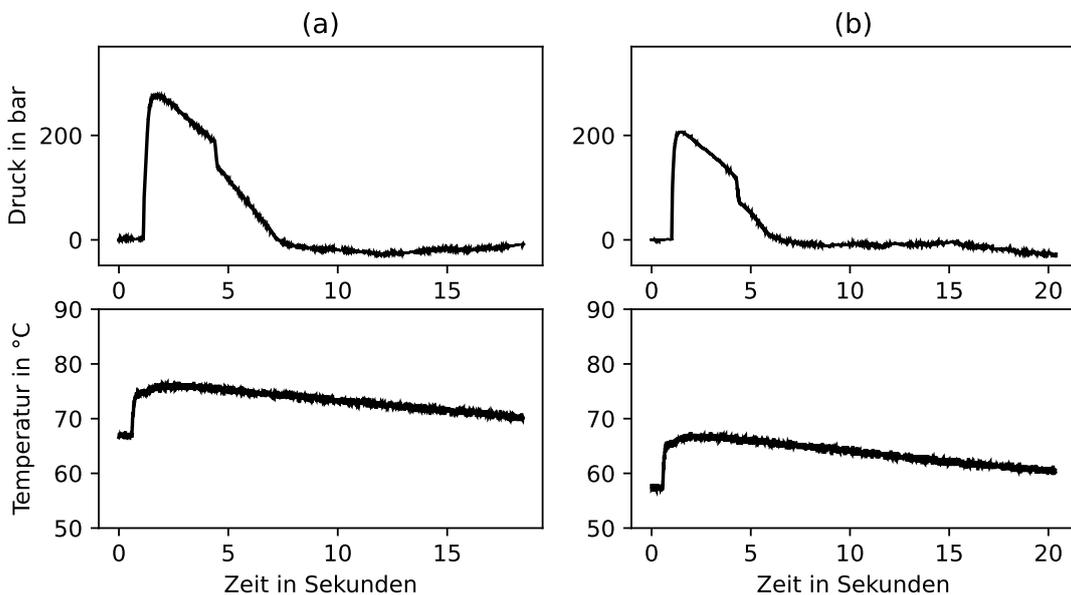
## Ausgangssituation und Problemstellung

Moderne Herstellverfahren werden zunehmend komplexer und die Anforderungen an die Produktqualität nimmt immer mehr zu. Zusätzlich muss seitens der Hersteller immer flexibler auf die Anforderungen des Marktes reagiert werden. Als Folge werden Produktionsanlagen häufiger umgerüstet und es entsteht mehr Aufwand bei der Wiederinbetriebnahme der beteiligten Prozesse. Eine automatisierte Qualitätskontrolle kann dabei helfen, dass beteiligte Personal zu unterstützen. Besonders wünschenswert wären in diesem Zusammenhang Handlungsempfehlungen für Maschinenbediener und Erklärungen zur Entscheidungsfindung von automatisierten Qualitätsprognosesystemen, welche helfen könnten, den Prozess möglichst

schnell im optimalen Arbeitspunkt zu betreiben. Vorarbeiten zur fortlaufenden Prozessparameterüberwachung an Spritzgießwerkzeugen sind in [1] und zur Qualitätsprognose in [2] dargestellt. Herausfordernd sind in diesem Zusammenhang das Vorhandensein nur kleiner Lerndatensätze, welche nicht balanciert sind und aus Zeitreihen verschiedener Länge bestehen. In **Abbildung 1** sind beispielhaft die Prozessdaten zweier „Schlechtteile“ und in **Abbildung 2** die Prozessdaten zweier „Gutteile“ aus einer Kunststoffspritzgießproduktion dargestellt. Zeitreihen verschiedener Länge kommen auch in anderen Bereichen vor. Beispielsweise sei hier die Verfahrensindustrie, die Medizin, die Meteorologie und die Logistik genannt.



**Abbildung 1: Prozessdaten zweier exemplarischer Schlechteile (a) und (b). Während eine deutliche Ähnlichkeit in den Temperaturverläufen (unten) zu sehen ist, kann man deutlichere Unterschiede in den Druckkurven (oben) sehen. Zudem weichen die Durchlaufzeiten der erzeugten Produkte voneinander ab, was der Zeitachse entnommen werden kann.**

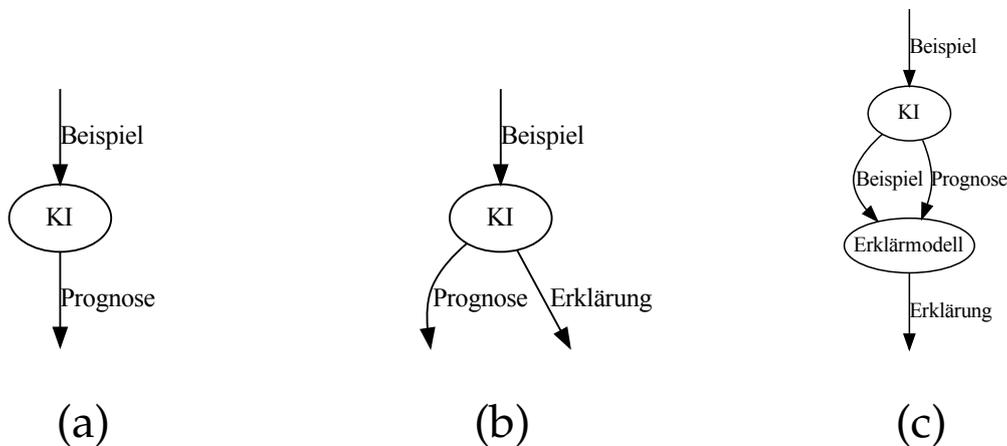


**Abbildung 2: Prozessdaten zweier exemplarischer Gutteile (a) und (b). Durch einfaches Betrachten der Prozessdaten im Vergleich mit Abbildung 1 kann zunächst keine sichere Aussage über die Qualität der zugehörigen Produkte getroffen werden.**

## Stand der Wissenschaft und Technik

Verfahren der Zeitreihenanalyse sind schon lange Gegenstand der Forschung. Im Gegensatz zu den modernen Verfahren zur Bild- und Sprachdatenauswertung mittels unter anderem tiefen künstlichen neuronalen Netzen ist es jedoch nicht zu einem vergleichbaren Durchbruch in der Zeitreihenverarbeitung gekommen. Ein Grund dafür ist, dass elementare Operationen wie die Euklidische Distanz auf Vektoren unterschiedlicher Länge nicht definiert sind. Eine begrenzte Anzahl von Methoden des maschinellen Lernens können Eingangsdaten unterschiedlicher Länge verarbeiten. Dazu zählen rekurrente neuronale Netze (RNN). Diese Gruppe von KI-Verfahren kann unter bestimmten Voraussetzungen sehr leistungsfähig sein und kommt zum Beispiel bei der Google Spracherkennung zum Einsatz [3]. Im Kontext von industriellen Produktionsprozessen werden diese Modelle jedoch nicht eingesetzt, da sie eine erhebliche Anzahl von Trainingsbeispielen benötigen und diese hier bis jetzt nicht verfügbar sind. Insbesondere die Menge von als „Schlechtteil“ gekennzeichneten Trainingsdaten ist hier besonders kritisch. Um diese Daten zu erheben, muss die Produktion in einem Arbeitspunkt betrieben werden, der Ausschuss erzeugt und unter Umständen Beschädigungen an den Anlagen verursachen kann. Es ist also von besonderem Interesse, Verfahren der KI einzusetzen, welche mit möglichst wenig Trainingsdaten für die Klasse „Schlechtteil“ angelern werden kann. Die Akzeptanz von KI-Systemen in der industriellen Produktion ist jedoch momentan eher gering. Ein Grund dafür ist die mangelnde Erklärbarkeit der Prognosen solcher Systeme. In der Wissenschaft ist seit einiger Zeit ein Trend in Richtung Erklärbarkeit von KI-Systemen zu verzeichnen. Dabei gliedern sich die Hauptforschungsaktivitäten in die Gruppe der modellspezifischen und der modellagnostischen Ansätze. In **Abbildung 3** sind beide Ansätze dargestellt. Zudem wird zwischen lokalen und globalen Erklärungen unterschieden. Globale Erklärungen werden aus einem Datensatz erzeugt und benötigen mehrere Beispiele. Lokale Erklärungen

verwenden nur das aktuelle Beispiel. Weitere Verfahren, welche Vergleiche zwischen Datenreihen unterschiedlicher Länge erlauben, basieren unter anderem auf einem dynamischen Beugen der Zeitdimension [4]. Ein großer Nachteil dabei ist jedoch der große Rechenaufwand für die Ermittlung aller Beugungsmuster der Datenreihen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass die Anpassung der Zeitachse derart verformt wird, dass sich ergebende Abbildungen physikalisch nicht sinnvoll interpretiert lassen [5]. Für diesen Fall ergeben sich weitere Probleme, da aktuell der Bedarf an „erklärbaren KI-Entscheidungen“ immer weiter steigt. Wenn beispielsweise auf Modellebene unzuverlässige Interpretationen durch minimale Abweichungen entstehen können, ist eine sinnvolle Erklärung von beispielsweise Klassifikationsalgorithmen nicht möglich. Dieses Problem wird in [6] bei der „One Pixel Attack“-Problematik beschrieben. Eine entsprechende Erklärung der KI-Entscheidung ist allerdings sehr hilfreich, um die Akzeptanz der Methoden seitens des Anwenders zu stärken und dem Anwender im Bedarfsfall Handlungsoptionen zu eröffnen. Inhärent erklärbar Methoden stammen zumeist aus dem Bereich des Maschinellen Lernens. Als ein Beispiel lassen sich hier Entscheidungsbaumstrukturen nennen. Hier lassen sich Ketten von Entscheidungen entlang der Baumstruktur, welche auf dem Weg entlang der Verzweigungen getroffen wurden, auflisten [7]. Der Entwurf von Entscheidungsbaumstrukturen für komplexe Prozesse, wie sie in der industriellen Produktion zum Einsatz kommen, ist aufwändig und verlangt einen tiefen Einblick in die jeweiligen Abläufe. Modellspezifische Erklärungen, wie sie hier bisher vorgestellt wurden, lassen sich auch beim Einsatz von „Convolutional Neural Networks“ (CNN) erzeugen [8]. Hierfür kommen meist Heatmaps zum Einsatz, mit deren Hilfe Regionen besonderer Aktivierung dargestellt werden. Dieser Ansatz war zunächst auf CNN-Modelle ohne vollverschaltete Schichten spezialisiert. In [9] ist der Ansatz auf einen großen Bereich von CNN-Modellen erweitert worden. Ein anderer



**Abbildung 3: Erklärbarkeit von KI-Modellen:** (a) keine Erklärung ist der allgemeine Fall und wird dann angenommen, wenn Erklärungen nicht im Fokus der Anwendung stehen, (b) modellspezifische Erklärungen werden aus dem Prognosemodell miterzeugt und stammen meist aus der vorletzten Schicht eines Klassifikations-/Regressionsmodells und (c) modellagnostische Erklärungen sind ungebunden bezüglich vorheriger Schritte. Dafür ist in einigen Fällen jedoch die Zuführung der Inputdaten notwendig, um eine Erklärung zu erzeugen.

Ansatz wird bei Verfahren der modellagnostischen Erklärungen verfolgt. Hier wird der Klassifikationsalgorithmus als „Black-Box“ aufgefasst. In [10] werden die Erklärungen durch lokale Modelle gewonnen, welche auf Basis gezielt gestörter Variationen der Eingangsdaten um den aktuellen Arbeitspunkt

trainiert werden. Ein Ansatz, der sich auf die Spieltheorie stützt ist in [11] beschrieben. Beide Methoden sind zusammen mit den darauf aufbauenden erweiterten Verfahren in [12] sehr gut dargestellt, sodass eine Übersicht vorhandener modellagnostischer Methoden der Erklärbarkeit vorhanden ist.

## Algorithmen und Methoden

Lokale modellagnostische Erklärmodelle eignen sich gut, um Prognosen für Eingabedaten unterschiedlicher Länge zu erklären. Dabei ist kein Vergleich mit anderen Eingabedaten notwendig, welche eine abweichende Länge aufweisen können, wie es bei globalen Erklärungen der Fall wäre. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Ansatz nach [10] weiter untersucht. In [13] ist der genannte Ansatz für Zeitreihen umgesetzt worden, wobei die entsprechende Zeitreihe in eine festzulegende Anzahl von Zeitscheiben aufgeteilt wird. Diese Zeitscheiben werden anschließend dem lokalen Erklärmodell als Merkmale zugeführt. Zur Prognose der Produktqualität wurde ein CNN verwendet. Die Güte der Qualitätsprognose ist **Tabelle 1** zu entnehmen. Zur Gewinnung wurde die Inputzeitreihe zunächst in eine Anzahl von Zeitabschnitten mit

gleicher Länge geteilt. Der Ansatz von LIME geht dabei davon aus, dass die Merkmale (Zeitscheiben) inaktiviert werden können, sodass inaktive Merkmale keinen Einfluss mehr auf die Prognose ausüben. Dabei werden zufällig Abschnitte der Eingabedaten inaktiviert und dem Prognosemodell zugeführt. Je nach inaktiviertem Bereich, wird sich die prognostizierte Klassenzugehörigkeitswahrscheinlichkeit mehr oder weniger ändern. Der so

|         | Prognose durch CNN-Modell |          |     |
|---------|---------------------------|----------|-----|
|         | Gut                       | Schlecht |     |
| Experte | Gut                       | 35       | 9   |
|         | Schlecht                  | 5        | 109 |

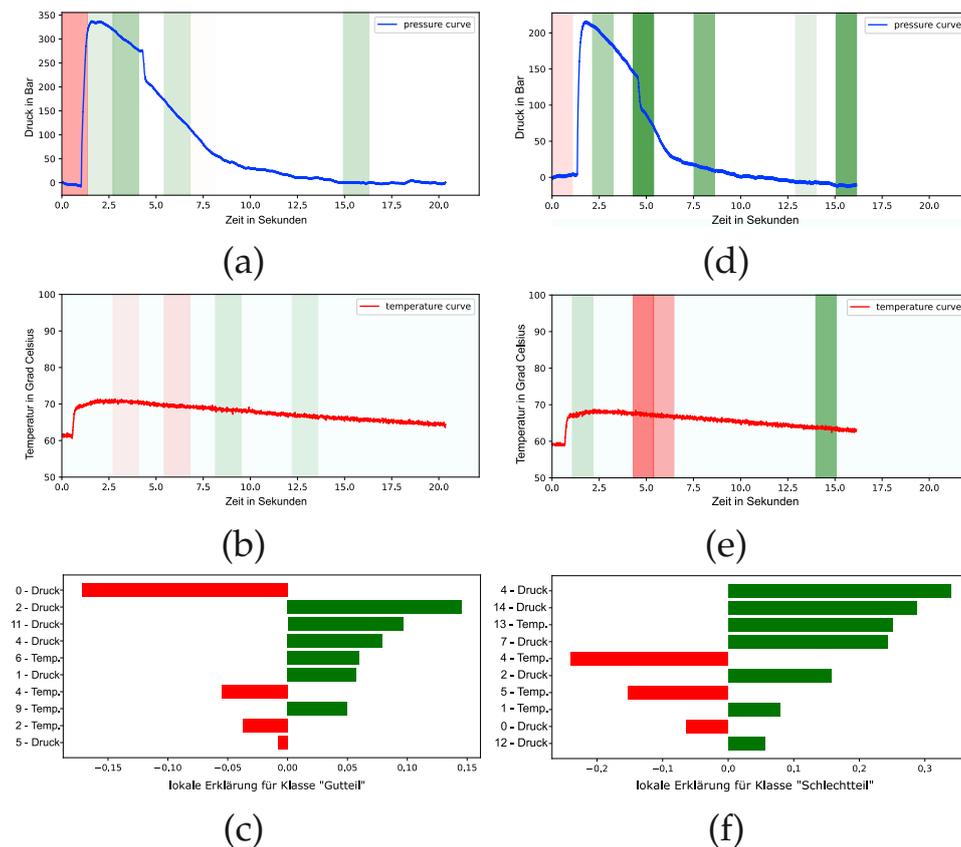
**Tabelle 1: Vertauschungsmatrix der Qualitätsprognose durch das CNN-Modell für einen separaten Testdatensatz.**

gewonnene Datensatz wird nun dazu verwendet, das lokale Erklärmodell zu trainieren. LIME bietet hier mehrere Möglichkeiten zur Auswahl des lokalen Erklärmodells an. Im Weiteren wird das empfohlene Modell der Ridge Regression verwendet. Alle festgelegten Parameter für die lokalen Erklärungen sind in **Tabelle 2** angegeben. Das sich Bereiche in den Prozessdaten von Kunststoffspritzgießprodukten so inaktivieren lassen, dass sie keinen Einfluss auf die Qualitätsprognose durch ein CNN-Modell aufweisen, ist jedoch nicht gegeben. Das Verletzen dieser Grundannahme führt jedoch nicht dazu, dass diese Methode nicht mehr angewendet werden kann. In **Abbildung 4** sind die lokalen Erklärungen für ein Gutteil und

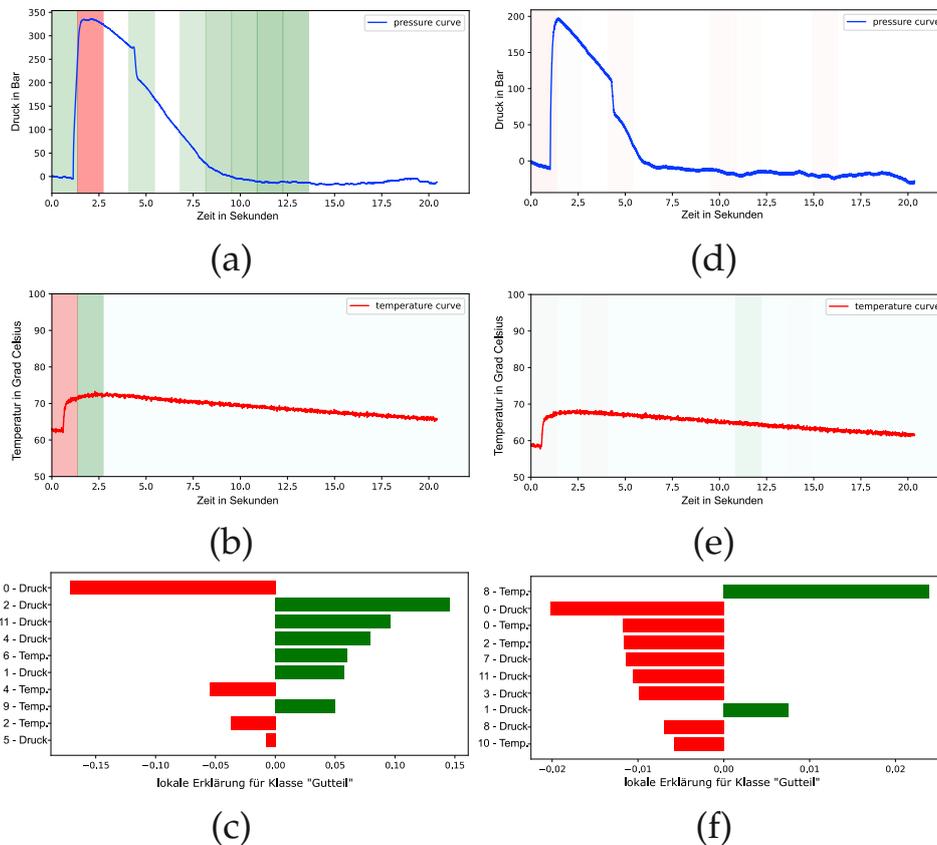
| Parameter              | Werte            |
|------------------------|------------------|
| Anzahl der Merkmale    | 15               |
| Anzahl der Erklärungen | 10               |
| Anzahl der Beispiele   | 100              |
| Lokales Erklärmodell   | Ridge Regression |
| Inaktivierung durch    | Rauschen         |

**Tabelle 2: Verwendete Parameter des Erklärmodells nach [8].**

ein Schlechttteil zusammen mit den zugehörigen Prozessdatenverläufen dargestellt. In den Balkendiagrammen, welche die Koeffizienten des lokalen Erklärmodells enthalten, ist zu sehen, dass die Prognose des CNN-Modells mehrheitlich unterstützt wird. In **Abbildung 5** ist auf der linken Seite



**Abbildung 4: Lokale modellagnostische multivariate Erklärungen für ein Gutteil (c) und ein Schlechttteil (f) mittels LIME [8]. Die zugehörigen Prozessdatenverläufe von Druck und Temperatur sind für das Gutteil in (a) und (b), für das Schlechttteil in (d) und (e) dargestellt. Das CNN-Modell hat in beiden Fällen die korrekte Klasse vorhergesagt. Die Zeitreihen der Prozessdaten werden gemäß [11] in eine konfigurierbare Anzahl von Zeitscheiben (hier 15) aufgeteilt, welche als Merkmale des lokalen Erklärmodells dienen. Die konfigurierbare Anzahl der Merkmale (hier 10) mit dem größten Beitrag zur richtigen (grün) und falschen (rot) Prognose werden in den Graphen der Prozessdaten entsprechend farblich hervorgehoben.**



**Abbildung 5: Prozessdatenverlauf von Druck (a), Temperatur (b), und lokale Erklärungen (c) für ein fälschlich als Gutteil prognostiziertes Schlechtteil. Die lokalen Erklärungen stützen auch hier die Prognose. Der Prozessdatenverlauf von Druck (d), Temperatur (e) und lokale Erklärungen (f) eines korrekt als Gutteil prognostizierten Gutteils. Hier wird die Prognose nicht durch die Erklärungen unterstützt.**

der Prozessdatenverlauf und die lokalen Erklärungen für ein fälschlich als Gutteil prognostiziertes Schlechtteil zu sehen. Auch hier wird die Prognose durch das lokale Erklärmodell gestützt. Auf der rechten Seite von **Abbildung 5** sind die Prozessdaten und die lokale Erklärung für ein Schlechtteil, welches korrekt als Schlechtteil prognostiziert

wurde dargestellt. In diesem Fall wird die Prognose nicht durch das lokale Erklärmodell unterstützt, da die roten Balken mit negativem Beitrag überwiegen. Alle gezeigten Erklärungen wurden mit Daten des Testdatensatzes erzeugt, welcher auch die Basis zur Erstellung der Vertauschungsmatrix in **Tabelle 1** ist.

## Fazit und Ausblick

Die Betrachtung von Zeitabschnitten als Merkmale gibt einen alternativen Blick in die Funktionsweise eines CNN-Klassifikationsmodells. Die Inaktivierungsmodelle nach [13] sind jedoch grundsätzlich nicht für die Erklärung von Entscheidungsfindungen von CNN-Modellen geeignet, da der Ausgang

eines FIR-Filters dadurch höchstens zufällig den Wert Null annehmen kann. Das trotzdem ein Beitrag zur Erklärung dieser Modelle geleistet werden kann, ist in **Abbildung 4** und **Abbildung 5** aufgezeigt. Die gezeigten Erklärungen unterstützen mehrheitlich die gegebene Prognose des CNN-

Modells. In **Abbildung 5** auf der rechten Seite wird die Prognose des CNN-Modells nicht unterstützt. Im Vergleich sind hier die Beiträge des lokalen Erklärmodells um den Faktor 5 bis 10 kleiner. Dieser Effekt könnte zur Schätzung der Unsicherheit einer Erklärung genutzt werden, wenn er reproduzierbar bei allen Erklärungen auftritt, welche tendenziell nicht die Prognose stützen. Für die Handlungsempfehlungen lassen sich jedoch keine gezielten Parameter ableiten. Der Maschinenbediener kann aber besser abschätzen, ob die Entscheidung des CNN in den bestimmten Bereichen plausibel ist oder ob es eine gewisse Unschärfe in der Bewer-

tung gibt. Eine Deaktivierung im Prozessdatensignal nach [13] wird technisch nie auftreten. Hier wäre eine gezielte Deformation/Störmodell des Signals wahrscheinlich zielführender. Der Einsatz eines gelernten Störmodells hätte einen weiteren Vorteil, somit würde eine Beeinflussung im Signalverlauf vielleicht auf physikalische Ursachen abgebildet werden können. Der Verlauf der Innendruckkurve kann physikalisch nicht nur in einem Zeitpunkt eine Verzerrung aufweisen, sobald eine Störung eintritt, kommt es zu einer kumulierten Verzerrung des Signalverlaufs. Diese Aspekte sind aktuell Gegenstand der Forschung.

## Literatur

- [1] M. Schneider, A. Jahn, N. Greifzu, und N. Fränzel, „Development of a chopper charge amplifier for measuring the cavity pressure inside injection moulding tools and signal optimisation with a Kalman filter“, *J. Sens. Sens. Syst.*, Bd. 6, Nr. 1, S. 199–210, 2017.
- [2] N. Greifzu, M. Schneider, M. Werner, N. Fränzel, A. Wenzel, und C. Walther, *Bewertung von Produktionsprozessen mit Verfahren der Künstlichen Intelligenz*. 2020.
- [3] A. Graves, A. Mohamed, und G. Hinton, „Speech Recognition with Deep Recurrent Neural Networks“, *ArXiv13035778 Cs*, März 2013, Zugegriffen: 5. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1303.5778>.
- [4] H. Li, J. Liu, Z. Yang, R. W. Liu, K. Wu, und Y. Wan, „Adaptively constrained dynamic time warping for time series classification and clustering“, *Inf. Sci.*, Bd. 534, S. 97–116, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ins.2020.04.009.
- [5] H. Li, „On-line and dynamic time warping for time series data mining“, *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, Bd. 6, Nr. 1, S. 145–153, Feb. 2015, doi: 10.1007/s13042-014-0254-0.
- [6] J. Su, D. V. Vargas, und S. Kouichi, „One pixel attack for fooling deep neural networks“, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Bd. 23, Nr. 5, S. 828–841, Okt. 2019, doi: 10.1109/TEVC.2019.2890858.
- [7] O. S. Michael Rothe, „Erklärbare KI“, in *Öffentliche Informationstechnologie in der digitalisierten Gesellschaft*, Fraunhofer-Institut FOKUS Kaiserin-Augusta-Allee 31, D-10589 Berlin: Kompetenzen-
- trum Öffentliche IT, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oeffentliche-it.de/-/erklarbare-ki>.
- [8] B. Zhou, A. Khosla, A. Lapedriza, A. Oliva, und A. Torralba, „Learning Deep Features for Discriminative Localization“, *ArXiv151204150 Cs*, Dez. 2015, Zugegriffen: 4. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1512.04150>.
- [9] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, und D. Batra, „Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization“, *Int. J. Comput. Vis.*, Bd. 128, Nr. 2, S. 336–359, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11263-019-01228-7.
- [10] M. T. Ribeiro, S. Singh, und C. Guestrin, „Why Should I Trust You?: Explaining the Predictions of Any Classifier“, *ArXiv160204938 Cs Stat*, Aug. 2016, Zugegriffen: 3. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1602.04938>.
- [11] E. Štrumbelj und I. Kononenko, „Explaining prediction models and individual predictions with feature contributions“, *Knowl. Inf. Syst.*, Bd. 41, Nr. 3, S. 647–665, Dez. 2014, doi: 10.1007/s10115-013-0679-x.
- [12] S. M. Lundberg und S.-I. Lee, „A Unified Approach to Interpreting Model Predictions“, in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, Red Hook, NY, USA, 2017, S. 4768–4777.
- [13] „emanuel-metzenthin – Overview“, GitHub. <https://github.com/emanuel-metzenthin> (zugegriffen 16. März 2022).