KT-KOLLOQUIUM

KT2019

17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

Agile Entwicklung physischer Produkte

Burkhard Corves, Kilian Gericke, Karl-Heinrich Grote,
Armin Lohrengel, Norbert Müller, Arun Nagarajah,
Frank Rieg, Gerhard Scharr, Ralph Stelzer (Hrsg.)

KT2019

Tagungsband

Burkhard Corves, Kilian Gericke, Karl-Heinrich Grote, Armin Lohrengel, Norbert Müller, Arun Nagarajah, Frank Rieg, Gerhard Scharr, Ralph Stelzer

17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

Agile Entwicklung physischer Produkte

am 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen

KT2019

Agile Entwicklung physischer Produkte

17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT 2019)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves (RWTH Aachen)

Prof. Dr.-Ing. Kilian Gericke (Universität Rostock)

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel (Technische Universität Clausthal)

Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller (Technische Universität Clausthal)

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah (Universität Duisburg-Essen)

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg (Universität Bayreuth)

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr (Universität Rostock)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)

Dieser Tagungsband wird online auf dem Publikationsserver

der RWTH Aachen zur Verfügung gestellt.

https://publications.rwth-aachen.de/

DOI: http://doi.org/10.18154/RWTH-2019-08298

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung der Herausgeber oder des Autors unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Vorwort

Systematische Methoden und Vorgehensweisen waren schon immer Bestandteil einer effizienten und effektiven Produktentwicklung. Damit war der Ingenieur mit Hilfe computergestützter Prozesse in der Lage, für vorgegebene Zielfunktionalitäten und Randbedingungen Produkte zu entwerfen, zu gestalten und zu konstruieren. Allerdings kommen aktuell noch weitere Herausforderungen hinzu. Dazu gehören Prozesse und Methoden insbesondere aus der Softwareentwicklung wie agile Methoden und Entwicklungsprozesse kombiniert mit der zugehörigen Digitalisierung und Dokumentation einschließlich Datenaustausch, Informationstransparenz und Cloudcomputing. Welche Bedeutung diese Entwicklungen haben, wird im jüngst erschienenen VDI-Statusreport „Agile Entwicklung physischer Produkte“ aber auch in der erst im letzten Jahr erschienenen Überarbeitung der Richtlinienreihe VDI 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“ deutlich. So wird z.B. in der Einleitung zu Blatt 1 der VDI 2221 ausgeführt, dass die heutigen Methoden der Produktentwicklung wesentlich stärker prozessorientiert sind, was der Tatsache geschuldet ist, dass in der Praxis heute die Beherrschung der Prozesse, die in immer stärkerem Maße fachdisziplin-, unternehmens- und nationenübergreifend sind, als vorrangige Herausforderung gesehen wird.

Solche Tendenzen werden vor allem dadurch befeuert, dass es in der Produktentwicklung schon lange nicht mehr allein um die mechanische Konstruktion geht, sondern um eine ganzheitliche Produktentwicklung, die sich aus einem mechatronischen Ansatz im Kontext des zu realisierenden Prozesses speist, in dem gleichberechtigt Mechanik, Informationsverarbeitung, Sensorik und Aktorik aufeinander abgestimmt auch im Sinne des LifeCycle-Managements entwickelt werden.

Ergänzend hierzu kann dem erwähnten Statusreport entnommen werden, dass die Produktentwicklung häufig auch dadurch geprägt ist, dass Entscheidungen auf Basis von unsicheren und unvollständigen Informationen erfolgen, was dazu führt, dass sich Anforderungen erst im Verlauf des Entwicklungsprozesses zu einem Produkt konkretisieren. Agilität soll diese Problematik lösen oder zumindest abfedern, wobei Agilität die Fähigkeit eines Entwicklungsteams darstellt, kontinuierlich und schnell in einem dynamischen Umfeld auf erwartete und unerwartete Veränderungen zu reagieren, diese anzunehmen und zum Vorteil zu nutzen.

Mit den Beiträgen in diesem Tagungsband sollen den Tagungsteilnehmern vor Ort aber auch dem Leser, der nicht an der Tagung teilnehmen konnte, Anregungen und Grundlagen zur Gestaltung einer effizienten und effektiven Produktentwicklung an die Hand gegeben werden. Vielen Dank an alle, die mit Ihren Beiträgen eine fundierte Diskussionsgrundlage liefern.

Ich wünsche allen Teilnehmern einen angenehmen und erfolgreichen Aufenthalt in der Wissenschaftsstadt Aachen!

Aachen, Oktober 2019 — Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves

Inhaltsverzeichnis

Anwendung **1**

Entwicklung eines Recyclingverfahrens zur Herstellung eines Faserverbunds aus Blisterverpackungen
(*Pascal Schmitt, Clemens Fichtner, Gerhard Scharr*) 2

Untersuchungen zur Formoptimierung strömungsdynamischer Profile durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung
(*Stephan Trautsch, Heike Mrech, Karl-Heinrich Grote*) 12

Einsatz der Lock-In-Thermografie zur Detektion der Rissfront bei bruchmechanischen Untersuchungen von DCB-Proben
(*Clemens Fichtner, André Knopp, Martin Reichel, Gerhard Scharr*) . . 24

Development and implementation of a FEM-based approach for simulating bearing stiffness
(*Johannes Glamsch, Seiedardeshir Sebteini, Frank Rieg, Bernd Sauer*) 34

Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für das Rapid Manufacturing
(*Normann Koldrack, Klaus Brökel*) 50

Datenaustausch, Informationstransparenz und Cloudcomputing **61**

Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle für den effizienten Einsatz von HPC in der digitalen Produktentwicklung
(*Christopher Lange, Tobias Rosnitschek, Matthias Roppel, Frank Rieg*) 62

Entwicklung einer Beschreibungssprache zur Analyse und Behebung von Datenaustauschproblemen
(*Johannes Mohr, Claudia Kleinschrodt, Tobias Siegel, Frank Rieg*) . . . 74

Graphenbasierter Ansatz zur Integration von Customer Feedback in den Produktentwicklungsprozess
(*Franz Wieck, Manuel Löwer, Tim Katzwinkel, David Kessing*) 86

Neuronale Netze und Deep Learning in der Konstruktion **101**
Regelgeometriedetektion in der Flächenrückführung mittels Deep Learning basierter Prozessierung von diskreten Daten
(*Arthur Hilbig, Stefan Holtzhausen, Ralph Stelzer*) 102
Abschätzen kritischer Kerben mit neuronalen Netzen
(*Henrik Stromberg, Armin Lohrengel, Volker Wesling*) 112

Agile Methoden des Model-Based Engineering **125**
Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit
(*Christian Heinrich*) 126
Modellbasierte IKT-Selektion für Methodentätigkeiten in der standortverteilten Produktentwicklung
(*Katharina Duehr, Jonas Kampermann, Patrick Taplick, Iris Gräßler, Albert Albers*) 138
Modellbasierte Entwicklung von Mehrkörpersystemen mittels haptischer Feedbacksysteme
(*Jascha Norman Paris, Mathias Hüsing, Burkhard Corves*) 150

Digitalisierung und Dokumentation im agilen Entwicklungsprozess **161**
Automatisierte Baugruppenoptimierung hinsichtlich Produktanforderungen am Beispiel eines Drehschieberverdichters
(*Dennis Kaczmarek, Armin Lohrengel*) 162
Klassifizierung von Normen zur Eignung für eine Maschinenumsetzbarkeit
(*André Loibl, Arun Nagarajah*) 174
Kopplung von Mixed Reality und einem digitalen Zwilling für den Wartungsprozess einer Industrieanlage
(*Steffen Kunnen, Dmytro Adamenko, Robin Pluhnau, Arun Nagarajah*) 186

Analyse und Vergleich verschiedener agiler Methoden **199**
Sprintplanung in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von Referenzsystemelementen
(*Holger Wessels, Jonas Heimicke, Simon Rapp, Patric Grauberger, Thilo Richter, Sven Matthiesen, Albert Albers*) 200
Alles im Fluss. Kanban und Scrum als Innovationswerkzeuge im Design Thinking für die agile Produktentwicklung.
(*Henrik Schnegas*) 212

Anwendung

Entwicklung eines Recyclingverfahrens zur Herstellung eines Faserverbunds aus Blisterverpackungen

Pascal Schmitt, Clemens Fichtner, Gerhard Scharr

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Leichtbau, Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
E-Mail: pascal.schmitt@uni-rostock.de
Internet: https://www.leichtbau.uni-rostock.de/

Inhalt: *Häufig bleibt für das Recycling von Verpackungen in Verbundbauweise (wie bspw. Blisterverpackungen) nur der Weg der thermischen Verwertung (verbrennen). Dabei werden im Fall der gängigsten Materialkombination (PVC-U und Aluminium) giftige Gase freigesetzt. Diese Arbeit stellt die Ergebnisse vor, Blisterverpackungen wiederzuverwerten (Upcycling). Dabei werden verschiedene Ansätze der Verarbeitung in Anlehnung an Faserverbundbauweise entwickelt und mit dem bestehenden Ansatz der Regranulierung und anschließenden Verschweißung, sowie PVC-U in homogener Form, verglichen. Orientiert an bestehenden Verfahren und Anordnungen faserverstärkter wird das Verbesserungspotential der mechanischen Festigkeit (z.B. E-Modul, Zugfestigkeit) durch die Verstärkungswirkung der Streifen-/ bzw. Faserbauweise untersucht.*

Stichwörter: *Blisterverpackungen, Upcycling, Recycling, Faserverbundwerkstoff, PVC-U, Aluminium, Regranulieren, Streifenbauweise, Zugfestigkeit, E-Modul.*

Development of a recycling process for producing a fibre composite out of pharma blisters

Abstract: *Often, the only way to recycle sandwich material packaging (such as blister packs) is by thermal utilization (burning). In the case of the most common combination of materials (PVC-U and aluminum), toxic gases are released. This work presents the results of recycling blister packs (upcycling). Various approaches to convert the blister packs into a style of fiber composite material are developed and compared with the existing regranulation and subsequent welding method, as well as with PVC-U in homogeneous form. Based on existing processes and arrangements of fiber-reinforced thermoplastics the improvement potential of the mechanical strength (e.g. elastic modulus, tensile strength) is examined by the reinforcing effect of the fiber construction.*

Keywords: *Blister packs, upcycling, recycling, fiber composite material, PVC-U, aluminum, regranulation, stripes, tensile strength, elastic modulus.*

1 Einleitung

Die Zunahme der Verpackungsabfälle hat negative Folgen auf die Umwelt. So enden laut NABU rund 10 Millionen Tonnen Abfälle jährlich im Meer [1]. Jedoch besteht auch bei ordnungsgemäßer Entsorgung Verbesserungspotential. Mehr als die Hälfte der Kunststoffabfälle in Deutschland muss energetisch verwertet, sprich verbrannt werden. Darunter befinden sich Werkstoffverbunde wie Blisterverpackungen, welche sich nicht ausreichend trennen lassen [2], [3]. Werkstoffverbunde aus Aluminium und PVC stellen in Deutschland ein Jahresvolumen von rund 100.000 Jahrestonnen [4]. Im Hinblick auf Upcycling-Methoden wurden an der Universität Rostock Konzepte erarbeitet und getestet, Blisterverpackungen zu einem Faserverbund weiterzuverarbeiten. Durch die gängige Materialzusammensetzung und für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden einheitliche Blister der Firma Ratiopharm GmbH verwendet.

2 Grundlagen Blisterverpackungen

Blisterverpackungen bestehen aus einer „Blisterhaube“ (Vorderseite), welche meist die grobe Kontur des Packguts angibt und eine „Blisterkarte“ (Rückseite), welche mit der Blisterhaube durch falzen, heften, siegeln oder kleben verbunden ist. Blisterverpackungen lassen sich in unterschiedlichen Ausführungen, zum Beispiel als Klappblister, Schiebeblister und Siegelblister finden und sind damit vielseitig einsetzbar. Insbesondere für tropensichere Verpackungen und Pharmaprodukte werden Siegelblister verwendet [5]. Dabei werden hohe Anforderungen an Dichtigkeit und die zum Schutz von Kindern vorausgesetzten Eigenschaften gestellt [6]. Daraus resultieren Kontaktstellen, die sich nur mit großem Aufwand trennen lassen.

Als Material wird meist hartes Polyvinylchlorid (PVC-hart, oder PVC-U) und teilweise Polypropylen (PP) verwendet. Bei den Materialien handelt es sich um amorphe Thermoplaste (PVC-U) und teilkristalline Thermoplaste (PP). Da der Anteil von Blistern aus PVC dominiert, werden zunächst ausschließlich diese betrachtet. Die Folien werden je nach Ausgangsform in einem Tiefziehprozess verformt und weisen Dicken von 250 – 300 µm auf.

PVC-U zeichnet sich durch hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte, sowie eine gute chemische Beständigkeit, Dichtigkeit gegenüber Aromastoffen, Fetten, Ölen und Sauerstoff und guten Klebe- und Schweißeigenschaften aus [1], [5].

Nachteilig zu nennen sind negative Eigenschaften zum Recycling, weil bei der Verbrennung giftige Gase aus Chlorwasserstoff freigesetzt werden, welche eine teure Abgasaufbereitung nach sich zieht. Außerdem ist der Heizwert gegenüber anderen Kunststoffen deutlich geringer. Die Einsatztemperaturen von PVC-U liegen zwischen -5 °C und +60 °C. Die Schmelztemperatur nach ISO 11357 liegt bereits bei 80 °C [1].

Die Blisterkarten, auch als Deckschichten bezeichnet, bestehen meist aus Aluminiumfolie. Nach Herstellerangaben (Alfipa) wird dabei meist die Legierung *EN-AW 8079* eingesetzt. In Deutschen Tabellenwerken trägt die Legierung die Bezeichnung *AlFeSi* und weist die gleichen Legierungsbestandteile wie handelsübliche Aluminiumfolie auf. Gute Eignung von Aluminiumfolie besteht unter anderem durch die geringe Dichte im Vergleich zu Stahl bei hohen Festigkeitswerten (bis 700 MPa), gute Witterungsbeständigkeit und ausbleibende Permeation von Wasser und anderen Stoffen auch bei Schichtdicken weit unter der verwendeten Dicke der Blisterkarten von rund 50 µm. Eine Substitution von Aluminium durch Kunststoff zu Blistern aus homogenem Material hat zur Folge, dass die Permeation zunimmt und die Haltbarkeit sinkt [7].

Stand der Technik ist das mechanische Trennen beider Komponenten. Ein Anteil von rund 10 % PVC im Aluminium führt jedoch dazu, dass das Aluminium nicht direkt recycelt werden kann und mit thermischer Nachbehandlung entstehen Endprodukte deren Qualität weit unter der von Primäraluminium liegt [4].

Alternative Ansätze beschäftigen sich mit der Verbesserung des Trennprozessen. Dabei arbeitet das Fraunhofer IVV an einem biologisch abbaubaren Lösemittel [4]. In Hinblick auf die direkte Weiterverarbeitung zu Produkten, als „Upcycling“ bezeichnet, bestehen Bemühungen von Firmen wie TerraCycle und auch der Universität Rostock Blister zu granulieren und anschließend weiterzuverarbeiten. Materialkennwerte vorausgegangener Versuche wurden in Bezug auf den Anteil von Heißsiegellack (Verbindet Aluminium und PVC-U) mit dem Ergebnis, dass die Festigkeitswerte deutlich unter denen von reinem PVC-U liegen und die Zunahme von Heißsiegellack zu keiner deutlichen Verbesserung der Festigkeit führen [8]. Ergänzend zu diesen vorausgegangenen Versuchen dienen die hier vorgestellten dem Grund, eine mögliche Verstärkungswirkung durch Faserstrukturen zu überprüfen.

3 Faserverstärkte Thermoplaste

Faserverbundwerkstoffe vereinen die positiven Eigenschaften von mindestens zwei Materialien (Fasern und Matrix) und erzielen so einen Mehrwert. Sie lassen sich den Verbundwerkstoffen unterordnen, zu denen neben *Faserverstärkten Werkstoffen* noch *Teilchenverbundwerkstoffe* und *Schichtverbundwerkstoffe* gehören [9].

Fasern dienen der Übertragung von Lasten im Werkstoffverbund. Es können unterschiedlichste Materialien, wie Aramid-, Metall-, Glas-, Kohle- und Naturfasern dafür verwendet werden. Bei der Faserlänge wird in Kurzfasern (0,1 – 5 mm), Langfasern (bis 20 mm) und Endlosfasern (ab 20 mm) unterschieden [9].

Die grundsätzlichen Aufgaben der Matrix bestehen darin, Kräfte in die Fasern einzuleiten und diese von Umwelteinflüssen sowie vor Verformung zu schützen. Aufgrund positiver Verarbeitungseigenschaften von Kunststoffen, guter chemischer Beständigkeit und einer relativ hohen spezifischen Festigkeit, eignen diese sich besonders als Matrixmaterial. Darunter dominieren derzeit duroplastische Werkstoffe wie Vinylester-, Polyester- oder Epoxydharze. Thermoplastische Kunststoffe gewinnen jedoch durch diverse Vorteile zunehmend an Bedeutung. So lassen sich thermoplastische Matrices beispielsweise einfach thermisch verformen und die Verarbeitungszeit beträgt somit meist wenige Minuten, während duroplastische Matrices teilweise einem mehrstündigen Trocknungsprozess obliegen. Thermoplastisches Material ist außerdem besser lagerfähig, weil es bei Zimmertemperatur steif ist. Aus diesem Grund eignen sich thermoplastische Pregregs im Vergleich zu duroplastischen nur bedingt für händische Laminierverfahren. Auch in Hinblick auf die Recyclingmöglichkeiten kommt thermoplastischen Abfällen die leichte thermische Umformbarkeit zugute. [9], [10]

4 Lösungsvarianten

Im folgenden Teil werden die Ansätze der Verarbeitung von Blisterverpackungen, sowie die Ergebnisse zur praktischen Überprüfung, vorgestellt.

4.1 Versuchsdurchführung

Als ausgangsmaterial stehen leere, gereinigte Blister, welche zunächst mit Heißluft (rund 300 °C) und einem unbeheizten Blech planiert werden. Diese werden dann nach je nach Ansatz wie folgend aufgeführt weiterverarbeitet (vergl. mit den jew. Zahlen in Abb. 1):

1. Flächige Blisterverpackungen als Schichtbauweise – dabei werden die PVC-Seiten der Blister flächig miteinander verschweißt. Durch eine Gewebestruktur (Kombination aus Leinwand- und Atlasbindung) können mehrere Schichten miteinander verbunden werden. (Abb. 1, „1“)
2. Flächige Blister mit Glasfaserverstärkung – dabei werden Kurzglasfasern zwischen den thermoplastischen Kontaktflächen eingearbeitet und zusammen verschweißt. (Abb. 1, „2“)
3. Blister in Streifenform (auch als „Blisterfasern“ bezeichnet) – dabei werden die Blister längs in Streifen der Dicke 0,5 bis 2 mm geschnitten und in unidirektionaler (UD) Anordnung verschweißt. (Abb. 1, UD mit 0°-Faserwinkel „3a“; UD mit 90°-Faserwinkel „3b“)
4. Blister in Granulatform – dafür werden die Blister möglichst gleichmäßig zerkleinert und das Granulat miteinander verschweißt. (Abb. 1, „4“)

Für den Formschluss der zuvor genannten Anordnungen hat sich das Verschweißen mit einer Fließtestpresse bei Temperaturen zwischen 180…205 °C, bei einem Anpressdruck von rund 0,4 Bar und einer Anpressdauer von 2…3 min. als geeignet herausgestellt.

Zur Fertigung von Probekörpern für die Zugversuche (nach DIN 527-4) werden zunächst Platten gefertigt und aus diesen werden die Probekörper herausgearbeitet (siehe Abb. 1). Die Zugprobekörper werden beidseitig mit Krafteinleitungselementen (siehe rechte Bildseite, Abb. 1) versehen. Neben den oben genannten eigen konzipierten Ansätzen (1-3) und

dem zuvor an der Uni Rostock bereits getesteten Ansatz der Regranulierung (4) werden Referenz-Probekörper aus reinem PVC-U erstellt (siehe Abb. 1, „5“).

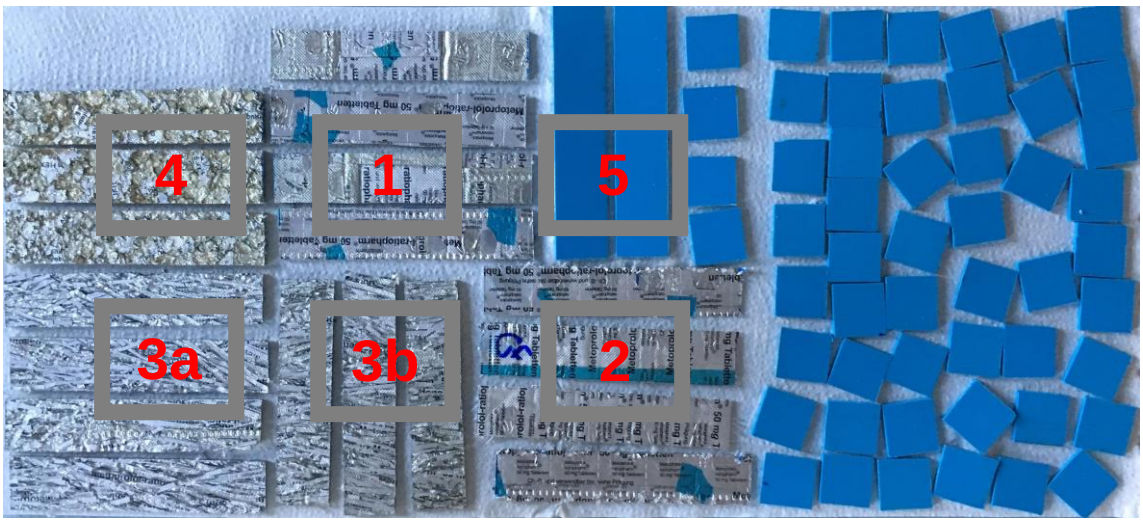


Abbildung 1: Probekörper unterschiedlicher Ansätze während des Herstellungsprozesses

4.2 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Zugproben vorgestellt. Die Abbildung 2 zeigt die charakteristische Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Verläufe für jeden geprüften Ansatz. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Probekörper aus Granulat (grün) die geringste Festigkeit aufweisen. Die Plattenbauweise führt, mit und ohne Glasfaserverstärkung zu einer geringen Erhöhung der Festigkeit. Die Kurven der Blisterfasern, in und orthogonal zur Zugrichtung, verlaufen zunächst parallel. Bei der Faseranordnung senkrecht zur Zugrichtung kommt es jedoch deutlich früher zum Bruch (orange und rote Kurven). Der Verlauf von der Probe aus homogenem PVC-U weist, wie dem Verlauf zu entnehmen ist, die höchsten Spannungswerte auf.

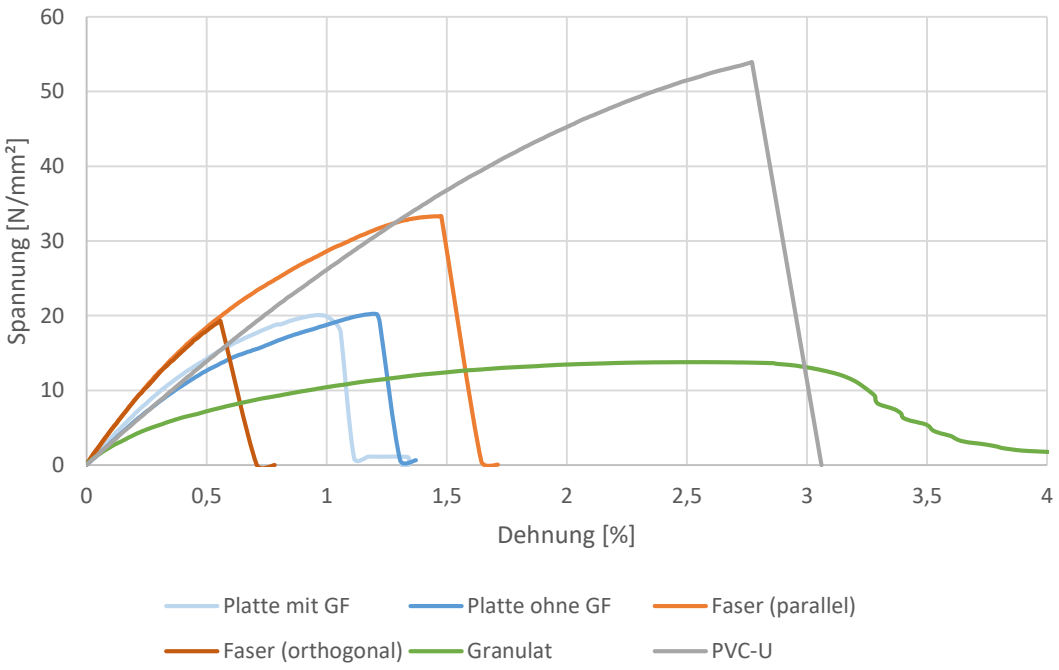


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der unterschiedlichen Ansätze

Das folgende Diagramm (Abb. 3) stellt die Zugfestigkeit der einzelnen Proben als Balkendiagramm dar. Darin ist auch die deutliche Erhöhung der Festigkeit durch die Faserstruktur in Zugrichtung (orange dargestellt) zu erkennen. Diese kann im Vergleich zu den anderen Recyclingansätzen eine Festigkeitssteigerung >70% erreichen. Die Proben aus reinem PVC-U liegen jedoch deutlich darüber.

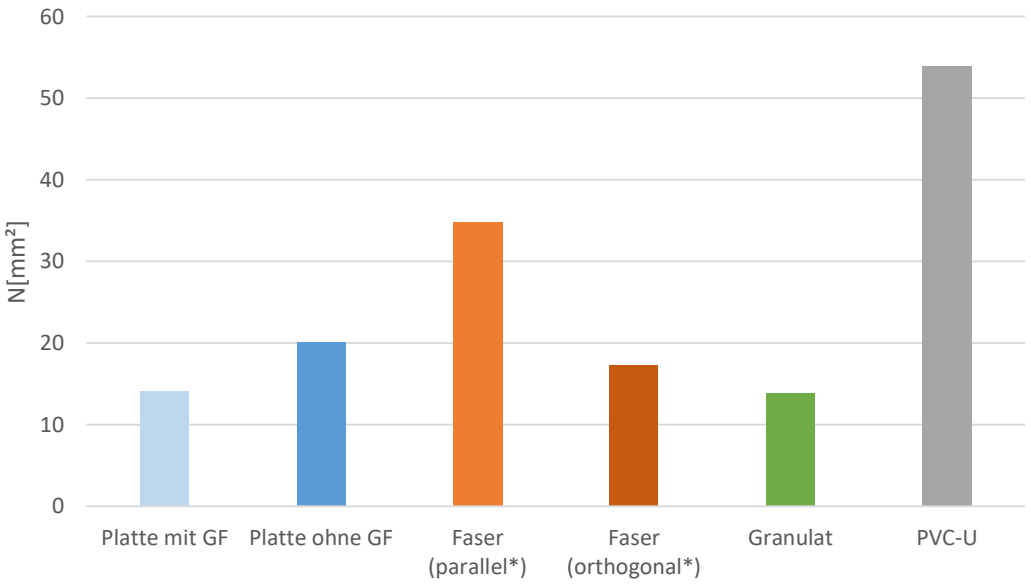


Abbildung 3: ermittelte Zugfestigkeit der unterschiedlichen Ansätze

Zurückzuführen ist die Abnahme der Festigkeitswerte durch die Zunahme der Fehlstellen im Material. Neu gebildete Kontaktstellen von PVC-U und Aluminium verbinden sich schlecht und Stellen eine Schwachstelle im Querschnitt der Probekörper dar. In der folgenden Abbildung sind diese schematisch für die unterschiedlichen Ansätze dargestellt.

Abbildung 5: Kontaktstellen von PVC-U und Aluminium im Querschnitt ((a) Blisterfasern in Zugrichtung, (b) Blisterfasern orthogonal zur Zugrichtung, (c) granulierte Probekörper, (d) Plattenbauweise

Für das Zug-E-Modul sieht die Veränderung anders aus. Hier kann durch den Anteil von Aluminium im Material die Steifigkeit gesteigert werden (siehe Abb. 4). Das Ist auch den anfänglichen Steigungen der Sp.-Dehnungs-Diagramme zu entnehmen (siehe Abb. 2).

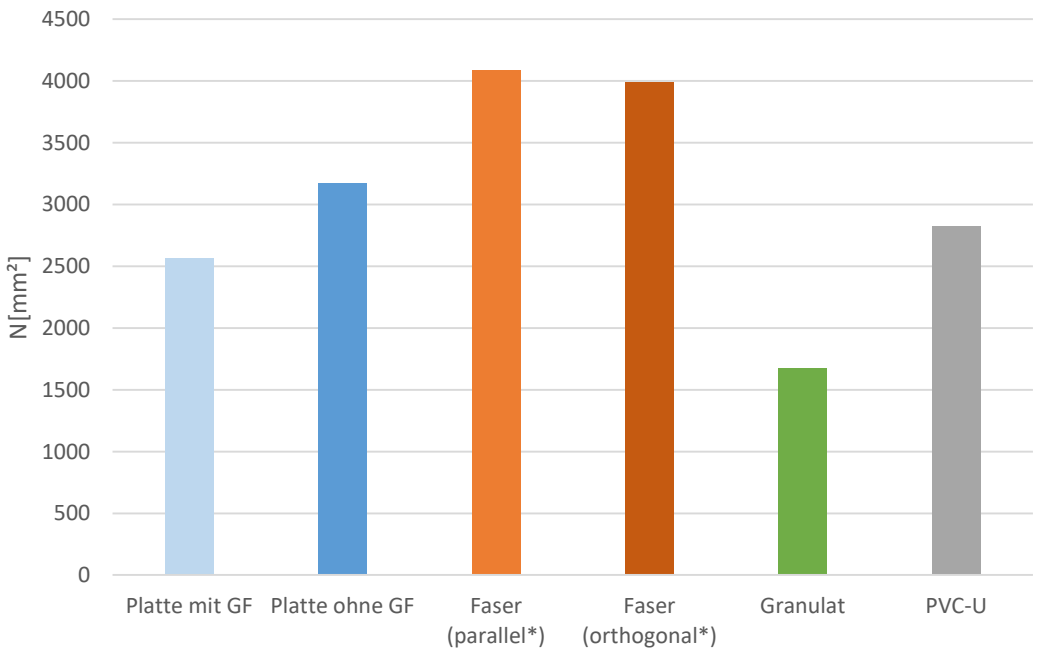


Abbildung 4 ermittelte E-Moduln der unterschiedlichen Ansätze

5 Fazit und Aussicht

Zusätzlich verwendete Glasfasern bringen nach dieser Versuchsdurchführung keinen Mehrwert. Grund kann in der ungenügenden Konsolidierung zwischen Glasfasern und PVC-Matrix liegen. Durch die Herstellung von Streifen wird die Faserbauweise nachempfunden und es konnte dabei bereits eine Steigerung der Festigkeit um über 100 % (im Vergleich zu granulierten Blistern) erreicht werden. Es ist weiterhin zu überprüfen, ob durch verringerte Faserbreiten die Fehlstellen im Material weiter vermindert werden und eine weitere Verstärkungswirkung erzielt werden kann. Durch die Verwendung unterschiedlicher PVC-U-Werkstoffe lässt sich über die Aussagekraft des direkten Vergleichs mit reinem PVC-U diskutieren. Das hohe Abfallaufkommen und die Belastung der Umwelt dadurch, würden weitere Bemühungen rechtfertigen und könnten bei Erfolg einen Mehrwert dadurch bringen, dass beide Materialien eine hohe Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen haben und beispielsweise im Wassersport eingesetzt werden könnten. Eine Umsetzung der Weiterverarbeitung in Streifenbauweise zu flächigen Bauteilen oder zur Herstellung flächiger Halbzeuge (sog. Organobleche) könnte beispielsweise wie in der folgenden Abbildung aussehen. Die leeren Blister werden der Vorrichtung von der linken Seite zugeführt, planiert und mit Walzen und einem Schneidwerkzeug (bspw. Aktenvernichter) zerkleinert und transportiert, bevor sie unter thermischer Einwirkung und Druck, verschweißt werden.

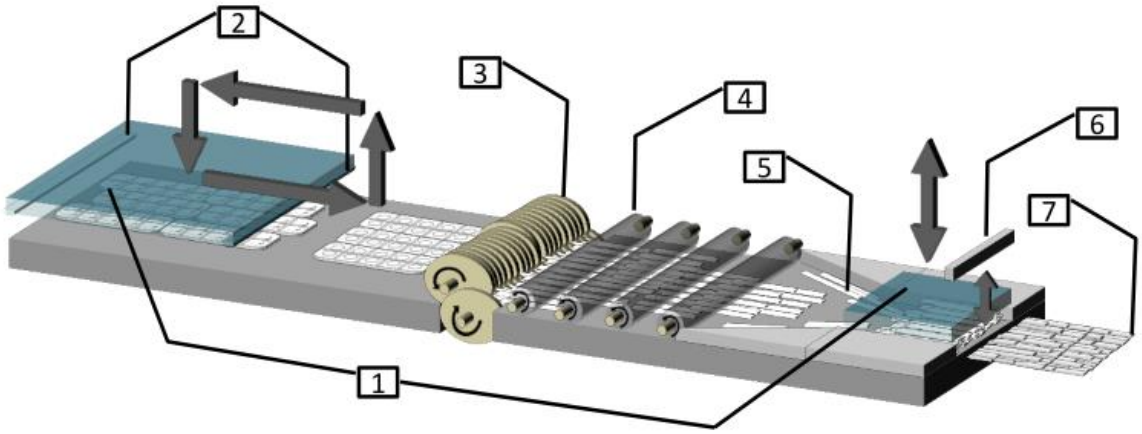


Abbildung 6 Umsetzungsszenario ((1) Fließpresse, (2) Mitnehmer, (3) Schneidwerkzeug, (4) Förderwalzen, (5) Faserführung, (6) Faseranschlag, (7) Organoblech (Halbzeug))

Literatur

[1] G. Abts and G. Abts, “Kunststoff-Wissen für Einsteiger,” in *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*, 2016.

[2] Umweltbundesamt, “Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2015,” 2015.

[3] CONVERSIO Market & Strategy GmbH, “Stoffstrombild Kunststoffe in deutschland 2017,” 2018.

[4] M. A., “Hochwertiges Sekundäraluminium aus Verpackungsabfällen der Pharmabranche – raffiniertes Aluminium.” .

[5] O. E. Ahlhaus, “Verpackung mit Kunststoffen: Mit 91 Tabellen,” 1997.

[6] R. Abelmann and S. Denley, “Blister als kindergesicherte Primärpackmittel: Teil 1: Technische Merkmale und Normen gewährleisten Sicherheit,” vol. 74, pp. 1371–1374, 2012.

[7] “Alfipa - Aluminium Film Paper. Aluminiumlegierungen und ihre Eigenschaften,” 2019. [Online]. Available: https://alfipa.de/produkte/aluminiumlegierungen/.

[8] P. Schmidt, “Untersuchung zum stofflichen Recycling von pharmazeutischen Blisterverpackungen,” Universität Rostock, 2016.

[9] *Handbuch Verbundwerkstoffe*. 2014.

[10] G. W. Ehrenstein and G. W. Ehrenstein, “Faserverbund-Kunststoffe,” in *Faserverbund-Kunststoffe*, 2018.

„Untersuchungen zur Formoptimierung strömungsdynamischer Profile durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung“

M.Sc. Stephan Trautsch [1)]

Prof. Dr.-Ing. Heike Mrech [2)]

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote [1)]

[1)] Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Institut für Maschinenkonstruktion, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg
Email: {stephan.trautsch, karl.grote}@ovgu.de; Internet: www.ovgu.de

[2)] Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg, 06217 Merseburg
Email: heike.mrech@hs-merseburg.de; Internet: www.hs-merseburg.de

Inhalt: *Strömungsdynamische Profile kommen in vielen technischen Systemen zum Einsatz. Sei es bei der Nutzung der Wind- und Wasserenergie oder aber in der Luft- und Schifffahrt. Dabei hat die Form der Profilkontur einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Kräfte am umströmten Querschnitt und somit auch auf die zu optimierenden Zielparameter. Diese können je nach Anwendungsgebiet stark variieren. Die Maximierung der Leistung einer Wasserturbine und die Vermeidung von Kavitation bei einer Schiffsschraube sind nur zwei mögliche Aspekte. Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge bei der Profilumströmung und die unterschiedlichsten Anforderungsrestriktionen machen die Suche nach der optimalen Form sehr kompliziert und zeitaufwändig. Die Optimierungsaufgaben sind durch eine sehr große Anzahl und Dynamik der Einflussparameter gekennzeichnet. Bei der Auslegung werden daher immer häufiger multikriterielle Optimierungsverfahren eingesetzt. Eine strömungsmechanische Formoptimierung gliedert sich dabei in mehrere Teilschritte, wobei die numerische Strömungssimulation in der Kombination mit naturanalogen Optimierungsverfahren den Kern dieser Prozessfolge darstellt. Die hier vorgestellte aktuelle Forschungsarbeit greift dieses Kernelement der Formgebungsverfahren auf und gestaltet es flexibler und transparenter als konventionelle Konstruktionsmethodiken. Ziel ist es den Konstruktionsprozess durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung so zu verbessern, dass die resultierende Formänderung in direkte Korrelation zu der initiierenden charakteristischen Strömungsgröße gesetzt werden kann. Der gewonnene Datenpool wird anschließend analysiert und in eine integrative Wissensbasis überführt.*

Schlüsselwörter: *Formoptimierung, dynamische Strömungsprofile, direkte Netz-Kontur-Kopplung*

Investigations on the shape optimization of flow-dynamic profiles through a direct and flexible mesh-contour coupling

Abstract: *Profiles using flow dynamics are utilised in many technical systems. Whether in wind power or hydroelectric power, or even in transport by air or by sea. In these areas, the shape of the profile contour has a significant influence on the resulting forces placed on the profile within the flow stream, and thus also on the outcome measures. According to the area of use, these can vary dramatically. Two possible aspects are the maximal output of a water turbine and the avoidance of cavitation of a ship propeller. The complex processes of flow dynamics while the profile is within the flow stream and the extremely variable restrictions of requisites make the optimal design very complicated and time-consuming. The actions required for optimisation are characterised by the large quantity and potential impact of influencing factors. Because of this, optimisation procedures with multiple criteria are being increasingly implemented at the construction stage. Here, the shape optimisation of flow technology is structured into various sub-steps, where the essence of the procedure lies in the amalgamation of numeric flow simulations with optimisation processes based on the natural world. The research project presented here takes this essential element of the design procedure and shapes it to be more flexible and transparent than conventional construction methods. The aim is to improve the construction process in such a way through a direct and flexible connection of grid and contour, that the resulting changes in shape can be placed in direct correlation with the initial typical flow size. The data pool obtained is finally analysed and transferred into an integrative knowledge base.*

Key words: *shape optimisation, profile using flow dynamics, direct connection of grid and contour*

1. Einleitung

Im Konstruktionsprozess von Strömungsmaschinen kommt der Auslegung und Formoptimierung strömungsdynamischer Profile eine besondere Bedeutung zu. Hier sind die wichtigen und schwierigen Optimierungsaufgaben zur Effizienzsteigerung der Systeme zu lösen wobei hier in der Regel auch die hohen Konstruktionskosten anfallen. Dies betrifft sowohl den Bedarf an Entwicklungs- und Optimierungszeit als auch die Notwendigkeit des Einsatzes von Experten und komplexen Optimierungsmethoden sowie -werkzeugen. Dabei hat die Form der Profilkontur einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Kräfte am umströmten Profil und somit auch auf die zu optimierenden Zielparameter. Diese können je nach Anwendungsgebiet stark variieren. Die Maximierung der Leistung einer Wasserturbine und die Vermeidung von Kavitation bei einer Schiffsschraube sind nur zwei mögliche Aspekte. Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge bei der Profilumströmung und die unterschiedlichsten Anforderungsrestriktionen machen die optimale Formgebung sehr kompliziert und zeitaufwändig. Die Optimierungsaufgaben sind durch eine sehr große Anzahl und Dynamik der Einflussparameter gekennzeichnet.

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der Effizienzsteigerung einer Profilgeometrie. Dabei wird diese in ihrer Form dahingehend optimiert, dass der Widerstand in Strömungsrichtung minimiert und der Auftrieb quer zu dieser maximiert wird. Modernste Wasserkraftanlagen können über 90 % und Windkraftanlagen über 80 % (vom Betz'schen Leistungsbeiwert) der theoretisch möglichen Leistung verwerten. Angesichts des weltweiten Potentials dieser Energieressourcen erscheint eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades als durchaus angemessen wobei auch kleinste Effizienzsteigerungen einen enormen globalen Mehrwert generieren können.

Ziel ist es den Konstruktionsprozess durch eine direkte und flexible Netz-Kontur-Kopplung so zu verbessern, dass die resultierenden Formänderungen in direkte Korrelation zu den initiierenden charakteristischen Strömungsgrößen gesetzt werden können. Der gewonnene Datenpool wird anschließend analysiert und in eine integrative Wissensbasis überführt.

2. Stand der Technik

Bei der Auslegung werden daher immer häufiger multikriterielle Optimierungsverfahren eingesetzt. So verwendet *Samad* [1] eine Mehrzieloptimierung auf Basis dreidimensionaler Navier-Stokes-Gleichungen. Ausgehend von den vier verwendeten Konstruktionsparametern generiert er eine Mehrziellösung bezüglich der Zielfunktionen Effizienz, Gesamtdruck und Drehmoment. Ein ähnliches Vorgehen wird von *James* [2] umgesetzt. Ebenfalls unter Verwendung eines genetischen Mehrzieloptimierungsalgorithmus soll sowohl die jährlichen Energieproduktion der Turbine maximiert als auch die Schaufelmasse minimiert werden. Die multikriterielle Optimierung hat sich bei der Turbomaschinengestaltung als durchaus sinnvoll herausgestellt. Eine unflexible und einseitige Optimierungsstrategie generiert oft mehr Nachteile als Vorteile insbesondere hinsichtlich der Kombination Festigkeit/Aerodynamik. Resultierend daraus, ergeben sich eine Schar an möglichen Kreuzungen wobei diese stark voneinander abhängen. Ohne das Herabsetzen einer Zielgröße ist somit keine Erhöhung einer anderen mehr möglich. Künstliche neuronale Netze können diesen Vorgang beschleunigen und unter gewissen Voraussetzungen auch zu einer Effizienzanhebung beitragen. Die Kombinatorik aus formsuchenden genetischen Algorithmen und zeitsparenden künstlichen neuronalen Netzen genoss somit in den vergangenen Jahren große Aufmerksamkeit. So lagen auch *Verstraete* [3] und *Uelschen* [4] vergleichbare Ansätze zu Grunde. Differenzierungen entstanden insbesondere bei der Parametrisierung und der Ausformulierung von Zielfunktion und Nebenbedingungen. *Verstraetes* Parametrisierung der radialen Schaufelform basiert dabei auf dreiundzwanzig Konstruktionsparametern. Die Dickenverteilung der Schaufelkontur wurde nicht als Optimierungsparameter vorgesehen. Diese wurde von *Uelschen* durch die Verwendung von zweidimensionalen B-Spline-Funktionen parametrisiert und in einen entsprechenden genetische Algorithmus zur Formoptimierung axialer Schaufelprofile eingebunden. *Pierret* [5] kommt nach der Realisierung einer ähnlichen Herangehensweise zu dem Resultat, dass eine starke Erhöhung der geometrischen Konstruktionsparametern unabdinglich für eine realistische Schaufelmodellierung ist. Ungeachtet der Vorteile die ein naturanaloges Optimierungsverfahren auf Basis parametrisierter mathematisch definierter

Kurvenzüge verspricht, ergeben sich auch einige grundlegende Probleme bei dessen Verwendung. Es wird vorausgesetzt, dass „gute“ Lösungen sich ähnlich sind und dass man daher durch Mutation und Rekombination schrittweise zu besseren Lösungen gelangen kann. Es ist demnach davon auszugehen, dass unkonventionelle Formvarianten oder neue Design-Konzepte mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erzeugt werden.

3. Formgebung mithilfe einer hochflexiblen und direkten Konturparametrisierung

Die konstruktive Gestaltung der Profilkontur im Optimierungsprozess wird konventionell durch mathematisch definierte Kurvenformen (Bézier-, B-Spline-, NURBS-Kurven) realisiert und verfolgt die Prämisse, die kennzeichnenden Kontrollpunkte zu minimieren. Dieser Ansatz begrenzt sowohl das potentielle Spektrum an Profilkonturen als auch die Intervention der Geschwindigkeits- und Druckverteilung, um und an der Profilkontur, auf deren Gestaltung. Eine direkte Verknüpfung der strömungsmechanischen Eigenschaften des Fluides mit der Formgebung des Optimierungsverfahrens kann somit nicht erzielt werden. Eine Unzulänglichkeit, die *Pierret und Van den Braembussche* schon 1999 erkannten und in ihrer Abhandlung [6] formulierten.

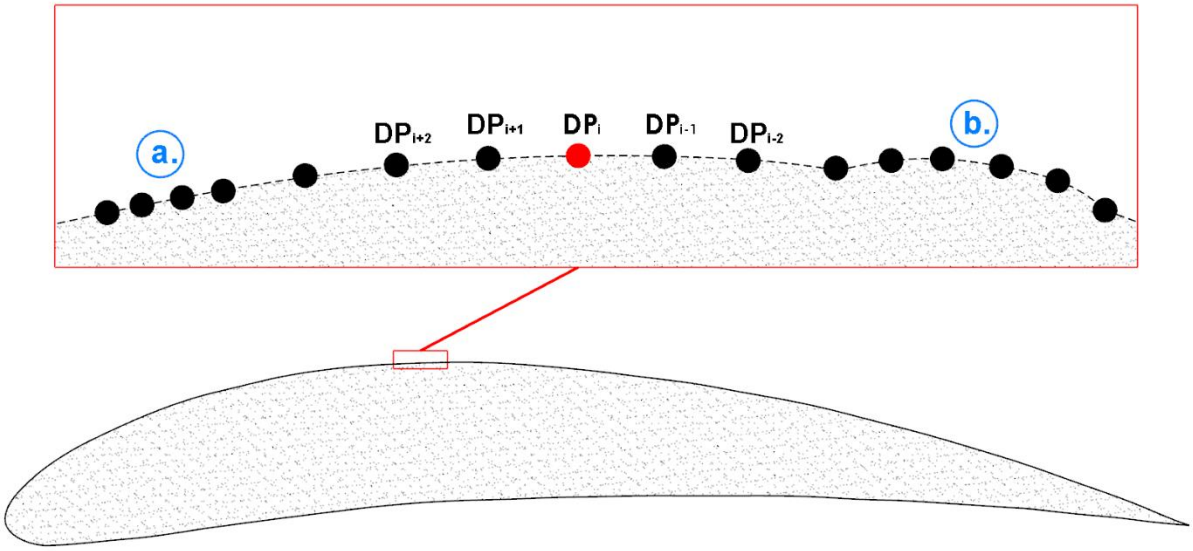


Abbildung 1 - Schematische Darstellung der direkten Parametrisierung eines dynamischen Profils

Die Forschungsarbeit soll an dieser Problemstellung ansetzen. Dafür wird die Profilgeometrie zunächst in zweidimensionale Profilschnittebenen (siehe Abb. 2) separiert, wobei deren Profilkontur durch eine hochdimensionierte Punktewolke substituiert wird (siehe Abb. 1). Ausgehend von der Profilnase werden die x- und y-Koordinaten der einzelnen Design-Punkte (DP) anhand des prozentualen Verhältnisses im Hinblick auf die Gesamtlänge beschrieben. Die damit erzielte Flexibilität in der Formgebung ermöglicht lokale Individualänderungen (Abb. 1 (b.)) im Konturverlauf und eine unkonventionelle und innovative Profilgestaltung. Des Weiteren können Design-Punkte lokal erhöht werden, um Gradienten besser auflösen zu können (Abb. 1 (a.)). Ausschlaggebend für eine genaue geometrische Abbildung der Profilkontur und der darauf aufbauende exakten numerische Strömungsberechnung ist die Präsenz der zur Verfügung stehenden Design-Punkte auf der Profilkontur. Dabei zeigte sich nach ersten Untersuchungen, dass die Distanz zwischen den einzelnen Design-Punkten einen im Verhältnis zur Profiltiefe abhängigen Wert nicht überschreiten darf. Andernfalls wird die Profilkontur in einer unbrauchbaren Qualität wiedergegeben insbesondere bei der Ausbildung lokaler Individualstrukturen. Eine zu große Anzahl an Design-Punkten erhöht jedoch das erforderliche Zeitinvestment zu stark.

Ziel ist eine Koordinierung der Design-Punkte entsprechend der vorliegenden Strömungsrestriktionen ohne den Einsatz mathematisch definierter Kurvenformen zu ermöglichen. Ein entsprechender Gegenpol wird durch die Implementierung einer Festigkeits- und Formuntersuchung geschaffen. Die Korrelation von struktur- und strömungsmechanischer Analyse ist für einen realistischen Optimierungsprozess unabdinglich [5]. Dabei werden geometrische Strukturen verhindert, die einen strömungsdynamischen Vorzug erhalten würden, strukturmechanisch jedoch nicht zu vertreten sind.

4. Entwicklung und Implementierung von Dynamischen Finiten Strömungsfeldern „DFSF“

Das Konzept der direkten Netz-Kontur-Kopplung bedarf einer speziellen und neuartigen Strukturierung des zu verwendenden Rechengitters. Dabei wird hinsichtlich

der Präsens und Positionierung der Design-Punkte ein globales Rechengitter generiert, dass eine individuelle lokale Struktur aufweist. Jedem Design-Punkt wird dabei ein Quartett von Wertepunkten (Value-Points - VP) zugewiesen (siehe Abb. 2). Eine dadurch aufgespannte Bezugsfläche stellt dem formgebenden Design-Punkten charakteristische strömungsrelevante Informationen zur Verfügung. Die daraus resultierenden Dynamischen Finiten Strömungsfelder - DFSF stehen in unmittelbarer Korrelation zur Profilkontur. Eine im Rahmen der Auslegung vorgeschlagene Formänderung kann somit in direkte Relation zu der initiierenden Strömungsgröße gesetzt werden. Folglich kann die Positionierung eines einzelnen Design-Punktes durch den Strömungscharakter des Fluides in seiner unmittelbaren Umgebung beschrieben werden.

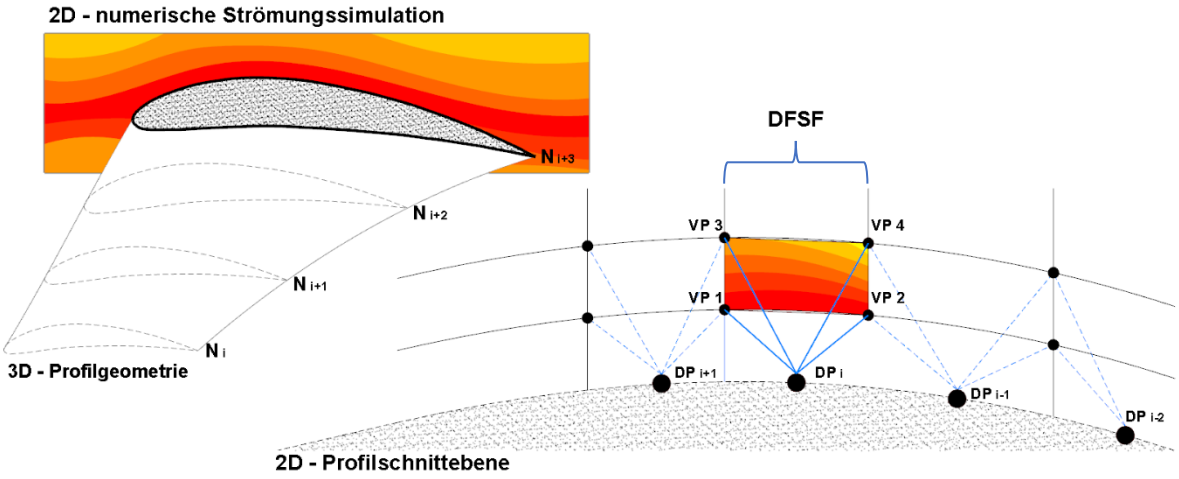


Abbildung 2 - Modellkonzept des Dynamischen Finiten Strömungsfeldes

Dabei sind Größe, Ausrichtung und Positionierung der Strömungsfelder die entscheidenden Kriterien für eine erfolgreiche Implementierung. Der Wandabstand zur Profilkontur muss dabei regulierbar sein da die jeweiligen kennzeichnenden Strömungseffekte sich in unterschiedlichen Schichten des umströmenden Fluides befinden. Naheliegend ist eine Ausrichtung, die sich an den geforderten Zielparametern orientiert. Separationsblasen und anderweitige Wirbelstrukturen haben ebenfalls einen großen Einfluss auf Güte von Widerstands- und Auftriebskoeffizient [7]. Insbesondere laminar/turbulente Übergangsbereiche können somit erfasst und dahingehend beeinflusst werden, dass sie einen positiven Wirkeffekt auf die vordefinierten Zielparameter generieren. Im Gegensatz zu einer punktuellen

Detektion der charakteristischen Strömungsgrößen ermöglichen die zweidimensionalen Strömungsfelder eine entsprechende dynamische Beurteilung. Dabei werden alle dimensionsbehafteten Größen bereinigt und in eine universelle Form überführt. Dieser Datenpool steht nun der anschließenden Analytik zur Verfügung.

5. Aufbau eines Analyseverfahrens zur Formoptimierung der initialen Profilgeometrie

Die iterative Formoptimierung der Profilkontur bildet die Grundlage der angestrebten Wissensbasis. Dabei werden in jedem Optimierungszyklus der Analytik sowohl lokale als auch globale Informationen bezüglich der Design-Punkt-Koordinaten, aktueller Zielparameter und charakteristischer Strömungsgrößen bereitgestellt (siehe Abb. 3):

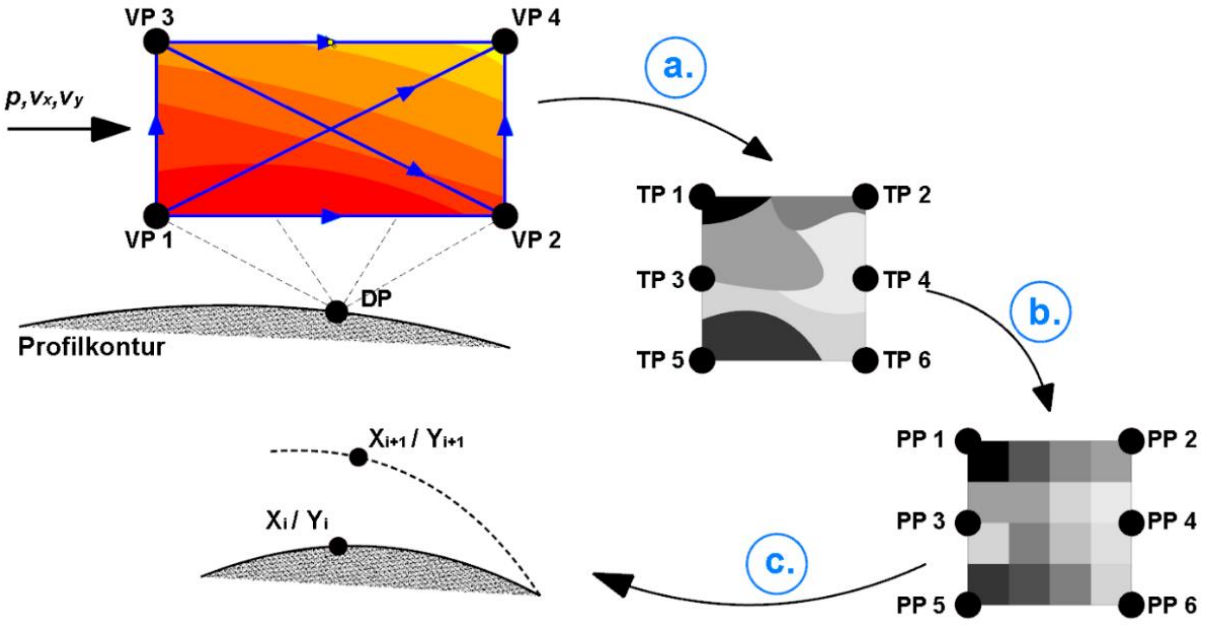


Abbildung 3 - Schematische Darstellung der visuellen Mustererkennung

Die Verarbeitung der extrahierten Daten erfolgt für jeden einzelnen Design-Punkt separat. Die zugehörigen DFSF werden zunächst in ein standardisiertes Abbild transformiert, das sich hinsichtlich Form und Skalierung vom realen Strömungsbild differenziert (Abb. 3 (a.)). Dabei werden die zugehörigen Wertepunkte in ein dimensionsloses Format überführt. Dieses setzt sich aus dem Verhältnis zweier

aufeinanderfolgender Wertepunkte bezogen auf den relativen Abstand zueinander zusammen. Als potentielle Eingangsgrößen können der Druck oder die Strömungsgeschwindigkeit dienen. Aber auch andere strömungsdynamische Eigenschaften sind denkbar.

Der Transformation Wert (Transformation-Point - TP) nimmt dabei für unterschiedliche Profilzonen entsprechende charakteristische Werte an. So ist er für den Druck in der Passage von Druck- zu Saugprofil sehr hoch, steigt in beschleunigten Strömungen an und sinkt bei einer Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit in einen negativen Wertebereich ab. Dahingehend ergibt sich eine Erweiterung des klassischen Druckprofiles wobei der daraus generierte Mehrwert zur optimalen Profilgestaltung verwendet werden kann. Zur besseren visuellen Erfassung der DFSF-Eigenschaften bedarf es einer weiteren rationalisierenden Umgestaltung. Dabei wird die transformierte Abbildung in eine Schachbrettstruktur (Abb. 3 (b.)) überführt (Picture-Point - PP). Diese vereinfacht die visuelle Detektion, bündelt den Informationsgehalt und reduziert das notwendige Zeitinvestment.

Darauf aufbauend wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Strömungsgrößen und der Positionierung des Design-Punktes ermittelt (Abb. 3 (c.)). Dabei ist es wichtig, nicht nur den Informationsgehalt eines einzelnen lokalen Design-Punktes zu verwerten sondern auch die globalen Zielgrößen mit einzubeziehen.

Dieser Vorgang erfolgt iterativ in jedem Optimierungszyklus und erweitert somit die Wissensbasis kontinuierlich. Damit bildet die systematische Auswertung der Datenstrukturen, das Erfassen von Querverbindungen und das Erkennen von Trends durch statistische Methoden einen wichtigen Baustein zur Erweiterung des physikalischen Verständnisses im direkten Umfeld des strömungsdynamischen Profils. Resultierende Gestaltungsrichtlinien ermöglichen eine schnelle und unkomplizierte Formgebung für die jeweiligen Strömungsrestriktionen und werden in den Optimierungszyklus eingebunden.

6. Modellbildung auf Basis einer numerischen strömungsmechanischen Berechnung

Die Verifizierung des Gesamtkonzeptes erfolgt durch die Modellierung einer Tragflügelgeometrie. Dazu wird das Berechnungsgebiet deutlich verkleinert, indem die dreidimensionale Profilgeometrie in zweidimensionale Profilschnittebenen überführt wird (siehe Abb. 2). Diese Vorgehensweise dient der Reduzierung des erforderlichen Zeitinvestment und wurde erstmalig von *Wu* [8] initiiert. Ausgangspunkt des anvisierten Modellkonzeptes bildet eine numerische Strömungssimulation der betrachteten Profilschnittebene. Dabei erfolgt die Konturmodellierung durch die zuvor beschriebene hochdimensionierte Punktewolke und der darauf aufbauenden Implementierung der dynamischen finiten Strömungsfelder. Als repräsentative Zielgrößen werden sowohl Widerstandsbeiwert als auch Auftriebsbeiwert definiert. Dabei strebt die Formoptimierung eine Maximierung des Auftriebs bei gleichzeitiger Minimierung des Widerstandes an. Die Prämisse einer strukturellen Integrität wird durch eine integrative Festigkeits- und Verformungsuntersuchung gewährleistet.

Iterativ wird nun die Lage der einzelnen Design-Punkte so verändert, dass die vordefinierten Zielparameter angenähert werden. Dabei wird die Positionierung eines jeden Design-Punktes anhand einer gewichteten Zielfunktion beschrieben, diese setzt sich zum einen aus dem aktuellen Datensatz der strömungsmechanischen Berechnung und zum anderen aus dem hinterlegten Datenpool der Wissensbasis zusammen. Die Gewichtungen richten sich dabei nach der Größe der zur Verfügung stehenden Datenbank, der Position des Design-Punktes auf der Profilkontur, des aktuellen Iterationsschrittes und der vorliegenden Randbedingungen. Diese Prozesskette durchläuft jede einzelne Profilschnittebene. Für die anschließende Verifizierung werden die formoptimierten Profilkonturen wieder zu einer dreidimensionalen Tragflügelgeometrie zusammengefügt. Das Gesamtkonzept wird nun durch eine Vergleichsdarstellung von originaler und formoptimierter Profilgeometrie auf eine potentielle Verbesserung der Zielparameter im Verhältnis zum erforderlichen Zeitinvestment hin untersucht.

Maßgebend für den Erfolg beziehungsweise die Qualität der Formoptimierung ist die Wahl eines passenden Abbruchkriteriums. Bei äquivalenten naturanalogen Optimierungsalgorithmen besteht das Risiko des Festsetzens in einem lokalen Extremwert. Durch die Implementierung einer Wissensbasis auf Grundlage der direkt gekoppelten Strömungsfelder soll diese Gefahrenquelle signifikant reduziert werden. Die dynamischen finiten Strömungsfelder korrelieren direkt zwischen Design-Punkt und strömenden Fluid was eine formoptimierende Koordination der Design-Punkte verbessert und wesentlich exakter macht.

7. Fazit

Gelingt eine technische Umsetzung, können strömungsdynamische Profile auf Basis eines wesentlich exakteren Modells, mit größeren konstruktiven Freiheitsgraden in einem effizienten, schnellen Konstruktions- und Optimierungsverfahren ausgelegt werden. Dabei wird der individuelle Charakter eines jeden Profilabschnittes strömungsmechanisch erfasst und formgebend umgesetzt. Resultierende lokale Unstetigkeiten beeinträchtigen die numerische Strömungsberechnung global und somit die weitere Formgebung. Die technische Herausforderung liegt in der Ausformung der Profilkontur wobei die wesentliche Einflussgröße im qualitativen Informationsspektrum der Wissensbasis zu sehen ist. Somit ist dem Aufbau einer Datenbank auf Basis einer visuellen Mustererkennung eine gesonderte Priorität zuzuschreiben. Weitere Fehlerquellen sind in der zweidimensionalen numerischen Strömungssimulation zu sehen. Physikalische Effekte die nur in einer dreidimensionalen Strömung auftreten können somit nicht erfasst werden und fließen daher auch nicht mit in das Modellkonzept ein. Nach der Entwicklung des zweidimensionalen dynamischen finiten Strömungsfeldes ist in Zukunft der dreidimensionale Ausbau möglich.

Literaturverzeichnis

[1] A. Samad, K.-Y. Kim und K.-S. Lee, „Multi-Objective Optimization of a Turbomaschinery Blade,“ 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, California USA, 2007.

[2] A. James und S. K. K., „Multi-Objective Design Optimization of Wind," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3, Issue 12, Indien, 2014.

[3] T. Verstraete, A. Hildebrand und R. Van den Braembussche, „Multidisciplinary design and off-design optimization of a radial compressor for industrial application," Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Brüssel, Belgien, 2011.

[4] M. Uelschen, Entwurf und Optimierung der zweidimensionalen Gitterströmung axialer Turbomaschinenbeschaufelungen mit neuronalen Netzen und Genetischen Algorithmen, Kassel: Universität Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Maschinenbau, 2000.

[5] S. Pierret, „Multi-objective and Multi-Disciplinary Optimization of Three-dimensional Turbomachinery Blades," 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.

[6] S. Pierret und R. A. Van den Braembussche, „Turbomachinery Blade Design Using a Navier-Stokes Solver and Artificial Neural Network," in *Journal of Turbomachinery, Volume 121, Issue 2*, 1999, pp. 326 - 332.

[7] T. Sonoda, Y. Yamaguchi, T. Arima, M. Olhofer, B. Sendhoff und H.-A. Schreiber, „Advanced High Turning Compressor Airfoil for Low Reynolds Number Condition - Part 1: Design and Optimization," The American Society of Mechanical Engineers; Journal of Turbomachinery; Vol. 126, USA, Juli 2004.

[8] C.-H. Wu, „A General Theory of the 3D Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial, Radial and Mixed-Flow Types," National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1952.

Einsatz der Lock-In-Thermografie zur Detektion der Rissfront bei bruchmechanischen Untersuchungen von DCB-Proben

Clemens Fichtner, André Knopp, Martin Reichel, Gerhard Scharr

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau, Universität Rostock
Albert-Einstein-Straße 2, 18057 Rostock
E-Mail: clemens.fichtner@uni-rostock.de; Internet: http://www.leichtbau.uni-rostock.de

Inhalt: *Der schichtweise Aufbau von Faserverbundwerkstoffen führt zu Materialeigenschaften, die das Entstehen von Delaminationen bei stoß- und schlagartigen Beanspruchungen und ihr Ausbreiten unter dynamischen Beanspruchungen begünstigen. Der Detektion derartiger Schädigungen kommt dabei eine besondere Rolle zu, da sie eine signifikante Schwächung der Leichtbaustruktur bewirken. Die Lock-In-Thermografie stellt ein zerstörungsfreies Prüfverfahren dar, mit dem diese Schädigungen detektiert und über einen definierten Zeitraum überwacht werden können. Um die Eignung dieses Verfahrens darzustellen sind eine experimentelle Vorgehensweise sowie ein Algorithmus zur Ermittlung einer Schädigung am Beispiel einer definierten Rissbeanspruchung unter Mode-I dargestellt. Mithilfe der dargestellten Vorgehensweise ist es möglich aus den Phasenbildern die Position der Rissfront zu ermitteln.*

Stichwörter: *Thermografie, Faserverstärkter Kunststoff, Lock-In, Risswachstum, DCB-Proben, Energiefreisetzungsrate*

Detection of the crack front position in double cantilever beam specimens using Lock-In-Thermography

Abstract: *The layered structure of fiber-reinforced plastic creates material properties that promote the developing of delamination from impact loading and its growing from dynamic stress. Therefore, there is a need of detecting such damage because the delamination brings a significant degradation of the lightweight structure. Lock-In-thermography is a nondestructive testing method, which is used to detect such defects and control them in a defined time range. The following article shows the possible usage of this testing method and presents the experimental procedures and an algorithm for the analysis of phase images of the thermography measurement. Using that algorithm, a procedure is presented for finding the crack front position in the phase images.*

Keywords: *Thermography, fiber reinforced plastic, Lock-In, crack growth, DCB-specimens, energy release rate*

1 Einleitung

Stetig steigende Energie- und Rohstoffkosten sowie der gesellschaftliche Konsens die Entwicklung technischer Systeme auf wirtschaftlich-nachhaltiger Basis vorzunehmen, machen den Einsatz und die Weiterentwicklung von Hochleistungs-Leichtbauwerkstoffen notwendig. Besonders die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) spielen durch ihre gewichtsbezogenen Eigenschaften in Kombination mit ihrem positiven Verhalten unter dynamischen Beanspruchungen eine besondere Rolle, speziell in der Anwendung in primären Strukturen im Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbau.

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus dieser Werkstoffe sowie des Fehlens von verstärkenden Faserstrukturen in Dickenrichtung besitzen sie nur unzureichende Delaminations- und Impacteigenschaften. Diese Eigenschaften führen unter dynamischer Bauteilbeanspruchung zum ungehinderten Ausbreiten der Delaminationen zwischen den Laminatlagen und gleichzeitig zu einer wesentlichen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Laminats [1]. Ein Maß für die entstehenden Delaminationen bei definiertem Energieeintrag in das Material ist die Delaminationsfestigkeit. Vorliegende Risse und Delaminationen können nach dem Energiekonzept wachsen, wenn die beim Risswachstum freiwerdende potentielle Energie größer ist, als die Energie, die notwendig ist um eine neue Oberfläche zu erzeugen [2]. Das Verhältnis der für die Vergrößerung zur Verfügung stehenden Energie zur gebildeten Bruchfläche wird als Energiefreisetzungsrate G definiert [3]. Risswachstum tritt auf, wenn ein kritischer Wert der Energiefreisetzungsrate G_c erreicht wird [4]. Die kritische Energiefreisetzungsrate bei faserverstärkten Kunststoffen wird auch als Materialkennwert beschrieben, der zusätzlich abhängig von der Art der Rissöffnungsbeanspruchung ist. Der einfachste Fall der Rissbeanspruchung stellt die Mode-I-Beanspruchung dar.

In der DIN EN 6033 [5] und der ISO 15024 [6] sind Prüf- und Auswerteverfahren dargestellt, um unter Mode-I-Belastung die kritische Energiefreisetzungsrate in FKV-Materialien mittels spezieller Prüfkörper zu ermitteln. Für deren Bestimmung werden vorrangig Double-Cantilever-Beam (DCB)-Prüfkörper verwendet. Ein definierter Anriss wird durch eine Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung verlängert. Die Beziehung der Rissverlängerung zu den jeweiligen Last-Weg-Werten ergibt die Energiefreisetzungsrate. Der Rissfortschritt wird standardmäßig mit einem verfahrbaren Mikroskop an der Probenaußenseite gemessen. In der

Abbildung 1 ist beispielhaft eine DCB-Probe mit Belastungsrichtung sowie seitlich angebrachter Skala zur Risslängenbestimmung abgebildet. Die Ermittlung der Position der Rissspitze stellt dabei eine besondere Herausforderung dar und ist daher fehlerbehaftet.

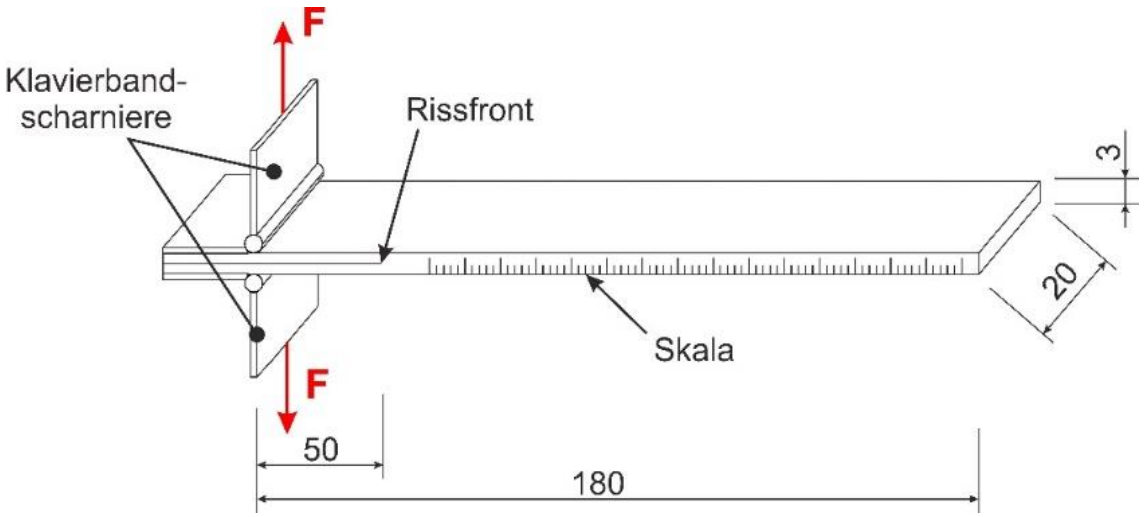


Abbildung 1: DCB-Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung

2 Zielsetzung

Die Lock-In-Thermografie stellt ein zerstörungsfreies Prüfverfahren dar, das Anwendung zur Detektierung von Delaminationen bei faserverstärkten Kunststoffen findet [7]. Durch einen Wärmeimpuls oder einen modulierten Wärmestrom, der auf die Oberfläche eines Prüfkörpers trifft, wird eine thermische Welle in diesem angeregt. Diese thermische Welle breitet sich im Bauteil aus und wird an vorhandenen Grenzflächen, z.B. Fehlstellen, Einschlüssen und Materialübergängen, reflektiert.

Für eine mögliche Automatisierung der in DIN EN 6033 beschriebenen Prüfprozedur werden Untersuchungen zum Detektieren des Rissfortschrittes mithilfe der Thermografie durchgeführt und ein Auswertungsalgorithmus zur Berechnung der Rissfront erarbeitet.

Ausgehend von diesen Überlegungen sollen Untersuchungen durchgeführt werden, ob eine Nutzung der Lock-In Thermografie für die Ermittlung der sich ausbildenden Delaminationsfläche während der DCB-Prüfung möglich ist, die zur Berechnung der Materialkennwerte herangezogen werden kann. Dazu ist neben der grundlegenden Vorgehensweise zur Auswertung der resultierenden Bilddaten ein Auswertealgorithmus zur automatisierten Rissfrontdetektion zu erarbeiten.

3 Einsatz der Lock-In Thermografie bei DCB-Prüfungen

Die DCB-Prüfung ist normiert, weist aber unterschiedliche Prüfansätze in den vorliegenden Normungen auf. Zur Berechnung der kritischen Energiefreisetzungsrate wird jedoch in beiden Normen die entsprechende Risslänge benötigt, die unter jeweiligen Kraft-Weg-Bedingungen vorliegt. Die Risslänge wird dazu an der Probenseite des Prüfkörpers abgelesen, wobei davon ausgegangen wird, dass eine parallel zum Anriss fortschreitende Rissfront vorliegt. Mit der Probenbreite wird dann daraus die entstandene Rissfläche bestimmt.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen unter Nutzung der Lock-In-Thermografie sollen zeigen, ob die Ermittlung der Position und des Verlaufes der Rissfront über der gesamten Probenbreite einer DCB-Probe, wie sie für die Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate eines faserverstärkten Kunststoffes benötigt wird, möglich ist und wie sich die Ergebnisse von der herkömmlichen Vorgehensweise unterscheiden.

3.1 Experimentelles Vorgehen

Zur Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate eines faserverstärkten Kunststoffes wird üblicherweise ein Double-Cantilever Beam-(DCB)-Prüfkörper, wie er in der Abbildung 1 dargestellt ist, verwendet. Der Prüfkörper besitzt eine Länge von 180 mm sowie eine Breite von 20 mm. Das 3 mm dicke Laminat besitzt eine unidirektionale Faserausrichtung aus IM7-Kohlenstofffasern in Kombination mit dem warmaushärtenden modifizierten Epoxidharzsystem M21 von Hexcel Composites. Für einen definierten Anriss ist ein PTFE-Trennfilm auf einer Länge von 50 mm eingebracht. Zur Lastaufbringung ist jeweils auf der Ober- und Unterseite ein Scharnier adhäsiv angebunden.

Der Probenkörper wird für die geplanten Untersuchungen in einen Prüfaufbau gebracht, wie er in der Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Dabei wird der Probenkörper an eine Belastungseinrichtung angebracht. Die Belastung kann auf den Prüfkörper mittels drehen einer Gewindespindel definiert aufgebracht und so ein Risswachstum in der Probe erreicht werden. Dabei entspricht eine Umdrehung der Spindel einem Verfahrweg von 3 mm.

Eine IR-Kamera wird mit einem Abstand von ca. 250 mm oberhalb der eingespannten Probe positioniert. Mit Hilfe eines Halogenlampenarrays wird eine Wärmestrahlung in die Probe eingekoppelt. Das Halogenlampenarray ist so anzuordnen, dass betrachtungsseitig eine möglichst homogene Ausleuchtung der Prüffläche erfolgt sowie ein Wärmeeintrag in die Seitenbereiche der Probe vermieden wird.

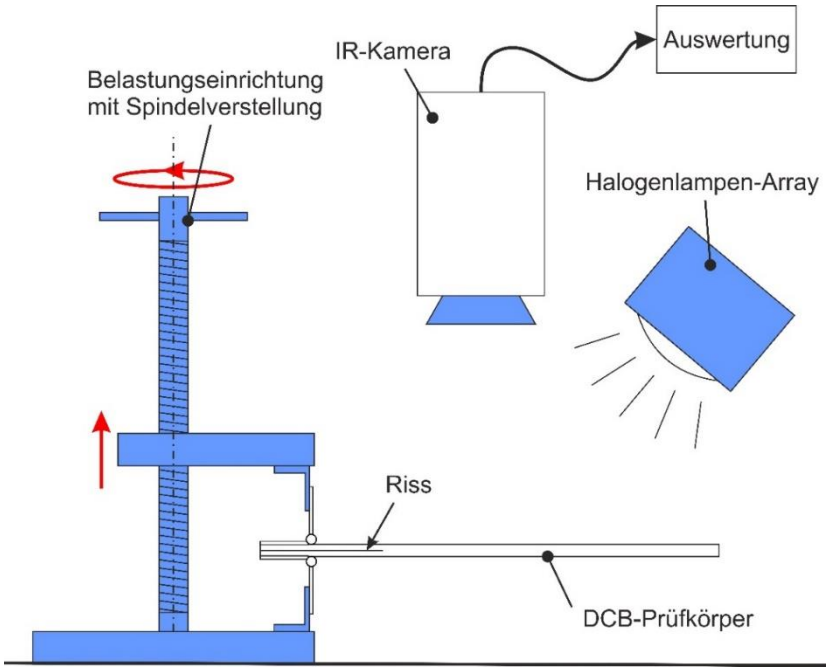


Abbildung 2: Prüfaufbau zur Ermittlung der Rissposition mittels IR-Thermografiesystem

Während der Prüfungen soll die aktuelle Position der Rissfront ermittelt werden, so dass daraus der Rissfortschritt abgeleitet werden kann. Dazu wird die Probe um einen definierten Wert mittels der Spindelverstellung an den Scharnieren auseinandergezogen, was zu einem symmetrischen Abheben der Rissufer – Mode-I-Beanspruchung – führt. Es werden einzelne Belastungszyklen vorgenommen und zwischen diesen Belastungen Thermografiemessungen durchgeführt. Gleichzeitig wird der Rissfortschritt, wie in der Norm festgelegt, an der Seite der Probe gemessen. Bei der Belastung der Probe wird die Spindel jeweils um eine Umdrehung herausgedreht. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis ein Versagen der Probe eintritt. Die zwischen den Belastungen aufgenommenen Phasen- und Amplitudenbilder aus den thermografischen Messungen werden für die nachfolgende Auswertung gespeichert. Insgesamt wurden 10 Messungen bis zum Versagen durchgeführt, was einem Traversenweg von 30 mm entspricht.

Die Modulationsfrequenz am IR-System wird auf 0,045 Hz eingestellt, um einen optimalen Fehlerkontrast zu erhalten. Neben der Modulationsfrequenz wird ebenfalls die Leuchtleistung der Halogenanregung optimiert und auf 60% der möglichen Strahlungsleistung festgelegt. Diese Werte sind in Voruntersuchungen für das verwendete Laminat berechnet sowie experimentell ermittelt worden.

3.2 Auswertung der IR-Messungen

Die bei der Versuchsdurchführung aufgenommenen Bildsequenzen der IR-Kamera werden mit der Thermografiesoftware „Real-time Lock-in Software“ in Phasen- und Amplitudenbilder umgerechnet. Für die Bestimmung der Delaminationsbereiche wird ausschließlich das Phasenbild verwendet, da hier der Fehlerkontrast, der durch die Delamination hervorgerufen wird, abgebildet wird.

Für eine Versuchsauswertung werden die jeweiligen Phasenbilder aufbereitet. Die Aufbereitung, wie sie in der Abbildung 3 schematisch dargestellt ist, lässt sich in vier Schritte unterteilen und wird mit der Opensource-Software ImageJ durchgeführt.

Abbildung 3: Schema der durchgeführten Aufbereitung der Phasenbilder

Im ersten Schritt wird die abgebildete DCB-Probe aus dem Phasenbild ausgewählt und ausgeschnitten. Für eine einheitliche Breite werden alle Proben auf die Breite des ersten Phasenbildes skaliert und anschließend ein Koordinatenursprung festgelegt. Abschließend werden die ausgewählten Bilder als *.txt-Datei exportiert, so dass diese mit MATLAB weiterverarbeitet werden können.

Nach dem Importieren der aufbereiteten Phasenbilder werden deren Grauwertmatrizen weiterverarbeitet, wobei die Rissfront mit nachfolgend beschriebenen Schritten über einen Algorithmus aus den Grauwertmatrizen ermittelt wird. Ein Schema zur Vorgehensweise zur Rissfrontbestimmung ist nachfolgend in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Schema der Rissfrontberechnung

In den jeweiligen Grauwertmatrizen der Phasenbilder werden die Abschnitte bestimmt, in denen sich die Rissfront befindet. Der Bereich der Rissfront ist durch einen Verlauf der Grauwerte gekennzeichnet, der durch ein Polynom dritten Grades abgebildet werden kann. Der Bereich der Rissspitze ist dabei durch die Definition der Wendestelle des Polynoms eindeutig bestimmbar. Die Rissfront kann als erster signifikanter Abfall des Grauwertverlaufs

einer Pixelreihe in Längsrichtung der Probe beschrieben werden, der sich nach der Störung, die durch die Probenvorderkante hervorgerufen wird, zeigt. Für die genaue Definition der Lage der Rissfront über der Probenbreite werden mehrere Pixelreihen betrachtet.

Dazu wird jede zur Auswertung herangezogene Pixelreihe in Längsrichtung durch ein Polynom abgebildet und die Wendestelle des Polynoms berechnet. Zur Kontrolle der Abbildbarkeit des Grauwertverlaufs in den definierten Bereichen wird ein maximaler Abstand zwischen Pixelwert und äquivalentem Wert des Polynoms definiert und als Wertungskriterium verwendet.

In Abbildung 5 ist beispielhaft die 3. Bildsequenz der Versuchsreihe mit ausgewählten Grauwertverteilungen der Pixelreihen 15, 20, 25 und 30 abgebildet. In dem Diagramm der Grauwertverteilung sind zusätzlich die berechneten Rissfronten (Wendestellen) und die zugrundeliegenden Polynome dargestellt.

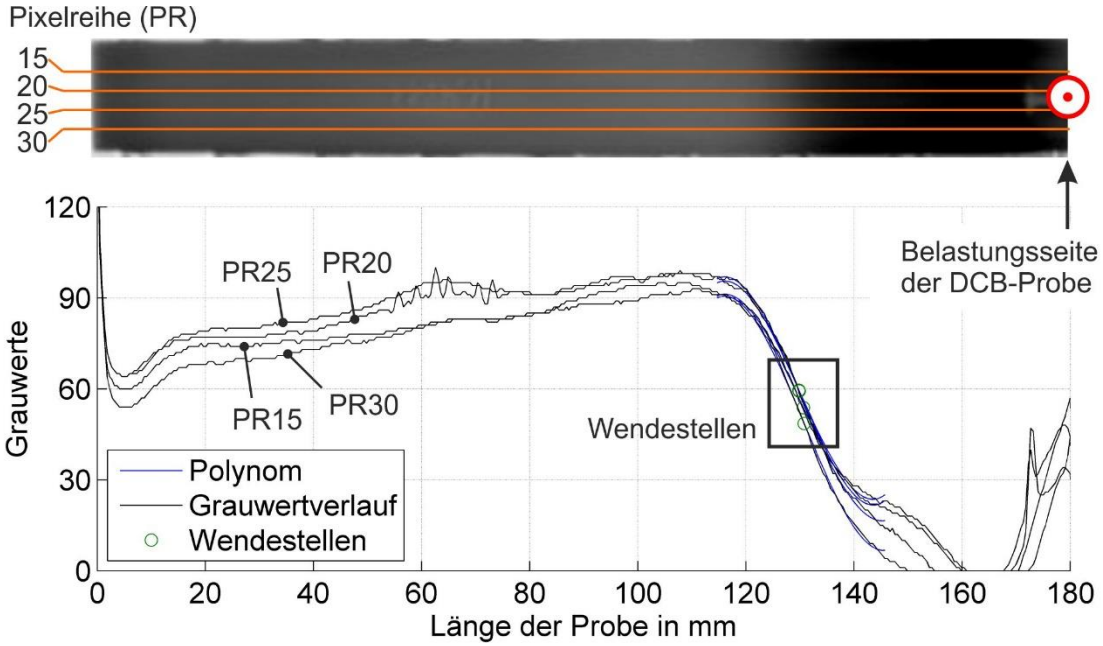


Abbildung 5: Darstellung der Grauwertverläufe der ausgewerteten Pixelreihen sowie die Darstellung der Auswertefunktion zur Wendestellenermittlung

Auffällig im Grauwertverlauf ist im Bereich von 50 bis 70 mm ein deutlich höheres Rauschen als im restlichen Grauwertverlauf. Das Rauschen ist durch die Beschriftung der Probe zu erklären, die in diesem Bereich aufgebracht ist. Im hinteren Bereich der Probe kann ein

Auseinanderlaufen der einzelnen Graphen beobachtet werden. Dieses stammt aus der Abbildung der Schraube, welche die Probe an der Gewindespindel fixiert. Die Beeinflussung auf die Auswertbarkeit ist dabei vernachlässigbar, da die Rissfront nicht in diesem Bereich verläuft. Weiter wird deutlich, dass der Kontrastwert im Phasenbild nicht optimal gewählt wurde, da im Bereich zwischen 160 und 170 mm die Grauwerte auf null absinken und somit dieser Bereich nicht vollständig abgebildet werden kann.

3.3 Ergebnisdarstellung und Diskussion

Nachdem die Auswertung der Phasenbilder der Lock-In-Thermografiemessungen beschrieben wurde, werden die berechneten Ergebnisse betrachtet, mit den gemessenen Risslängen verglichen und die Notwendigkeit einer Fehlerkorrektur aufgezeigt. In Diagramm 1 sind die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Dabei ist die an dem Rand abgelesene Risslänge (Abgelesen) mit der berechneten Risslänge (Berechnet) und der korrigierten Risslänge (BrechnetKorr) gegenübergestellt. Zusätzlich zur besseren Übersicht ist die Differenz zwischen der abgelesenen und berechneten Rissposition (Diff) sowie der abgelesenen und der berechnet-korrigierten Rissposition (DiffKorr) angegeben. Die Standardabweichung (Std.Dev) beschreibt die mittlere Abweichung zwischen den berechneten Wendestellen je Phasenbild und ermöglicht eine Abschätzung der Genauigkeit des Algorithmus.

Es wird deutlich, dass sich die Differenz zwischen abgelesener und berechneter Rissfront je Messung annähert. Dies deutet auf einen systematischen Fehler bei der Thermografiemessung hin, da dieser Effekt auch bei weiteren Messungen auftrat. Für die Fehlerkorrektur eignet sich bei diesem Versuch eine Ausgleichskurve in der Form

$$f(x) = a \cdot x^b + c. \tag{1}$$

Da der Fehler gegen einen Grenzwert läuft, ist es wahrscheinlich, dass der Fehler im Bereich der Energieeinbringung entsteht und aus einer indirekten Beeinflussung der Prüfung durch die Energieeinbringung resultiert. Durch die Korrektur der Messwerte kann die Genauigkeit der berechnetet Rissspitze signifikant verbessert werden. Der Mittelwert der Differenz ohne Korrektur liegt bei den 10 Bildframes insgesamt bei -1,9 mm und kann auf 0,0 mm verringert werden. Bei bekannten Beeinflussungen bedeutet dies, dass eine effektive Korrektur der Messwerte möglich ist und dass die Messgenauigkeit deutlich erhöht werden kann.

Tabelle 1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe

Bild Nr.	Abgelesen [mm]	Berechnet [mm]	BerechnetKorr [mm]	Diff [mm]	DiffKorr [mm]	Std.Dev [mm]
1	139	146.7	139.7	-7.7	-0.7	0.68
2	130	134.2	129	-4.2	1	0.73
3	127	130.2	126.5	-3.2	0.5	0.44
4	126	128.5	125.8	-2.5	0.2	0.43
5	125	128.3	126.5	-3.3	-1.5	0.57
6	125	125.3	124.3	-0.3	0.7	0.39
7	123	123.9	123.6	-0.9	-0.6	0.42
8	122	120.5	120.8	1.5	1.2	0.75
9	119	119	119.9	0	-0.9	0.77
10	117	115.5	116.9	1.5	0.1	0.86
			Mittelwert:	-1.91	0.0	

Das Ergebnis der Versuchsreihe zeigt, dass bei einer Prüfung von DCB-Proben mithilfe der Lock-In-Thermografie ein Rissfortschritt im Probenkörper nachgewiesen werden kann. Durch die Korrektur des systematischen Fehlers wird eine signifikante Verbesserung der berechneten Delaminationslänge erreicht.

Für die Messgenauigkeit der Messung der Risslänge an der Seite der DCB-Probe wird ±0,5 mm angenommen, da die Rissspitze nur schwer zu erkennen ist und der Endpunkt dieser Spitze vom Betrachter abgeschätzt werden muss. Die Genauigkeit der Phasenbilder der Thermografiemessung wird durch den Pixelabstand der IR-Kamera und durch die Störeinflüsse begrenzt. Bei der Berechnung der Rissfront kann von einer möglichen Genauigkeit kleiner ±0,5 mm ausgegangen werden. Aufgrund einer nicht exakten Überlagerung der einzelnen Phasenbilder und dem Störeinfluss der sich ändernden Wärmeleitfähigkeit im gepinnten Bereich wird diese Genauigkeit bei der geprüften DCB-Probe nicht erreicht. Die momentane Abbildungsgenauigkeit kann auf ±1,5 mm geschätzt werden. Die Abweichungen zwischen der gemessenen und berechnete korrigierten Risslänge bestätigen diese Einschätzung. Eine Verbesserung der Messgenauigkeit ist jedoch möglich.

4 Zusammenfassung

Die Ermittlung der Rissfront bei bruchmechanischen Experimenten mithilfe der Thermografie zeigt, dass die Auswertbarkeit stark von der optimalen Wahl der Kontrastwerte abhängt und für den Nachweis einer Delamination ein Mindestmaß an Störung der Wärmeleitfähigkeit vorhanden sein muss, um eine genaue Detektion des Fehlerbereichs mit der Lock-In-Thermografie zu ermöglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Detektion einer Rissfront an einer DCB-Probe mithilfe der Lock-In-Thermografie möglich ist und ein systematischer Fehler korrigiert werden kann. Mögliche weitere Einsatzgebiete für die Detektion eines Rissfortschrittes sind zum einen Langzeitversuche, bei denen beispielsweise ein Bauteil unter realer Belastung getestet wird und ein Rissfortschritt beobachtet werden soll, um die kritische Risslänge zu ermitteln. Andererseits ist ein Einsatz für Inspektionen und die Abschätzung des Risswachstums zwischen Inspektionsintervallen denkbar. Auch könnten bei rissbehafteten Bauteilen, das Risswachstum zwischen den einzelnen Prüfintervallen gemessen und automatisiert ausgewertet werden.

Literatur

[1] Knopp, A.; Scharr, G. (2014) *Effect of z-pin surface treatment on delamination and debonding properties of z-pinned composite laminates.* Journal of Materials Science 49, S. 1674–1683

[2] Griffith, A.A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 221 (1921), Nr. 582-593, S. 163-198

[3] Irwin, G.R.: Analysis of stresses and strains near the end of the crack. Journal of Applied Mechanics 24 (1957), S. 361-364

[4] Richard, H.A.; Sander M.: Ermüdungsrisse: Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden. 2. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012

[5] Norm ISO 15024:2001-12, *Fibre-reinforced plastic composites - Determination of Mode I interlaminar fracture toughness, GIC, for unidirectionally reinforced materials.*

[6] Norm DIN EN 6033:2016-02, *Luft- und Raumfahrt- Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe-Prüfverfahren – Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrate – Mode I – GIC*.

[7] Ibarra-Castanedo C., Maldague X.P.V. (2013) *Infrared Thermography*. In: Czichos H. (eds) Handbook of Technical Diagnostics. Springer, Berlin, Heidelberg

Development and implementation of a FEM-based approach for simulating bearing stiffness

Johannes Glamsch, Seiedardeshir Sebteini*, Frank Rieg, Bernd Sauer*

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
E-Mail: johannes.glamsch@uni-bayreuth.de; Internet: https://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik, Technische Universität Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern
E-Mail: sebteini@mv.uni-kl.de; Internet: https://megt.mv.uni-kl.de

Abstract: *Knowledge of the stiffness values of the bearings in a rotor-dynamical system is of particular importance, because they have a significant influence on the natural frequencies of the entire system. To guarantee the safe operation of the system, the critical speeds should be driven through as fast as possible and the operating speed should be as far away as possible from the natural frequencies. Since the vibrations can also cause a wide variety of noises and damages, knowledge of the bearing stiffness is also of great importance from the acoustics' and lifetime point of view.*

So far, the analytical standard ISO/TS 16281 is usually used for the calculation of the deep groove ball bearing stiffness, which, however, disregards or simplifies many aspects, such as the internal clearance or the housing clearance fit and stiffness. Therefore, a new methodology is presented in this paper which determines realistic stiffness values of deep groove ball bearings on the basis of a simplified Finite Element model, taking into account the elasticity of the bearing rings, the bearing internal clearance, housing fit and housing stiffness.

The presented methodology is implemented and validated against reference Finite Element models and bench tests. It is shown that the method, despite the low computational effort, has a very good agreement with the reference models.

Keywords: *Finite Element Method, Computer Aided Engineering, Machine Elements, Bearing Stiffness, Rotor-Dynamical Systems, Natural Frequencies*

Entwicklung und Implementierung eines FEM-basierten Ansatzes zur Berechnung der Wälzlagersteifigkeit

Inhalt: *Die Kenntnis der Lagersteifigkeiten ist in einem rotordynamischen System von besonderer Wichtigkeit, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenfrequenzen des Gesamtsystems haben. Um einen sicheren Betrieb des Systems zu gewährleisten, sollten die kritischen Drehzahlen möglichst schnell durchfahren werden und die Betriebsdrehzahl möglichst weit von den Eigenfrequenzen entfernt sein. Da die auftretenden Schwingungen zudem verschiedene Geräusche sowie Schäden verursachen können, ist die Kenntnis der Lagersteifigkeit auch aus akustischer Sicht und für die Betrachtung der Lebensdauer von großer Bedeutung.*

Derzeit wird für die Berechnung der Lagersteifigkeit von Radialrillenkugellagern meist die Norm ISO/TS 16281 herangezogen, welche jedoch viele Aspekte, wie beispielsweise Lagerspiel oder Gehäusesteifigkeit und -spiel, ignoriert oder vereinfacht berücksichtigt. Daher wird in diesem Artikel eine neue Methodik vorgestellt, die realistische Steifigkeitswerte von Rillenkugellagern auf der Grundlage eines vereinfachten Finite-Elemente-Modells bestimmt, wobei die Elastizität der Lagerringe, die Lagerluft, der Gehäusesitz und die Gehäusesteifigkeit berücksichtigt werden.

Die vorgestellte Methodik wird implementiert und anhand von Referenzmodellen und Prüfstandversuchen validiert. Es zeigt sich, dass die Methode trotz des geringen Rechenaufwands eine sehr gute Übereinstimmung mit Referenzmodellen aufweist.

Stichwörter: *Finite Elemente Methode, Computer Aided Engineering, Maschinenelemente, Wälzlagersteifigkeit, Rotordynamische Systeme, Eigenfrequenzen*

1 Introduction

Many rotor dynamic applications are operated supercritically, i.e. their operating speed is above at least one natural frequency, which must be traversed from standstill. Wind turbines for example, have to go through frequent starts and stops due to changing wind conditions. To minimize the loads resulting from resonances, driving through these critical speed ranges should be done as fast as possible. In addition, the operating speed must not be too close to a natural frequency. The overestimation of the natural frequencies can lead to the total failure of the system. The design of rolling bearing rotor-dynamical systems thus requires the exact knowledge of their natural frequencies. Because the stiffness of the bearings has a significant influence on the vibration behaviour of the system and thus on its natural frequencies, its exact determination is considered important [1, 2, 3].

The dynamic modelling of powertrains often assumes linear bearing stiffness, e.g. in wind turbines [4]. However, rolling bearings have a non-linear stiffness behaviour, which is why the bearing stiffness at the operating point is of particular importance [5, 6].

The determination of the stiffness of rolling bearings is standardized in ISO/TS 16281 [7]. This standard represents a purely analytical approach and therefore requires a number of simplifications: The elasticity of the bearing rings and the connecting geometry is neglected, as well as the clearance fit between bearing outer ring and housing is not included in the calculation, which can lead to a deformation of the outer ring. In addition, the bearing internal clearance is taken into account only partially, which has particular influence on the load distribution of the rolling elements. Due to the bearing's internal clearance only a few rolling elements are in contact at low load. Only after an ovalization of rings or deformation of the rolling elements more rolling elements can come into contact. The factors mentioned above indeed have a major influence on the lowering of the bearing under load and the resulting bearing stiffness [1, 6]. The standard ISO/TS 16281 is also used to determine the rolling bearing stiffness in calculation programs such as KISSsoft [8] or LAGER2 [9].

For the determination of stiffness parameters, which do not have the above restrictions, there are currently two main procedures available. On the one hand, the stiffness values can be determined by time consuming physical experiments (test bench), which often involves high costs. The second approach is to determine the stiffness of the bearings by

means of numerical methods. Here, the most common approach is a Finite Element analysis, in which the bearing and the housing are fully modelled using three-dimensional volume elements, as in [6] or [10]. It should be noted that automatic model generation is very difficult for different types of bearings. Furthermore, full Finite Element models require very long computation times and often have convergence difficulties, which in turn makes model automation problematic. For this reason, a new approach is needed which allows an automated stiffness calculation of bearings taking into account elastic bearing rings, the connecting geometry (in particular the housing clearance fit) and the bearing internal clearance. This article presents and discusses a fully automated approach employing a simplified calculation method based on the Finite Element method to evaluate the radial rolling bearing stiffness under realistic conditions.

2 Development of a simplified calculation method

To develop a simplified calculation method for rolling bearings, first the whole bearing system is divided into sub-assemblies, as seen in Fig. 1. All of these components have to be included in the substitute model to obtain realistic stiffness values. [11]

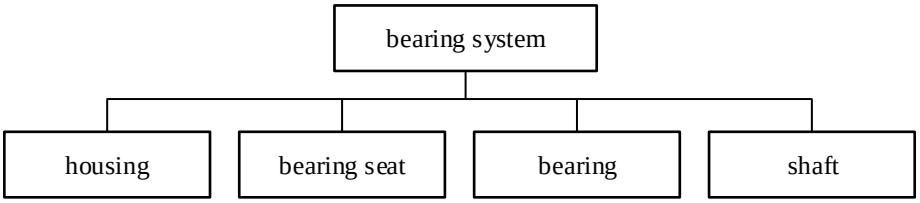


Figure 1: Sub-assemblies of a bearing system [11]

As mentioned in the introduction, a fully modelled and meshed Finite Element assembly, consisting of the three-dimensional meshed (hexahedron/tetrahedron) rings and rolling elements (see Fig. 2) is capable of representing the whole bearing system and its stiffness.

The benefits of this method are the exact representation of the rolling bearing geometry (e.g. bearing internal clearance and housing clearance fit). On the downside, the automatic generation of the three-dimensional meshes of the rings and rolling elements is quite complex. Furthermore, the meshes must be very fine to accurately model the Hertzian contact between the rings and the rolling elements, which leads to very high computation times. Besides that, the model is very sensitive towards contact properties, which can complicate the automation of the stiffness calculation. [6]

For this reason, an attempt was made by [11] to develop a substitute model which does not possess the disadvantages explained. As described, the Hertzian contact between the bearing rings and the rolling elements requires a very fine mesh at the contact areas and a contact algorithm, which can lead to high computing times and convergence problems. Therefore, in the substitute model proposed in [11], the rolling elements are replaced by rod elements which connect the inner and the outer ring and have the same stiffness behaviour as the rolling elements (see Fig. 3). Due to this simplification, the mesh of the bearing rings can be significantly more coarse and the contact calculation between the rolling elements and the bearing rings can be omitted.

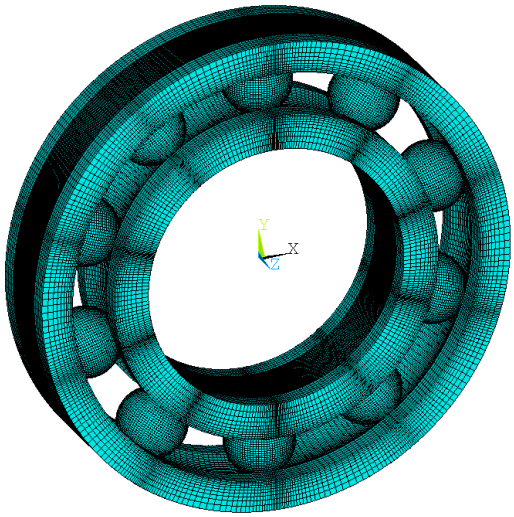


Figure 2: Full Finite Element model of a deep groove ball bearing (without housing)

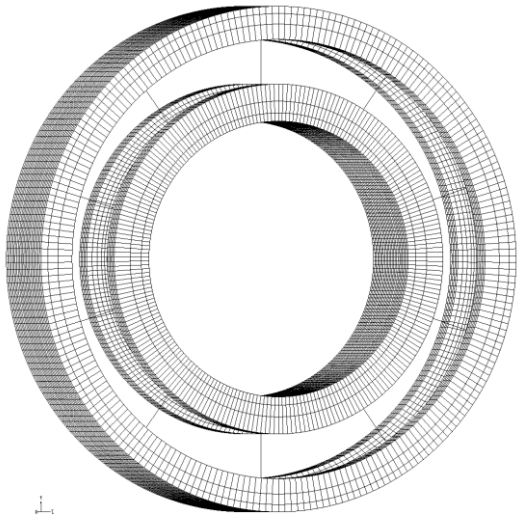


Figure 3: Substitute model of a deep groove ball bearing (without housing);
rolling elements substituted by rods

Because the very rigid shaft it is expected to have little effect on the stiffness of the bearing system, the shaft is not explicitly modelled but replaced by a rigid coupling element which couples a central shaft reference node to the inner ring of the bearing. In order to model correctly all the relevant effects of the bearing seat, the housing is explicitly modelled by volume elements. By defining a contact condition between the outer ring of the bearing and the bore surface, the housing fit can be modelled realistically.

3 Implementation of the calculation algorithm

After evaluating a modelling strategy with a good compromise between accuracy and calculation speed, this strategy was implemented in an automated calculation tool [6]. The implementation details are discussed in this chapter.

3.1 Calculation methods

The calculation tool implements two different methods of the assembly generation. In the first calculation mode (CM 1, see Fig. 4) a structured FE mesh of the rolling bearing assembly is automatically created. The inner and outer rings are represented by linear hexahedron elements with eight nodes, which are created by the rotation of a two dimensional structured quadrilateral cross section mesh of the rings [12, 13]. The rolling elements are modelled with one rod per rolling element, which connect the inner and outer ring. There is no explicit modelling of the shaft, instead there is one rigid coupling element, which connects one reference point in the centre of the bearing with the nodes at the inner surface of the inner ring. The load will be applied at this reference node. The whole outer surface of the outer ring is fixed in all directions. This model is used to calculate the bearing stiffness without the influence of the housing.

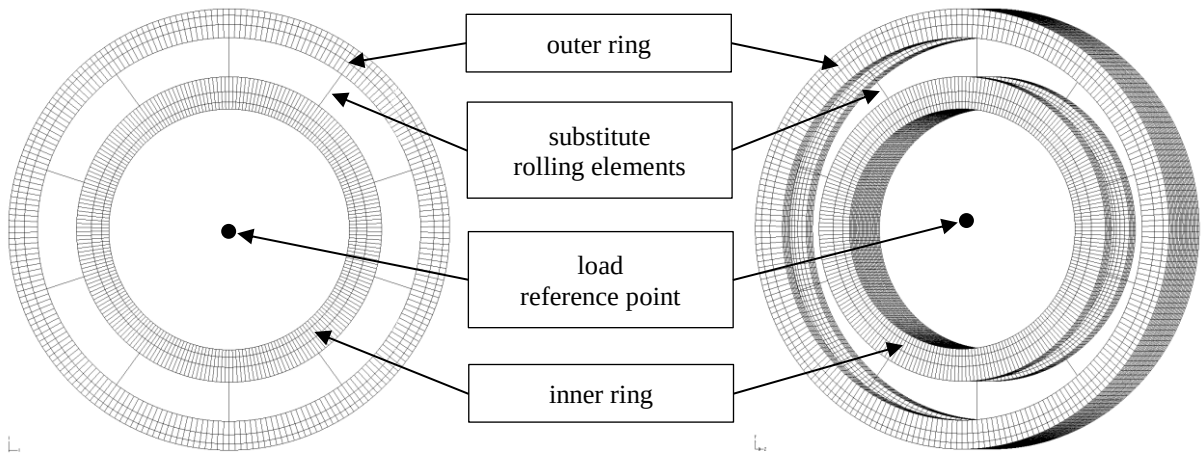


Figure 4: Bearing substitute model in calculation mode 1 (CM 1; without housing)

Calculation mode two (CM 2, see Fig. 5) creates an additional mesh for a ring-shaped housing. The housing and the rolling bearing are combined into an assembly. Furthermore, a contact definition is set up between the two parts. In this calculation mode, the load is also

applied at the reference node in the centre of the bearing, but instead of clamping the outer ring surface, the outer surface of the housing is fixed in all directions.

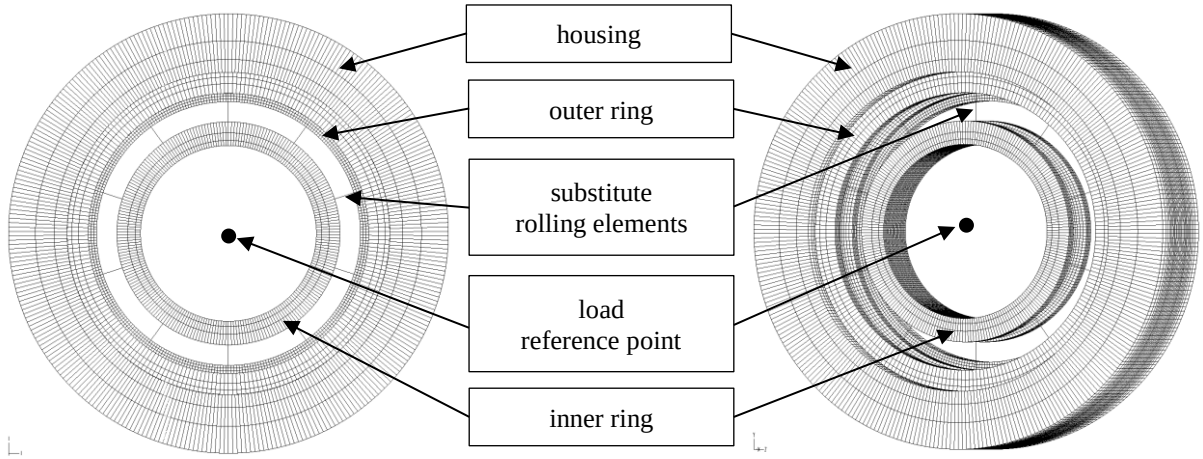


Figure 5: Bearing substitute model in calculation mode 2 (CM 2; with housing)

All necessary geometric parameters for creating the FE model are supplied in an input text file:

Deep Groove Ball Bearing:

- Outer diameter D
- Bore diameter d
- Shoulder diameters D_1 and d_1
- Raceway diameters D_2 and d_2
- Rolling element diameter D_r
- Bearing width B
- Outer and inner osculation κ_o and κ_i

Ring Housing:

- Diameter D_0
- Shoulder diameter D_{aG}
- Width B_0
- Clearance fit

The bearing internal clearance and housing clearance fit are explicitly modelled in the assembly.

3.2 Hertzian contact between bearing rings and rolling elements

The rods between the two bearing rings must have a nonlinear behaviour to mimic the real Hertzian contact conditions. In addition, an algorithm has to be developed to imitate the behaviour caused by the bearing internal clearance discussed earlier. This nonlinear behaviour can be realized by applying the load iteratively to the whole bearing system and by calculating the deformation of the bearing in every substep. After each step the length of each rod is determined. Based on the rod length, a new calculated Young's modulus is assigned to each rod. The relation between rod stiffness as a function of their corresponding length is calculated by the Hertzian contact equations.

The relation between the contact force F and the rolling element deformation u is given in Eq. (1) [7]:

$$F(u) = c_p\, u^{3/2} \tag{1}$$

The spring constant c_p is a geometry-based value, which can be calculated for each bearing [7]. To obtain the stiffness of the contact point, F can be differentiated with respect to u, which leads to Eq. (2):

$$c(u) = \frac{dF}{du} = \frac{3}{2} c_p \sqrt{u} \tag{2}$$

Thus, the Young's modulus of each rod can be calculated by using Eq. (3), where l describes the length and A the cross section of the rod which is set to a constant factor:

$$E = \frac{cl}{A} \tag{3}$$

To mimic the behaviour, which is caused by the bearing internal clearance, the cross section A of all rods that are larger than the rolling element diameter D_r is set to zero, which leads to a Young's modulus of $E = 0$.

The calculated stiffness has to be adjusted, because the Hertzian contact contains the stiffness of the whole contact, which includes the inner ring, the rolling element and the outer ring. This is equivalent to three springs in series. Because of the elastic inner and outer ring in this model, the rod has only to mimic the stiffness of the rolling element. To achieve this, the calculated stiffness is adjusted accordingly via a constant factor [14].

3.3 Housing fit tolerance consideration

Another critical criterion to be considered is the clearance fit between outer bearing ring and housing. For realistic modelling, the clearance fit is taken into account when generating the meshes of the ring and the housing. Thus, an ovalization of the outer ring is possible, which changes the load distribution of the rolling elements. To achieve this, a contact definition has to be defined. In general, three different contact methods are available:

1. Tied contact: constrained surfaces tied together,
2. Frictionless contact: constrained surfaces can separate and slip without friction,
3. Friction contact: constrained surfaces can separate and slip with friction.

A friction contact would lead to the most realistic results but is very computationally expensive. Due to the expected low friction coefficients between the bearing and the housing and the goal of achieving a fast calculation method, a frictionless contact method is used in the described approach. Furthermore, there is no rotation of the ring possible, so the acting contact forces are mostly normal forces. In this case, the frictionless contact yields sufficiently accurate results.

3.4 Calculation process

The whole calculation process is displayed in the following figure:

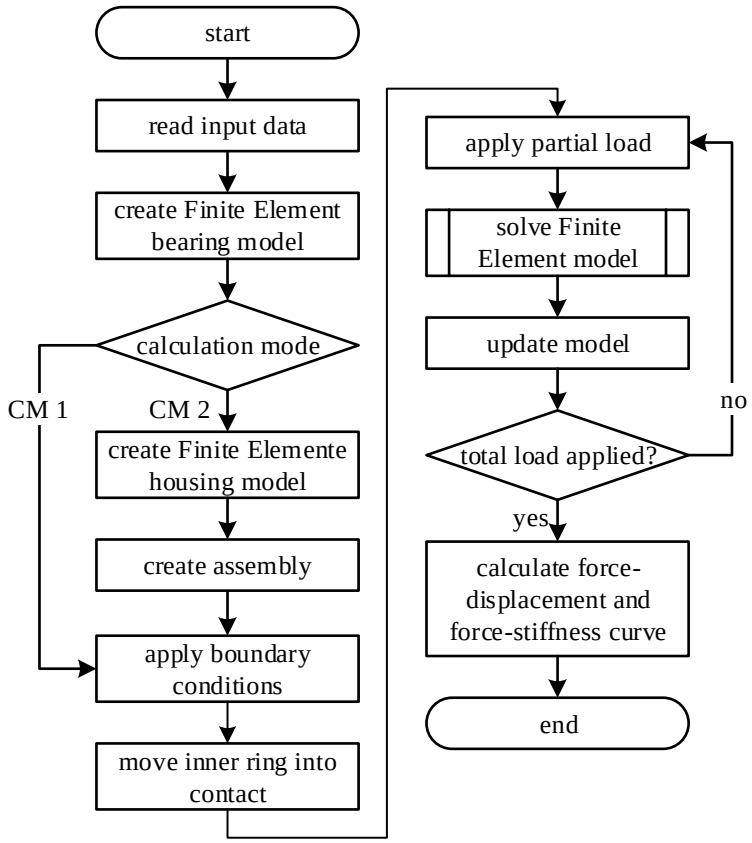


Figure 6: Calculation process of the substitute model

The program works as follows: After reading the input file and calculating the c_p spring constant of the bearing, the bearing model is created. This step consists of creating the hexahedron meshes for the bearing rings, integrating the rod elements for substituting the rolling elements and defining the material properties for the rings and each rod. Furthermore, the rigid coupling is integrated into the calculation model to represent the shaft.

If CM 2 is used (calculation with housing), an additional hexahedron mesh representing the housing is automatically created. The housing is integrated into the rolling bearing assembly and is moved towards the load direction until the bearing and the housing come into contact. Additionally, the material properties of the housing are defined.

In the next step, the necessary boundary conditions for the calculation are defined. As stated in chapter 3.1, in CM 1 the whole outer surface of the outer ring is fixed in x-, y- and z-direction. In CM 2 there are no boundary conditions applied to the outer ring, because

it seats in the housing, instead the outer surface of the housing is fixed. The load steps are applied to the reference point in the centre of the inner ring. Furthermore, there are additional boundary conditions at the reference node to ensure a numerically stable behaviour:

- Locking the displacement in axial direction,
- Locking the displacement in the second radial direction,
- Locking all rotation degrees of freedom.

Besides that, it must be observed that the outer ring of the bearing is statically indeterminate, because it is only connected via rod elements, which cannot transmit torque. Therefore, a rotation of the outer ring around the shaft axis is possible. To prevent this behaviour, the displacement of the uppermost rod node in load direction is locked in the perpendicular direction of the load direction. This serves only numerical purposes and has no stiffness influence.

Subsequently the inner ring is moved about the bearing internal clearance in load direction to ensure that at least one “rolling element” respectively rod is in contact. Because Eq. (2) evaluates to zero when the displacement $u = 0$, the inner ring is moved an additional small initial displacement. Thus, at least one rod is transmitting force in the first load step.

Now the main loop of the calculation program starts. The total load is divided into smaller load steps, which are gradually applied to the shaft reference node in the Finite Element model. Due to this, the nonlinear rod behaviour can be solved with linear Finite Element analyses. The number of load steps and their subdivision (linear/logarithmic) can be defined in the input file. In each step the Young’s modulus of the rods is being re-calculated: First, a cross section of zero is defined for all rods which are longer than the rolling element diameter, because at these positions there would be no contact between the rolling elements and the rings. With Eq. (3) this leads to a Young’s modulus of zero. For all other rods, the displacement/compression u is calculated. Knowing u, the Young’s modulus E can be derived from Eq. (2) and Eq. (3). After solving the model, the displacements are transferred to the next step. This process will be repeated until the total load is applied to the model.

Finally, the discrete force-displacement points of all load steps are fitted through the least-squares-method with the trial function $u(F) = aF^b + cF + d$. To improve the convergence of this nonlinear optimization problem, the default values of the parameters were defined as follows: $a = 0$, $b = 2/3$, $c = 0$, $d = \text{bearing internal clearance}$.

This function is then analytically derived and inverted (see Eq. (4)), which leads to a stiffness function of the whole bearing system in respect to its load:

$$c(F) = \left(\frac{du(F)}{dF}\right)^{-1} \tag{4}$$

4 Validation of the calculation method

In the following the results of the developed modelling strategy is to be investigated and validated by the results of the full FE model and the test bench [6]. For the comparisons, a bearing of the type 6212 from the bearing manufacture Schaeffler is used. The bearing has a bore diameter of $d = 60\,\text{mm}$, an outer diameter of $D = 110\,\text{mm}$ and a static load rating of $C_0 = 36\,\text{kN}$ [15]. The maximum applied load is $7.2\,\text{kN}$ ($C_0/P = 5$).

In Fig. 7 the force-displacement plot of the proposed substitute model is compared to that of a full FE model. A validation against the test bench is not possible for CM 1 due to the fact that bench tests cannot be accomplished without a housing.

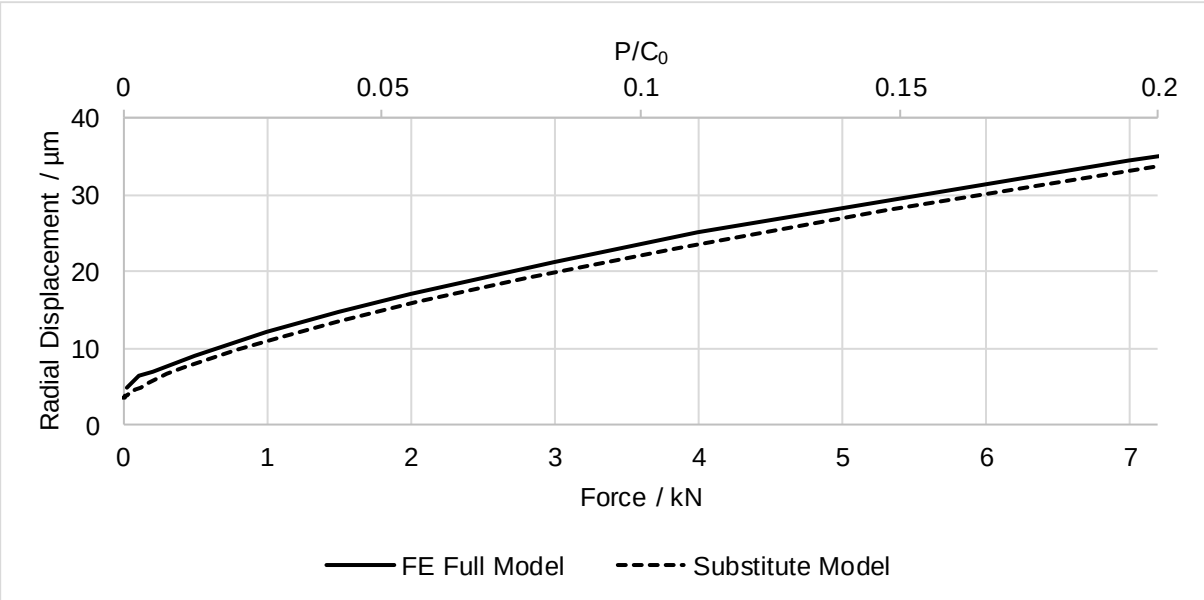


Figure 7: Radial displacement over force (CM 1: no housing) for the deep groove ball bearing 6212

The results of the full FE model and the substitute model show a very good match. A nearly constant offset of less than $2\ \mu m$ is apparent, which has no influence on the result due to the differentiation of the curves to achieve the stiffness. A possible reason for this offset is for example the unavoidable contact penetration of the rolling element and ring meshes in the full FE model, which does not occur in the discussed substitute model. The radial stiffness curves are shown in Fig. 8.

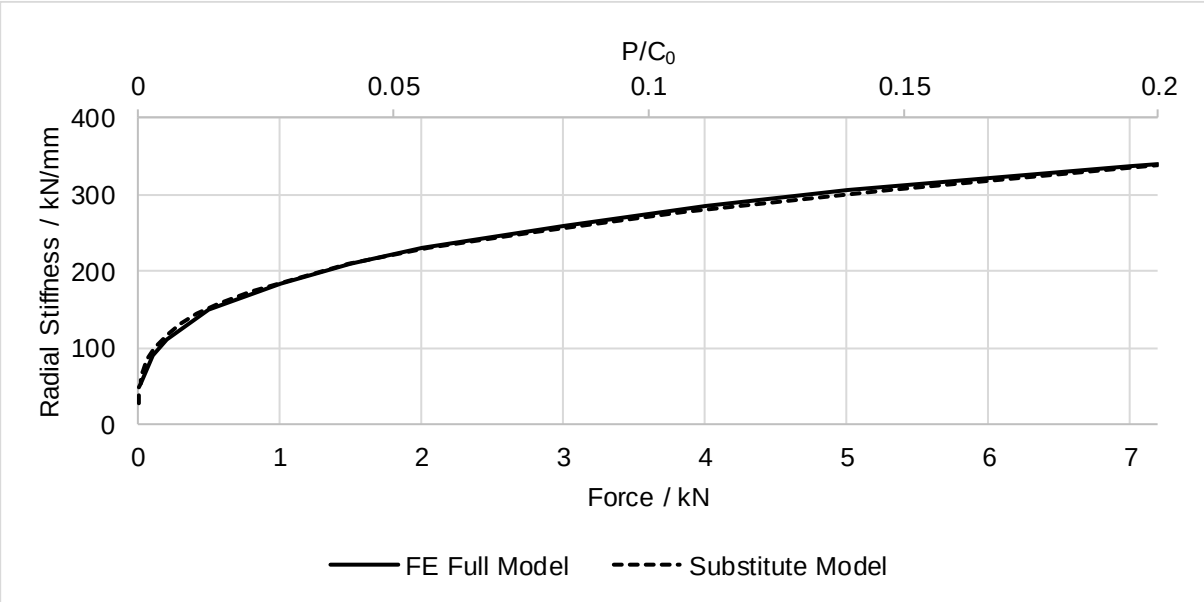


Figure 8: Radial stiffness over force (CM 1: no housing) for the deep groove ball bearing 6212

There is no noticeable deviation (below 2% in the load range from $0.5\ kN$ to $7.2\ kN$) and the curves are almost congruent. Thus, it should be noted that for a fixed outer ring the substitute model provides very good results in comparison to the full FE model. The advantage of calculating the bearing system stiffness with the substitute model instead of analytical formulas is that the influence of the bearing internal clearance and hence the different rolling element load distribution is taken into account.

In the following, the results of the substitute model against the full FE model and the test bench results are to be validated taking into account the housing and thus the housing clearance fit (CM 2). For this purpose, the displacement and stiffness over bearing load plots for a housing clearance of $3\ \mu m$ are compared in Fig. 9 and Fig. 10.

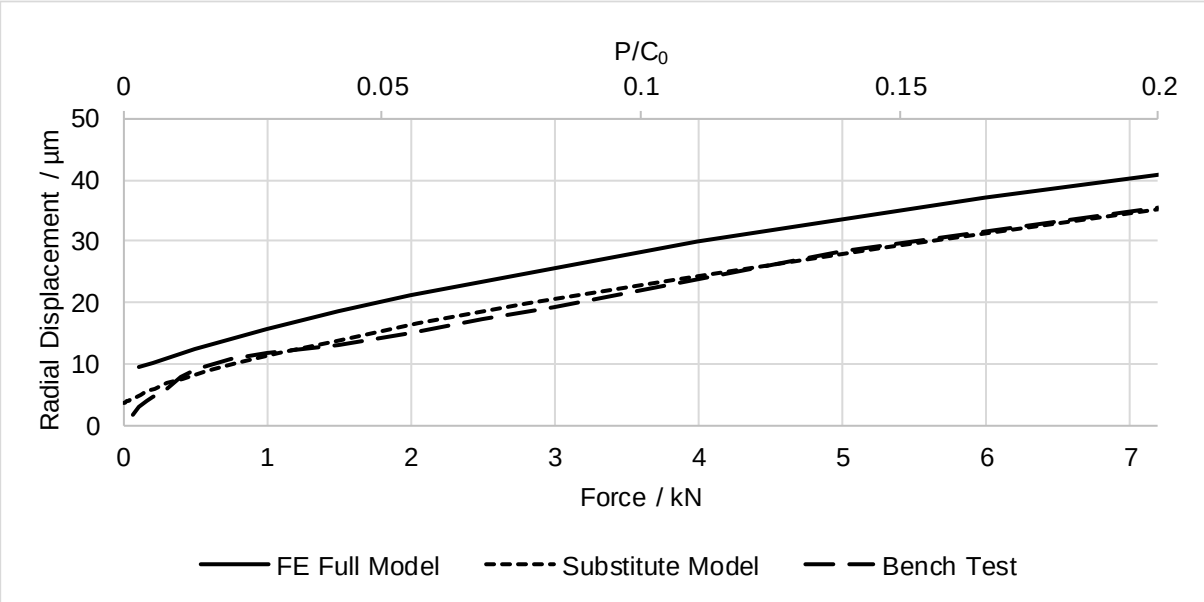


Figure 9: Radial displacement over force (CM 2: $3\ \mu m$ housing clearance fit) for the deep groove ball bearing 6212

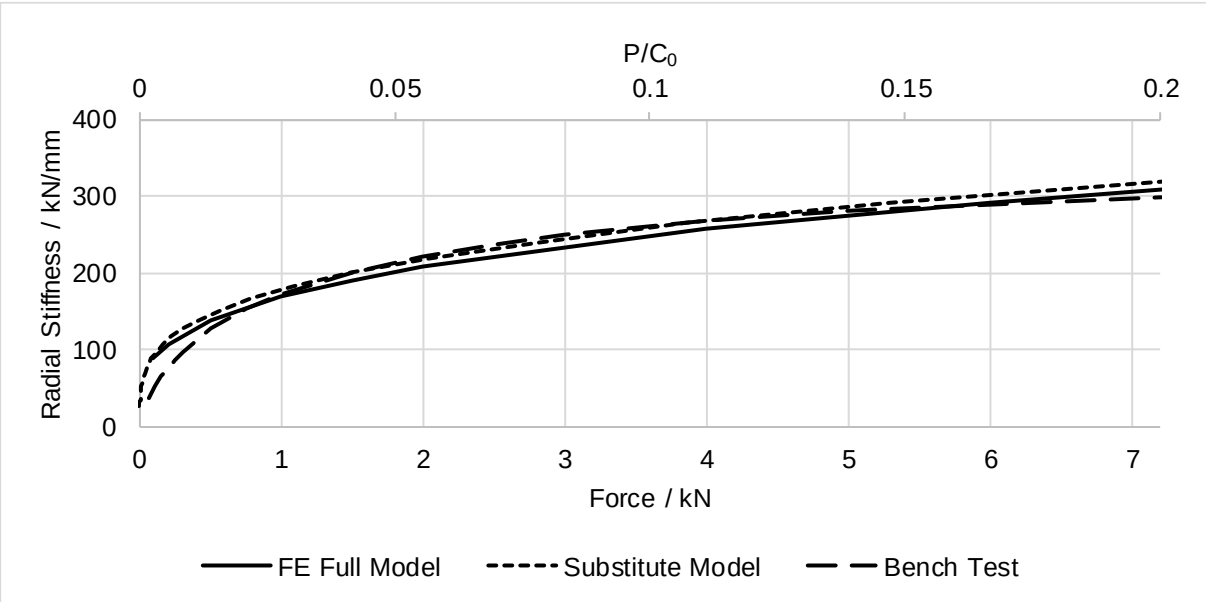


Figure 10: Radial stiffness over force (CM 2: $3\ \mu m$ housing clearance fit) for the deep groove ball bearing 6212

This comparison also shows the good agreement between the substitute model, the full FE model and the test bench. The difference in the displacement over force plots is merely a relatively constant offset, which has as stated before no effect on the stiffness curves. The maximum deviation of the stiffness curves of the two simulation models is at a maximum of 5.3% in the relevant load range from $0.5\ kN$ to $7.2\ kN$. Therefore a high accuracy of the substitute model can be confirmed for this calculation model as well.

5 Conclusion

In this paper, a methodology for the automatic calculation of the bearing stiffness was presented and its implementation described. The calculation tool generates a Finite Element model based on an input text file. In the next step the load is iteratively applied to the model, thus simulating the deformation and the associated rigidity of the bearing. This new approach takes into account many effects that are commonly not considered in state-of-the-art methods.

The method was validated against a full Finite Element model and bench tests. The compared force-displacement and force-stiffness values yield a very good agreement of all approaches. Thus, this method can be used in the future design of rotor-dynamical systems to ensure its safe operation. Further research will investigate how the presented approach can be applied to other bearing types and how combined load cases can be taken into account.

6 Acknowledgement

This work has been supported by the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) and the Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) in Germany as part of the project FVA 747 I respectively IGF 18735 N.

References

[1] Dresig, H.; Holzweißig, F.: *Maschinendynamik*. 10th edition, Berlin: Springer, 2011.

[2] Steinhilper, W.; Röper, R.: *Maschinen- und Konstruktionselemente 3*, 2nd edition, Berlin: Springer, 1996.

[3] Schlecht, B.; Breslau, G.; Ulrich, C.: *Zur Modellbildung und Simulation von Zylinderrollenlagern*. Proceedings of the Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, pp. 343-362, 2017.

[4] Srikanth, P.; Sekhar, AS.: *Dynamic analysis of wind turbine drive train subjected to nonstationary wind load excitation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 229, No. 3, pp. 429-446, 2014.

[5] Raabe, M: *Moderne Wellenberechnung unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte aus der Wälzlagerinnengeometrie.* Proceedings of the Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, pp. 241-250, 2007.

[6] Glamsch, J.; Sebteini, S.; Rieg, F.; Sauer, B.: *Bestimmung der Wälzlagersteifigkeit unter Berücksichtigung der Innen- und Außenringelastizität und des Passungsspiels für die Rotordynamikauslegung*. Final Report Industrielle Gemeinschaftsforschung IGF 18735 N, 2017.

[7] Norm ISO/TS 16281:2008-06. *Rolling bearings - Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings.*

[8] KISSsoft AG: *Handbook KISSsoft*. Version 03/2017A.

[9] Schleich, T.; Otto, M.: *Lebensdauer-Industriegetriebe-Wälzlager III - Erweiterung der FVA Programme RIKOR und LAGER2 zur Bestimmung der Lebensdauer von Wälzlagern in Industriegetrieben*. Final Report Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. FVA 364 III, 2011.

[10] Guo, Y.; Parker, R.: *Stiffness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model*. Mechanism and Machine Theory, Vol. 51, pp. 32-45, 2012.

[11] Braun, M.; Sebteini, S.; Rieg, F.; Sauer, B.: *Bestimmung der Wälzlagersteifigkeit unter Berücksichtigung der Innen- und Außenringelastizität und des Passungsspiels für die Rotordynamikauslegung*, Mid-Term Report Industrielle Gemeinschaftsforschung IGF 18735 N, 2016.

[12] Viebahn, F.: *Systematische Untersuchung der Anwendbarkeit der Finite-Elemente-Analyse zur Abbildung des Wälzlagerwanderns mittels der statistischen Versuchsplanung (PhD-Thesis)*. Aachen: Shaker Verlag, 2018.

[13] Neidnicht, M.: *Numerisches Abbildungsvermögen als Maßgabe zuverlässiger Finite Elemente-Netzgenerierung (PhD-Thesis).* Aachen: Shaker Verlag, 2013.

[14] Brändlein, J.; Eschmann, P.; Hasbargen L.; Weigand, K.: *Die Wälzlagerpraxis - Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen*. 3rd edition. Mainz: Vereinigte Fachverlage GmbH, 1998.

[15] Schaeffler: *Wälzlager*. 1st edition. Herzogenaurach: Schaeffler KG, 2008.

Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für das Rapid Manufacturing

Normann Koldrack, Prof. Klaus Brökel

Lehrstuhl für Produktentwicklung (ehemals Konstruktionstechnik/CAD), Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
E-Mail: Normann.Koldrack@uni-rostock.de; Internet: https://www.pt.uni-rostock.de

Inhalt:

Es wird gezeigt, dass mit dem Einsatz der 3D-Drucktechnik hydraulische Spannbuchsen aus Kunststoff hergestellt werden können. Dabei wird besonders auf die Problematik der Simulation dieser Welle-Nabe-Verbindung eingegangen. Die Daten werden anschließend mit Ergebnissen von Prüfstandsversuchen verglichen. Der Prozess der Erstellung des Bauteils wird dem Rapid Manufacturing zugeordnet.

Stichwörter: *Rapid Manufacturing, 3D-Druck, hydraulische Spannbuchse, Welle-Nabe-Verbindung*

Development of a hydraulic clamping bush for Rapid Manufacturing

Abstract:

It is shown that with the use of 3D printing technology hydraulic clamping bushes made of plastic can be produced. Particular attention is paid to the problem of simulating this shaft-hub connection and the comparison of these results with those of bench tests. The component thus prepared is associated with the rapid manufacturing.

Keywords: *Rapid Manufacturing, 3D printing, hydraulic clamp, Shaft-hub-connection*

1 Einleitung

Steigende Anforderungen an Produktvielfalt, Bauteilkomplexität und Flexibilität erhöhen bei gleichbleibenden Qualitätsanforderungen den Wettbewerbsdruck und stellen Unternehmen vor große Herausforderungen. Additive Fertigungsverfahren sind ein gefragtes Hilfsmittel, um diese Probleme zu überwinden. Dabei kann die additive Fertigung in drei unterschiedlichen Bereichen der Produktentstehung eingesetzt werden. Das Rapid Prototyping führt mit dem Druck physischer Modelle zu einer Zeitersparnis im Produktentwicklungszyklus. Rapid Tooling dient der Fertigung komplexer Werkzeuge oder Werkzeugbestandteile. Abformmodelle können beispielsweise direkt gedruckt werden - ohne eine aufwändige manuelle Herstellung von Modellen. Die größten Potentiale liegen jedoch in der additiven Fertigung von Bauteilen und Produkten, was als Rapid Manufacturing bezeichnet wird.

Durch die verbesserten Festigkeitswerte der Druckmaterialien und durch eine Zunahme der Materialvielfalt können auch Rapid Prototyping-Verfahren (wie das FDM-Verfahren) für die Erzeugung von Bauteilen eingesetzt werden. [1]

Eine mögliche Verwendung dieser neuen Möglichkeiten ist der Einsatz gedruckter Bauteile als kraftschlüssiges Verbindungselement zwischen Welle und Nabe. Besonders interessant ist das hydromechanische Prinzip, da hier Konstruktionen komplett frei von beweglichen Bauteilen möglich sind und die Geometrie mit klassischen Herstellungsverfahren nur sehr aufwendig erzeugt werden kann.

2 Aufbau und Funktion von kraftschlüssigen Verbindungen mit dem hydromechanischen Prinzip

Das Prinzip der hydraulischen Spannbuchse basiert auf dem Pascalschen Gesetz. Dieses Gesetz der allseitigen Druckausbreitung besagt, dass der hydrostatische Druck einer Flüssigkeit an jedem Punkt, in jeder Raumrichtung, gleich groß ist. Die Buchse besteht aus einem doppelwandigen, mit Fluid gefüllten Hohlzylinder. Wird der Druck des Fluids erhöht, wirkt dieser gleichmäßig auf die Wände des Hohlzylinders. Wenn die hydraulische Spannbuchse zwischen Welle und Nabe positioniert wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, können sich die Mantelflächen verformen, bis sie mit der Welle respektive der Nabe in Kontakt treten. Ist dies erfolgt, bildet sich eine gleichmäßige Flächenpressung aus und ermöglicht den Reibschluss.

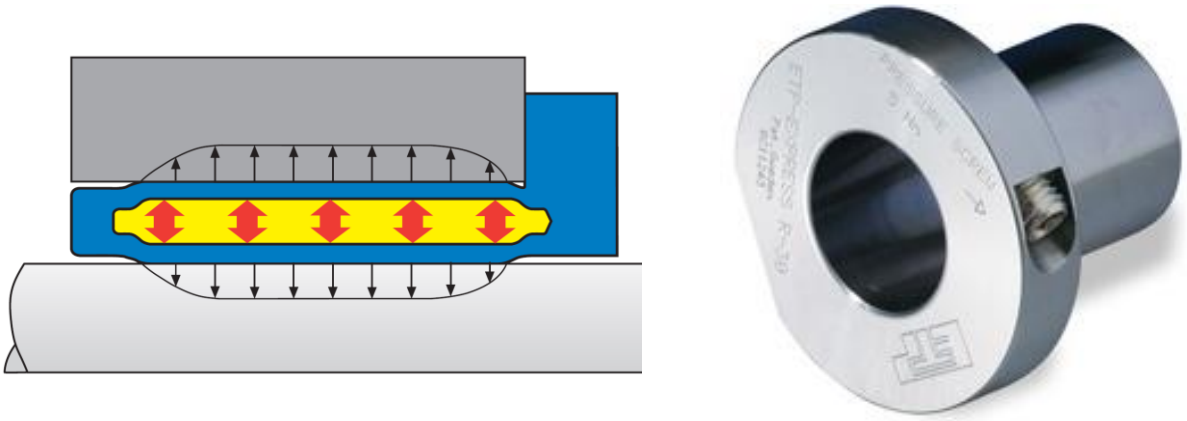


Abbildung 1: Wirkprinzip einer hydraulischen Spannbuchse und Spannbuchse der Firma ETP [2]

Hydraulische Spannbuchsen zeichnen sich besonders im Bereich der Montage/Demontage gegenüber anderen Welle-Nabe-Verbindungen aus. Sie sind ohne Spezialwerkzeug zu verwenden und benötigen dabei ein geringes Anzugsmoment. [2,3,4]

Bei der Demontage sind keine zusätzlichen Abdruckvorrichtungen, Demontageschrauben oder Umbauten notwendig. Eine genaue Justierung bei der Montage ist möglich, da beim Spannen keine axiale Bewegung auftritt. Die Expansion der Buchse erfolgt lediglich in radialer Richtung. Dies ermöglicht es, die Buchse leicht und schnell sowie mehrfach auszurichten. Da der Einbau in jeder Winkelstellung möglich ist, ist eine gute Zugänglichkeit auch bei engen Einbauverhältnissen gegeben. Dies wird erreicht, indem die Spannvorrichtung axial oder radial ausführbar ist.

Wie die meisten kraftschlüssigen Verbindungen zeichnen sich auch die hydraulischen Spannbuchsen dadurch aus, dass an den zu fügenden Bauteilen keine Nachbearbeitungen, wie sie z.B. bei Passfedern oder Stiftverbindungen erforderlich sind, notwendig sind. Aus diesem Grund treten keine Bereiche mit Spannungskonzentrationen auf, was zu kostengünstigeren Maschinenelementen, die höhere Lasten bei reduzierten Materialkosten übertragen können, führt.

3 Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für das Rapid Manufacturing

Als 3D-Drucker für die Herstellung wurde der *uPrint SE Plus* der Firma Stratasys Ltd. ausgewählt. Dieser FDM-Drucker verwendet Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) als Druckmaterial. Das ABS wird als festes Ausgangsmaterial einem Extruder zugeführt und kurz unter dem Schmelzpunkt in teigigem Zustand auf die Bauplattform oder darunterliegende Schichten aufgetragen. Die thermische Energie im erhitzten Material reicht dabei aus, um sich mit dem umliegenden Material zu verbinden.

Ein aus einzelnen Schichten hergestelltes Bauteil weist eine Welligkeit auf der Oberfläche auf. Diese verläuft parallel zur Druckebene und ist hauptsächlich von der gedruckten Schichtdicke abhängig. Für einen schnellen Druckvorgang und homogenere Materialeigenschaften ist es vorteilhaft, eine größere Schichtdicke

zu wählen, da es zu weniger Übergängen zwischen den einzelnen Lagen kommt. Allerdings nimmt mit steigender Schichtdicke auch die Welligkeit an der Bauteiloberfläche zu.

Die erzeugten Schichten bilden einen anisotropen Werkstoff. In [5,6] wurde festgestellt, dass die Ausrichtung der Schichten einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat und eine unidirektionale Schichtung in Zugrichtung die größte Belastbarkeit begünstigt.

Das ausgeprägt anisotrope Verhalten 3D-gedruckter Bauteile erfordert die Betrachtung dieser Eigenschaften bei FE-Simulationen. Aus diesem Grund wurden für das hier verwendete Material die relevanten Werkstoffkennwerte ermittelt. Um die Welligkeit der Materialoberfläche zu reduzieren, wurde diese mit Aceton behandelt. Die Materialeigenschaften und Behandlung mit Aceton wurden in [7] veröffentlicht.

3.1 Simulation in ANSYS

In der Simulation werden die Geometriedaten der hydraulischen Spannbuchse sowie die Daten der umgebenden Bauteile Welle und Nabe, welche in Abbildung 2 gezeigt sind, verwendet. Es werden drei Parameter untersucht: der Druck in der Buchse, der Spalt zwischen Buchse und Welle bzw. Nabe sowie der Reibkoeffizient der in kontakttretenden Oberflächen.

Die Simulation wird in zwei Lastschritten durchgeführt. Im ersten wird der Druck in der Buchse bis zum Solldruck aufgebaut und die Flächenpressung zwischen Welle und Buchse sowie Buchse und Nabe hergestellt. Dabei verformen sich die Außenwände der Buchse. Anschließend wird im zweiten Schritt der Druck in der Buchse konstant gehalten und ein Moment über die Kontaktbereiche übertragen, bis es zum Überschreiten der Haftreibung kommt. Dieser Druck wirkt senkrecht auf die Innenflächen der Buchse.

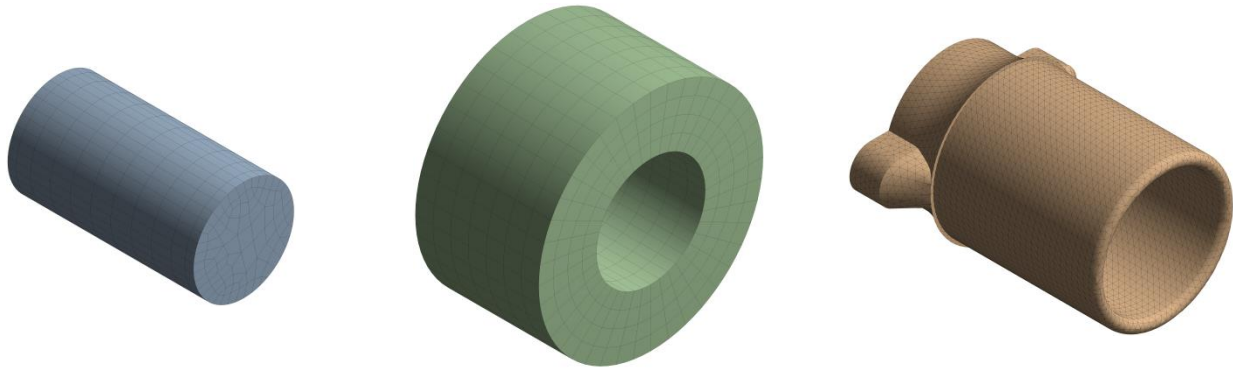


Abbildung 2: Welle, Nabe und Buchse für die Simulation in ANSYS mit Vernetzung

Zur idealisierten Lagerung der Bauteile sind in beiden Lastschritten die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Welle gesperrt. Die Buchse kann sich bis zum Kontakt mit der Welle bzw. Nabe frei bewegen. Ebenso frei ist die Rotation der Buchse um die Mittelachse, um die Übertragung von Kräften über die Buchse zu gestatten. Die Rotation um die beiden anderen Achsen ist gesperrt.

Um die Abhängigkeit der Parameter zu untersuchen, ist in den folgenden Darstellungen (Abbildung 3, 4 und 5) das übertragene Moment in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten und der Spaltbreite (Abbildung 3), sowie der Spaltbreite und dem Spanndruck (Abbildung 4) dargestellt.

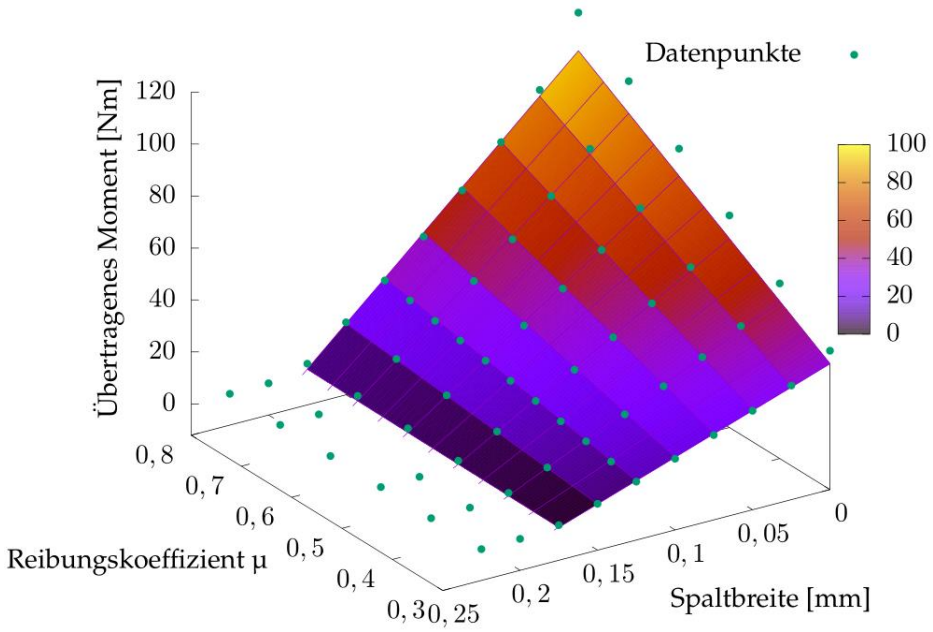


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient und der Spaltbreite bei einem Spanndruck von 1,2 MPa

Für eine bessere Visualisierung und für nachfolgende Berechnungen wurde eine Fläche passend zu den Datenpunkten gefittet. Um die Anpassungsgüte zu überprüfen, wurde der Chi-Quadrat-Test (χ^2) verwendet.

In Abbildung 3 wird der Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und der Spaltbreite dargestellt. Der Spanndruck liegt für diese Untersuchungen bei 1,2 MPa. Der Reibungskoeffizient wurde von 0,3 bis 0,8 in Schritten von 0,1 variiert und die Spaltbreite von 0 mm bis 0,2 mm in Schritten von 0,05 mm. Bei einer Spaltbreite von 0,1 mm konnten zusätzliche Daten verwendet werden, daher ist hier der Reibungskoeffizient in Schritten von 0,05 variiert. Die Datenpunkte bei einer Spaltbreite von 0 mm wurde für die Approximation der Fläche nicht betrachtet, da hier Ausreißer auftreten. Aufgrund der Vernetzung kommt es bei dieser Spaltbreite zu lokalen Durchdringungen der Ausgangsgeometrien, was zu einer Vorspannung ähnlich einer Pressverbindung führt.

Bei Betrachtung der Grafik ist zu erkennen, dass ab einer bestimmten Spaltbreite keine Kraft mehr übertragen wird. Es zeigt sich, dass die Schnittgerade der Fläche f(μ,t) mit der Ebene bei 0 Nm bei einer Spaltbreite von 0,178 mm auftritt, wenn ein Spanndruck von 1,2 MPa herrscht. Dieser Wert ist unabhängig vom Reibungskoeffizienten und entspricht damit den Erwartungen an die physikalischen Randbedingungen.

Da der Reibungskoeffizient keinen Einfluss auf den ersten Kontakt zwischen Welle und Nabe hat, ist die Betrachtung des Verhaltens der Spaltbreite und des Spanndruckes auf das übertragene Moment sinnvoll. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

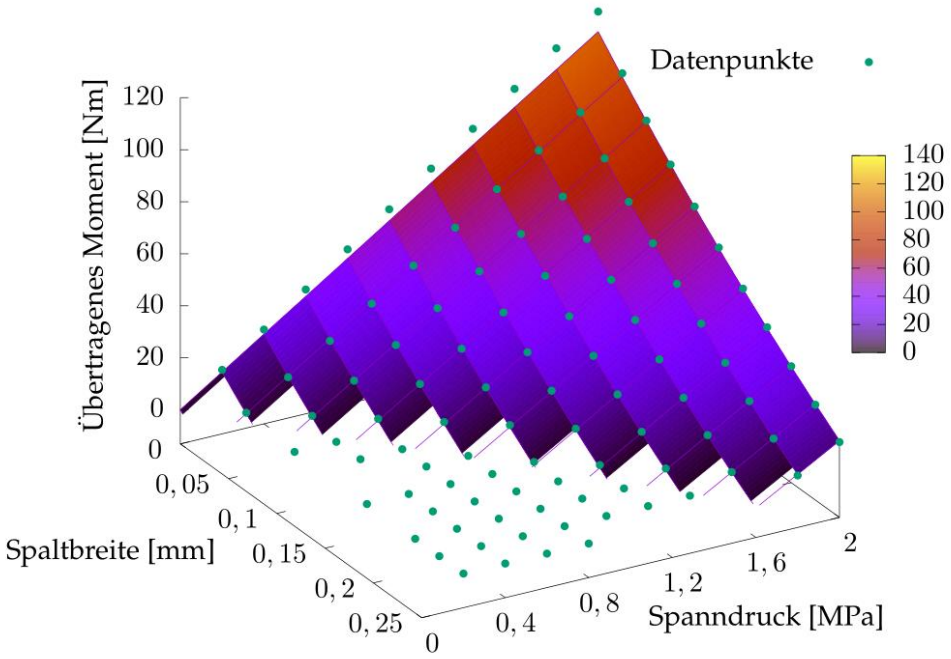


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen der Spaltbreite und dem Spanndruck bei einem Reibungskoeffizienten von 0,5 auf das übertragene Moment

Für diese Darstellung wurde der Reibungskoeffizient auf 0,5 festgelegt. Die Spaltbreite wurde von 0 mm bis 0,2 mm in Schritten von 0,05 und der Spanndruck von 0,8 MPa bis 2,0 MPa in Schritten von 0,2 MPa variiert. Es fällt auf, dass bei Modellen, bei denen kein vollständiger Kontakt ausgebildet und damit kein Moment übertragen werden kann, es bei einigen Parameterkombinationen zu keiner Konvergenz im Modell kommt. Dies ist besonders bei hohen Spanndrücken und großem Spalt und bei kleinem Spalt mit niedrigen Drücken aufgetreten.

Für die dargestellte Fläche wurden die Datenpunkte bei einer Spaltbreite von 0 mm und einem übertragenen Moment von weniger als 0,1 Nm nicht in der Regressionsanalyse betrachtet. Es zeigt sich, dass beide Parameter einen nicht linearen Einfluss auf das übertragene Moment haben.

Die Darstellung des Zusammenhanges aller drei Parameter auf das übertragene Moment ist graphisch nur unter Einschränkungen möglich. Abbildung 5 zeigt eine Darstellung dieser 4-dimensionalen Daten. Hierfür wurden Flächen gleicher Momente in Inkrementen von 20 Nm dargestellt. Zusätzliche Datenpunkte für die Darstellung wurden linear interpoliert.

Die Ergebnisse ermöglichen es, für jede Parameterkombination das zu übertragene Moment zu ermitteln oder im Umkehrschluss vom Moment auf die Parameter zu schließen. Dies wird bei der Bewertung der experimentellen Ergebnisse im folgenden Abschnitt verwendet.

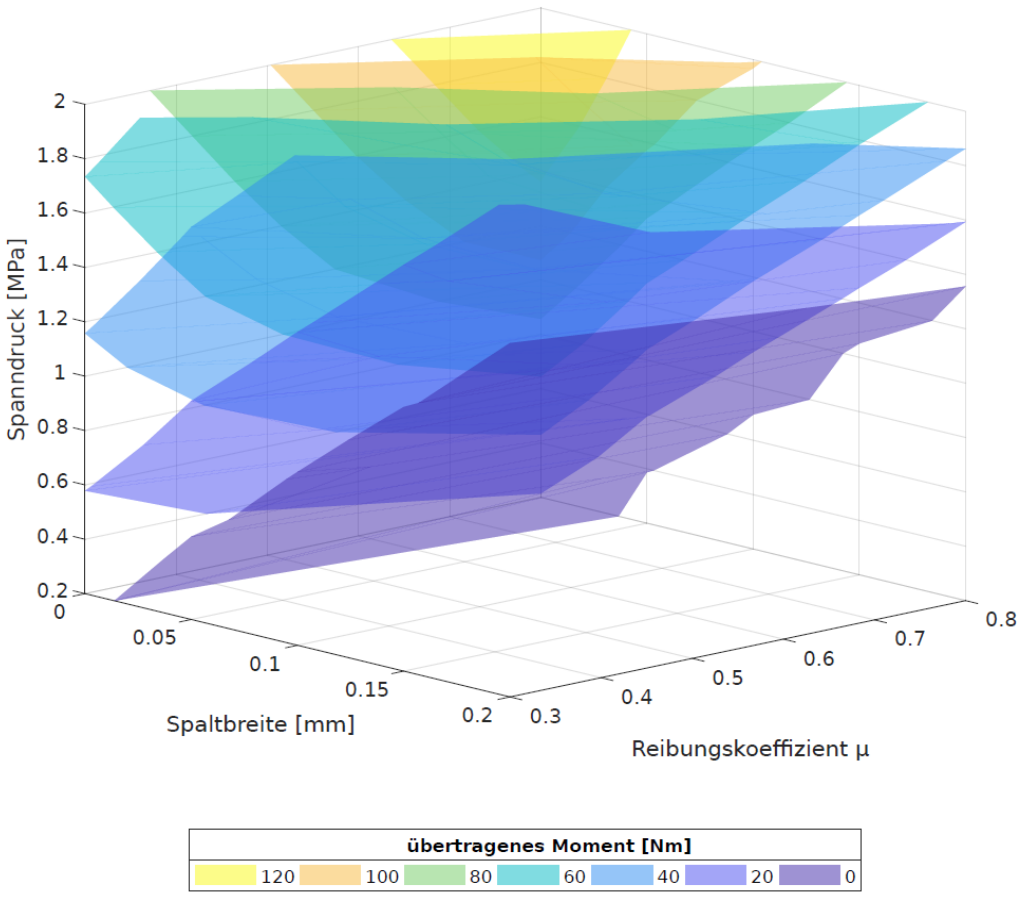


Abbildung 5: Auswirkung von Reibungskoeffizient, Spanndruck und Spaltgröße auf das übertragene Moment

3.2 Prüfstandversuche und Vergleich mit der Simulation

Zur Validierung der Simulation wurden Buchsen gedruckt und an einem eigens hierfür erstellen Prüfstand verbaut. Der Innendruck der Buchsen wurde schrittweise um 2,5 Nm erhöht und 300 Sekunden gehalten. Die Last wurde so lange erhöht, bis es zum Schlupf zwischen der Buchse und der Welle bzw. Nabe kam.

Die Auswertung der Messreihen ist in Abbildung 6 dargestellt und zeigt den Buchseninnendruck in Relation zum übertragenen Moment. Die Höhe der Balken gibt die letzte vollständig absolvierte Momentenstufe wider. Der Fehlerbalken zeigt das übertragene Moment zum Zeitpunkt des ersten Auftretens von Schlupf. Die Regression durch die Messpunkte zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Druck und übertragbarem Moment. Der Schnittpunkt dieser Regressiongrade mit der Ordinate gibt den mindestens erforderlichen Innendruck an, der für den Kontakt der Baugruppen erforderlich ist. Für diese Buchsen sind es 0,33 MPa.

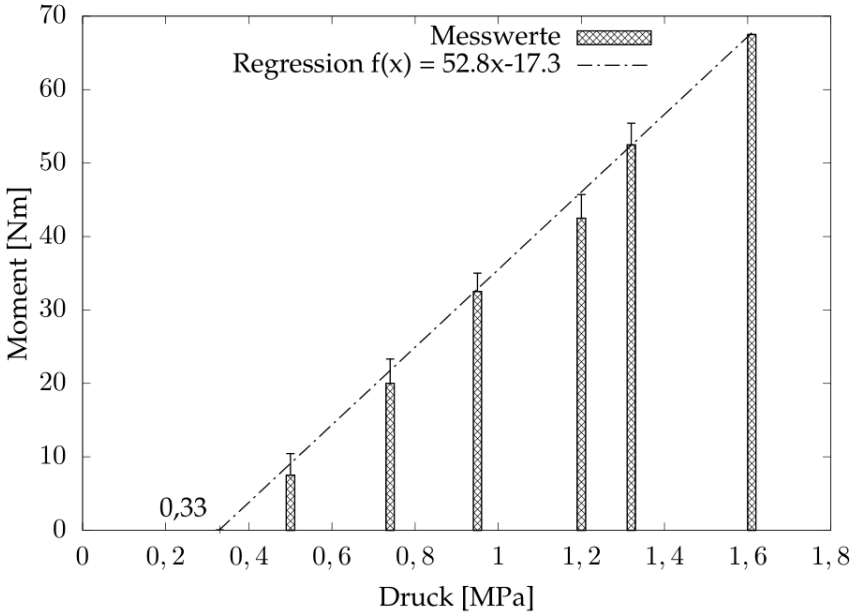


Abbildung 6: Übertragbares Moment in Abhängigkeit zum Spanndruck der Buchse, gemessen am Prüfstand.

In Abschnitt 3.1 wurden die Ergebnisse der FE-Analyse präsentiert. Anhand Abbildung 3 wurde gezeigt, dass der Reibkoeffizient keinen Einfluss auf den initialen Kontakt zwischen Buchse und Welle bzw. Nabe und damit auf den nötigen Spanndruck hat, um den Spalt zu schließen. Aus diesem Grund kann die Gleichung der dargestellten Fläche verwendet werden, um den Spalt der Buchse am Prüfstand zu errechnen. Der Schnittpunkt dieser Fläche mit der Ebene bei 0 Nm bei einem Spanndruck von 0,33 MPa ergibt einen Spalt von 0,0477 mm.

Mit der Kenntnis dieses Wertes ist es nun möglich, die Simulation mit konstantem Spalt und variablem Spanndruck sowie Reibkoeffizienten zu wiederholen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 zu sehen.

Das übertragene Moment wird in Abhängigkeit vom Spanndruck für die Reibkoeffizienten 0,3; 0,4; 0,5 und 0,6 dargestellt. Zusätzlich ist die Regressionsgerade (siehe Abbildung 6) aus dem Versuch zum übertragbaren Moment abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die Regression der Versuchsmesswerte zwischen denen der errechneten Werte mit einem Reibkoeffizienten von 0,5 und 0,6 liegt.

Über die Betrachtung des Anstiegs der Geraden kann ein Reibkoeffizient von 0,501 für die am Prüfstand vermessenen Buchsen ermittelt werden.

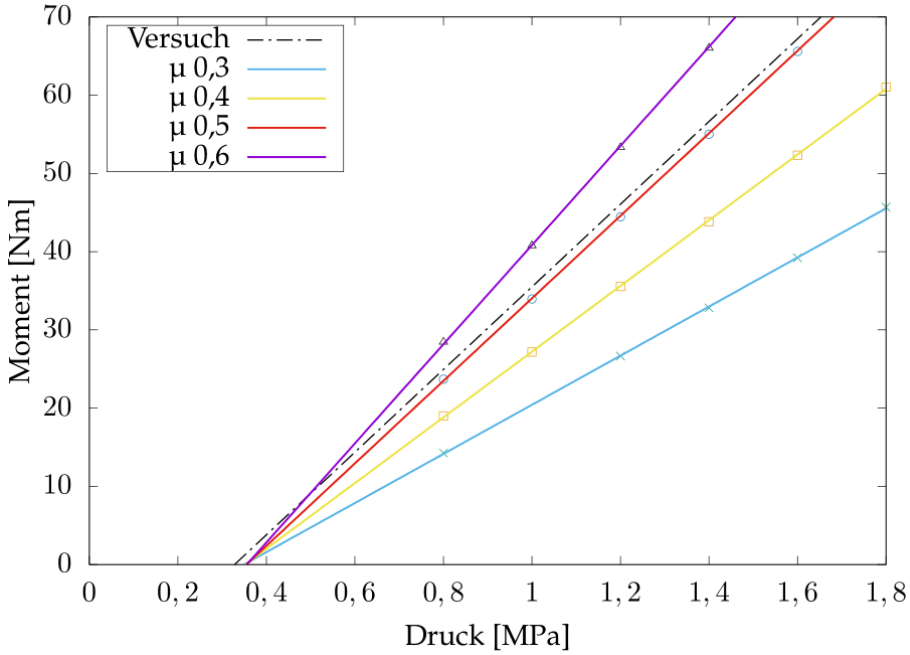


Abbildung 7: übertragenes Moment bei einem Spalt von 0,05 mm in Abhängigkeit zum Spanndruck; Vergleich der Simulation mit dem Versuch

4 Ergebnisse, Diskussion und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass hydraulische Spannbuchsen mittels Rapid Manufacturing herstellbar sind. Ihre Funktionsfähigkeit wurde am Prüfstand nachgewiesen. Der ermittelte Reibkoeffizient aus der Kombination der Daten aus den Versuchen und den Simulationsergebnissen entspricht eigenständigen Versuchen zur Haftreibung der verwendeten Materialkombination. Mit den Versuchen am Prüfstand können jedoch noch keine Aussagen über die Dauerfestigkeit getroffen werden. Besonders thermoplastische Kunstoffe, wie sie beim FDM-Verfahren verwendet werden, erfordern umfangreiche Tests, um Effekte wie die Spannungsrelaxation und das Kriechen über die Einsatzdauer zu betrachten.

Das vorgestellte Simulationsmodell kann erweitert werden, um diese Effekte abzubilden. Es ist weiterhin möglich, andere Materialen in der Simulation, als auch dem 3D-Druck zu verwenden.

Die 3D-gedruckte hydraulisch Spannbuchse wurde unter dem Aktenzeichen DE 10 2018 123 980 als Patent angemeldet. [8]

Abbildung 8 Prototyp einer 3D-gedruckten hydraulischen Spannbuchse aus Kunststoff

5 Literaturangaben

[1] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren*. 4. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 2013

[2] ETP TRANSMISSION AB: ETP Product Catalogue GER: Hydraulische Welle-Nabe Verbindungen

[3] Sabine Güttler : Innovative Prinzipfindung und Konstruktion von ETP-Spannbuchsen unter Berücksichtigung verschiedener Fertigungsverfahren, Werkstoffe und des Druckmediums. Rostock, Universität Rostock, Projektarbeit,12.10.1994

[4] Ringspann GmbH: Lieferzeit und Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110. https://www.ringspann.de/de/produkte/welle-nabe-verbindungen/konus-spannelemente/

[5] Ziemian, Constance; Sharma, Mala. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. Mechanical Engineering, 2012 – DOI 10.5772/34233

[6] Ahn, Sung-Hoon; Montero, Michael; et. Al.: *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Issue: 4, 2002 – DOI 10.1108/13552540210441166

[7] Koldrack, N.; Schmitt, P.: Über den Einfluss von Aceton auf die Zugfestigkeit und Welligkeit von 3D-gedrucktem ABS-P430. 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2018

[8] Patentanmeldung DE 10 2018 123 980, unveröffentlicht

KT2019

Datenaustausch, Informationstransparenz und Cloudcomputing

Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle für den effizienten Einsatz von HPC in der digitalen Produktentwicklung

Christopher Lange, Tobias Rosnitschek, Matthias Roppel, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
E-Mail: christopher.lange@uni-bayreuth.de; Internet: https://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Der Einsatz von High-Performance-Computing (HPC) in der Produktentwicklung kann maßgeblich zur Optimierung der gesamten Prozesskette beitragen. Da gerade kleinen und mittleren Unternehmen aufgrund der hohen Investitionen der Zugang zu dieser Technologie fehlt, wird HPC zunehmend als Dienstleistung angeboten. Die Handhabung der Rechenressourcen ist jedoch komplex. Folglich muss durch geeignete Schnittstellen sichergestellt werden, dass auch HPC-unerfahrene Nutzer effizient arbeiten können. Daher wird in diesem Beitrag die Konzeption und Entwicklung einer Webschnittstelle vorgestellt, mit deren Hilfe die Bedienungsfreundlichkeit von HPC-Systemen im Umfeld von Finite Elemente Analysen deutlich verbessert werden kann. Die Webschnittstelle wurde bereits in Teilen als Demonstrator umgesetzt und in ersten Tests erfolgreich angewendet.*

Stichwörter: *Digitalisierung, FEA, HPC, parallele und verteilte Systeme*

Development of a Web Interface for the efficient usage of HPC in the Context of Digital Product Engineering

Abstract: *The usage of High-Performance- Computing (HPC) for product engineering may have a huge impact on the efficiency of the whole process chain. Especially small and medium sized enterprises have hardly access to this technology due to high investments. Therefore, there is an increasing supply of HPC-as-a-service. However, the use of the computational resources is complex and it has to be assured, that also inexperienced users are able to work efficiently with HPC-systems. This is achieved with of appropriate interfaces. In this paper the development of a web-based HPC-interface is presented, which enhances the usability of HPC-Systems in the context of finite element analysis significantly. The web interface is already partly implemented as a demonstrator and was successfully used in first tests.*

Keywords: *Digitalization, FEA, HPC, Parallel and Distributed Systems*

1 Einleitung und Motivation

Mit der stetig zunehmenden Komplexität neuer Produkte, steigt gleichermaßen die Notwendigkeit große Datenmengen in kurzer Zeit zu verarbeiten [1]. Besonders in der Produktentwicklung spielen computergestützte Systeme eine zunehmend größere Rolle. So werden etwa in der virtuellen Produktentwicklung numerische Simulationen zur Produktvalidierung eingesetzt. Aufgrund der realitätsnäheren Abbildung von Prozessen und Produkten steigt entsprechend der Detailierungsgrad der verwendeten Modelle stark an, was sich in langen Rechenzeiten widerspiegelt [2]. Demnach ist die Verkürzung der Rechenzeiten bei gleichbleibender Ergebnisqualität ein Bestreben, das für Industrie und Wissenschaft gleichermaßen von Interesse ist. Eine leistungsstarke Methode zur Reduzierung der Rechenzeit stellt das High Performance Computing (HPC) auf Rechenclustern dar. Hierbei werden einzelne Computer (Rechenknoten) miteinander verbunden, sodass diese befähigt werden große Datenmengen parallel zu verarbeiten. Im Kontext numerischer Simulationen können somit größere und komplexere Probleme aus partiellen Differentialgleichungssystemen und großen Matrizen effizient gelöst werden [2].

Aufgrund der Vorteile, welche mithilfe der massiven Parallelisierung im Produktentwicklungsprozess generiert werden können, hat die deutsche Bundesregierung 2015 in einer Bekanntmachung erstmals geäußert, dass der Einsatz von HPC eine Grundlage für Innovationen darstelle und für die Generierung von Wettbewerbsvorteilen unerlässlich sei [3]. Insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) fehlt häufig der Zugang zu HPC-Systemen, weshalb angestrebt wird, ein europaweites Netzwerk aus HPC-Serviceanbietern und KMU zu etablieren [3,4]. Da KMU neben den finanziellen Mitteln auch häufig die Expertise für die Nutzung von HPC-Systemen fehlt, soll HPC zunehmend als Dienstleistung (HPC-as-a-Service) zur Verfügung gestellt werden, damit sich die betroffenen Unternehmen weiter auf ihre Schlüsselkompetenzen konzentrieren können, ohne dabei an Wettbewerbsfähigkeit einzubüßen [5]. Zudem tritt der Bedarf an Rechenleistung meist schubweise auf und liegt nicht permanent vor, weshalb Anlagen in eigenen Räumlichkeiten wirtschaftlich unattraktiv sind. Im Rahmen dieser Problematik wurden Förderprojekte wie *HiPerSim4all* [6], *SESAME NET* [7] oder *Fortissimo* [8] ins Leben gerufen.

Aufgrund der Komplexität des HPC ist es für eine sinnvolle Integration in Produktenwicklungsprozesse notwendig, geeignete Schnittstellen zu schaffen, damit sich auf Seiten der KMU auf das Wesentliche konzentriert werden kann. So wird in diesem Beitrag die Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle vorgestellt, mit deren Hilfe es HPC-unerfahrenen Nutzern ermöglicht wird, bei Bedarf auf die Rechenressourcen zu zugreifen und diese effizient in der Produktentwicklung zu nutzen. Dabei soll der Anwender bei der Wahl geeigneter Rechenressourcen unterstützt und die Berechnungszeiten der Simulationen abgeschätzt werden. Das Anwendungsgebiet der Schnittstelle soll sich ferner zunächst auf die Finite-Elemente-Analyse (FEA) beschränken.

2 Grundlagen des Cluster Computing

High-Performance-Computing kann im Allgemeinen dem Cluster-Computing zugeordnet werden. Das Grundprinzip des Rechnens mit Computer-Clustern besteht darin, dass verschiedene unabhängige Computer (Rechenknoten bzw. Nodes) mit eigenem oder gemeinsamen Speicher über ein Netzwerk miteinander verbunden sind [1,2]. Dabei erfüllt ein Leitrechner (Master-Node) eine übergeordnete Funktion, indem er die Rechenaufgaben auf die übrigen Rechenknoten (Worker-Nodes) verteilt und die Kommunikation innerhalb des Clusters regelt. Auf diese Weise können Problemstellung massiv parallel und daher in deutlich geringerer Zeit gelöst werden [9]. Als Kommunikationsstandard wird überwiegend das Message Passing Interface (MPI) verwendet. Darüber werden auf den beteiligten Rechenkernen verschiedene Prozesse gestartet, welche an einer gemeinsamen Aufgabe arbeiten. Für eine abgesicherte Kommunikation zwischen den Rechenknoten sowie dem sicheren Zugriff von Extern, wird das Secure Shell (SSH) Protokoll verwendet [10].

Durch den Einsatz von HPC-Systemen kann die Rechenzeit deutlich reduziert werden, jedoch existieren Grenzen der Parallelisierbarkeit. Zu beachten sind in diesen Kontext die Gesetze nach Amdahl sowie Gustafson. Amdahls Gesetz besagt, dass ein Problem definierter Größe mit einer beliebigen Anzahl an Prozessoren nicht in unendlich kurzer Zeit gelöst werden kann [1, 9]. Dies ist damit zu begründen, dass zum einen die Verkürzung der Rechenzeit auf die parallelisierbaren Anteile beschränkt ist und zum anderen der Kommunikationsaufwand mit der Anzahl der eingesetzten Rechenkerne wächst, weshalb bei zu vielen beteiligten Kernen die Rechenzeit wieder ansteigt. Bei Gustafson wird hingegen die

Problemgröße variiert und somit gezeigt, dass durch eine zunehmende Parallelisierung größere Probleme in gleicher Rechenzeit gelöst werden können [9]. Entsprechend ergibt sich aus diesen beiden Gesetzen, dass für ein spezifisches Problem eine ideale Konfiguration an Rechenkernen existiert und die eingesetzte Kernanzahl in HPC-Systemen mit der Problemgröße für eine effiziente Lösung zu finden ist.

Das Anbieten von HPC-Systemen als Dienstleistung kann als Bereitstellung von Ressourcen über Clouddienste verstanden werden [11]. Damit ändert sich ebenfalls die Interaktion mit solchen Systemen. Die ständige und freie Verfügbarkeit der Rechenressourcen steigert die Akzeptanz und führt zu einem heterogenen Anwenderkreis, mit teilweise unerfahrenen Nutzern, welche wiederum einen größeren Unterstützungsbedarf benötigen. Stehen scheinbar unendliche Rechenressourcen zur Verfügung, so werden in der Regel deutlich mehr Rechenkerne als notwendig allokiert, wodurch eine wirtschaftlich optimale Ausnutzung des Clusters erschwert wird [12]. Entsprechend wird der potentielle Mehrwert von HPC teilweise relativiert. Die Forschung hinsichtlich Benutzungsfreundlichkeit von HPC-Systemen gliedert sich nach [12] grob in die folgenden Teilbereiche: Web Portal, Execution Steering, Workflow Management, Application deployment und Legacy to SaaS. Dabei stützen sich die letzten beiden Punkte auf das HPC-System betreffende Aspekte, auf die der Anwender in der Regel keinen Einfluss hat. Aus diesem Grund werden diese im Rahmen dieses Beitrags nicht weiter beleuchtet. Die zu entwickelnde HPC-Schnittstelle umfasst die übrigen drei Punkte. Deshalb soll im Folgenden auf funktionale Aspekte der Schnittstelle (Datenaustausch, Steuerung und Ausführung von Berechnungen, etc.) näher eingegangen werden.

3 Konzeption und Entwurf einer webbasierten HPC-Schnittstelle

Die Entwicklung der HPC-Schnittstelle orientiert sich an dem aus dem Maschinenbau bekannten Entwicklungsprozess nach Pahl/Beitz [13]. Im Folgenden sollen hierfür die Anforderungsanalyse (Planen und Klären der Aufgabe), sowie die Architektur (Konzipieren und Entwurf) dargestellt werden. Die Anforderungsanalyse besteht zum einen aus persönlichen Gesprächen mit Projektteilnehmern des ESF-geförderten Forschungsprojekts *HiPerSim4all*, sowie zum anderen aus der praktischen Erfahrungen aus verschiedenen am Lehrstuhl für

Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth durchgeführten Schulungen mit Bezug zum High-Performance-Computing. Die Anforderungen werden zunächst thematisch gruppiert und hinsichtlich funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen klassifiziert. Anschließend folgt eine Zusammenfassung und Reduktion auf sieben Kernanforderungen. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Kernanforderungen an die HPC-Schnittstelle. (F = Funktionale Anforderung; NF = Nicht-funktionale Anforderung)

Nr.	Klasse	Beschreibung	F / NF
1	Betrieb	Die Schnittstelle ist über das gesicherte Hypertext Transfer Protocol (https) für den Anwender erreichbar.	F
2	Betrieb	Die Schnittstelle soll den Datenaustausch verschiedener FE-spezifischer Formate mit einem oder mehreren HPC-Systemen ermöglichen.	F
3	Betrieb	Die Schnittstelle soll Berechnungen auf externen HPC-Systemen starten und die Ergebnisse dem Anwender zurückliefern.	F
4	Daten	Datenschutz und Datensicherheit gemäß aktueller gesetzlichen Vorgaben soll auch bei externen HPC-Systemen mit gemeinsamen Speicher sichergestellt werden.	NF
5	Betrieb	Berechnungsparameter sollen für den Anwender konfigurierbar sein.	NF
6	Usability	Das System soll Metadaten der Simulationen erfassen und auf deren Basis Empfehlungen für eine optimale Cluster-Konfigurationen geben können.	NF
7	Usability	Die Bedienung der Schnittstelle soll für den Anwender einfach zu erlernen und intuitiv sein.	NF

Bei Betrachtung der Anforderungen wird deutlich, dass sich diese nicht durch Einsatz von Standardsoftware realisieren lassen. Zielsetzung der zu konzipierenden Schnittstelle ist daher zum einen die Effektivität und Effizienz der digitalen Produktentwicklungsprozesse mittels HPC-Ressourcen zu steigern, und zum anderen Analysen des Betriebs- und Nutzungsverhaltens, zwecks Steigerung der Prozessperformance, zu ermöglichen. Eine Optimierung der Prozessperformance lässt sich weiterhin durch (Teil-) Automatisierung und Unterstützung des Anwenders bei Wahl der Rechenressourcen erreichen.

Aus dem Ablauf eines typischen Simulationsprozesses (Preprocessing, Solving, Postprocessing) leiten sich die folgenden zu erfüllenden Funktionalitäten ab:

1. Bereitstellen der softwarespezifischen Modelleingabedatensätze auf einem Speichermedium des HPC-Systems
2. Aufbau einer gesicherten Verbindung mit dem HPC-System
3. Allokieren der HPC-Rechenressourcen und lokales Bereitstellen der Eingabedaten
4. Initialisieren der FE-Rechenkerne und Starten der Berechnung
5. Rückübermitteln der Ausgabedatensätze an den Anwender. Löschen aller bereitgestellten oder berechneten Modelldaten auf dem HPC-System
6. Erfassen und Auswerten der Simulationsmetadaten

3.1 Datenaustausch (Funktionalitäten 1 und 5)

Datenaustausch bezeichnet im Allgemeinen das Senden, Übermitteln und Empfangen von Daten zwischen zwei oder mehreren Organisationen. Im Fokus wissenschaftlicher Forschung mit industriellen Kontext stehen im besonderen Austauschformate für Produktdaten, da Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Übertragbarkeit der Daten trotz Standardisierung noch nicht sichergestellt ist [14]. Für die Schnittstellenkonzeption ist der Datenaustausch dagegen als unproblematisch einzustufen, da native Formate verwendet werden. Für die weitere Konzeption sei daher die Annahme getroffen, dass die Softwareumgebung auf beiden Seiten der Schnittstelle identisch sei. Aus diesem Grund kann auf Standardprotokolle der Dateiübertragung zurückgegriffen werden. Im Hinblick auf die Datenübertragung kann zwischen den für den Verbindungsaufbau notwendigen Daten (Steuerdaten), wie beispielsweise Zugangsdaten, und den eigentlich zu übertragenden Daten (Nutzdaten), wie beispielsweise Modelldaten, unterschieden werden. Für die Nutzung im Rahmen der Schnittstelle eignen sich insbesondere die Protokolle aus Tabelle 2. Dabei ist jedoch anzumerken, dass für SCP und RCP keine offiziellen Spezifikationen vorliegen. Weiterhin ist anzunehmen, dass für SCP aufgrund unflexibler Einsatzmöglichkeiten und bisher nicht gelöster Sicherheitsprobleme, zunehmend an Bedeutung verlieren wird und somit eine nachhaltige Weiterentwicklung nicht gewährleistet werden kann [18]. Im Sinne einer Maximierung der

Datensicherheit sollte die Schnittstelle für die Datenübertragung daher vorzugsweise auf SFTP oder FTPS zurückgreifen.

Tabelle 2: Dateiaustausch-Protokolle und die jeweilige Verschlüsselung der zu übertragenden Daten (Auszug)

Protokoll	Steuerdaten	Nutzdaten
File Transfer Protocol (FTP) [15]	Unverschlüsselt	Unverschlüsselt
SSH File Transfer Protocol (SFTP) [16]	Verschlüsselt	Verschlüsselt
FTP over SSL (FTPS) [17]	Verschlüsselt/Unverschlüsselt	Verschlüsselt/Unverschlüsselt
Secure Copy Protocol (SCP)	Verschlüsselt	Verschlüsselt
Remote Copy Protocol (RCP)	Unverschlüsselt	Unverschlüsselt

3.2 Verbindungsaufbau und Allokation der HPC-Rechenressourcen (Funktionalitäten 2 und 3)

Der de facto Standard für den Aufbau einer verschlüsselten Verbindung mit einem entfernten Gerät ist das Netzwerkprotokoll SSH. Dabei ist es notwendig, dass die verbindungaufbauende Instanz die Zugangsdaten für das HPC-System im Klartext vorliegen hat. Dies verhindert jedoch eine verschlüsselte Speicherung und widerspricht damit allgemein anerkannten Sicherheitsstandards [19]. Als Alternative bietet sich insbesondere asymmetrische Authentifizierungsverfahren, wie beispielsweise die Public-Key-Authentifizierung [20] an. Allerdings ist auch hierbei notwendig den privaten Schlüssel des Anwenders sicher für die Schnittstelle zugänglich zu machen. Dies kann beispielsweise durch Ablage auf dem Schnittstellensystem und zusätzlicher Verschlüsselung erfolgen. Alternativ ist auch für jeden Simulationsprozess eine einmalige Übertragung des privaten Schlüssels mit temporärer Speicherung denkbar.

Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau ist die Allokation der Rechenressourcen notwendig. Hierfür wird serverseitig ein Ressourcen-Manager, beispielsweise Torque [21] oder PBS Pro [22], benötigt. Weiterhin wird ebenfalls ein Job-Scheduler benötigt, z. B. Maui [23], welcher die Ausführung der verschiedenen Berechnungsjobs im Hintergrund koordiniert und

steuert. Die auf dem HPC-System installierte Software kann in der Regel kein Einfluss genommen werden, weshalb die Schnittstelle sich flexibel an unterschiedliche HPC-Konfigurationen anpassen muss. Um die Vielzahl an unterschiedlichen Cluster-Konfigurationen mit der Schnittstelle erfassen zu können, ist die Entwicklung modular-einsetzbaren Adaptern und Transformatoren nötig, die von dem Anwender erhaltenen Daten in der spezifischen Syntax bzw. Datenstruktur des jeweiligen HPC-Systems „übersetzt“.

3.3 Initialisierung und Start der Berechnung (Funktionalität 4)

Anforderungen der FE-Rechenkerne an die auf dem HPC-System verfügbare Software unterscheiden sich stark. Gleichzeitig ist die Softwareumgebung cluster-spezifisch, generisch und in ihrer Erweiterbarkeit beschränkt, sofern man keine entsprechenden Berechtigungen auf dem System hat. Viele Anbieter von HPC-Systemen erlauben jedoch den Anwendern eigene Umgebungseinstellungen zu definieren und zu initialisieren, beispielsweise durch Verwendung von Umgebungsmodulen [24]. Dies ermöglicht den Anwendern unterschiedliche, für die Ausführung der FE-Rechenkerne notwendige, Unterprogramme (z. B. Programmbibliotheken) zu laden und so die jeweiligen Anforderungen der verwendeten FE-Programme zu erfüllen. Selbiges muss bei der Konzeption der Schnittstelle ebenfalls berücksichtig werden. So sind die Anforderungen jedes unterstützten FE-Rechenkerns in der Schnittstelle zu definieren und die notwendigen Programmbestandteile, bei Bedarf, auf das HPC-System nachzuladen. Dies kann mit einem der in Kapitel 3.1. vorgestellten Protokolle erfolgen. Die Kommunikation mit dem Job-System kann wiederum per SSH erfolgen. Auch hierbei ist analog zu Kapitel 3.2 zu beachten, dass die zu verwendende Syntax je nach verfügbaren Ressourcen Manager und Scheduler abweichen kann.

3.4 Erfassung und Auswertung Simulationsmetadaten (Funktionalität 6)

Um den Anwender bei der Konfiguration der Rechenressourcen bestmöglich unterstützen zu können, müssen Informationen über das zu rechnende Simulationsmodell vorhanden sein. Diese können anschließend mit Datensätzen über die Leistung des jeweiligen HPC-Systems in Korrelation gesetzt werden, um so eine optimale Konfiguration der Rechenressourcen ermitteln und die prognostizierten Leistungskennwerte dem Anwender mitteilen zu können. Da Daten zunächst nicht zur Verfügung stehen, müssen diese durch die

Schnittstelle selbst erhoben werden und auf deren Basis ein selbst-lernendes System implementiert werden. Hierfür bieten sich Methoden des maschinellen Lernens an, welche bereits für ähnliche Problemstellungen erfolgreich eingesetzt wurden [25]. Zur Erfassung der Modell- und Leistungsdaten wird ein eigenständiges Modul entwickelt, welches die entsprechenden Ausgabedateien ausliest und die Daten in einer Datenbank speichert. Hierbei müssen modell- und systemseitig alle Daten erfasst werden, die Einflüsse auf Berechnungszeiten des HPC-Systems haben könnten. Ein Überblick über die Mindestmenge der benötigten Daten ist in Tabelle 3 gegeben. Die in der Datenbank erfassten Simulationsmetadaten können anschließend mit Methoden des maschinellen Lernens in Modellen aufbereitet und mit neuen Daten laufend trainiert werden. Die trainierten Modelle werden nach einer gewissen Zeit in der Lage sein die Berechnungszeiten für eine gegebene Problemstellung vor Berechnungsbeginn abzuschätzen und dem Anwender eine optimale Konfiguration der HPC-Ressourcen vorzuschlagen.

Tabelle 3: Überblick über die bei der Benutzung der Schnittstelle zu erfassenden Leistungs- und Modelldaten pro Berechnungsjob

Modelldaten	**Leistungs- bzw. Systemdaten**
Verwendete Software/Rechenkern	HPC-Cluster-Konfiguration
Anzahl der Freiheitsgrade	Anzahl der Rechenknoten
Anzahl an Knoten	Rechenknoten-Typ
Anzahl an Elementen	Anzahl der Kerne pro Rechenknoten
Elementtyp (Ansatzfunktionen)	Berechnungsdauer
FE-Analysetyp	CPU Zeit
Verfahren des Gleichungslösers	In den Speicher geschriebene Daten
Ergebnis der FE-Analyse	Von dem Speicher ausgelesene Daten

4 Ergebnis und Ausblick

Auf Basis der Anforderungen und der vorangegangenen Erläuterungen, wird ein Konzept nach Abbildung 1 vorgeschlagen. Im Zuge einer Evaluierung wurde das Konzepts im

Rahmen des Projekts *HiPerSim4all* teilweise als Demonstrator umgesetzt. Die Implementierung erfolgte auf einer virtuellen Maschine mit Ubuntu 18.04.1 LTS. Ein Web-Frontend bzw. Graphical User Interface (GUI) erleichtert den Anwendern den Umgang mit der Schnittstelle. Dieses wurde auf Basis des quelloffenen Frameworks Django [26] umgesetzt. Eine Anbindung erfolgte zunächst an einem Rechencluster der Universität Bayreuth. Erste Befragungen von Anwendern ergaben, dass der Simulationsprozess im Vergleich zur Kommandozeile vorher als deutlich einfacher empfunden wird. Umfassende und tiefgreifende Untersuchung des Effizienzsteigerungspotentials stehen jedoch noch aus. Weiterhin konnte die Unterstützung des Anwenders durch maschinelles Lernen ebenfalls noch nicht tiefgreifend analysiert werden. Grund hierfür sind die zunächst noch nicht in ausreichender Menge vorhandenen Datensätze. Durch fortlaufende Nutzung werden jedoch ausreichende Datenmengen generiert und das Konzept in seiner Gesamtheit validiert. Eine Weiterentwicklung der Schnittstelle wird ebenfalls in der Unterstützung weiterer rechenintensiver Prozessschritte der Finiten-Elemente-Analyse, wie beispielsweise der Vernetzung, bestehen. Die konzipierte Schnittstelle hat großes Einstiegspotential Anwender beim High-Performance-Computing zu unterstützen und die Hürde für den Einsatz dieser Technologie bzw. deren Akzeptanz in kleinen und mittleren Unternehmen zu steigern.

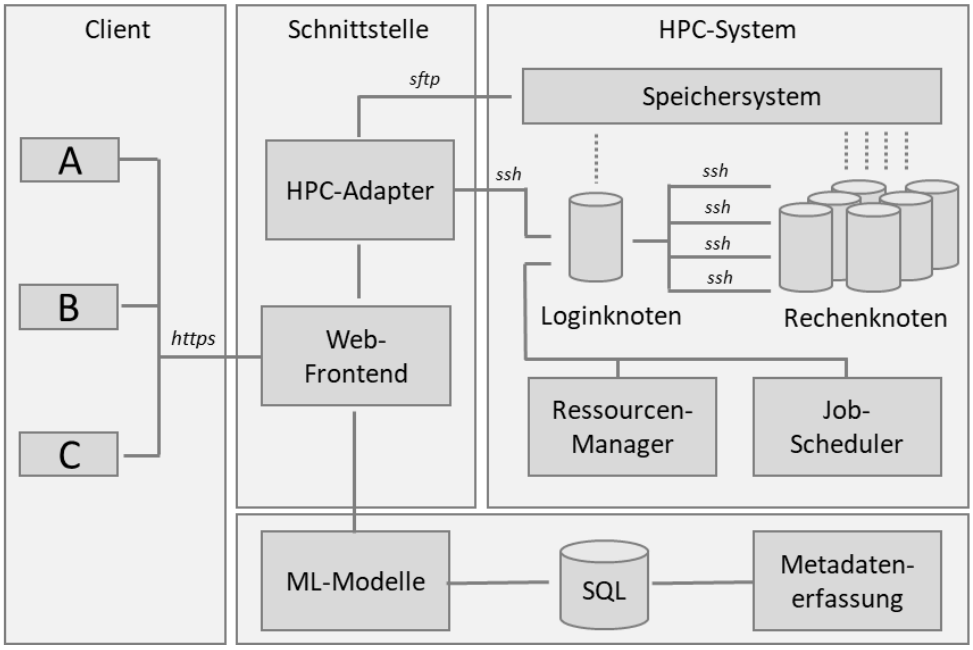


Abbildung 1: Vorschlag zum konzeptionellen Aufbau einer webbasierten HPC-Schnittstelle

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Europäischen Sozialfonds sowie der Oberfrankenstiftung im Rahmen des Forschungsprojekts *HiPerSim4all* finanziert.

Literatur

[1] Rauber, T et al: *Parallel Programming for Multicore and Cluster Systems*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. - ISBN 978-3-642-37801-0

[2] Nielsen, F.: *Introduction to HPC with MPI for Data Science*, Switzerland: Springer International Publishing, 2016. - ISBN 978-3-319-21903-5

[3] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *„Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung,“* 20. März 2015. [Online]. Verfügbar: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1032.html. [Zugriff am 15. Mai 2019].

[4] Gigler, B.-S. et al: *Financing the future of supercomputing*, Luxemburg: European Investment Bank, 2018.

[5] Industrieanzeiger: *„Kleine Unternehmen – große Rechenleistung“*, Industrieanzeiger, 1. August 2016. [Online]. Verfügbar: https://industrieanzeiger.industrie.de/management/it/kleine-unternehmen-grosse-rechenleistung/. [Zugriff am 15. Mai 2019].

[6] Universität Bayreuth Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD: *„HiPerSim4all - High Performance Simulation für alle“*, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, 14. Mai 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de/de/forschung/projekte/hipersim4all/. [Zugriff am 15. Mai 2019].

[7] DataCenter-Insider: *„Mehr HPC für den Mittelstand durch Förderung und Cloud“*, Data Center Insider, 18 Oktober 2016. [Online]. Verfügbar: https://www.datacenter-insider.de/mehr-hpc-fuer-den-mittelstand-durch-foerderung-und-cloud-a-556146/. [Zugriff am 15. Mai 2019].

[8] Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI: *„SESAME Net – HPC-Technologien für kleine und mittlere Unternehmen,“* Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, 5. November 2016. [Online]. Verfügbar: https://www.scai.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/news-05-11-2015.html. [Zugriff am 15. Mai 2019].

[9] Bengel, G. et al: *Masterkurs Parallele und Verteilte Systeme*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-8348-2151-5

[10] Barrett, D. J et al.: *SSH, The Secure Shell: The Definitive Guide*, Sebastopol: O'Reilly and Associates, 2005. - ISBN 978-0-59-600895-6

[11] Parashar, M et al.: *Cloud paradigms in practices for computational and data-enabled science and engineering*, Computing in Science & Engineering 15, 4, S. 10-18, 2013.

[12] Netto, M. et al.: *HPC Cloud for Scientific and Business Applications: Taxonomy, Vision, and Research Challenges*, ACM Comput. Surv. 51(1), S. 1-29, 2018. – DOI 10.1145/3150224

[13] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[14] Kleinschrodt, C. et al.: *Konzeptionelles Design zur softwaregestützten Analyse und Modifikation von Produktdaten*. In: 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT 2018). Digitalisierung und Produktentwicklung: Vernetzte Entwicklungsumgebungen. Bayreuth, pp.156-167. ISBN 978-3-00-059609-4.

[15] Request For Comments (RFC) 959: *File Transfer Protocol* [online]. Oktober 1985. Verfügbar: https://tools.ietf.org/html/rfc959 [Zugriff am 12. Juni 2019]

[16] Request for Comments (RFC) 4250ff. *The Secure Shell (SSH) Protocol Assigned Numbers* [online]. Januar 2006. Verfügbar im Internet: https://www.ietf.org/rfc/rfc4250.txt [Zugriff am 13. Juni 2019].

[17] Request for Comments (RFC) 4217: *Securing FTP with TLS* [online]. Oktober 2005. Verfügbar: https://tools.ietf.org/html/rfc4217 [Zugriff am 13. Juni 2019].

[18] OpenSSH*. Release Notes* [online]. April 2019. Verfügbar*:* https://www.openssh.com/txt/release-8.0 [Zugriff am 13. Juni 2019].

[19] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Sicherheit von Webanwendungen [online]. Maßnahmenkatalog und Best Practices, Bonn: Verfügbar: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Studien/WebSec/WebSec.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff am 13. Juni 2019].

[20] Request for Comments (RFC) 4252: *The Secure Shell (SSH) Authentication Protocol* [online]. Section 7 - Public Key Authentication Method. Verfügbar: https://tools.ietf.org/html/rfc4252#section-7 [Zugriff am 13. Juni 2019].

[21] Adaptive Computing Enterprises, Inc. *TORQUE Resource Manager* [Software]. 2019. Verfügbar: http://www.adaptivecomputing.com/products/torque/ [Zugriff am 13. Juni 2019].

[22] Altair Engineering, Inc. *PBS Professional Open Source Project* [Software]. 2019. Verfügbar: https://www.pbspro.org/ [Zugriff am 13. Juni 2019].

[23] Adaptive Computing Enterprises, Inc.: *Moab HPCX Suite* [Software]. 2019. Verfügbar: http://www.adaptivecomputing.com/products/maui/ [Zugriff am 13. Juni 2019].

[24] Delaruelle, X. et al.: Environment modules [Software]. 2019. Verfügbar: http://modules.sourceforge.net/ [Zugriff am 13. Juni 2019].

[25] Tuncer, O. et al..: *Diagnosing Performance Variations in HPC Applications Using Machine Learning.* In: 32nd International Conference, ISC High Performance 2017. Frankfurt, pp. 355–373. ISBN 978-3-319-58666-3

[26] Django Software Foundation: Django [Software]. 2019. Verfügbar: https://www.djangoproject.com/ [Zugriff am 18. Juni 2019]

Entwicklung einer Beschreibungssprache zur Analyse und Behebung von Datenaustauschproblemen

Johannes Mohr, Claudia Kleinschrodt, Tobias Siegel, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
E-Mail: johannes.mohr@uni-bayreuth.de; Internet: http://www.lscad.de

Inhalt: *Die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Daten ist eine der Grundvoraussetzungen für die Verwirklichung der Vision Industrie 4.0. In der Praxis stellen allerdings die Bereitstellung, der Austausch und die Weiterverarbeitung von Informationen branchenübergreifend immer noch ein großes Problem dar. Um die Vielfalt der auftretenden Anforderungen und Problemstellungen abzudecken, wurde ein Konzept für eine flexibel anpassbare Software entwickelt. Kernbestandteil hierbei sind abänderbare Konfigurationsdateien. Inhalte können durch eine hierfür entwickelte und angepasste Beschreibungssprache ergänzt und so an die individuellen Nutzerbedürfnisse abgestimmt werden. Die konzeptionellen Bestandteile werden im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt und auf ein Minimalbeispiel angewendet. Durch die angestrebte Flexibilität und Erweiterbarkeit sowie die Möglichkeit der Automatisierung kann die Software effektiv in bestehende Prozesse eingebunden werden und dabei helfen Datenaustauschprobleme zu beheben und durchgängige Informationsflüsse sicherzustellen.*
Stichwörter: *Beschreibungssprache, Datenaustausch, Konfigurationsdateien, Softwareentwicklung*

Abstract: *The availability of high-quality data is one of the basic requirements for the realization of the vision Industry 4.0. In practice, however, providing, exchanging and processing information is still a big problem across all sectors. To address the variety of emerging needs and issues, a flexible, customizable software concept has been developed. The core component are flexible and adaptable configuration files. The content can be supplemented by the self-developed description language and adapted to the individual needs. The conceptual components are presented in this article and applied to a minimal example. With the flexibility, extensibility, and automation capabilities, the software can be effectively integrated into existing processes to help resolve data exchange problems and ensure consistent information flows.*
Keywords*: description language, data exchange, configuration files, software development*

1 Motivation

Die Wirtschaft ist bereits seit Jahren von Begriffen wie Industrie 4.0 und Digitalisierung geprägt. Ein zentrales Ziel der Vision Industrie 4.0 ist es, eine intelligente Fabrik („Smart Factory“) zu schaffen, die durch eine Güterproduktion ohne menschliche Interaktion charakterisiert ist. Beispielsweise kann dadurch die Arbeitsvorbereitung parallel zur Produktion durchgeführt werden, wodurch zum Beispiel Ressourcen effizienter eingesetzt, die Produktqualität erhöht und Produktionsausfälle vermieden werden [1].

Bei der Realisierung einer intelligenten Fabrik nimmt vor allem die Digitalisierung der abzubildenden Werkzeuge und Maschinen eine wichtige Rolle ein, da diese zum Beispiel für die virtuelle Produktion und sicherheitsrelevante Simulationen notwendig sind [2]. Um eine intelligente Fabrik zu verwirklichen, ist ein funktionierender Austausch der virtuellen Abbilder von zentraler Bedeutung. Dies ist Grundvoraussetzung für eine fehlerfreie, reibungslose und schnelle Produktion [3].

In der Praxis zeigen sich jedoch Probleme, die einem effizienten Datenaustausch entgegenstehen und zu fehlerhaften Interpretationen führen. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 gezeigt. Zu sehen ist ein dreidimensionales (3D) Modell, das in unterschiedliche CAD-Systeme (Computer Aided Design) importiert wurde. Der Import kann korrekte Ergebnisse liefern, es kann jedoch auch zu Fehlern wie einer Entfärbung oder einer gravierenden Geometrieverfälschung kommen. Um von dem Potential der Digitalisierung zu profitieren, muss der Datenaustausch optimiert werden und durchgängig funktionieren [4].

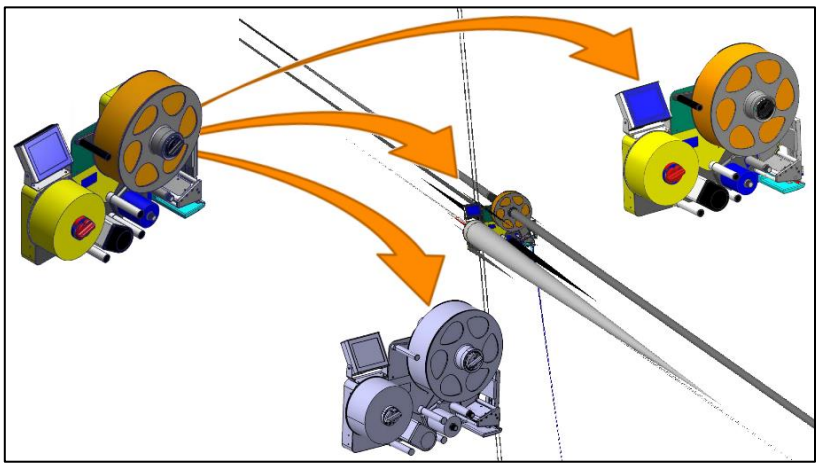


Abbildung 1: Ein korrektes CAD-Modell zeigt zum Teil starke Verfälschungen nach dem Import in verschiedene CAD-Systeme [4]

Um den Problemen beim Austausch von Daten entgegenzuwirken, wurde bereits ein Softwarekonzept entwickelt und teilweise in [5] veröffentlicht. Ziel der konzeptionierten Software ist es, Austauschdateien hinsichtlich eines funktionierenden Datenaustauschs aufzubereiten. Hierbei sind die Funktionen aus den beiden Kernproblemen des ungenügenden Informationsgehalts und der mangelhaften Kompatibilität abzuleiten: Zum einen kann der Inhalt überprüft und optimiert, zum anderen kann die Kompatibilität der Dateien kontrolliert und verbessert werden. Abbildung 2 zeigt einen Überblick über das Softwarekonzept.

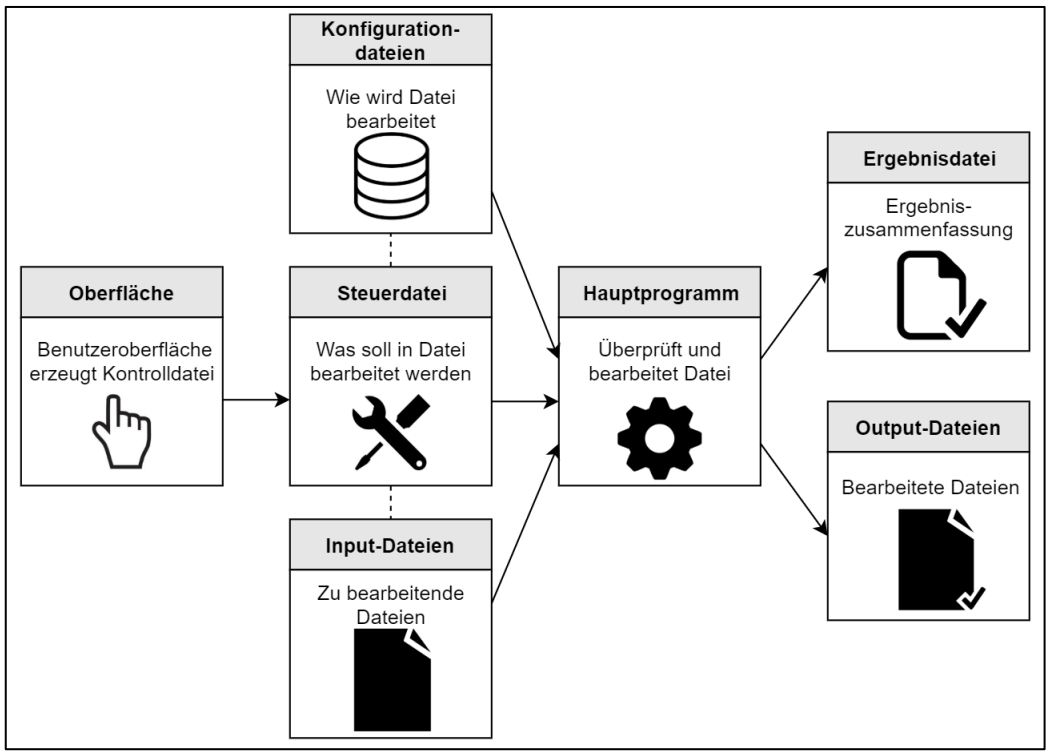


Abbildung 2: Softwarekonzept [5]

2 Konfigurationsdateien als Basis einer Software zur Analyse und Behebung von Datenaustauschproblemen

Es hat sich herausgestellt, dass die flexible Erweiterung des Umfangs, der von der Software abgedeckt wird, ein zentraler Faktor ist, der bei der Umsetzung beachtet werden muss, damit eine weitreichende Verbreitung und der Erfolg des erarbeiteten Konzepts sichergestellt werden. Die Anpassungsfähigkeit hat verschiedene Gründe: Einerseits liegen unterschiedliche Anforderungen verschiedener Branchen vor, die sogar von Unternehmen zu Unternehmen variieren können, andererseits existiert eine Vielzahl an Formaten, die zum

Datenaustausch eingesetzt werden. Um die geforderte Flexibilität zu realisieren, nehmen die Konfigurationsdateien eine Schlüsselposition ein, da in dieser die umfangreichen Informationen hinterlegt werden, die eine effiziente Bearbeitung der Austauschdateien ermöglichen.

Exportierte Austauschdateien werden von einem Hauptprogramm nach dem klassischen EVA-Prinzip (Eingabe/ Verarbeitung/ Ausgabe) bearbeitet und hinsichtlich eines funktionierenden und korrekten Datenaustauschs überprüft und verbessert. Das Programm erhält Befehle über eine Steuerdatei, in der die Pfade der relevanten Konfigurationsdateien, die für die Bearbeitung benötigt werden, die getroffenen Einstellungen sowie die Anweisungen geschrieben stehen. Die Steuerdatei wird durch eine intuitiv bedienbare Oberfläche generiert. Zusätzlich dient die Oberfläche für die Angabe fehlender Werte und die Anzeige der Ergebnisse, die ebenfalls in einer Ergebnisdatei vermerkt werden.

Die Schlüsselwörter, die für die Suche notwendig sind, lassen sich in einer einfachen Weise in Konfigurationsdateien im ASCII-Format (American Standard Code for Information Interchange) hinterlegen. Interpretation und Verarbeitung ist Aufgabe des Hauptprogramms. Dateien im ASCII-Format bietet den großen Vorteil, dass sie mit Hilfe eines beliebigen Texteditors geöffnet, eingesehen und angepasst werden können. Das Hinzufügen von Textdateien und das Erweitern der Ordnerstruktur ermöglicht die geforderte Flexibilität. Als Suchausdrücke werden reguläre Ausdrücke verwendet. Hierbei handelt es sich um Beschreibungen von Mustern, die anhand einer bestimmten Syntax aufgebaut sind und für ein effizientes Suchen und Ersetzen genutzt werden. Näheres hierzu kann [5] entnommen werden.

Abbildung 3 zeigt eine effiziente Ordnerstruktur, wie die benötigten Textdateien gegliedert und an die Bedürfnisse der Aufgabenstellung angepasst werden können.

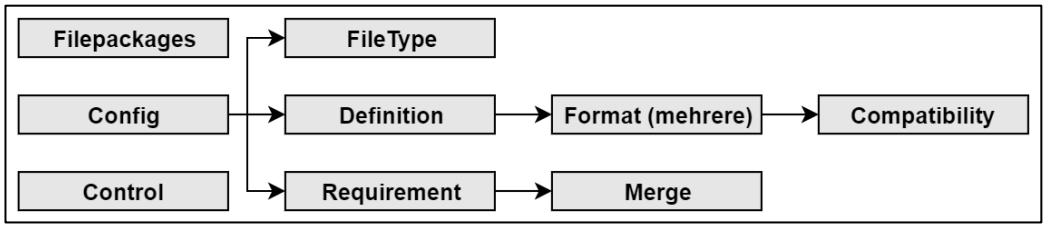


Abbildung 3: Gliederung der benötigten Textdateien

Das Control-Verzeichnis beinhaltet verschiedene Steuerdateien, die die nötigen Informationen für die Steuerung des Hauptprogramms beinhalten. Eine zentrale Funktion einer

Steuerdatei ist es, auf die benötigten Dateien zu referenzieren, die explizit für die abzuarbeitenden Anweisungen benötigt werden. Obwohl für die Programmdurchführung lediglich eine Steuerdatei benötigt wird, können sich mehrere Dateien im Ordner befinden, die für verschiedene Anwendungsfälle verfasst sind.

Ein Austauschmodell kann aus unterschiedlichen Dateien bestehen, die zu einem Dateipaket zusammengefasst werden [6]. Dementsprechend befinden sich im Filepackages-Ordner sämtliche abzuarbeitende Pakete. Im Rahmen eines Batch-Modus können diese automatisiert überprüft und optimiert werden.

Das sich im Config-Ordner befindende Definition-Verzeichnis beinhaltet mehrere formatspezifische Unterordner, in denen Textdateien gespeichert sind, die den abstrakten Aufbau der betrachteten Items beschreiben. Ein Item ist ein Objekt, dass durch die Software kontrolliert und gegebenenfalls angepasst wird. Es handelt sich beispielsweise um, im CAD-System erstellte, geometrische Elemente, wie einen Punkt, ein Koordinatensystem, eine Ebene oder eine Achse. Da sich die Zusammensetzung dieser Items zwischen mehreren CAD-Systemen unterscheiden kann, wird pro System und Version eine eigene Datei vorgesehen. Die Angaben werden benötigt, um die Objekte in den zu kontrollierenden Dateipaketen im Rahmen der inhaltlichen oder kompatibilitätsbezogenen Überprüfung und Optimierung zu finden. Definitionen für die Kompatibilitätsoptimierung werden in den Dateien des Compatibility-Verzeichnisses spezifiziert.

Im Requirement-Verzeichnis befinden sich Textdateien, die normspezifische Anforderungen, wie Benennung oder Werte für die Eigenschaften verschiedener Items beinhalten.

Eine Dateioptimierung kann dateiübergreifend erfolgen, da sich die Informationen innerhalb eines Dateipakets gegenseitig ergänzen können. Dateiübergreifende Informationen müssen nicht explizit in mehreren Dateien gleich abgebildet sein. Jedoch ist es möglich, die benötigten Informationen aus einer anderen Datei des Pakets implizit zu ermitteln [7]. Die Zusammenhänge werden in einer Merge-Datei konkretisiert.

Das FileType-Verzeichnis beinhaltet allgemeingültige Textdateien. Die abgebildeten Informationen beziehen sich auf mehrere Textdateien. Beispielsweise werden Verweise beziehungsweise Shortcuts für Suchbegriffe definiert, die in den Konfigurationsdateien genutzt werden können, um die Lesbarkeit zu erhöhen.

3 Beschreibungssprache für die Textdateien

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der abzubildenden Informationen ist die Entwicklung einer verständlichen Beschreibungssprache, auf der die Textdateien beruhen, von grundlegender Bedeutung. Um die Syntax auf die Bedürfnisse des Nutzers und den speziellen Anwendungsrahmen abzustimmen und um eine durchgängige Verwendung der Software sicherzustellen, basieren die Textdateien auf einem eigens entwickelten Format.

Zur Trennung allgemeiner und beschreibender Informationen, erfolgt eine Aufteilung der Textdatei in Sektionen. Die Sektion, die die allgemeinen Daten beinhaltet, beginnt mit dem Schlüsselwort `HEAD` und endet mit `END_HEAD`. Die Sektion der beschreibenden Daten, wie zum Beispiel der Aufbau eines Items, erfolgt in der DATA-Sektion. Der Beginn der Sektion ist mit `DATA` gekennzeichnet und das Ende mit dem Begriff `END_DATA`. Der Aufbau einer Datei ist in Abbildung 4 dargestellt.

```
HEAD;
      ...
END_HEAD;
DATA;
      ...
END_DATA;
```

Abbildung 4: HEAD- und DATA-Sektion

Zudem ist es zweckmäßig, Definitionen und Anweisungen (Funktionen) zu unterscheiden. Definitionen bestehen aus Zuweisungen, die mit einem Gleichheitszeichen gekennzeichnet werden und sich in verschiedenen Textdateien wiederfinden. Thematisch zusammenhängende Definitionen, wie beispielsweise verwandte Einstellungen oder Abhängigkeiten, werden in einem Definitionsblock gebündelt. Um die Eindeutigkeit zu gewährleisten, müssen vor jedem Block zunächst die Kategorie und ein frei wählbarer Name angegeben werden, der innerhalb der Dateien als Referenz herangezogen wird. Dagegen ist eine Funktion zum Beispiel das Überprüfen einer Datei hinsichtlich des Vorhandenseins eines bestimmten Items. Der Funktionsaufbau orientiert sich an den Komponenten Inhalt, Kompatibilität, Überprüfen und Optimieren [5]. Zuweisungen eines Definitionsblocks stehen innerhalb von geschweiften Klammern und die Parameter einer Funktion sind von runden Klammern umschlossen. Ein Beispiel eines Definitionsblocks und einer Funktion in einer Steuerdatei kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Definitionsblock und Funktion in einer Steuerdatei

	Definitionsblock	Funktion

Beispiel	`dependency FILE_1{`
	`  ...`
	`}`
		`content check FILE_1 (...);`

Erklärung	Ein dependency-Definitionsblock enthält die Dateipfade der Dateien, die für die Anweisungen in der entsprechenden Steuerdatei benötigt werden. Es werden die Pfade angegeben, die für die Bearbeitung der mit FILE_1 bezeichneten Datei relevant sind. Ein dependency-Block steht in der HEAD-Sektion einer Steuerdatei.	Der erste Begriff definiert, ob es sich bei der Funktion um eine Komponente bezüglich des Informationsgehalts („content“) oder der Kompatibilität („compatibility“) handelt. Der zweite Begriff definiert, ob sich die Funktion auf die Komponente Überprüfen („check“) oder Optimieren („improve“) bezieht. Danach folgt der Referenzname der Datei, auf die sich der Befehl bezieht. In Klammern wird das zu prüfende Item angegeben. Eine Funktion steht in der DATA-Sektion einer Steuerdatei.

Besonderheiten ergeben sich bei der Beschreibung von Items. Die angegebenen Daten stellen abstrakte Suchausdrücke dar, die vom Hauptprogramm benötigt werden, um entsprechende Items zu finden. Das Hinterlegen dieser Daten muss allgemeingültig erfolgen, um für unterschiedliche Anwendungsfälle genutzt werden zu können. Die abstrakte Angabe von Informationen kann durch die Verwendung von Operationen realisiert werden. Damit diese im Hauptprogramm vom Rest der Zuweisung getrennt werden können, muss eine eindeutige Trennung erfolgen (im Beispiel durch die Umschließung mit |).

Tabelle 2 zeigt einen Punkt wie er in einer AP (Anwendungsprotokoll) 214 konformen STEP-Datei (Standard for the Exchange of Product Model Data), die aus Creo Parametric 4.0 exportiert wurde, definiert ist. Zusätzlich ist die abstrahierte Darstellung, wie der Punkt hinterlegt werden muss, abgebildet.

Tabelle 2: Gegenüberstellung eines Punktes aus einer AP 214 konformen STEP-Datei und der abstrahierten Darstellung

In STEP-Datei:	`#44=CARTESIAN_POINT('CRP',(0.E0,0.E0,0.E0));`
Abstrahiert:	`|ref1~ENTITYNUMBER|=CARTESIAN_POINT(|name=NAME|,(|NUMBER|,` `|NUMBER|,|NUMBER|));`

Eine Operation aus dem Beispiel in Tabelle 2 ist die Zuweisung von Eigenschaften, wie `name=NAME`. Um ein entsprechendes Item zu suchen, wird zunächst der Shortcut für `NAME`

an die entsprechende Position gesetzt. Der gefundene Ausdruck wird im Anschluss der Eigenschaft `name` zugewiesen, um diese mit den angegebenen Werten, die das Item erfüllen muss, zu vergleichen. Falls nur ein Suchausdruck ohne Zuweisung verwendet werden soll, wird lediglich der Shortcut angegeben (zum Beispiel `|NUMBER|`).

Eine weitere abgebildete Operation ist eine Referenzangabe (`ref1~ENTITYNUMBER`). Diese sind bei komplexeren Items notwendig, die Verknüpfungen enthalten. Die Zeichenkette `ref1` kann im Anschluss genutzt werden, um auf die gefundene Entitätsnummer zu referenzieren.

Generell werden, wie in anderen Sprachdefinitionen auch, Keywords genutzt, die fest vorgegeben sind. Folgende Begriffe sind als Keyword reserviert: Sektionskennzeichner (zum Beispiel `HEAD`); Kategorie eines Definitionsblocks (zum Beispiel `dependency`); Zuweisungen innerhalb von Definitionsblöcken (zum Beispiel `regex`); modulspezifizierende Kennzeichnung einer Funktion (zum Beispiel `content`).

Abgesehen von den genannten Aspekten, sind hilfegebende Komponenten im Format integriert. So ist es möglich, Kommentare in eine Textdatei einzufügen, die vom Hauptprogramm nicht interpretiert werden. Für die Abgrenzung des Kommentars von den eigentlichen Informationen wird die Zeichenfolge „//“ für die Einleitung verwendet. Ein mehrzeiliger Kommentar beginnt mit der Zeichenkette „/*“ und endet mit „*/“. Die Verwendung ist in Abbildung 5 verdeutlicht.

Die Korrektheit und Vollständigkeit der angegebenen Daten werden durch Prüfroutinen sichergestellt, wodurch beispielsweise Fehlern in der Rechtschreibung vorgebeugt wird.

Um die Lesbarkeit weiter zu erhöhen, wird mit einer Syntaxhervorhebung gearbeitet. Sie dient dazu, den geschriebenen Text hinsichtlich der Bedeutung zu kennzeichnen, indem der Text unterschiedlich formatiert wird. Das Prinzip ist in Abbildung 5 verdeutlicht.

```
HEAD;
      //Einzeiliger Kommentar
END_HEAD;
DATA;
      /*Mehrzeiliger
        Kommentar*/
END_DATA;
```

Abbildung 5: Hilfegebende Elemente - Kommentare und Syntaxhervorhebung

4 Beispiel – Überprüfung eines Koordinatensystems

Die exemplarische Anwendung der Beschreibungssprache wird anhand einer Inhaltsüberprüfung erläutert. Es soll kontrolliert werden, ob ein benanntes Koordinatensystem (PCS) in einer STEP-Austauschdatei vorliegt [8]. Da im dargestellten Beispiel keine Kompatibilität verbessert und keine dateiübergreifende Optimierung durchgeführt wird, sind das Merge- und das Compatibility-Verzeichnis hier nicht von Relevanz. Abbildung 6 zeigt die für dieses Beispiel benötigten Verzeichnisse und eine Erklärung des jeweiligen Inhalts.

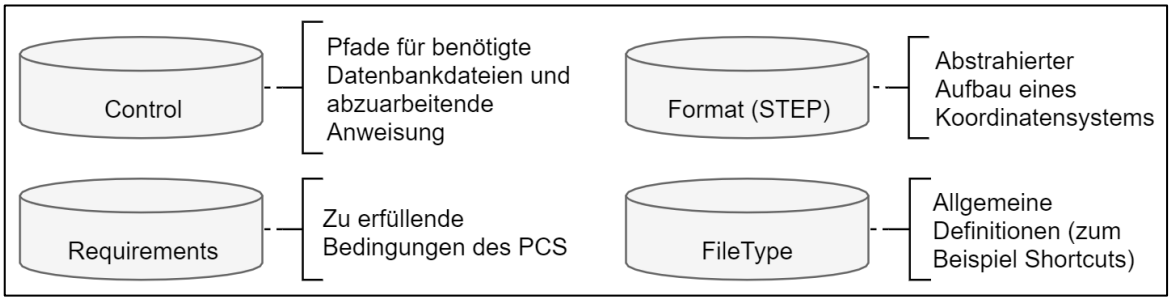


Abbildung 6: Relevante Verzeichnisse für die Inhaltsüberprüfung eines Koordinatensystems

Von zentraler Bedeutung ist die Steuerdatei. In dem Definitionsblock der HEAD-Sektion befinden sich sämtliche relevante Dateipfade, die für die Bearbeitung benötigt werden. Genauer erfolgt die Pfadangabe für das Dateipaket, welches die STEP-Datei beinhaltet (`filePackages`), gefolgt von dem Pfad zu der Datei, die die Bezeichner beschreibt (`fileTypeDefinition`). Anschließend ist der Pfad für die Werte der Eigenschaften vermerkt, die das Koordinatensystem PCS erfüllen muss (`requirement`). Zuletzt ist der Verweis auf die Datei angegeben, die den abstrakten Aufbau eines Koordinatensystems definiert (`sourceSystem`). Die Anweisung (`content check STEP (PCS)`) kann der DATA-Sektion entnommen werden. Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Steuerdatei.

```
HEAD;
 dependency STEP{
    filePackages = "...",
    fileTypeDefinition = ...",
    requirement = "...",
    sourceSystem = "..."
  };
END_HEAD;
DATA;
  content check STEP (PCS);
END_DATA;
```

Abbildung 7: Abhängigkeiten und Anweisung in der Steuerdatei im Control-Ordner

Die Zeichenkette `PCS` in der Anweisung ist der Referenzname, der auf einen Eintrag in der zugehörigen Requirement-Datei verweist, auf die in der HEAD-Sektion verlinkt wurde. Der in Bezug genommene Definitionsblock ist in der Abbildung 8 dargestellt. Er enthält die benötigten Bedingungen für das Koordinatensystem. Die erste Bedingung (`condition[1]`) besagt, dass die Eigenschaft `name` der Zeichenkette `PCS` entspricht. Eigenschaften werden mit einem Punkt getrennt an den Itembezeichnung angehängt (zum Beispiel `PCS.name`). Diese Art des Zugriffs orientiert sich ebenfalls an etablierten Programmiersprachen. Es können weitere Eigenschaften hinzugefügt werden, wie bestimmte Werte, die die Koordinaten des Ursprungs des Koordinatensystems erfüllen müssen.

```
item PCS {
    itemType = coordinate_system,
    condition[1] = (PCS.name == "PCS")
};
```

Abbildung 8: Angabe der Eigenschaften in der Datei im Requirement-Ordner

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass der Typ des Items einem Koordinatensystem (`coordinate_system`) entspricht. Die abstrahierte Itemdefinition ist im Format-Verzeichnis hinterlegt und in Abbildung 9 aufgezeigt.

```
itemDefinition coordinate_system{
    data[1] = "|ref1~ENTITYNUMBER|=CARTESIAN_POINT(|NAME|,(|NUMBER|,
               |NUMBER|,|NUMBER|));",
    data[2] = "|ref2~ENTITYNUMBER|=DIRECTION(|NAME|,(|NUMBER|,|NUMBER|,
               |NUMBER|));",
    data[3] = "|ref3~ENTITYNUMBER|=DIRECTION(|NAME|,(|NUMBER|,|NUMBER|,
               |NUMBER|));",
    data[4] = "|ENTITYNUMBER|AXIS2_PLACEMENT_3D(|name=NAME|,|~ref1|,|~ref2|,
               |~ref3|);"
};
```

Abbildung 9: Abstrahierte Itemangabe in der Datei im Format-Ordner

Der Ausdruck für den Shortcut `NAME`, der in der STEP-Datei gefunden wird, wird der Eigenschaft `name` zugewiesen. Da unter Umständen mehrere Koordinatensysteme gefunden werden, müssen die Eigenschaften mit den angegebenen Werten im Requirement-Ordner (siehe Abbildung 8) verglichen werden.

Bei den Bezeichnern `ENTITYNUMBER`, `NAME` sowie `NUMBER` in Abbildung 9 handelt es sich um Shortcuts für reguläre Ausdrücke, die in der entsprechenden Datei im FileType-

Verzeichnis definiert sind. Ein Beispiel eines regulären Ausdrucks zum Finden einer Nummer ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

```
regexShortcut NUMBER{
    regex = "([+\-]?(?:0|[1-9]\d*)(?:\.\d*)?(?:[eE][+\-]?\d+)?)"
};
```

Abbildung 10: Angabe eines Shortcuts für einen regulären Ausdruck zum Finden einer Nummer in der Datei im FileType-Ordner

Die folgenden Begriffe im dargestellten Beispiel sind reservierte Keywords: Sektionskennzeichner (`HEAD, END_HEAD, DATA, END_DATA`); Kategorie eines Definitionsblocks (`dependency, itemDefinition, regexShortcut, item`); Zuweisungen innerhalb von Definitionsblöcken (`filePackages, fileTypeDefinition, requirement, sourceSystem, data, regex, itemType, condition`); Modulspezifizierende Kennzeichnung einer Funktion (`content, check`).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es existieren bereits Ansätze, um Problemen, die beim Datenaustausch entstehen, mithilfe einer Software entgegenzuwirken. Exportierte Austauschdateien werden durch die Anwendung aufbereitet. Ein zentrales Element nehmen die flexibel erweiterbaren Konfigurationsdateien ein.

Eine mögliche Variante einer Ordnerstruktur der benötigten Dateien ist dargestellt. Die sich darin befindenden Textdateien basieren auf einer Beschreibungssprache, die auf die jeweiligen Bedürfnisse des Anwendungsgebiets abgestimmt ist. In den Dateien erfolgt eine eindeutige Unterteilung in Definitionen, die im Wesentlichen aus Zuweisungen bestehen und Anweisungen an das Hauptprogramm. Um eine abstrahierte und allgemeingültige Darstellung der Items zu ermöglichen, werden verschiedene Operationen wie Zuweisungen oder Referenzen genutzt. Damit das Hauptprogramm die Inhalte aus den Textdateien interpretieren kann, sind Keywords notwendig, an denen sich das Programm orientiert. Abgesehen von den genannten Aspekten werden hilfegebende Elemente bereitgestellt, die über den reinen Inhalt hinausgehen und das Verständnis erhöhen. Dazu zählt unter anderem die Möglichkeit, Kommentare in den Text einzufügen. Die Lesbarkeit wird durch eine Syntaxhervorhebung verbessert.

Da in Zukunft die Nachfrage an qualitativ hochwertigen Daten weiter steigen wird, ist es unerlässlich, Lösungsstrategien für die aktuell herrschenden Probleme zu entwickeln. Einen Beitrag hierzu liefert das EFRE-geförderte (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) Projekt ViWAT (Virtueller Werkzeugdaten Austausch Transformator), in dessen Rahmen die gezeigten Ergebnisse entstanden [9].

6 Literaturverzeichnis

[1] ROTH, Armin: Industrie 4.0 - Hype oder Revolution? In: ROTH, Armin (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0* : *Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. o. A. Berlin Heidelberg : Springer, 2016, S. 1–15

[2] FRICK, Walter: *Virtuelle Ebenbild: Der digitale Zwilling*. URL https://www.cimsource.com/cocodeal/downloads.html – Überprüfungsdatum 2019-06-26

[3] KLEINSCHRODT, Claudia ; RIEG, Frank: *Industrie 4.0* : *Scheitert die vierte industrielle Revolution am Datenaustausch?* In: *Werkzeug Technik* 10 (2016), Nr. 156, S. 143–145

[4] KLEINSCHRODT, Claudia ; HACKENSCHMIDT, Reinhard ; RIEG, Frank: *Digitale Werkzeuge für die Digitale Fabrik* (VDMA Forum 4.0 auf der EMO 2017). Hannover, 19.09.2017

[5] KLEINSCHRODT, Claudia ; MOHR, Johannes ; ZIMMERMANN, Markus ; RIEG, Frank: Konzeptionelles Design zur softwaregestützten Analyse und Modifikation von Produktdaten, Bd. 16. In: BRÖKEL, Klaus; NAGARAJAH, Arun; RIEG, Frank; SCHARR, Gerhard; STELZER, Ralpf (Hrsg.): *Digitalisierung und Produktentwicklung*. o. A. Bayreuth : Universität Bayreuth, 2018, S. 156–167

[6] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKZEUGE UND SPANNZEUGE: *DIN 26100* : *Container-Datei - Zusammenfassung verschiedener Produktdateien für den Datenaustausch*. o. A. Berlin : DIN, 2017

[7] KLEINSCHRODT, Claudia ; RIEG, Frank: *Normalisation of STEP files for improving the data compatibility of transferred tool models*. In: *Technical Gazette* 5 (2017), Nr. 24, S. 201–205

[8] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKZEUGE UND SPANNZEUGE: *DIN 4003-81* : *Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf Grundlage von Merkmalen nach DIN 4000 - Teil 81: Bohr- und Senkwerkzeuge mit nicht lösbaren Schneiden*. o. A. Berlin : DIN, 2017

[9] LSCAD: *ViWAT* : *Virtueller Werkzeugdaten Austausch Transformator*. URL www.viwat.lscad.de – Überprüfungsdatum 2019-07-11

17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

KT-KOLLOQUIUM

Graphenbasierter Ansatz zur Integration von Customer Feedback in den Produktentwicklungsprozess

Franz Wieck, Manuel Löwer, Tim Katzwinkel*, David Kessing

Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität, Bergische Universität Wuppertal
Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal
E-Mail: wieck@uni-wuppertal.de; Internet: http://www.fgproq.uni-wuppertal.de

*Institut für Produkt-Innovationen
Bahnhofstr. 15, 42651 Solingen
E-Mail: katzwinkel@uni-wuppertal.de; Internet: http://www.ipi.uni-wuppertal.de

Inhalt: *Agile Entwicklungsmethoden gewinnen zunehmend an Bedeutung. Ein Kernaspekt dieser Entwicklung ist die aktive Einbindung von Kundenfeedback in den Produktentwicklungsprozess. Insbesondere im Hinblick auf die fortschreitende Digitalisierung sind Tools notwendig, um dieser Entwicklung gerecht werden zu können. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen KI gestützten, graphenbasierten Ansatz zur Integration von Online-Kundenbewertungen von Endverbrauchern in den Produktentwicklungsprozess anhand einer Verknüpfung mit der Produktstruktur. Statt aufwendiger anonymer Kundenbefragungen mit limitierter Teilnehmeranzahl kann hierdurch eine große Menge an Rezensionen automatisch analysiert, verknüpft und visualisiert werden.*

Stichwörter: *Digitale Informationstransparenz, Big Data, Downstream Kundeninteraktion, graphenbasierte KI*

Integrating customer feedback into the product development process with a graph-based approach

Abstract: *Agile development methods are becoming increasingly important. A core aspect of this development is the active integration of customer feedback into the product development process. Especially in view of the advancing digitalization, tools are necessary to be able to cope with this development. This paper describes an AI-supported, graph-based approach for the integration of customer evaluations into the product development process. By linking the product structure to processed reviews from an onlineshop, a large number of reviews can be automatically analyzed, linked and visualized to fuel the product development process.*

Keywords: Digital Intelligence, Customer Integration, Big Data, Graph-based AI

1 Einleitung

Agile Entwicklungsmethoden beinhalten im Gegensatz zu klassischen Produktentwicklungsprozessen einen iterativen, über den gesamten Prozess hinweg durchgeführten, Abgleich des Entwicklungsstatus mit dem Kunden [1, p. 38]. Dieses Feedback wird genutzt, um den Entwicklungsprozess und die zu entwickelnde Produktarchitektur flexibel auf die relevanten Kundenbedürfnisse anzupassen. Übergeordnetes Ziel ist dabei die zeitliche Straffung des Entwicklungsprozesses (kürzere time-to-market) sowie eine möglichst präzise Erfüllung der Kundenwünsche[1, p. 2]. Besonders für innovative Produkte und neuartige Technologien kann dieser zusätzliche Informationsgewinn erfolgsentscheidend für die spätere Kunden- bzw. Marktakzeptanz sein. Während sich bei der agilen Entwicklung eines einzelnen Produkts das Kundenfeedback meist auf ausgewählte Key-User und Expertenkreise beschränkt, bietet sich bei der Entwicklung von Produktfamilien oder Produktgenerationen auch die Einbeziehung von Kundenfeedback aus vorangegangenen Marktphasen an. Im Zuge der Digitalisierung der Gesellschaft sowie dem massiven Ausbau des Online-Handels in den letzten Jahren stehen heute sehr große Datensätze mit individuellen Kundenreviews und Nutzerfeedback zur Verfügung. Um das Potential dieser Informationen nutzen zu können, werden Werkzeuge und Methoden zur Integration des Kundenfeedbacks in den Produktentwicklungsprozess benötigt.

2 Kundenfeedback im Kontext des Produktentwicklungsprozesses

In den Unternehmensbereichen Marketing und Service ist Kundenfeedback seit vielen Jahren ein zentrales Thema. Dabei geht es nicht nur um die Messung des Erfüllungsgrads spezifischer Kundenwünsche und Erwartungen, aufgrund der digitalen Bewertungsportale im Internet trägt die Kundenzufriedenheit heutzutage auch flächenwirksam zur Neukundengewinnung bei und hat somit einen multiplikatorischen Einfluss auf die Marktakzeptanz des Produkts [2, p. 106]. Während die analoge, anonymisierte Kundenbefragung immer mehr an Bedeutung verliert, werden die Auswertung digitaler Informationen und die aktive Einbindung der verfügbaren Datenströme in die Geschäftsprozesse zu immer zentraleren Themen [2, p. 121]. Nach Thun ist die Ermittlung des Kundenfeedback hierbei oft noch auf die sogenannten Transaktionszeitpunkte (z.B. Kaufzeitpunkt, Inanspruchnahme eines Ser-

vice, Reklamation) beschränkt, woraus sich eine zeitgesteuerte Art der Datenerhebung ableitet [2, p. 108]. Während die oben benannten Unternehmensbereiche die Kundeneinbindung seit jeher im Blick haben, rückt der Kunde und sein Feedback mit der Adaption der agilen Entwicklungsmethoden auch verstärkt in den Fokus der Produktentwicklung.

Nach Brockhoff kann die Integration von Kundenfeedback im Produktentwicklungsprozess zu kundendominierten („vom Kunden“), herstellerdominierten („für den Kunden“) oder kooperativen Innovationsprozessen bzw. Produktinnovationen führen[3, p. 110]. Im Kontext der Produktentwicklung kategorisiert Schulte den Zeitpunkt der Einbindung von Kundenfeedback anhand des Bezugszeitpunkts des Produktionsstarts zusätzlich in die prospektive und retrospektive Akquisition [3, p. 98]. Im Gegensatz zum direkten Produktbezug (sog. Mikrointegration) beeinflusst die retrospektive Akquisition von Kundenfeedback demnach den Produktentwicklungsprozess von Produktfamilien und Produktgenerationen (sog. Makrointegration) [3, p. 99]. Piller zufolge kann die Rolle des Kunden oder der Kundengruppe im Entwicklungsprozess weiterhin einem Spektrum zwischen rein passiver (z.B. klassische Marktforschungsmethoden) und proaktiver Integration (sog. customer co-creation) unterschieden werden [4, p. 8f]. An dieser Stelle muss ergänzt werden, dass die Kundenintegration selbstverständlich ebenfalls vom spezifischen Wissensstand (z.B. Produktwissen, Prozesswissen etc.) abhängt und der Einzelkunde hierdurch die Rollen eines Bedürfnisträgers, eines Wissensträgers oder sogar eines Innovators einnehmen kann [3, p. 112].

2.1 Der Online-Handel als Quelle für Kundenfeedback

Im Rahmen dieses Beitrags wird speziell der Bereich der retrospektiven, passiven Makrointegration von Kundenfeedback im Kontext der voranschreitenden Digitalisierung der Gesellschaft betrachtet. In diesem Zusammenhang stellen insbesondere der Handel in Online-Shops sowie der Einfluss von social media eine Herausforderung dar. Laut dem aktuellen Statista-Dossier zum Online-Handel in Deutschland konnte im Jahr 2018 ein Gesamtumsatz von 53,3 Milliarden Euro im Onlinehandel verzeichnet werden [5, p. 8]. Dies entspricht einem Gesamtanteil am Einzelhandelsumsatz von über 13% [5, p. 13]. Dabei gaben 31% der befragten Internetnutzer zwischen 18 und 64 Jahren an, mindestens einmal im Monat online einzukaufen [5, p. 17]. Der umsatzstärkste Online-Shop in Deutschland ist demnach derzeit der Händler amazon.de mit einem Jahresumsatz von knapp 9

Milliarden Euro, gefolgt von otto.de mit einem Umsatz von knapp 3 Milliarden Euro [5, p. 21]. Die umsatzstärksten Artikel sind derzeit Bekleidung, Elektronikartikel und Kommunikation, Computer und -zubehör sowie Haushaltswaren und -geräte [5, p. 30]. Für das Jahr 2019 werden 74,3 Millionen E-Commerce-Nutzer in Deutschland prognostiziert [5, p. 39]. Anhand dieser Statistiken wird deutlich, dass die Integration von Kundenfeedback aus dem Bereich des Online-Handels ein enormes Potential für die Produktentwicklung bedeutet, da dieser Vertriebsweg in der heutigen Zeit stark genutzt wird.

Internet-Plattformen von Online-Händlern wie Amazon.de bieten Kunden die Möglichkeit, nach dem Kauf eines Produktes eine eigene Rezension zu formulieren und eine Bewertung (z.B. durch Vergabe von Sternen) vorzunehmen. Tandon et al. zeigten, dass man dieses Kundenfeedback für die KI-gestützte Informationsgewinnung im Produktmanagement nutzen kann [6, p. 118]. Dabei konnten aus einer großen Anzahl Einzelrezensionen mit Hilfe von intelligenten Textmining-Algorithmen und einer Sentimentanalyse Rückschlüsse auf die Kundenwahrnehmung dezidierter Produktmerkmale für den Zweck einer marketingorientierten Marktanalyse geschlossen werden [6, p. 116f]. Nach Thun besteht die Zukunft des Kundenzufriedenheitsmanagements gerade in solchen datenzentrierten, digitalen Ansätzen [2, p. 121]. Schweitzer et al. unterstreichen darüber hinaus das Unterstützungspotential von Kundenfeedback für die Innovationsfähigkeit von F&E Teams sowie ein feedback-basiertes Potential zur Wertsteigerung von radikalen Neuentwicklungen im Bereich der Produktentwicklung [7, p. 14].

2.2 Handlungsbedarf

Trotz der, in den vorherigen Kapiteln dargelegten, großen Potentiale der Integration von Kundenfeedback in den Entwicklungsprozess, insbesondere vor dem Hintergrund der sich in jüngster Zeit durchsetzenden agilen Entwicklungsmethoden und der angespochenen technologischen Möglichkeiten in Zeiten massiven Online-Handels mangelt es dem Produktentwickler derzeit an soliden Methoden und Werkzeugen zur praktikablen Umsetzung einer derartigen Feedbackintegraion in den aktiven Entwicklungsprozess. In diesem Beitrag wird daher nachfolgend ein Ansatz vorgeschlagen, mit dem eine KI-unterstützte Auswertung großer Mengen an Kundenfeedback aus einer Online-Plattform semantisch mit der Produktstruktur eines weiterzuentwickelnden Produkts im Sinne einer Produktgenerationsentwicklung zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses genutzt werden kann.

3 Verknüpfung von Kundenfeedback und Produktstruktur – ein graphenbasierter Ansatz

Nach Ansicht der Autoren lassen sich aus den angesprochenen Kundenrezensionen von Online-Plattformen wichtige Informationen für die Produktentwicklung gewinnen (unvollständige Aufzählung):

a) Felddaten aus dem User-Cycle (IST-Aufnahme)
Wie verhält sich das Produkt in der realen Nutzungsphase aus Sicht des Kunden? Lassen sich die positiven/negativen Erfahrungen auf konkrete Strukturelemente zurückführen? Entsprechen die Realerfahrungen den Konstruktionsabsichten?

b) Informationsquellen für Anforderungen aus Nutzersicht (SOLL-Aufnahme)
Welche Anforderungen stellt der reale Anwender an das Produkt? Können die Anforderungen auf bestimmte Bestandteile der Produktstruktur zurückgeführt werden? Entsprechen die Anforderungen den Annahmen der Produktplanungsphase?

c) Extraktion konkreter Verbesserungsvorschläge (Innovationspotenzial)
Welche Lösungsvorschläge / Innovationsideen äußern die Anwender? Gibt es konkrete Lösungsvorschläge für einzelne Strukturelemente der Produktarchitektur?

Zur Einbindung des Kundenfeedbacks in den Produktentwicklungsprozess (PEP) stellt sich dabei zum einen die Frage, in welche Phasen des PEP Kundenfeedback sinnvoll implementiert werden kann. Zum anderen muss geklärt werden, wie die zusätzlichen Informationen anforderungsgerecht mit dem prozessbegleitenden Datenmodell des PEP verknüpft werden können.

Im vorliegenden Beitrag wird eine retrospektive, passive Makrointegration von Kundenfeedback im Kontext einer Produktgenerationenentwicklung betrachtet. Es wird daher ein bereits vorhandenes Datenmodell der Produktstruktur angenommen. In Bezug auf den Produktentwicklungsprozess gibt es prinzipiell mehrere Entwicklungsphasen, die von der Integration des Kundenfeedbacks profitieren. Für die konkrete Phasenzuordnung ist dabei der Inhalt des spezifischen Feedbacks entscheidend. Da das Kundenfeedback auf ein konkretes, im Markt befindliches Produkt bezogen ist, liegt zunächst ein direkter Bezug zu den finalen, marktvorbereitenden Phasen des PEP nahe. Beispiele hierfür sind etwa in der Bewertung einer Material- oder Oberflächengüte, der Produktmontage oder dem Inhalt der

Produktdokumentation zu finden. Darüber hinaus werden aber auch die Produktfunktionalitäten sowie deren konstruktive Umsetzung in Kundenfeedbacks thematisiert. Als Beispiele können hier etwa die Leistungsfähigkeit eines Produkts (z.B. tatsächliche maximale Schnitthöhe eines Rasenmähers) und seine Robustheit (z.B. Verformungsgrad des Schneidblatts eines Rasenmähers bei Steinschlag) genannt werden. Derart gestaltetes Kundenfeedback betrifft die Phasen der Konzeptkonstruktion und Gestaltung (z.B. Werkstoffwahl, Geometriedefinition). Schließlich gibt es Kundenfeedback, bei dem die frühen Phasen der PEP angesprochen werden (z.B. die Konzeptentwicklung). Hierbei werden die grundsätzlichen Lösungsprinzipien infrage gestellt (z.B. Magnetverschluss anstatt Riemenschnalle als Verschlussmechanismus bei einer Laptoptasche) oder zusätzliche Funktionalitäten eingefordert (z.B. Wasserdichtheit eines Smartphones). Dabei ist der Grad der möglichen Design-Beeinflussung durch das Kundenfeedback umgekehrt proportional zum zeitlichen Verlauf des PEP. Sind konkrete Mängel oder Verbesserungsvorschläge mit Bezug zur Fertigung und Montage unmittelbar umsetzbar (z.B. Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Bauteilproduktion und Endmontage), so können Gestaltungskonzepte in der Entwicklung der nachfolgenden Produktgeneration direkt überarbeitet werden. Die nachstehende Abbildung visualisiert die Einflussmöglichkeiten von Nutzerfeedback auf den PEP.

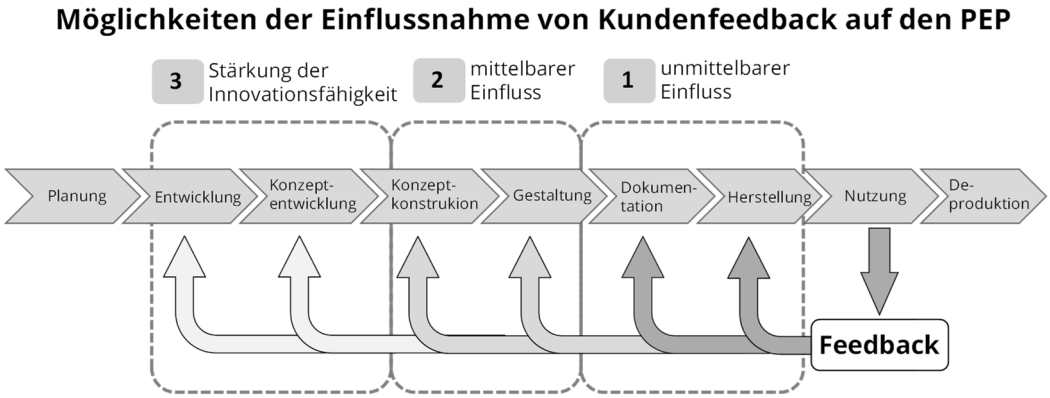


Abbildung 1: Einflussmöglichkeit von Nutzerfeedback im PEP

Die automatisierte Rückführung von Kundenfeedback aus dem Online-Handel bietet hierbei die besondere Gelegenheit, Rückmeldungen von Käufern zu verarbeiten, welche bislang nicht am Produktentwicklungsprozess beteiligt waren. Im Gegensatz zu sogenannten Key-Usern oder Anwendern als Stakeholder im Entwicklungsprozess helfen diese bis-

lang wenig oder nicht beachteten, realen Use-Cases bei der Zielausrichtung in der Produktentwicklung. Darüber hinaus bieten solche Rezensionen die Möglichkeit, den Produktlebenszyklus sowie die Lebensdauer des Produkts bzw. einzelner Bestandteile unter Realbedingungen zu ermitteln. Ebenso kann durch Stimmungsanalyse eine Wechselbereitschaft von einer bestehenden zu einer zukünftigen Produktreihe, wie etwa ein Wechsel von einem Konkurrenzprodukt zur eigenen Produktserie, durch intelligente Auswertung der Kundenrezensionen eruiert werden.

Zur methodischen Integration von Kundenfeedback in den PEP wird im Rahmen der hier vorgestellten Methode die Graphendarstellung verwendet. Im Folgenden wird ein methodischer Rahmen beschrieben, mit dem das angesprochene Feedback für die Produktentwicklung nutzbar gemacht werden kann.

Ausgehend von der Stückliste eines vorhandenen Produktes wird zunächst ein Sub-Graph erzeugt, der die Produktstruktur wiedergibt. Die Überführung der Listendarstellung in eine Graphendarstellung bietet dabei die Möglichkeit der besseren Visualisierung von Abhängigkeiten und der Analyse der Topologie der Struktur. Park und Kremer [2019] nutzen Graphen darüber hinaus auch, um Aussagen über die Entwicklung von Produktfamilien und deren Strukturen zu treffen und die Robustheit und Komplexität von Produktarchitekturen zu evaluieren. Im Rahmen dieses Beitrags steht jedoch die Verknüpfung von Produktstruktur und Kundenfeedback im Vordergrund. Die Repräsentation der Strukturstücklist durch einen Sub-Graphen wird daher anschließend mit der Sub-Graphen Darstellung der Kundenreviews verknüpft. Hierzu bedarf es der Überführung der in Fließtext vorliegenden Rezensionen in eine Graphendarstellung.

Die einzelnen Teilschritte zur Graphendarstellung textbasierter Reviews werden im Folgenden kurz schematisch beschrieben. Dabei basieren die Einzelschritte zunächst auf der Anwendung verfügbarer Web- und Analysetechnologie, die anschließend zu einer methodischen Verknüpfung der Dateninformationen im beschriebenen Kontext aggregiert werden. Die Teilschritte zur Textextraktion lassen sich zunächst wie folgt einteilen:

1. Rohdaten Sammeln
   Die Kundenrezensionen der Online-Plattform werden mittels Web-Crawler Technologie ausgelesen und als Datensätze zwischengespeichert .
2. Datenaufbereitung
   Mittels der sogenannten natürlichen Sprachverarbeitung (engl. Natural Language

Processing, kurz: NLP) werden anschließend Füllwörter, redundante Textbausteine, usw. herausgefiltert. Der verbleibende Text wird anhand von Schlagwörtern und deren Häufigkeit geclustert.

3. Aufbereiteten Datensatz bereitstellen
   Der aufbereitete Datensatz besteht aus einem vieldimensionalen Daten-Vektor mit den ermittelteten Textelementen und deren Häufigkeiten.
4. Aufbereiteten Datensatz in Graph überführen
   Durch die Überführung in eine Graphen-Darstellung wird eine Verknüpfung zur oben beschriebenen Produktstruktur ermöglicht.

Eine ausführliche Dokumentation dieser Form der Textanalyse findet sich bei Vivek [8]. Die Verknüpfung zwischen der Graphendarstellung der Produktstruktur und des Graphen der Renzensionen geschieht auf Basis der Schlüsselwörter aus der Produktstruktur. Die nachstehende Abbildung 2

Abbildung 2zeigt das schematische Vorgehen innerhalb der Analyse Methode.

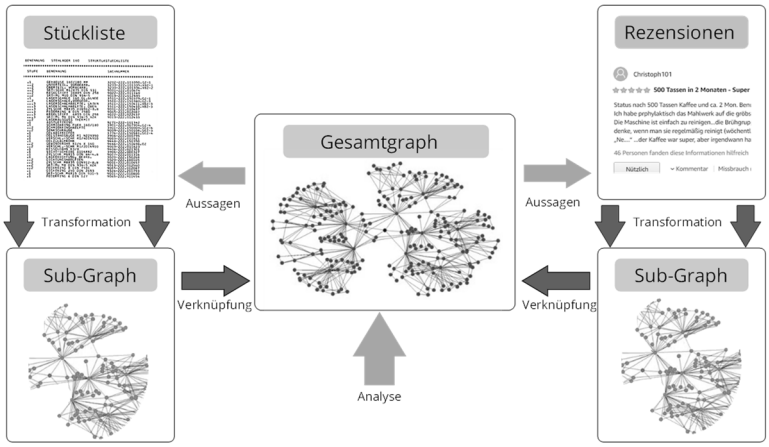


Abbildung 2: Graphenbasiertes Framework zur Feedbackintegration in den PEP

Während das prinzipielle Vorgehen den konventionellen Strategien der NLP bzw. dem Textmining entspricht, ist besonders die Textverarbeitung (z.B. Lemmatisierung) sowie die semantische und inhaltliche Verknüpfung der Informationsbausteine aus Strukturstückliste sowie Kundenrezension gleichermaßen herausfordernd. Da die spezifischen Strukturelemente, Hauptworte und Hauptwortgruppen nur für den jeweiligen Anwendungsfall konkretisiert werden können, wird im folgenden Kapitel eine praktische Anwendung der beschriebenen Strategie demonstriert.

4 Beispielanwendung

In diesem Abschnitt wird die Integration von Kundenfeedback und Strukturstücklisten-informationen in einen gemeinsamen Graphen anhand eines Endverbraucherproduktes – einer Kaffeemaschine – erläutert. Ziel dieser Anwendung ist es, exemplarisch darzustellen,

a) wie eine automatisierte Vernetzung von Rezensionen auf Produktelemente möglich ist,
b) welche Anforderungen für eine praxisnahe Implementierung notwendig sind,
c) wie viele (quantitative Betrachtung) Rezensionen automatisiert zugeordnet werden können.

Darüber hinaus ist ein produktneutrales Analyseschema entwickelt worden, welches erweiterbar ist und für weitere Untersuchungen genutzt werden kann. Die Vorgehensweise innerhalb des Schemas gliedert sich in folgende Teilschritte:

1. Datenbeschaffung/Datenerfassung/Datenerhebung
2. Daten analysieren und aufbereiten
3. Erstellung der Sub-Graphen
4. Verknüpfung der Sub-Graphen zu einem Graphen
5. Visualisierung und Analyse des gesamten Graphen

Der Prozess der Datenanalyse beginnt mit der Datenbeschaffung der Kundenrezensionen über das Produkt. In diesem Beispiel werden die Daten des Online-Händlers Amazon.de genutzt. Bei der Auswahl des Produktes wurde darauf geachtet, dass in der bei Amazon.de angebotenen Kategorie die durchschnittliche Anzahl an Kundenrezensionen der Top 40 Produkte (Durchschnittlich 655 Produktbewertungen) dem ausgewählten Produkt entspricht (De'Longhi ECAM 23.420.SB mit 875 Bewertungen und 4,1 von 5 Sternen). Vergleiche mit anderen Wettbewerbsprodukten im selben Online-Portal zeigen, dass hiermit ein repräsentatives Produkt für die Produktkategorie in Bezug auf die Anzahl der Kundenrezensionen und die durchschnittliche Bewertung ausgewählt wurde. Mittels web-scrapping, eine Technik zum gezielten Extrahieren von Textelementen zur Informationsgewinnung, wurden die Rezensionen für die untersuchte Kaffeemaschine heruntergeladen.

Abbildung 3 zeigt tabellarisch ein Teilergebnis dieses Vorgangs. Die Produktstruktur wurde der Gebrauchsanweisung des Geräts entnommen und leicht modifiziert. Aus Herstellersicht können diese Daten detaillierter und strukturierter bereitgestellt werden. Für das hier vorgestellte Beispiel genügt jedoch die Darstellung einer hierarchischen, Bauteil-bezogenen Produktstruktur ohne weitere Informationen wie Arbeitsplänen, Fertigungsschritten, usw.

Struktur	Beispiel
order, url,	"1562759406-2901", "https://www.amazon.de/DeLong [...] ",
author, title,	"Käufer15", "kurz nach Ablauf der Garantie [...] ",
date,	"30. Juni 2018",
content, rating	"Nachdem der Kaffeevollautomat [...] ", "1,0 von 5 Sternen“

Abbildung 3: Datenstruktur und Beispiel der Kundenrezensionen (für die Analyse verwendetet Inhalt ist grau hinterlegt)

Im zweiten Schritt wird der vorliegende Datensatz der Kundenrezensionen mittels NLP (Natural language processing) aufbereitet. Der hier verwendete Algorithmus ist mit der Programmiersprache Python implementiert worden. Der verwendete Algorithmus reduziert die einzelnen Rezensionen, indem Füllwörter und Sonderzeichen gelöscht und Worte auf ihren Wortstamm zurückgeführt werden. Aktuell werden Rechtschreibfehler und im Text vorhandene Zahlen noch nicht berücksichtigt. Einen Ausschnitt der Auswertung des untersuchten Datensatzes zeigt Abbildung 4.

Da für den Untersuchungsgegenstand – die Kaffeemaschine – keine realen Produktentwicklungsdaten, wie Stückliste oder CAD-Modelle, den Autoren zur Verfügung standen, ist die Produktstruktur auf Basis des physischen Gerätes und der Bedienungsanleitung erstellt. Diese Struktur bildet (unvollständig) die Hauptbaugruppen der Kaffeemaschine ab und bietet die Möglichkeit weitere Unterbaugruppen und Bauteile hinzuzufügen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Kaffeemaschine durch 17 Baugruppen/Bauteilen modellhaft beschrieben (siehe Abbildung 5).

Abbildung 4: Hauptworte (**oben**) und Hauptwortpaare (**unten**) nach Abschluss der Textanalyse

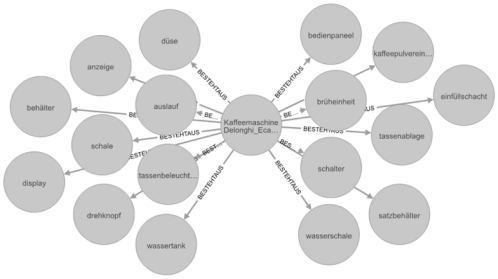


Abbildung 5: Vereinfachte Produktstruktur einer Kaffeemaschine in Neo4j

Im vierten Schritt werden die zwei Sub-Graphen (Produktstruktur und Rezensionen) miteinander verknüpft. Dafür wird untersucht, ob die Bezeichnung der Bauteile bzw. Baugruppen in den Rezensionstexten enthalten sind. Ausgehend von der Produktstruktur werden die Bauteil- bzw. Baugruppenbezeichnungen mit den Rezensionstexten verglichen. Eine Rezension wird dann einer Baugruppe zugeordnet, wenn der Rezensionstext die Bauteilbezeichnung enthält.

Abbildung 6 stellt das zugrundeliegende Schema der erstellten Graphendatenbank dar. Das Schema besteht aus 3 *Labels*, *Feedback*, *Baugruppen* und *Mapping* und aus 2 Beziehungen, bezieht sich (*BEZIEHTSICH*) und besteht aus *(BESTEHTAUS)*. Daraus ergibt sich die die folgende Logik. Das *Feedback bezieht sich* auf einzelne *Baugruppen* und die *Baugruppen* bestehen aus *Baugruppen*. Das *Mapping* bestimmt welche Elemente von *Feedback* mit welchen Elementen von *Baugruppen* verbunden sein müssen.

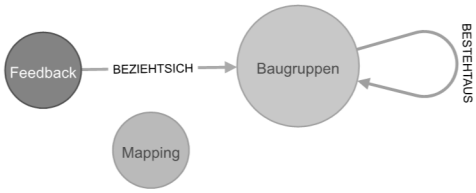


Abbildung 6: Implementiertes Schema der Graphendatenbank in Neo4j

Der fünfte und letzte Schritt beinhaltet die Visualisierung und Auswertung des gesamten Graphen. Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Vernetzung von Rezensionen und Baugruppen dar. Die hellgrauen und großen Elemente sind die Bauteile bzw. Baugruppen und die kleineren und dunkleren Punkte die Rezensionen. Für den untersuchten Datensatz konnten 293 Rezensionen aus insgesamt 875 automatisiert zugeordnet werden. Mithilfe der Graphendarstellung kann nun eine strukturspezifische Auswertung durch den Produktentwickler erfolgen. Anhand der Schlagworte und Kommentare können Eigenschaften und Aufbau der Produktbauteile und Baugruppenstrukturen hinterfragt und für eine konstruktive Überarbeitung in Betracht gezogen werden. Ebenso sind Kommentarelemente, die auf mehrere Bauteile oder Baugruppen verknüpft sind, ein Anzeichen für Aggregationspotential innerhalb der Baustruktur bzw. zu prüfende Fehlerketten aus Anwendersicht.

5 Fazit uns Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, wie Rezensionen eines Online-Shops als Kundenfeedback für den Entwicklungsprozess eines Nachfolgeprodukts genutzt werden können. Dabei wurde ein graphenbasierter Ansatz vorgestellt, bei dessen Anwendung automatisiert eine Verknüpfung zwischen Kundenfeedback und Produktstruktur visualisiert wird. Neben einem positiv bzw. negativ Feedback zur Baustruktur des Produkts bietet der Ansatz dabei auch Potential für die Steierung der Innovationsfähigkeit durch Einbeziehung spezifisch zugeordneter Anregungen durch die Anwender.

Der vorgestellte Ansatz wird derzeit im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben am Fachgebiet für Produktsicherheit und Qualität der Bergischen Universität Wuppertal erforscht und evaluiert.

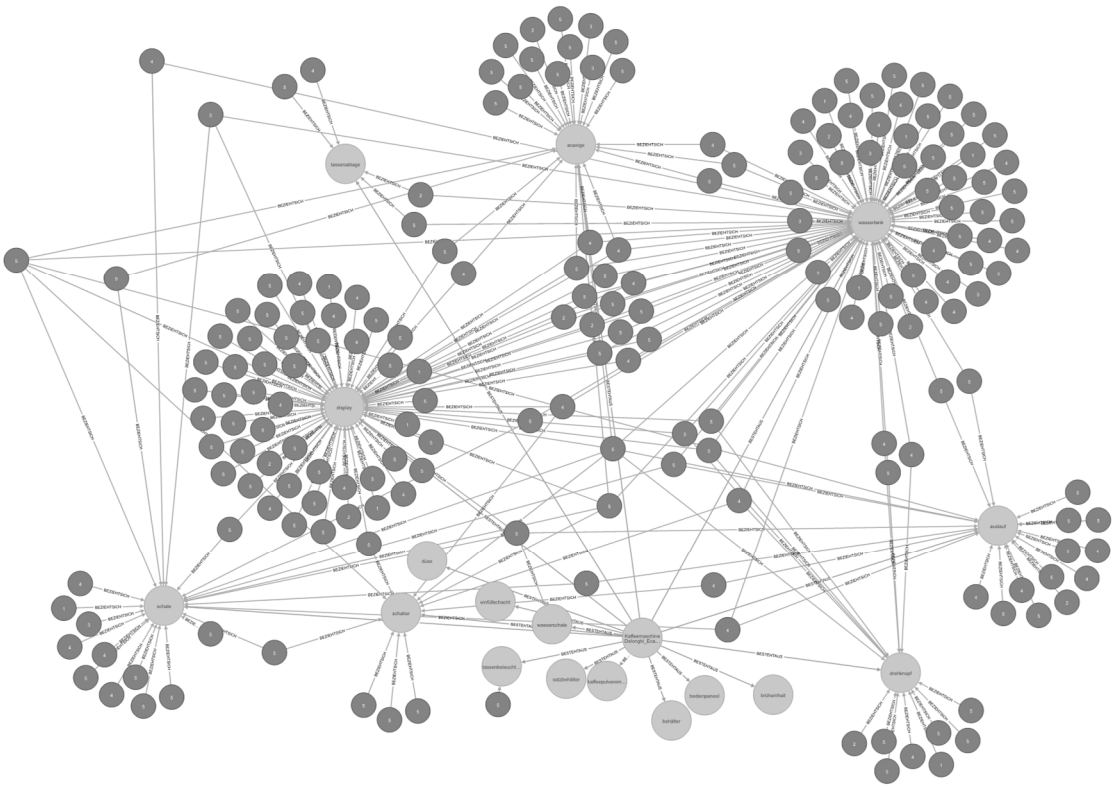


Abbildung 7: Gesamtgraph alle Elemente der Produktstruktur und zugehörigen Rezensionen

Literatur

[1] Schmidt, T. S. *et al.*: *Agile Development of physical Products - An empirical Study about Motivations, Potentials and Applicability*, Munich, Germany, 2017.

[2] Thun, S.: *Transformation der Kundenzufriedenheitsforschung - Anforderung an das Kundenzufriedenheitsmanagement der Zukunft*. in *Zukunft der Marktforschung*. 2019, pp. 105–123.

[3] Schulte, S.: *Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit*, Ruhr-Universität Bochum, 2006.

[4] Ihl, C. and Piller, F.: *Von Kundenorientierung zu Customer Co-Creation im Innovationsprozess*. *Mark. Rev. St. Gall.* vol. 27. no. 4. pp. 8–13. 2010.

[5] Riehm, U. *et al.*: *E-Commerce in Deutschland*, *Eine kritische Bestandsaufnahme zum elektronischen Handel*, 2018. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/studie/id/6387/dokument/e-commerce-statista-dossier/. [Accessed: 16-Jul-2019].

[6] Tandon, S. and Govindaraj, A.: *Decoding Digital Consumer Feedback: Customer*

Intelligence Insights Through Unstructured Data Mining. *Soc. Media Mark.* pp. 113–120. 2018.

[7] Schweitzer, F. *et al.*: *There's More Than One Perspective to Take Into Account for Successful Customer Integration Into Radical New Product Innovation: A Framework and Research Agenda*. *IEEE Trans. Eng. Manag.* vol. PP. pp. 1–17. 2019.

[8] Vivek, S.: *Automated Keyword Extraction from Articles using NLP*, 2018. [Online]. Available: https://medium.com/analytics-vidhya/automated-keyword-extraction-from-articles-using-nlp-bfd864f41b34. [Accessed: 18-Jul-2019].

KT2019

Neuronale Netze und Deep Learning in der Konstruktion

Regelgeometriedetektion in der Flächenrückführung mittels Deep Learning basierter Prozessierung von diskreten Daten

Arthur Hilbig, Stefan Holtzhausen, Ralph Stelzer

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD (KTC), Technische Universität Dresden
George-Bähr-Straße 3c, 01069 Dresden
E-Mail: {Arthur.Hilbig, Stefan.Holtzhausen, Ralph.Stelzer}@tu-dresden.de
Internet: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/ktc

Inhalt *In diesem Beitrag wird eine exemplarische Umsetzung vorgestellt, die zukünftig eine Automatisierung essenzieller Reverse-Engineering-Prozessschritte ermöglichen kann. Das Einbinden des Deep Learning bietet dabei eine wissensbasierte Unterstützung der Segmentierung innerhalb der Flächenrückführung, um nachteilige kooperative Nutzerinteraktionen zu vermeiden.*

Stichwörter: *Reverse Engineering, Flächenrückführung, Deep Learning, Geometriedetektion.*

Ruled Geometry Detection in Surface Reconstruction using Deep Learning based Processing of Discrete Data

Abstract: *In this paper an exemplary implementation will be presented for the future possibilities of an automation of the reverse engineering process chain. The deep learning embeds a knowledge-based support in the segmentation step of surface reconstruction in order to avoid disadvantageous cooperative user interaction.*

Keywords: *Reverse Engineering, Deep Learning, Surface Reconstruction, Geometry Detection.*

1 Einleitung

Die heutigen Prozessschritte des Reverse Engineering, sind von teilautomatisierten Verfahrensschritten und zeitaufwändigen Systemnutzerinteraktionen geprägt. Speziell das Erstellen eines parametrisch nutzbaren Flächenmodells aus diskreten 3D-Daten erfordern ein vorhergehendes Wissen über die angestrebte topologische Zusammensetzung im hierarchisch geordneten CAD-System. Das technische Wissen eines Ingenieurs bleibt unabdingbar, weil die in Normen, Richtlinien und Entwicklungsstandards definierten Konstruktionsempfehlungen und Fertigungsmethoden hierdurch Anwendung finden.

Das Einbringen unterschiedlicher Ingenieurskompetenzen und deren technischen Verständnis kann als intelligente Prozessunterstützung verstanden werden. Diese menschliche Entscheidungsstruktur des Denkens und Handels war lange nicht logisch zu zergliedern und algorithmisch nachzuahmen. Fortschritte auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz bzw. das maschinellen Lernens, bieten die Möglichkeit solche Sinneszusammenhänge zu erforschen und automatisiert in diese Prozessschritte zu integrieren [1]. Zukünftig könnte ohne eine Systemnutzerinteraktion ein konstruktionstechnisches Verständnis in die algorithmischen Verarbeitungsschritte automatisiert einfließen.

2 Problemdefinition anhand der Flächenrückführung

Im Allgemeinen lässt sich das Reverse Engineering zum Generieren eines virtuellen Abbilds von einem physisch vorliegenden Objekt im engeren Sinne in die 3D-Digitalisierung, die Vorverarbeitung und die Flächenrückführung einteilen (Abbildung 1) [2].

Abbildung 1: Prozessschritte in der Flächenrückführung nach [2] und [3]

Die 3D-Digitalisierung beinhaltet volumetrisch- und oberflächenorientierte Erfassungsmethoden. Diese generiert eine 3D-Punktwolken aus den Lagebeziehung von Objektpunkten bestimmter Ansichtspositionen, wie es beispielsweise bei photogrammetrischen Systemen der Fall ist. Innerhalb der Vorverarbeitung führt die Registrierung unterschiedliche Punktwolken auf ein gemeinsames Koordinatensystem zusammen, woraufhin die Triangulation ein bereinigtes Dreiecksnetz erstellt. Diese Prozessschritte der Generierung eines diskreten Oberflächenmodells finden heute bereits vollautomatisiert statt.

Die darauffolgende Flächenrückführung hat zum Ziel ein topologisch geordnetes Oberflächenbegrenzungsmodell zu generieren, das anhand von Randpolygonen bzw. Begrenzungsleitlinien eine Approximation der diskreten 3D-Daten im CAD-Umfeld ermöglicht.

Eine Segmentierung unterteilt das Dreiecksnetz aufgrund von Homogenitätskriterien kantenorientierter oder flächenorientierter Verfahren, wodurch eine geometrische Zerlegung in zusammenhängende Regionen der Punktwolke entsteht. Verwendung finden dabei beispielsweise die Glattheitsbedingung der geometrischen Tangentialebenstetigkeit, die ein kontinuierlichen Übergang der Triangulation fordert. Ausgerichtet an diesen Punktwolkenregionen der Segmentierungsdaten leitet die Oberflächenanpassung und -erstellung die Primäroberflächen her. Für Regelgeometrien (Ebene, Zylinder) finden analytische Verfahren und für Freiformflächen interpolierende Verfahren Verwendung. Die über die Flächenbegrenzungen hinausreichenden Primäroberflächen, sind durch eine Anpassung und Variation der Zwangsbedingungen vollständig bestimmt. Dort werden Übergangs- bzw. Zwangsbedingungen zu den weiteren Primäroberflächen festgelegt, sodass spezifische Oberflächenübergänge entstehen und sich das nutzbare Konstruktionsfeature (Extrusion, Rotation) ergibt. Die Oberflächenzusammenführung verschneidet und vereinigt die überschneidenden Primäroberflächen der Segmentierungsregionen, wodurch die Flächenschnittkurven mit den Verschnittflächen das Oberflächenbegrenzungsmodell bilden.

Diese heutige Verfahrensweise der Flächenrückführung ist angewiesen auf eine kooperative Nutzerunterstützung und ein Konstruktionsverständnis, wobei iterativ die Zwangsbedingungen festzulegen und zu korrigieren sind. Konstruktionshierarchien sind als aufeinander folgende Verarbeitungsschritte händisch einzubringen. Ausgehend von der Problematik einer manuellen unterstützen Verarbeitungsweise der Flächenrückführung könnte ein Deep Learning basierter Ansatz die parametrische Zieldarstellung der Konstruktionsfeatures als eine intelligenten Geometriedetektion, ohne eine vollständige Prozessierung, festlegen.

3 Verfahrensauswahl im Deep Learning

Das Anlernen tiefer künstlicher neuronaler Netzwerke (KNNs), auch Deep Learning genannt, ist ein Teilgebiet des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz. Dieser induktive Ansatz leitet aus mehreren Bedingungen eine allgemeine Regel ab und stellt eine Generalisierung als Wahrscheinlichkeitsaussage für unbekannte Beispiele bereit. Speziell

überwachte Lernverfahren lassen ein gerichtetes Verfahrensmodell zu, indem aus dem Vergleich von Ausgangswerten eines KNNs und ihren zugeordneten Zielwert ein Fehlervektor erstellt und minimiert wird.

Die räumliche Merkmalseinordnung der diskreten Dreiecksnetze als visuelle Objekterkennung verstehend, kann in die Teilprobleme der Objektlokalisation bei gleichzeitiger Objektklassifikation unterteilt werden. Ansätze zur Verarbeitung von räumlichen Informationen basieren weitergehend auf unterschiedlich Geometriebeschreibungen. Eine effiziente Methode im euklidischen Raum, die im maschinellen Sehen eine räumliche Verarbeitung mit verbundener Eigenschaftsaufgliederung erlaubt, ist die semantische Segmentierung [4]. Diese ermöglicht zuverlässig ein filterbasiertes Selektieren in gerasterten Datensätzen, in welche die diskreten 3D-Daten überführt werden müssen. Bei den Filtern handelt es sich um Faltungsmatrizen mit anlernbaren Verbindungsgewichten und spezifischer Vernetzung [5], die globale Kontextmerkmale und lokale Nachbarschaftsbeziehungen der zu verarbeitenden Daten beachten.

4 Die Prozesspipeline zu einer intelligenten Flächenrückführung

Anhand einer Prozesspipeline sollen allgemeine Verfahrensschritte vorgestellt werden, die auf einem Prozessmodell für die Datenanalyse in der Produktentwicklung [6] aufbauen. Hierdurch kann das Systemnutzerwissen und die unterschiedlichen kooperativen Verfahrensweisen der Flächenrückführung auf Basis eines gleichen Vorgehensmodells aufgelöst werden. Ausgehend von verfügbaren Datenbeständen systematisieren die Verfahrensschritte der Zieldefinition, der Datenvorbereitung, dem maschinellen Lernen und der Ergebnisnutzung die Vorgehensweise (Abbildung 2).

Im Vorhinein bestimmt die Zieldefinition, je nach zu vorhersagender Wahrscheinlichkeit spezieller geometrischer Merkmale, die Klassenauswahl und -festlegung. Im Hinblick auf die prototypische Umsetzung werden beispielsweise unterschiedliche Regelgeometrien als Klassen definiert, sodass eine Klasseneinteilung in den Eingangsdaten getroffen werden kann. Innerhalb der Datenvorbereitung dienen zunächst CAD-Datensätze und keine 3D-Scans realer Objekte als Datenquelle, wodurch ein parametrisches Oberflächenmodell der Objekte bereits vorliegt. Die als synthetische Daten betrachteten CAD-Modelle stellen Si-

mulationsdaten dar, die Rückschlüsse auf die reale Objekttopologie erlauben und bei gleichzeitig erweiterbarer Mannigfaltigkeit und Objektanzahl die Datenbasis beinflussbar machen. Zu beachten sind die Existenz der festgelegten Geometrieklassen und deren relationale Oberflächenübergänge untereinander. Bei Unvollständigkeit können neue CAD-Modelle generiert und modifiziert werden, sodass verschiedenartige Geometrievariationen einfließen.

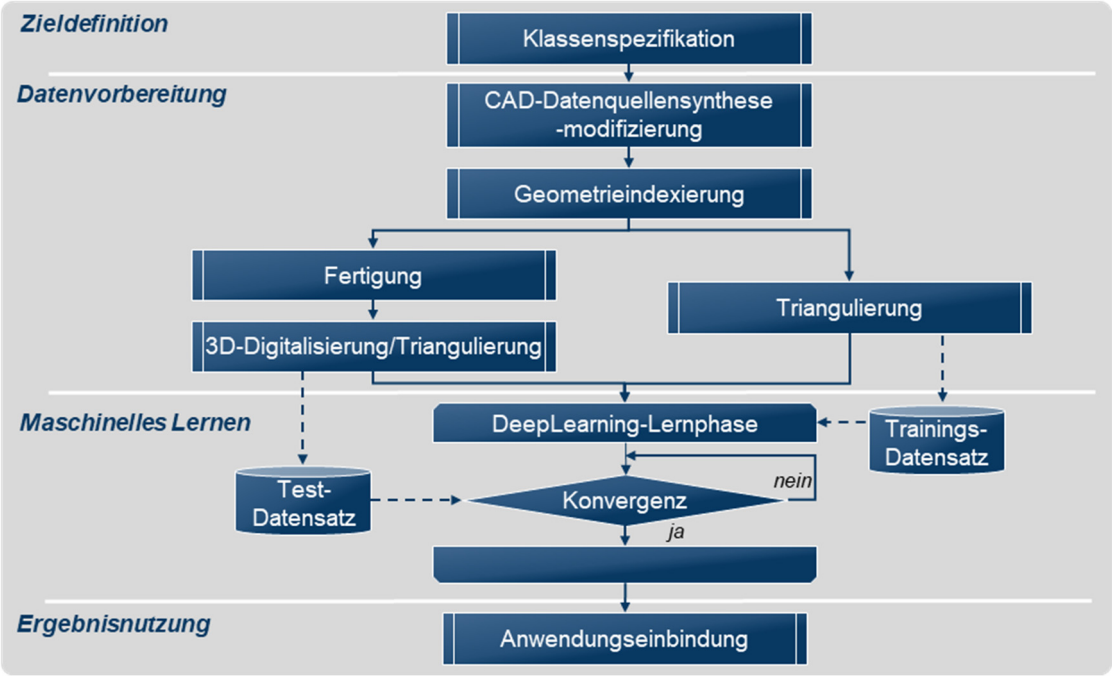


Abbildung 2: Prozesspipeline zum Einbinden des Deep Learning i.A.a. [7]

Anschließend kennzeichnet die Indexierung Geometriemerkmale anhand der getroffenen Zieldefinition, sodass Eingangswerte mit zugehörigem Zielwert entstehen. Dieses Einbringen der Eingangsdaten-, und Zielwertverbindungen stellt den einzigen interaktiven und nicht automatisierbaren Verfahrensschritt mit notwendiger Nutzereingabe dar. Dessen Konstruktionsverständnis prägt sich als Geometrieverknüpfung in den Datensatz ein. Die darauffolgende Triangulierung überführt die indexierten CAD-Modelle in die diskreten Dreiecksnetze und daraufhin in ein gerastertes Datenformat in Form von Voxel- oder Pixeldaten, das für eine Anwendung der semantischen Segmentierung notwendig ist. Damit steht ein Trainingsdatensatz für die maschinelle Lernphase bereit.

Da eine Applikation auf 3D-Scans physischer Objekte angestrebt wird, muss potenziell eine Überprüfungsdatensatz zu dem realspezifischen Einsatzszenario in Form von Testdaten geschaffen werden. Diese sichern zum Optimierungsfortschritt auf dem Trainingsdaten

ein Abbruchkriterium der Lernphase ab. Dazu durchlaufen CAD-Modelle einen realistischen Produktlebenszyklus über die Fertigung eines physischen Objekts, der 3D-Digitalisierung und der Triangulierung.

Die anschließende Phase des maschinellen Lernens, speziell das Anlernen einer spezifischen Netzwerkstruktur einer semantischen Segmentierung, bestimmt iterativ den Fehlervektor der Ausgangswerte zu den Zielwerten des Trainingsdaten. Der Vergleich zum Testdatensatz quantifiziert hierbei den Lernerfolg zu der realen Anwendung. Bei ausreichender Konvergenz zu einem Abbruchkriterium ist die Lernphase beendet.

Innerhalb der Ergebnisnutzung wird die angelernte Netzwerkstruktur in den jeweiligen Prozessschritten der Flächenrückführung eingebunden, sodass die Teilprozesse ohne manuelle Eingaben und Iterationen stattfindet können.

5 Prototypische Umsetzung einer Regelgeometriedetektion

Nachfolgend soll die prototypische Umsetzung der aufgestellten Prozesspipeline den Teilprozess einer intelligenten Segmentierung mit einer Regelgeometriedetektion auflösen.

5.1 Zieldefinition und Klasseneinteilung

Als Zieldefinition dient eine Klasseneinteilung der zu detektierenden Oberflächen, die sich an einer Topologieunterscheidung auf Grundlage der geometrischen Tangentenstetigkeit orientiert. Weitergehend folgt die Klasseneinteilung den Primitiven von Regelflächen und einfachen Konstruktionsfeatures, wie Verrundungen. Aufgrund ihrer analytische gleichwertigen Geometriedarstellung lag ein besonderes Augenmerk auf der Unterscheidung von Verrundungen mit gerader Leitlinie zu einer Extrusion eines Teilkreises aus einem Skizzenelement zu einem Teilzylinder (Abbildung 3).

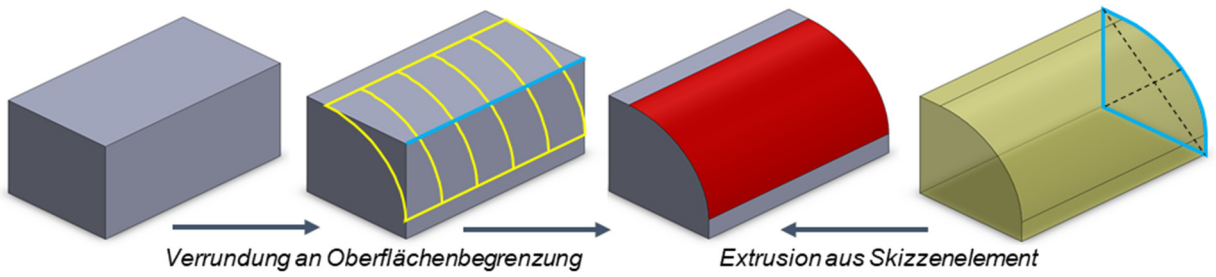


Abbildung 3: Unterscheidung eines Teilzylinders nach Konstruktionsfeatures

Eine kontextuelle Einordnung innerhalb der Oberflächenstruktur eines Bauteils ist erforderlich, wodurch eine topologische Konstruktionsabfolge und die verwendeten Konstruktionsfeatures präzisiert werden. Ebenfalls wird eine Fallunterscheidung in konvexe und konkave Oberflächen getroffen, sodass Innen- von Außenzylindern unterscheidbar sind.

5.2 CAD-Modelpräparation und Bildsynthese

Während der exemplarischen Datensatzvorbereitung (Abbildung 4) wird für die Oberflächenindexierung eine CAD-Modelldatenbank aufgebaut, welche die unterschiedlichen geometrischen Variationsmöglichkeiten der Klasseneinteilung und der unterscheidbaren Segmentübergänge abbildet. Eine Farbcodierungen markiert die einzelnen Teilsegmente des CAD-Oberflächenbegrenzungsmodell nach der Klasseneinteilung als Zielwerte.

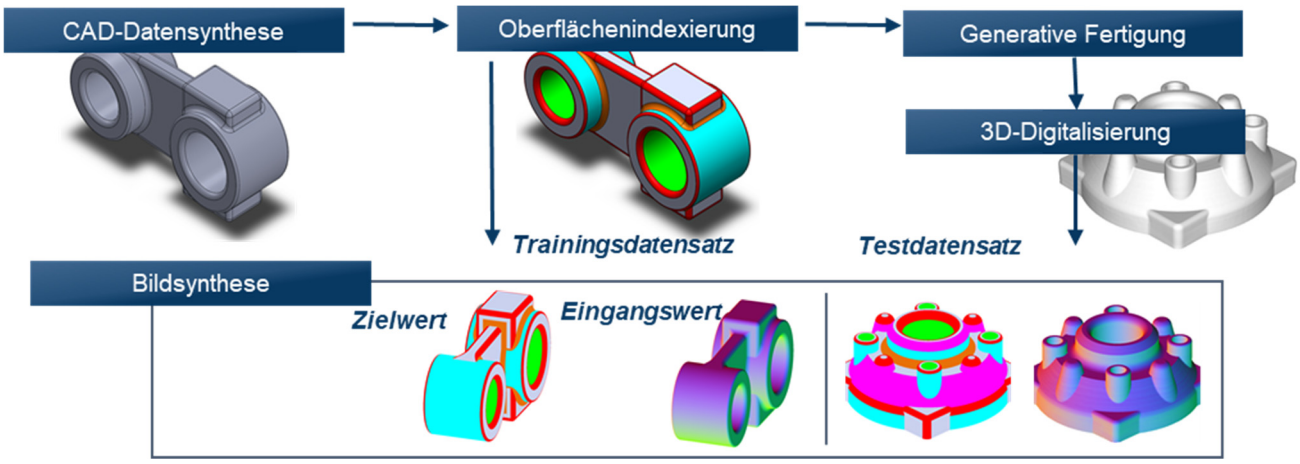


Abbildung 4: Datensatzvorbereitung und -synthese

Die abgeleitet Geometriedarstellung einer Tangentialebenenstetigkeit gewährleistet eine performante Berechnungsstrategie im Deep Learning. Die Überführung in den Bildraum erfolgt über einen Shader, der die unterschiedlichen Übergangsbedingungen in einer farblich gekennzeichneten blickrichtungsabhängigen Winkeldifferenz der Dreiecknormalen darstellt. Die Rücktransformation in den euklidischen Raum ist mit den bekannten Renderingparametern ausführbar.

Weitergehend durchlaufen verschiedene CAD-Modelle zur Testdatenerstellung eine generative Fertigung mit einem Fused-Deposition-Modeling-Verfahren (FDM), dass einen

groben und schichtweisen Extrusionsaufbau hergestellt und charakteristische Oberflächenfehlstellung signifikant repräsentiert einprägt. Die unverarbeitete Tessellation wird auf demselben Koordinatenursprung, wie das ursprüngliche CAD-Modell, registriert, womit eine Erstellung der zugehörigen Zielwerte und die Überprüfung der angelernten Netzwerkstruktur möglich ist.

5.3 Substanzieller Lernrahmen und Evaluation

Die Lernphase findet in einem Batchlernverfahren mit mehreren Beispielinstanzen statt, wobei unterschiedliche binäre Evaluationsmetriken als statistisches Gütekriterien einer Kontingenztabelle dienen. Innerhalb einer Hyperparameterabstimmung wurde eine Eingrenzung der auszuwählenden Konfigurationsparameter (Lernrate, Optimierungsalgorithmus, Verlustfunktion) der Lernphase vorgenommen. Folgend ist der Lernfortschritt der pixelweisen Klassifizierung anhand einer Trainingsinstanz gezeigt (Abbildung 5).

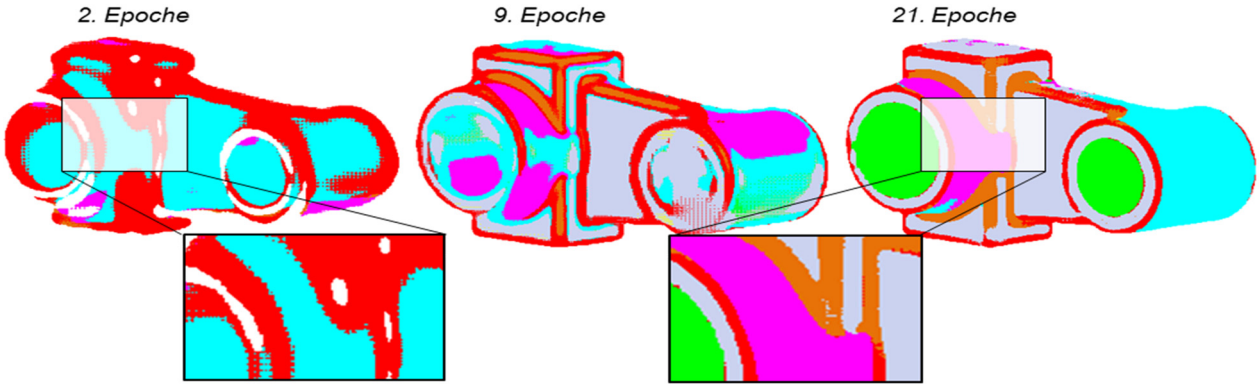


Abbildung 5: Lernfortschritt einer Trainingsinstanz

Der einmalige Durchlauf der Trainingsdaten durch die Lernphase bezeichnet eine Epoche. Am Anfang der Lernphase sind das Ausbilden von verschwommenen Segmentierungsregionen mit einer hohen Unschärfe und Falschklassifikationen sichtbar. Mit fortschreitender Lerndauer manifestieren sich eindeutigere Umrandungen und Klassengrenzen, wobei sich präzise und korrekt eingeordnete Oberflächensegmente herausbilden. Der Nachweis einer impliziten Wissensableitung konnte durch die Einordnung der Nachbarschaftsbeziehung mit der Klassifikation der Verrundungsgeometrie erbracht werden. Die Evaluation mit den Testdaten ergibt jedoch zahlreiche Fehldetektionen aufgrund eines Generalisierungsfehler und einem frühen Lernwendepunkt (Abbildung 6).

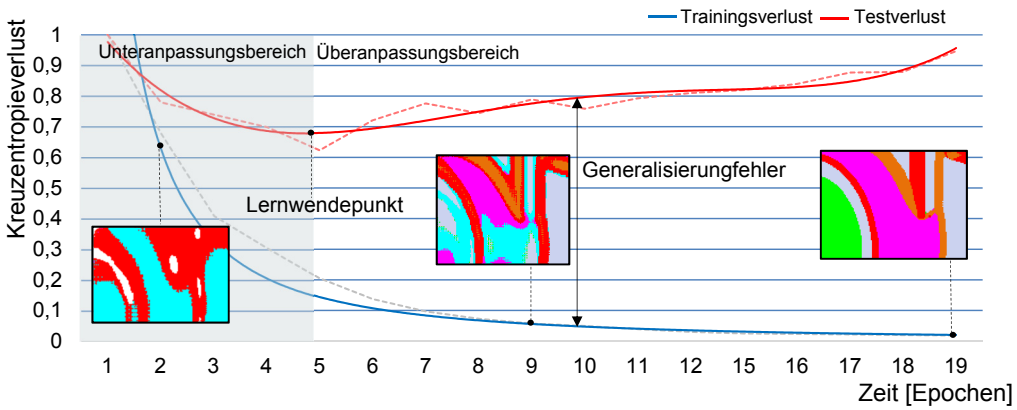


Abbildung 6: Lernkurve der semantischen Segmentierung

Bei fortschreitender Lerndauer zeigt sich eine Überanpassung auf den Trainingsdatensatz und zu speziell angelernter Gesetzmäßigkeiten. Beispielsweise sind konkave und konvexe Zylinder vertauscht oder als Konus systematisiert. Der Ähnlichkeitsabstand der eingeprägten Fertigungsungenauigkeiten von synthetischen Trainingsdaten zu realen Testdaten beeinflusst nachteilig die Erkennungsrate. Eine Abwägung zwischen dem erreichten Trainingsfehler, der Überanpassung und der Trainingsdatensatzgröße erzielt eine Verbesserung der Detektionsgenauigkeit. Weitergehend überträgt eine Transferlernphase, die angelernte Netzwerkstruktur in wenigen Lerniterationen auf reale Datenbeispiele. Hierdurch können stabile Oberflächendetektionen der wesentlichen Oberflächenklassen (Abbildung 7) gewährleistet werden, sodass systematische Fertigungsungenauigkeiten ausgeblendet sind.

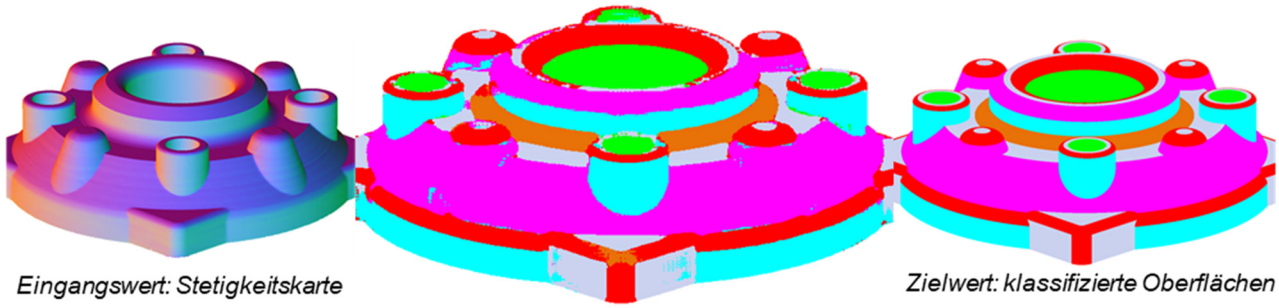


Abbildung 7: Regelgeometriedetektion auf die Testdaten

Diese Umsetzung verdeutlicht vorteilhaft, dass eine neuronale semantische Segmentierung stabile Wahrscheinlichkeitsaussagen und eindeutige Objektregionen klassifiziert. Die angelernte Netzwerkstruktur könnte nun eine intelligente Segmentierung in der Flächenrückführung ausführen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieses Beitrages vorgestellte Vorgehensmodell zeigt ausgehend von den heutigen manuellen Prozessschritten der Flächenrückführung des Reverse Engineering die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten der Einbindung Deep Learning basierter Verarbeitungsweisen. Eine prototypische Umsetzung einer Regelgeometriedetektion in diskrete 3D-Daten zeigt, dass eine künstliche und wissensbasierte Unterstützung der Oberflächensegmentierung in bestimmte Geometrieklassen möglich ist, wodurch nachteilige kooperativen Nutzerinteraktionen zum Festlegen der Oberflächenbegrenzungen umgangen werden können. Zum weiterführenden Nachweis soll das Verfahrensmodell auf die anderen Subprozesse der Flächenrückführung ausgeweitet und die Verwendung von Freiformflächen eingebunden werden.

7 Literatur

[1] *Worden,* Keith*; Staszewski,* Wieslaw *J.; Hensman,* James.*J.:* Natural computing for mechanical systems research – A tutorial overview. In: Mechanical Systems and Signal Processing 25 (2011), S. 4-111. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.013

[2] *Schöne,* Christine*.:* Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik. Dresden, Technische Universität Dresden, Habilitation, 2009. ISBN: 978-3-86853-103-9

[3] *Varady,* Tamas; *Martin,* Ralph*:* Chapter 26 - Reverse Engineering. *In: Farin,* Gerald*; Hoschek,* Josef*; Kim,* Myung-Soo (Hrsg.): Handbook of Computer Aided Geometric Design. North-Holland, Amsterdam, 2002, S. 651-681. DOI: 10.1016/B978-044451104-1/50027-7

[4] *Garcia-Garcia,* Alberto*; Orts-Escolano,* Sergio*; Oprea,* Sergiu *et al.:* A survey on deep learning techniques for image and video semantic segmentation. *In:* Applied Soft Computing 70 (2018), S. 41-65. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.05.018

[5] *LeCun, Yann; Jackel, L.D.; Boser, B. et al.:* Handwritten Digit Recognition – Applications of Neural Net Chips and Automatic Learning. *In:* IEEE Communication (1989), S. 41-46

[6] *Klement,* Sebastian*; Saske,* Bernhard; *Arndt,* Stephan *et al.:* Prozessmodell für Datenanalysen in der Produktentwicklung. *In: Brökel,* Klaus*; Corves,* Burkhard*; Grote,* Karl-Heinrich *et al.* (Hrsg.): Digitalisierung und Produktentwicklung – Vernetze Entwicklungsumgebung.

[7] 66001: Informationsverarbeitung - Sinnbilder und ihre Anwendung. DIN, Ausgabe Dezember 1983.

Abschätzen kritischer Kerben mit neuronalen Netzen

Henrik Stromberg, Armin Lohrengel, Volker Wesling

Technische Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Straße 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld
E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: www.tu-clausthal.de

Inhalt: *Die erfolgreiche Abschätzung der kritischen Kerbe eines Bauteils ist ein wichtiger Schritt der Festigkeitsberechnung, der momentan fast ausschließlich auf der Erfahrung des Ingenieurs aufbaut. Eine weitere Automatisierung von Entwicklung und Dimensionierung erfordert hierfür automatisierbare Lösungen. Es wird ein Ansatz gezeigt, mit dem auf Basis neuronaler Netze die kritische Kerbe eines Bauteils gesucht werden kann, um z.B. Vernetzungsalgorithmen besser steuern zu können. So können spannungsantizipierende Vernetzungsverfahren entwickelt werden. Es werden mehrere Herangehensweisen verglichen und ein Vorschlag zur Integration in ein Bauteilberechnungskonzept gemacht.*

Stichwörter: *Formzahl, Dimensionierung, Neuronale Netze, Finite Elemente*

Estimating critical stress concentrations using neural networks

Abstract: *The successful estimation of the critical stress concentration in a part is a major step of the strength calculation that momentarily relays exclusively on the engineer's experience. In order to continue the automation of development and dimensioning an automatable solution for this step is required. An approach to find critical stress concentrations based on neural networks is shown which count be used for example to allow for better control of meshing algorithms. Thereby stress anticipating meshing algorithms can be developed Several setups are compared and a suggestion towards implementation in a calculation concept is made.*

Keywords: *stress concentration, dimensioning, neural networks, finite elements*

1 Einleitung

Da in der Konstruktion grundsätzlich Sicherheit und Funktionsfähigkeit, aber auch der sparsame Einsatz von Ressourcen zu berücksichtigen sind, kommt einer möglichst exakten rechnerischen Festigkeitsvorhersage eine hohe Priorität zu. Mit der heute verfügbaren Rechnertechnik und numerischen Methoden können Berechnungen mit großer Zuverlässigkeit durchgeführt werden, erfordern aber ihrerseits ein hohes Maß an Ressourcen und Zeit. Daher gilt es auch, den Aufwand der Berechnung zu berücksichtigen und soweit als möglich zu reduzieren. Da ein Nachweis i. A. nur für den gefährdeten Querschnitt erforderlich ist, kann die Größe der numerisch zu behandelnden Systeme erheblich gesenkt werden, wenn vor der Durchführung der Berechnung der potentielle Versagensort bekannt ist. Wird eine solche Abschätzung als Heuristik für die Berechnung genutzt, liegt ihr das Erfahrungswissen des Berechnens zu Grunde. Im Folgenden wird die Formalisierbarkeit und Automatisierbarkeit dieses Vorgangs diskutiert.

2 Stand der Technik

Menschliches Erfahrungswissen wird durch biologische Prozesse generiert und abgerufen, die sich im Gegensatz zur konventionellen Arbeitsweise von Computern durch ein Zustandskontinuum und massive Parallelverarbeitung auszeichnen. Diese Strukturen sind dazu geeignet, Probleme zu lösen, die intuitiv leicht lösbar, aber schwer zu formalisieren sind. Ein prominentes Beispiel sind Bilderkennungsaufgaben. Durch die bionische Übertragung dieser Vorgehensweise in Computersysteme konnte Rosenblatt schon 1960 ein lernfähiges Computersystem entwickeln, dass handgeschriebene Ziffern erkannte [1]. Diese Technik der künstlichen neuronalen Netze (KNN) hat sich seitdem für Erkennungs- und Klassifizierungsaufgaben durchsetzen können.

2.1 Künstliche neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze werden in Schichten aufgebaut. Grundsätzlich wird in flache und tiefe neuronale Netze unterschieden, wobei flache Netze aus einer Eingangsschicht, wenigen verborgenen Schichten und einer Ausgangsschicht bestehen. Tiefe neuronale

Netze hingegen enthalten viele verborgene Schichten, sowie Faltungs- und Pooling-Schichten. In der vorliegenden Veröffentlichung werden flache Netze mit einer verborgenen Schicht verwendet.

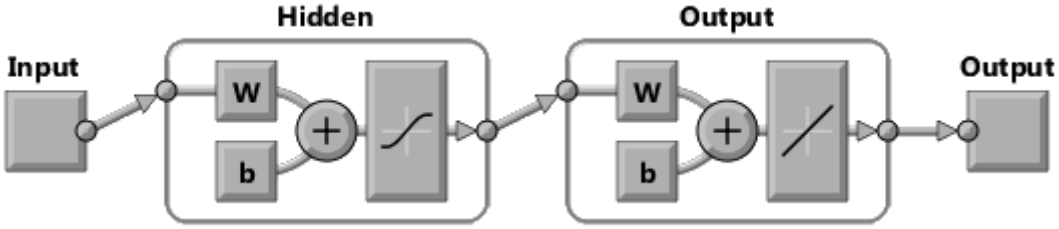


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines künstlichen neuronalen Netzes

Der Eingabevektor Input wird mit der Gewichtungsmatrix w multipliziert und das Resultat dem Biasvektor b addiert. Diese Summe wird dann mit Hilfe einer Übertragungsfunktion in eine Ausgabe zwischen 0 und 1 überführt. Diese Übertragungsfunktion stellt das Aktivierungsverhalten des Neurons dar. Im Folgenden wird der Tangens hyperbolicus verwendet. Während sich die Anzahl der Neuronen – auch Knoten genannt – auf der Eingangsschicht aus der Zahl der benötigten Eingangssignale ergibt, kann die Anzahl der Neuronen der verborgenen Schicht frei gewählt werden. Die Leistungsfähigkeit des Netzes hängt in hohem Maße von der sinnvollen Wahl dieser Schichtbreite ab. Die Ausgangsseite der verborgenen Schicht ist über eine zweite Gewichtsmatrix w mit den Ausgangsneuronen verbunden. Auch hier wird ein Biasvektor b addiert. Die Übertragungsfunktion ist hier die Identität. Ein- und Ausgangssignale müssen so skaliert werden, dass ihr genutzter Wertebereich innerhalb des Intervalls zwischen 0 und 1 liegt.

Der dargestellte Aufbau erlaubt es, das Verhalten von verbundenen Nervenzellen zu simulieren. Das Verhalten ist nun abhängig von den gewählten Verbindungsgewichten w und den Biasvektoren b. Diese müssen im Laufe des Lernprozesses bestimmt werden. Die einfachste Lernstrategie ist das überwachte Lernen, bei dem dem Netz zusammengehörige Paare aus Eingangs- und Ausgangswerten gegeben werden, um daraus zu generalisieren. Die Stellgrößen b und w müssen also so optimiert werden, dass die Differenz zwischen realer und gewünschter Ausgabe des Netzes minimal wird. Stand der Technik sind hier Op-

timierungsalgorithmen wie Levenberg-Marquardt mit Backpropagation [2]. Optimierungskriterien können der Korrelationskoeffizient R oder das Mittel der quadratischen Fehler MSE sein.

2.2 Formzahlbestimmung mit neuronalen Netzen

Einen ersten Ansatz zur Bestimmung von Formzahlen mit neuronalen Netzen lieferten Cardoso, Dias et. al. 1998, indem sie Formzahlen für geschweißte Stöße kreisförmiger Rohre mit Hilfe neuronaler Netze berechneten. Hierzu bestimmten sie über einen Parameterraum Formzahlen mittels FEM und trainierten ein neuronales Netz zur Bestimmung der Formzahl. Sie konnten zeigen, dass es mit vergleichsweise kleinen Netzen – 2 verborgene Schichten á 15 und 5 Neuronen – möglich ist, Formzahlen abzuschätzen. In dieser Arbeit wird allerdings auch auf die Unsicherheit des Verhaltens neuronaler Netze für unbekannte Muster verwiesen [3]. Auch Zhang, Zhang et.al. stellen fest, dass die Interpolation von Formzahlen durch neuronale Netze effizienter sein kann als die Bestimmung von Regressionsgleichungen [4]. Auch Dabiri et. al. können in mehreren Arbeiten neuronale Netze dafür trainieren, von Geometrieparametern auf Kerbwirkungszahlen zu schließen (z.B. [5]).

3 Kerbbewertung

Die langfristige Zielstellung ist das Identifizieren der kritischen Kerbe eines Bauteils. Da der Berechnungsaufwand zur Bestimmung örtlicher Spannungen im Vergleich zu Nennspannungen hoch ist, soll eine Methode entwickelt werden, die auf Basis von Nennspannungen Abschätzungen treffen kann.

3.1 Angenommene Vereinfachungen

Unbenommen des langfristigen Ziels, einen Algorithmus zu entwickeln, der mit beliebigen Geometrien arbeiten kann, wird hier zunächst die Vereinfachung auf rotationssymmetrische Bauteile vorgenommen. Deren Geometrie kann als Funktion des Durchmessers von der Längskoordinate betrachtet werden, ist also ein skalares Problem. Im zweiten Schritt werden Voruntersuchungen für den Wechsel in ein dreidimensionales Problem durchgeführt.

Der Stand der Forschung zeigt, dass für die Identifikation dreidimensionaler Körper tiefe neuronale Netze gute Leistungen erbringen [7]. Daher ist ein Wechsel auf tiefe Netze für diesen Schritt vermutlich notwendig.

3.2 Bauteilanalyse

Der erste Schritt der Vorgehensweise des Algorithmus besteht darin, in der Geometrie alle Kerben zu finden und diese für die weitere Verarbeitung vorzubereiten. Zunächst wird hierfür das Durchmesserprofil bestimmt. Alle Berechnungen erfolgen einheitenlos, da die absolute Bauteilgröße für Formzahlen allgemein nicht relevant ist. Aus dem Durchmesserprofil (vgl. Abb. 3) werden potentielle Kerben extrahiert, die dann einzeln weiterverarbeitet werden. Dieser Schritt wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt durch Analyse des Verlaufes der Durchmesserfunktion durchgeführt. Um das Verfahren auch auf zwei- oder dreidimensionale Probleme anwenden zu können, sollte dieser Schritt mit einem künstlichen neuronalen Netz durchgeführt werden. Da mit einem flachen Netz unabhängig von der verwendeten Knotenzahl keine ausreichend guten Ergebnisse erzielt werden konnten, muss dieses Problem mit einem tiefen Netz bearbeitet werden. Auch eine Vorverarbeitung der Daten zum Durchmesserprofil brachte keine signifikante Verbesserung. (vgl. Abbildung 4)

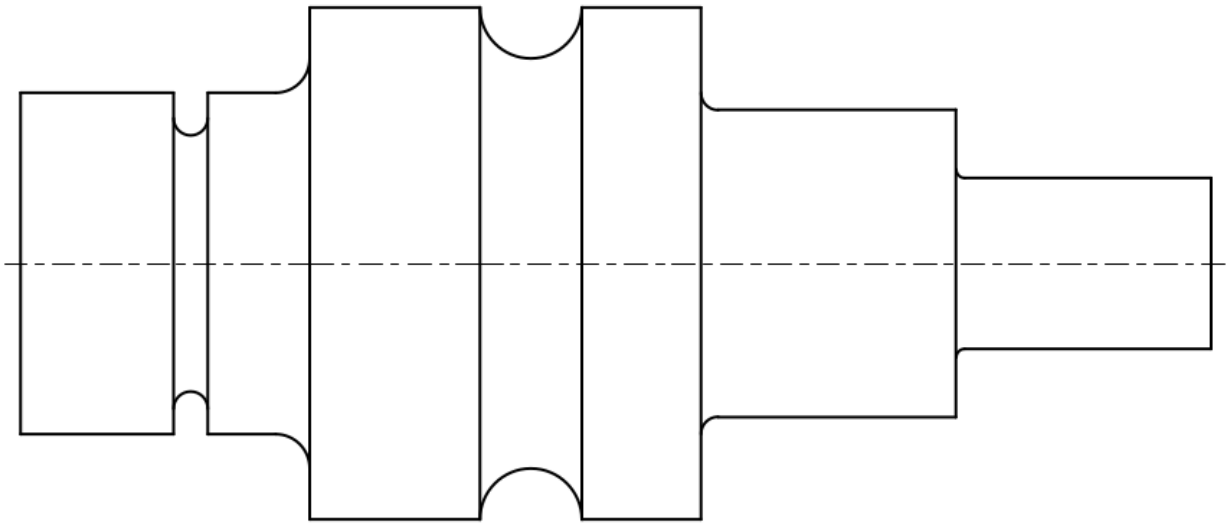


Abbildung 2: Geladene Bauteilgeometrie

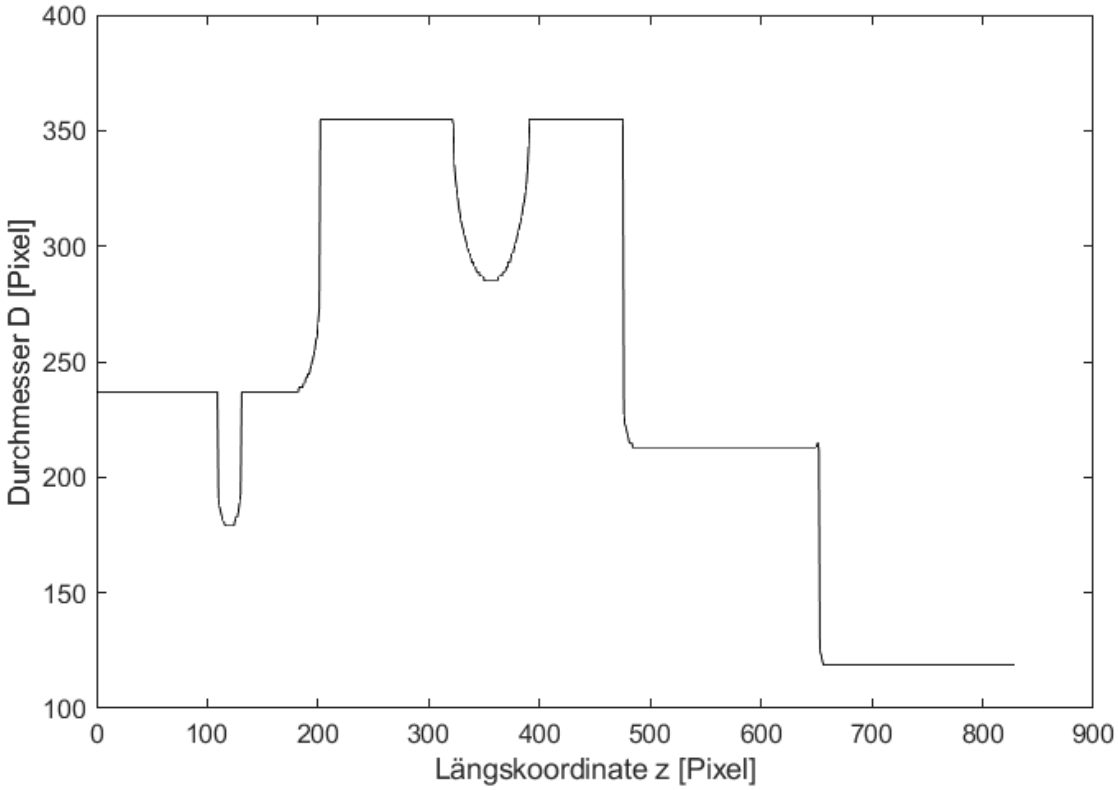


Abbildung 3: Extrahierte Durchmesser

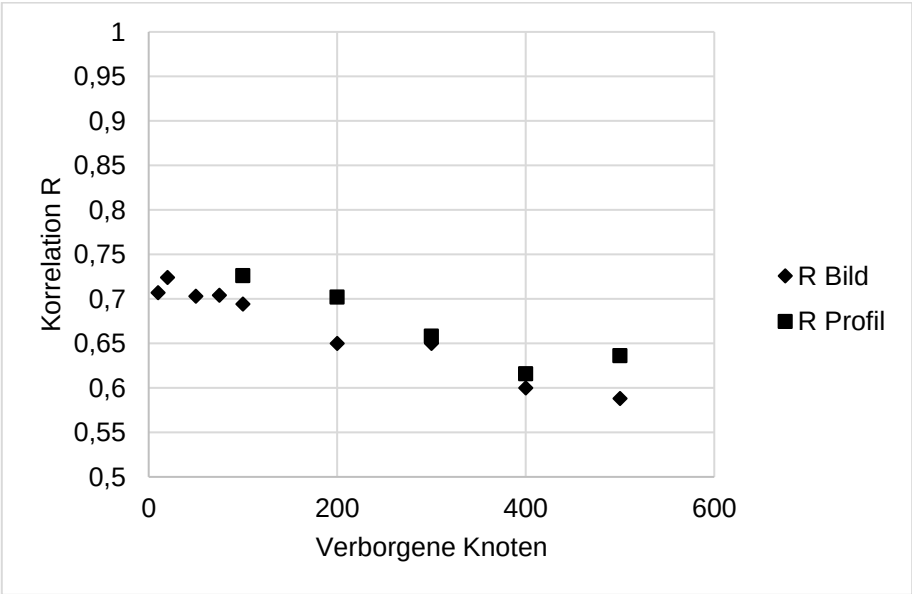


Abbildung 4: Fehlerbetrachtung der Kerbsuche mit KNN

4 Kerbanalyse

Die einzelnen Kerben werden durch KNNs weiter analysiert. Diese haben eine Eingangsbreite von 200 Neuronen, sodass die Geometrie auf diese Breite skaliert wird. Um Übersteuern der Übertragungsfunktion zu verhindern, werden alle Geometrien auf ihren größten Durchmesser normiert. Ein erstes Netz klassifiziert eine gefundene Kerbe. Hierzu wird die Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung mit bekannten Kerbformen berechnet. Bisher sind Ringnuten und Absätze implementiert. Abhängig von der Klassifizierung, wird die Kerbe an ein für die jeweilige Kerbform trainiertes Netz übergeben, das die zur Bestimmung der Formzahl benötigten Geometrieverhältnisse bestimmt.

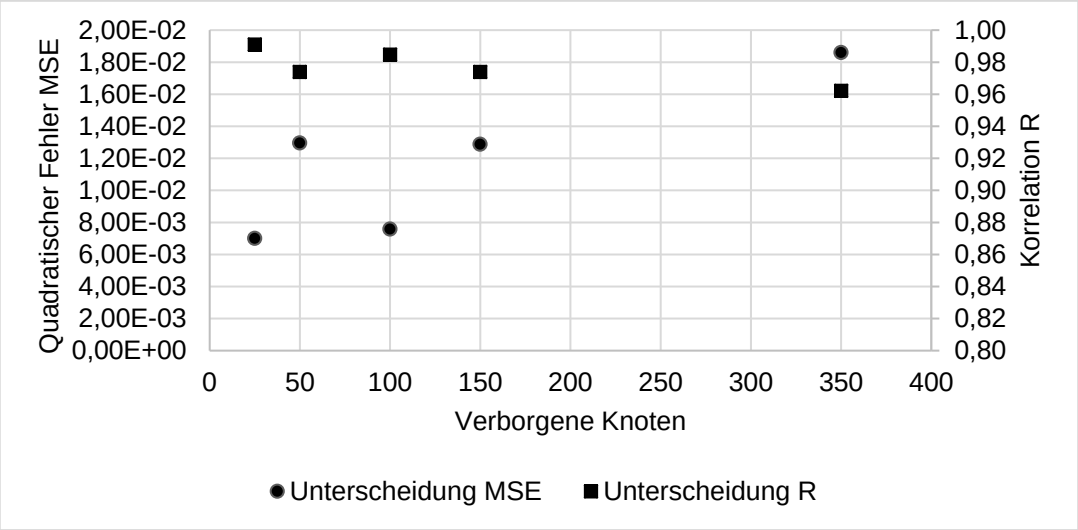


Abbildung 5: Fehlerbetrachtung Kerbidentifikation

Abbildung 5 zeigt die Abhängigkeit der quadriert
en Fehler und der Korrelation des erstellten Netzes von der Anzahl der verborgenen Knoten. Hierbei wird eine Korrelation von 1 und ein Fehler von 0 angestrebt. Primäres Auswahlkriterium ist der quadratische Fehler MSE. Erreichen mehrere Netze gute Werte, werden diese detaillierter untersucht und verglichen. In diesem Fall zeigt sich, dass das Netz mit 25 Neuronen große vereinzelte Fehler aufweist. Daher wird das Netz mit 100 Neuronen gewählt.
In ähnlicher Weise werden verschiedene Netzgrößen zur Bestimmung der Größenverhältnisse der Kerben erprobt. (vgl. Abb. 6 und Abb. 7)

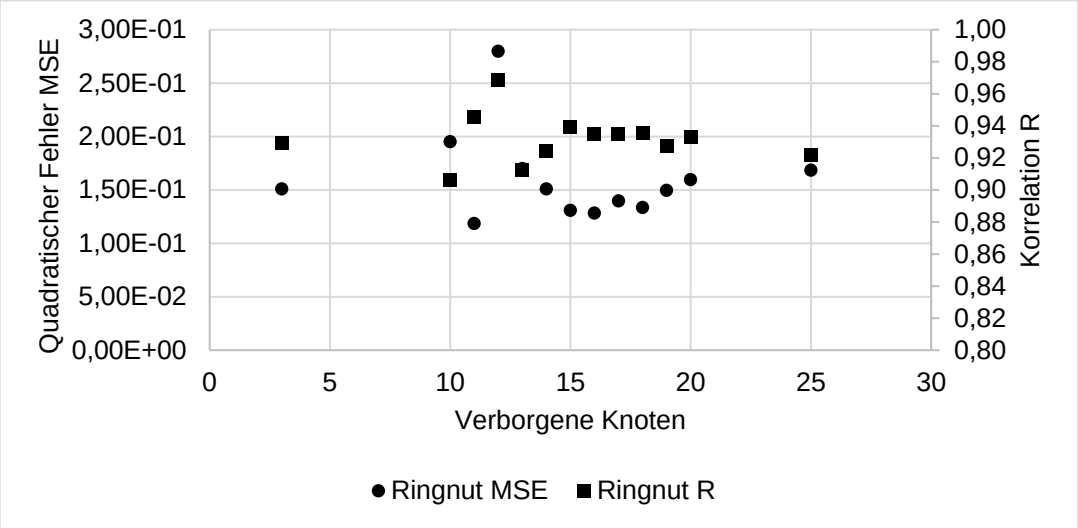


Abbildung 6: Fehlerbetrachtung Ringnut

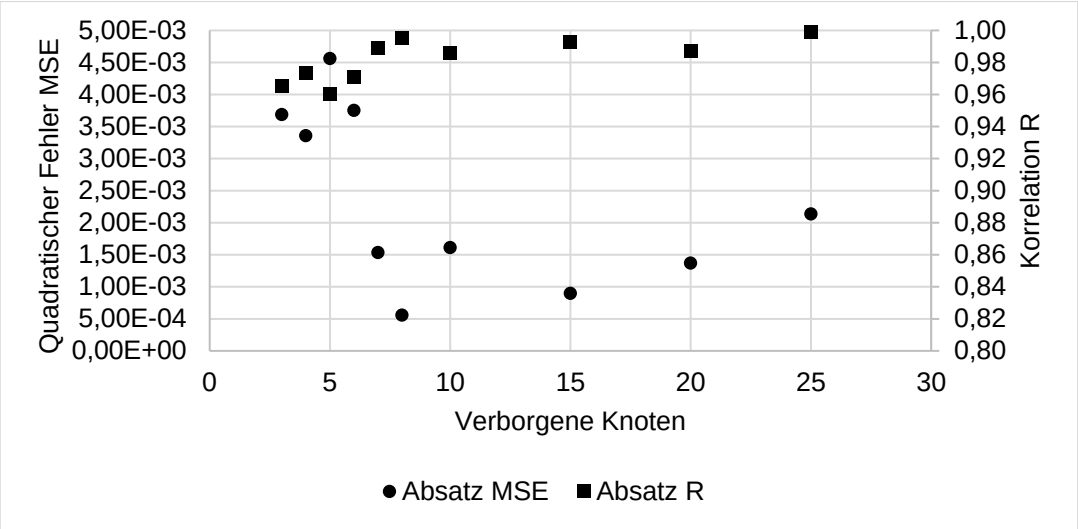


Abbildung 7: Fehlerbetrachtung Absatz

Für den Absatz wird ein Netz mit 8 verdeckten Knoten gewählt, für die Ringnut mit 11 Knoten. Um auf Basis der von den KNNs bestimmten Geometrieverhältnisse Formzahlen zu bestimmen, wird an dieser Stelle auf Formzahlfunktionen aus der einschlägigen Literatur zurückgegriffen [6]. Alternativ können hier auch KNN eingesetzt werden, wie sie erstmals von Dias et. al. [3] verwendet wurden.

Das Gesamtsystem wurde mit der bereits eingangs in Abbildung 2 gezeigten Welle unter Torsionsbelastung erprobt. Als Referenzlösung wurde eine FEM-Berechnung durchgeführt. Die Kritikalität einer Kerbe wird als Quotient aus Formzahl und Widerstandsmoment gegen Biegung oder Torsion bzw. Querschnittsfläche im Fall von axialer Belastung angegeben und ist somit eine reine Geometriegröße. Der Vergleich zwischen Abschätzung und FE-Lösung in Abbildung 10 zeigt, dass die kritische Kerbe sicher identifiziert werden kann. In der Fehlerbetrachtung wird deutlich, dass die Ungenauigkeiten größtenteils durch schlechte Abschätzung des Kerbradius verursacht werden. Dies ist auf die geringe Auflösung der Eingangsschicht des neuronalen Netzes zurückzuführen. Eine Verbesserung ist möglich, indem die Auflösung vergrößert wird.

Voruntersuchungen zeigen auch, dass die Erkennung der Kerbmerkmale auf Basis von Pixelgrafiken in ähnlicher Qualität funktioniert.

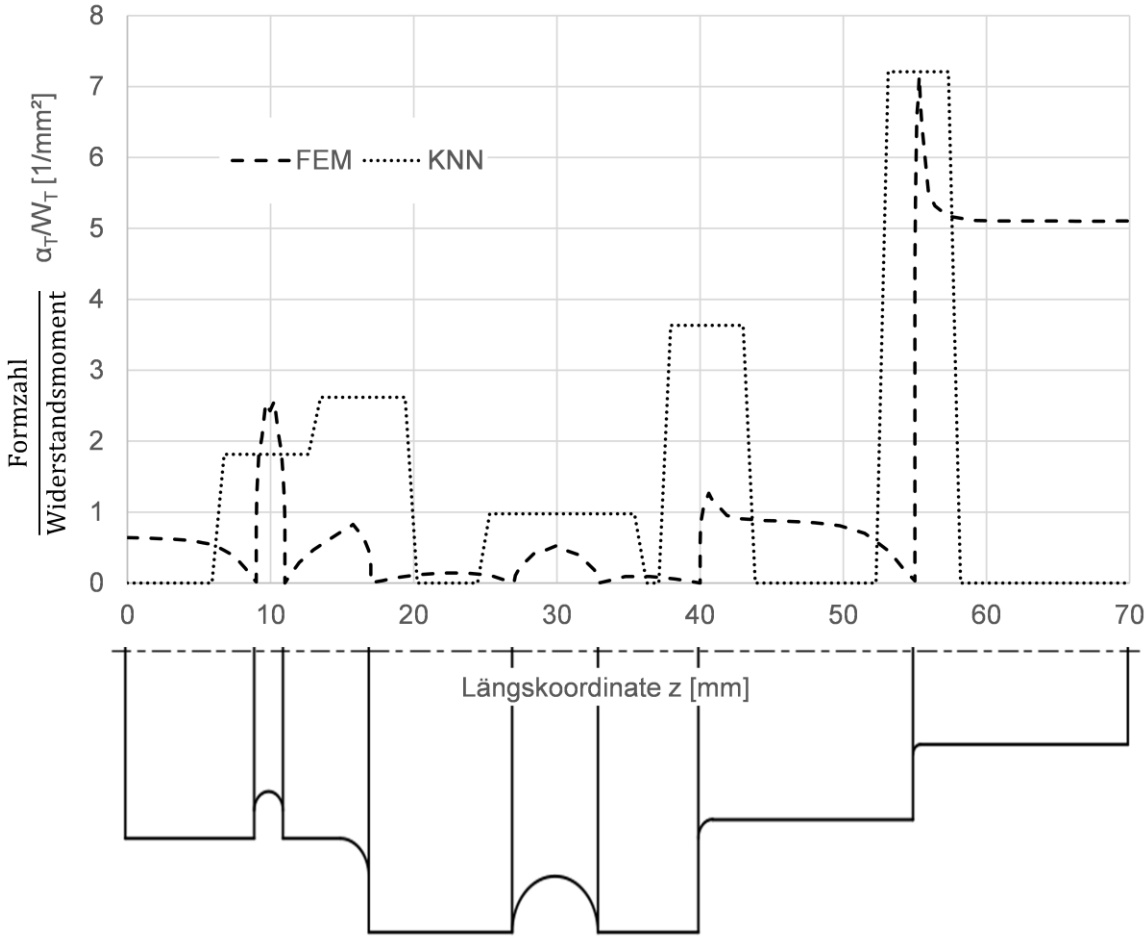


Abbildung 10: Gesamtauswertung

5 Anwendung im Festigkeitsnachweis

Die bisherigen Untersuchungen zeigen ein erhebliches Potential der eingesetzten Technik auf. Allerdings muss ein Verfahren entwickelt werden, das den Festigkeitsnachweis komplexer Bauteile verbessern kann. Dies ist möglich, wenn das Verfahren zur Unterstützung von finite-Elemente-Methoden eingesetzt wird.

Um aussagekräftige Ergebnisse aus FEM-Berechnungen zu erhalten, ist ein an die Problemstellung angepasstes Netz erforderlich. Dieses kann iterativ mit den in Abbildung 10 dargestellten Verfahren erzeugt werden. Zunächst wird das Bauteil mit einem groben Netz gelöst. Aus dieser Lösung können keine sicheren Aussagen über örtliche Spannungen gezogen werden. Durch die Integration über Querschnitte ist es aber möglich, Nennspannungen mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Zudem können Bereiche großer bzw. kleiner Vergleichsspannung identifiziert werden. Nun wird die Geometrie mit KNN nach Kerben durchsucht, und es werden die Formzahlen der Kerben abgeschätzt. So kann auf ungefähre örtliche Spannungen geschlossen werden, die eine Priorisierung der Kerben ermöglichen. Als potentiell kritisch betrachtete oder Bereiche hoher Vergleichsspannung mit unbekannter Kerbgeometrie werden nun zu Submodellen freigeschnitten und können unabhängig und parallel gelöst werden. Hierbei werden die verwendeten Diskreditierungen iterativ verfeinert, bis eine hinreichende Genauigkeit der bestimmten Spannungen erreicht ist. Die Bestimmung der Fehler kann über Konvergenzanalysen oder a priori-Fehlerabschätzung nach Bangerth und Rannacher [8] erfolgen.

Mit Hilfe der berechneten örtlichen Kerbspannungen und abgeschätzter numerischen Fehler kann die Güte der Kritikalitätsabschätzung kontrolliert werden. Wenn bisher unbekannte Kerbtypen auftauchen, können diese zur Datenbank hinzugefügt werden. Die berechneten örtlichen Spannungen können zudem eingesetzt werden, um die eingesetzten Formzahlberechner zu verbessern. Somit entsteht ein Berechnungsverfahren, das autonom problemorientierte FE-Netze erzeugen und lösen kann.

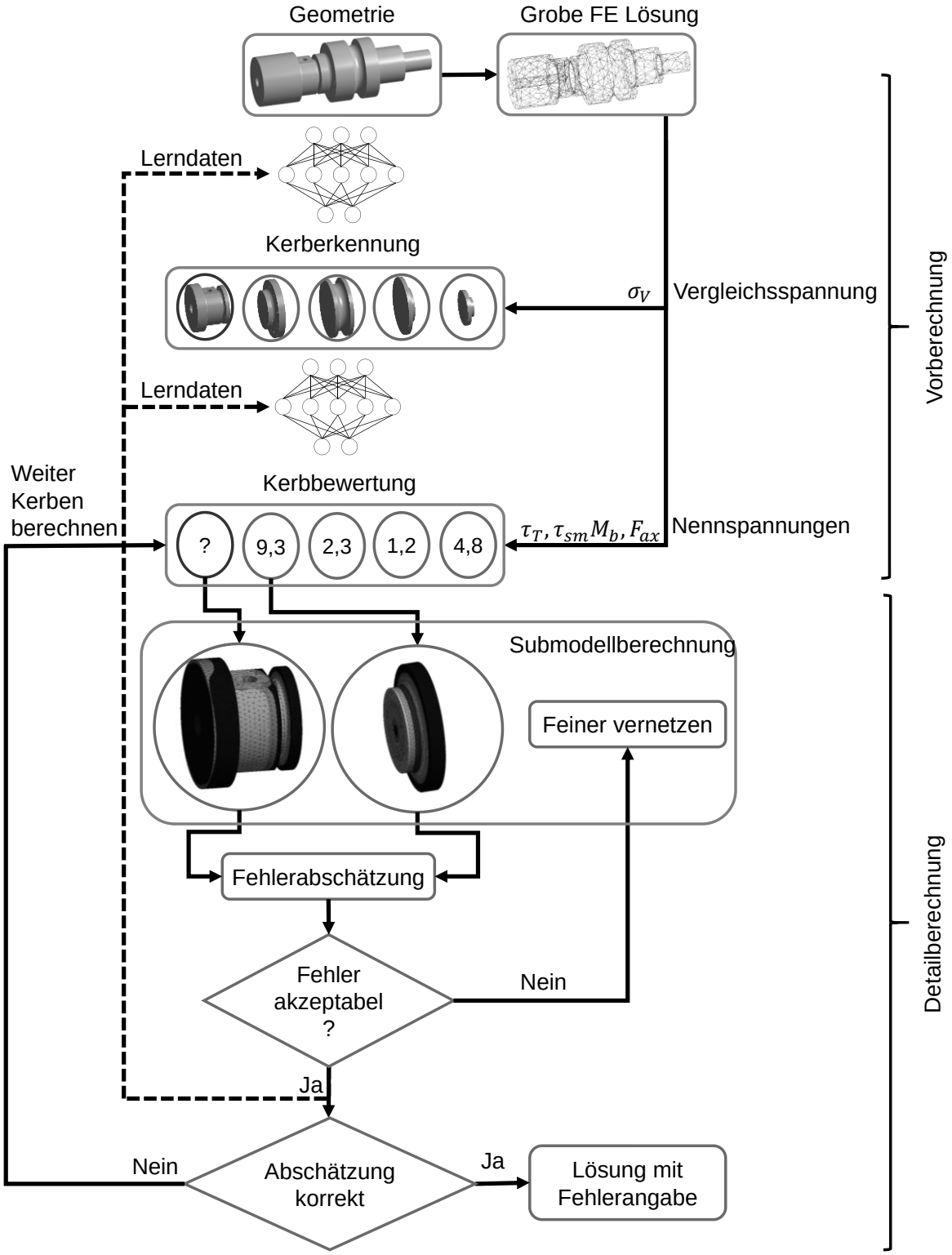


Abbildung 10: Einbindung von KNN in den FEM Lösungsprozess

6 Fazit und weiteres Vorgehen

Im nächsten Schritt sollte ein tiefes neuronales Netz entwickelt werden, das das Finden von Kerben aus dreidimensionaler Geometrie erlaubt. Zudem muss die Vorhersagegenauigkeit der Netze zur Kerbuntersuchung verbessert werden. Momentan wird ein für die in Abschnitt 5 genannte Verfahrensweise geeigneter Vernetzer entwickelt.

Literatur

[1] Rosenblatt, Frank: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism (1961)

[2] Hagan, Martin T.; Menhaj, Mohammad B.: *IEEE Transactions On Neural Network: Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm; Vol. 5, 1994*

[3] Cardoso, Ademar A.; Dias,Augusto Oscar B.; Dias, Carlos A.N.: *Proceedings of the Eighth (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference Montreal, Canada: A New Approach to Calculate Stress Concentration Factors: Artificial Neural Networks; Vol. IV* – ISBN 1-880653-38-9

[4] Zhang, Y M; Zhang, L; Zheng, J X; Wen B C: *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers: Neural network for structural stress concentration factors in reliability-based optimization; Vol. 220, Part G, 2006*

[5] Dabiri, Mohammad; Ghafouri, Mehran; Björk, Timo.: *Journal of Structural Mechanics: Estimation of stress concentration factor in butt and T-welded joints utilizing artificial neural network-based models; Vol. 50, No 3, 2017*

[6] Schlecht, Berthold: *Maschinenelemente – Tabellen und Formelsammlung*. Dresden: Pearson, 2011. ISBN – 978-3827371478

[7] Garcia-Garcia, Alberto; Gomez-Donoso, Francisco; Et al.: PointNet: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN): A 3D Convolutional Neural Network for real-time object class recognition, 2016

[8] Bangerth, Wolfgang; Rannacher, Rolf: *AdaptiveFinite Element Methods for Differential Equasions*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2003.

KT2019

Agile Methoden des Model-Based Engineering

Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit

Christian Heinrich

Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal
Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld
E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: https://www.imw.tu-clausthal.de

Inhalt: *Druckkammlagerungen können in schrägverzahnten Getrieben zur Wirkungsgradsteigerung eingesetzt werden. Zur Verringerung ihrer Verlustleistung ist eine Erhöhung der Hertzschen Pressung notwendig, welche bisher in Prüfstandsversuchen zu Grübchenbildung geführt hat. In einer Kopplung der Elastohydrodynamiksimulation mit einer Finite-Elemente-Berechnung zur Abbildung der Platten- und Wellensteifigkeit kann Kantentragen als möglicher Grund nachgewiesen werden. Dies führt zur Empfehlung, Druckkamm und Anlaufring mit gleicher Steifigkeit zu konstruieren.*

Stichwörter: *Druckkamm, Elastohydrodynamik, Kantentragen, Simulationskopplung, Boussinesq-Halbraum*

Simulation of thrust cones considering plate and shaft stiffness

Abstract: *Thrust cone bearings can be used to increase the efficiency of helical gearboxes. In order to reduce their power loss, the Hertzian pressure needs to be increased. This previously lead to pitting damage on test rigs. Linking a simulation of elastohydrodynamics and a finite element simulation for plate and shaft stiffness, edge loading can be demonstrated as a possible explanation. This leads to the recommendation of designing thrust cones and gear rim with equal stiffness.*

Keywords: *Thrust cone, elastohydrodynamic lubrication, edge loading, co-simulation, Boussinesq half space*

1 Einleitung

Druckkammlagerungen dienen der Axialkraftübertragung zwischen parallelen, rotierenden Wellen. Sie bestehen aus zwei runden Platten mit kegelig angeschliffenen Laufflächen auf der Ritzelwelle („Druckkämme“), die üblicherweise mit ebenfalls kegeligen Laufflächen am Rad („Anlaufringe“) jeweils einen konvergenten Spalt bilden, welcher unter Ölzufuhr und Rotation eine hydrodynamische Trennung der Oberflächen ermöglicht.

Werden Druckkämme in schrägverzahnten Getrieben zur Aufnahme der Verzahnungs-

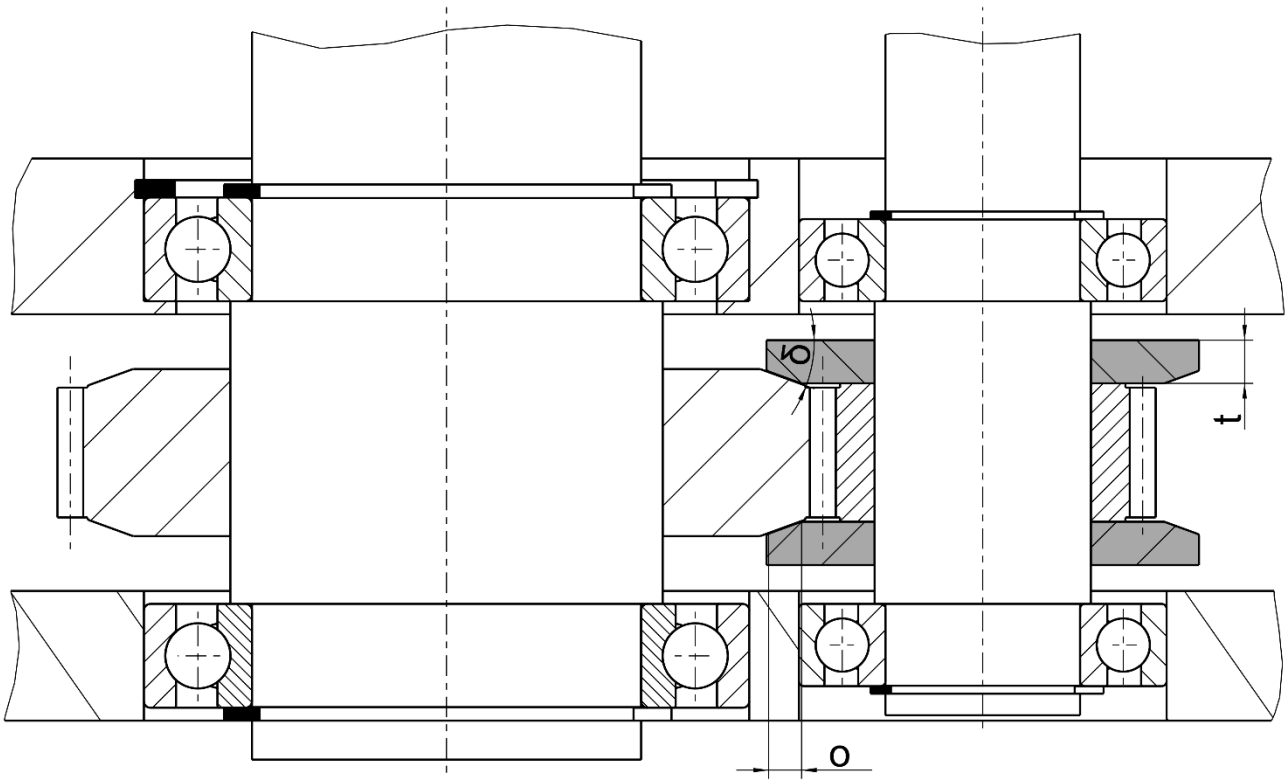


Abbildung 1: Druckkammanordnung im schrägverzahnten Getriebe mit grau markierten Druckkämmen und den geometrischen Größen Kegelwinkel δ, Überdeckung o und Plattendicke t

axialkraft und somit zur axialen Entlastung der Wälzlagerung eingesetzt, können kleinere Wälzlager oder andere Bauformen eingesetzt werden. In [1] wurde eine signifikante Steigerung des Getriebewirkungsgrades bei Einsatz einer Druckkammlagerung mit axial lastfreien Rillenkugellagern anstelle der sonst notwendigen Kegelrollenlager experimentell nachgewiesen.

Bevor Wirkungsgradsteigerungen in weiteren Getriebekonstruktion, beispielsweise von Zylinderrollenlagern ausgehenden oder gar bei gleichbleibenden, jedoch axial entlasteten Wälzlagern, erzielt werden können, besteht die Herausforderung, die Verlustleistung des Druckkamms als zusätzlichen tribologischen Kontakt weiter zu optimieren.

Wichtigste geometrische Einflussgrößen der Verlustleistung sind neben der radialen Lage des Kontaktgebiets der Kegelwinkel und die Überdeckung (Abbildung 1). Ein höherer Kegelwinkel bzw. eine geringere Überdeckung führen bei bzgl. Axialkraft und Drehzahl gleichbleibendem Betriebszustand sowie gleicher Übergangsdrehzahl aus der Mischrebung zu einer geringeren Verlustleistung. Diese Parametervariationen führen jedoch zu höheren

nominalen Hertzschen Pressungen. In Versuchen [2, 3] auf einem Zweischeibenprüfstand (Abbildung 3) wurde an nitrierten Proben der Werkstoffe 30CrNiMo8 und 34CrMo4 Ausfall durch Grübchenbildung bei rechnerischen Pressungen mit einem Mittelwert von 248 MPa und einer Standardabweichung von 61 MPa beobachtet, was unter Anwendung einer Student-t-Verteilung aufgrund der beschränkten Stichprobenmenge für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% zu einer zur Auslegung anzuwendenden Grenze von lediglich 118 MPa führt. Die Grübchen-Dauerfestigkeit derselben Werkstoffe wird in Tabellen für die Verzahnungsauslegung jedoch mit 1000 MPa angegeben [4], also etwa eine Größenordnung höher. Dies legt nahe, dass in der Realität lokale Pressungsspitzen auftreten. In Verbindung mit der Feststellung, dass in Verschleißversuchen der Abtrag stark einseitig erfolgt (Abbildung 2), wird Kantentragen vermutet, welches in dieser Veröffentlichung genauer untersucht werden soll.

Simulationen der Elastohydrodynamik von Druckkämmen sind aus [1] und [5] bekannt. In beiden Programmen wird die Laufflächendeformation aufgrund des Drucks in der Halbraumdarstellung nach Boussinesq gelöst. Diese ermöglicht eine sehr schnelle Berechnung der Spaltdeformation auf demselben Rechengitter wie die Lösung der Druckverteilung.
Dabei wird die Deformation $u_{f,i}$ an einem Gitterpunkt i durch den Druck p_j an Stelle j durch Multiplikation mit der vorberechneten abstandgewichtenden Einflusszahl $d_{i,j}$ bestimmt, deren Berechnung beispielsweise in [6] angegeben ist:

$$u_{f,i} = d_{i,j} \cdot p_j \tag{1}$$

Die Gesamtdeformation an einem Punkt durch alle Einzeldrücke ergibt sich aus der Addition der Einzelverformungen.

Während die Voraussetzung der unendlichen Ausdehnung des Halbraumes in alle Raumrichtungen in die Tiefe, in Umfangsrichtung und radial in Richtung der Wellenachse annähernd erfüllt wird, wird sie in radial exzentrische Richtung verletzt, da dort mit dem Druckkammaußendurchmesser eine Körperkante liegt.

Weiterhin kann mit der ausschließlichen Deformationsberechnung nach Boussinesq die Steifigkeit des restlichen Systems in Form der möglichen Platten- und Wellenbiegung o. Ä. nicht abgebildet werden.

Insbesondere bei der in Abbildung 1 dargestellten üblichen Konstruktionsvariante, in der eine vergleichsweise dünne, biegeweiche Druckkammscheibe an die Stirnseite des

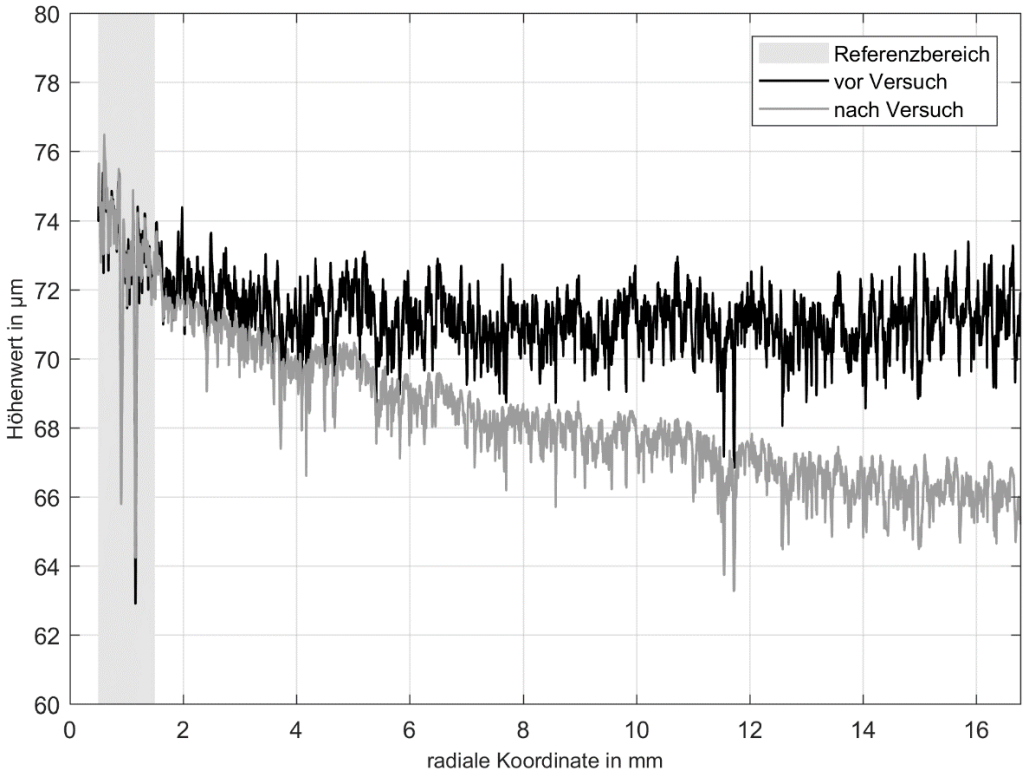


Abbildung 2: Vergleich der Laufflächenhöhe vor und nach dem Verschleißversuch. Der Abtrag ist stark einseitig [2]

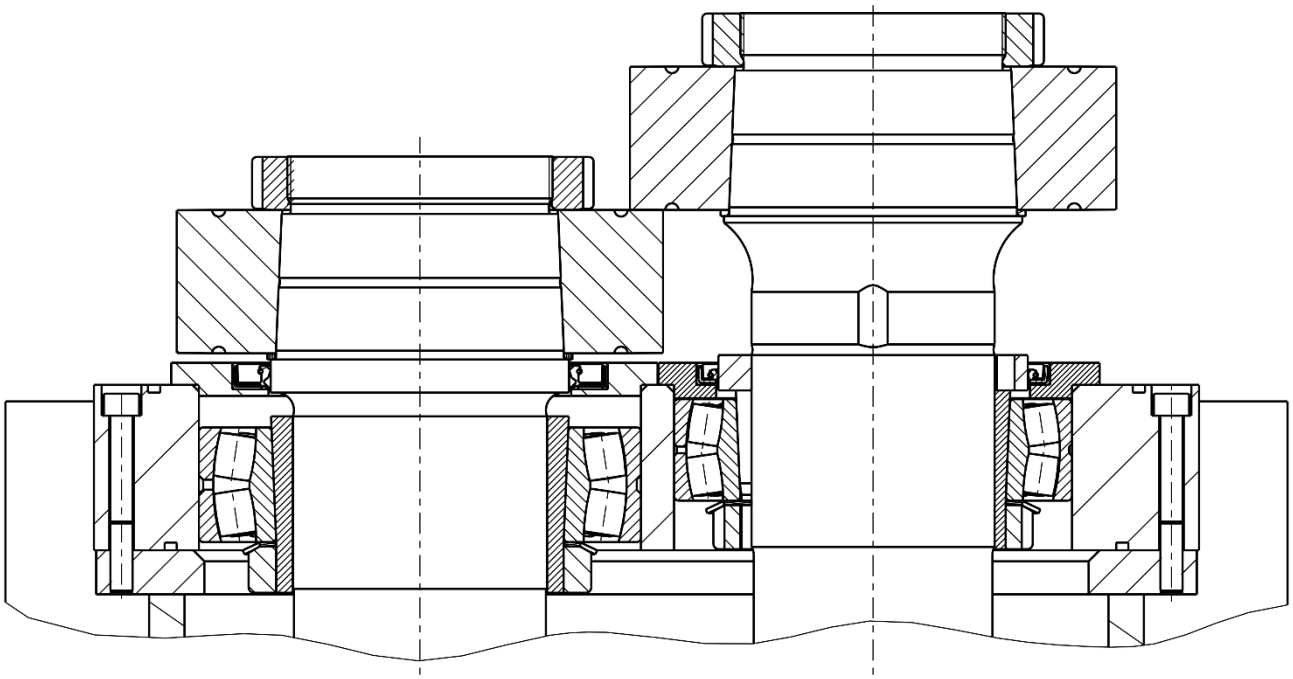


Abbildung 3: Zweischeibenprüfstand. Die rechte Welle wird mit einer Zugkraft beaufschlagt.

breiteren und somit steiferen Rades angreift, kann dies ein unzulässiger Modellierungsfehler sein. Beim Einsatz in Fahrzeuggetrieben werden unter Leichtbaugesichtspunkten möglichst dünne Druckkämme angestrebt.

Um den Einfluss der Plattensteifigkeit genauer zu untersuchen, wird im Rest der Veröffentlichung die Elastohydrodynamiksimulation mit einer Deformationsberechnung des kompletten Druckkamms und Anlaufrings unter Einsatz der Methode der Finiten Elemente (FEM) anstelle des Boussinesq-Halbraums beschrieben.

2 Simulationsverfahren

Als Grundlage dient der institutseigene Matlab-Code, dessen Entwicklung in [1] detailliert beschrieben ist. Eine wesentliche Ergänzung zum dort beschriebenen Stand ist der Ersatz des begrenzt realistischen Gümbel-Kavitationsmodells durch die JFO-Kavitationsrandbedingung [7].

Im Programm wird die Druckentwicklung im Schmierspalt durch Lösung der mit Finiten Volumen (FVM) diskretisierten Reynolds-Differentialgleichung berechnet und in Fixpunktiterationen mit der druckabhängigen Spaltdeformation (Boussinesq-Halbraum) und der druckabhängigen Viskosität und Dichte des Schmierstoffs in ein Gleichgewicht gebracht. Tragkraft und Verlustleistung werden durch Integration der Gittergrößen bestimmt.

Für die hier vorgestellte Untersuchung wird der Spaltdeformationsteil ersetzt. Die druckbedingten Laufflächendeformationen werden nunmehr in je einem FE-Modell für den Druckkamm und einem für den Anlaufring zur Ermittlung der Spalthöhenfunktion zur Tragdruckberechnung bestimmt.

Dazu wird die Scheiben- und ggf. Wellengeometrie im kommerziellen FEM-Programm ANSYS Workbench 19.1 dreidimensional modelliert und mit linearen Quaderelementen vernetzt. Während die Lauffläche im überdeckten Bereich ähnlich fein wie das FVM-Netz diskretisiert wird, kann der Rest des Systems deutlich gröber aufgelöst werden, um die vergleichsweise makroskopische Biegung zu erfassen. Die Einspannungsbedingungen werden bei ihrer Variation in Abschnitt 3 beschrieben.

Da das FEM-System in der Fixpunktiteration zwischen Druck und Verformung sehr oft gelöst werden muss, ist es sinnvoll, das Gleichungssystem nicht jedes Mal von neuem zu lösen, sondern zu Beginn zu faktorisieren. Dafür werden die Steifigkeitsmatrix $\mathbf{K}$ und die

Knotenkoordinaten über APDL-Kommandos (Ansys Parametric Design Language) in Textdateien exportiert und in Matlab eingelesen. Dort wird die symmetrische Steifigkeitsmatrix nach vorheriger Minimum-Degree-Permutation zur Minimierung des Fill-ins, d. h. der Zunahme der Matrixeinträge ungleich Null, mit dem Cholesky-Verfahren zerlegt. Der Zeitgewinn gegenüber einem wiederholten Lösen in ANSYS beträgt etwa zwei Größenordnungen.

Der Transfer zwischen den unterschiedlichen Rechengittern von FVM und FEM wird über eine Interpolation mit radialen Basisfunktionen (RBF) vorgenommen. Dieses der Energieerhaltung genügende Verfahren [8] zeichnet sich gegenüber anderen durch hohe Genauigkeit aus [9]. Eine Interpolation ist auch zwischen unstrukturierten oder lokal unterschiedlich aufgelösten Gittern möglich.

Zum detaillierten Aufbau des Interpolationsverfahrens sei auf [8, 10] verwiesen; wegen der Fokussierung auf die Druckkammanwendung werden nur die zur direkten Aufstellung der Interpolationsmatrix $\mathbf{H}$ notwendigen Gleichungen nach [10] zitiert:

Benötigt wird die Matrix $\mathbf{P}$ mit den Koordinaten x_s, y_s der Festkörperknoten:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{s_1} & \cdots & x_{s_N} \\ y_{s_1} & \cdots & y_{s_N} \end{pmatrix} \tag{2}$$

Die Matrix $\mathbf{M}$ beinhaltet Auswertungen der radialen Basisfunktion ϕ für die N Knoten des Festkörpernetzes mit den vektoriellen Positionen $\mathbf{x}_{s_i}$:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \phi_{s_1 s_1} & \phi_{s_1 s_2} & \cdots & \phi_{s_1 s_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{s_N s_1} & \phi_{s_N s_2} & \cdots & \phi_{s_N s_N} \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\phi_{s_1 s_2} = \phi\left(\left\|\mathbf{x}_{s_1}\right\| - \left\|\mathbf{x}_{s_2}\right\|\right) \tag{4}$$

Diese RBF erzeugt Einflussfaktoren, welche den Beitrag eines Knotens zur Berechnung der Interpolierten eines anderen abstandsbasiert bewerten. Eine Reihe von RBF wird in [10] tabelliert. Für den Transfer zwischen Fluid- und Festkörpergebiet wird ein mit zunehmender Ferne abnehmender Einfluss gewünscht, was besonders deutlich in Funktionen mit begrenztem Einflussbereich („kompaktem Träger“) umgesetzt wird. Hierbei ist die Wendland-C^2-Funktion für gute Ergebnisse bekannt [8, 11]:

$$\phi(\|\mathbf{x}\|) = \begin{cases} (1-\|\mathbf{x}\|/r)^4(4\,\|\mathbf{x}\|/r+1) & \text{für} \quad (1-\|\mathbf{x}\|/r) > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{5}$$

r bezeichnet die radiale Entfernung, ab welcher Knoten keinen Einfluss mehr haben. Schließlich kann mit der Matrix $\mathbf{A}$, welche die Positionen der Fluidknoten mit dem Index f beinhaltet

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & x_{f_1} & y_{f_1} & \phi_{f_1 s_1} & \phi_{f_1 s_2} & \cdots & \phi_{f_1 s_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{f_\mathrm{N}} & y_{f_1} & \phi_{f_N s_1} & \phi_{f_N s_2} & \cdots & \phi_{f_N s_N} \end{pmatrix} \tag{6}$$

und der Definition

$$\mathbf{M}_{\boldsymbol{p}} = (\mathrm{P}\mathrm{M}^{-1}\mathrm{P}^{\mathrm{T}})^{-1} \tag{7}$$

die Transformationsmatrix $\mathbf{H}$ aufgestellt werden:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\boldsymbol{p}}\mathbf{P}\mathbf{M}^{-1} \\ \mathbf{M}^{-1} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}_{\boldsymbol{p}}\mathbf{P}\mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix} \tag{8}$$

Nun können die Knotenverschiebungen der FEM $\mathbf{u}_s$ auf das Netz der FVM $\mathbf{u}_f$ interpoliert werden:

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{H} \cdot \mathbf{u}_s \tag{9}$$

Die Transformation der Drücke $\mathbf{p}_f$ des FVM-Netzes zu $\mathbf{p}_s$ in das FEM-Netz wird ebenfalls unter Anwendung von $\mathbf{H}$ durchgeführt:

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{p}_s = \mathbf{p}_f \tag{10}$$

Zur Lösung des FEM-Gleichungssystems

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_s = \mathbf{f}_s \tag{11}$$

ist noch eine Umrechnung der Drücke $\mathbf{p}_s$ in Kräfte $\mathbf{f}_s$ über einzelnen Knoten zugeordnete Wirkflächen notwendig.

3 Numerische Untersuchung

Die Untersuchungen werden an der Scheibengeometrie des in Abbildung 3 dargestellten Prüfstands mit den Betriebsparametern der besprochenen Pittingversuche durchgeführt. Detaillierte technische Zeichnungen werden in [1] zur Verfügung gestellt. Der Kegelwinkel beträgt 1,0°, die Außendurchmesser 220 mm, die Überdeckung 16 mm. Die Antriebsdrehzahl beträgt 840 1/min, der Schlupf 10 %, die Ölviskositätsklasse ISO VG 46.

3.1 Boussinesq-Randbedingungen

Zuerst wird eine Verifikation der neuen Implementation durch Vergleich der Ergebnisse einer Berechnung mit dem bisher eingesetzten Boussinesq-Halbraum und einem FEM-Modell, welches die Randbedingungen des Halbraumes näherungsweise abbilden soll, durchgeführt. Dafür werden die Scheiben mit einem größeren Außendurchmesser von 278 mm modelliert, so dass die Lauffläche in beide radiale Richtungen gleich weit von einer Körperkante entfernt ist. Die Scheibenrückseite wird festgelagert. Die Druckverteilungen in Abbildung 4(a) und 4(b) für eine rechnerische Hertzsche Pressung von 160 MPa zeigen gute Übereinstimmung. In Abbildung 4(f) ist die Schmierspalthöhe in Laufflächenbreiten-, d. h. in radialer Richtung an der Stelle des EHD-Staurands aufgetragen; bei ähnlicher Krümmung muss eine etwas geringere Schmierspalthöhe in der FEM-Variante festgehalten werden.

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Körperkante auf das Rechenergebnis überprüft. Abbildung 4(c) zeigt das Resultat bei Modellierung der Scheibe mit korrektem Außendurchmesser und rückseitiger Festlagerung zur Elimination des Einflusses der Biegesteifigkeit. In Abbildung 4(d) erfolgt die Festlagerung lediglich am Scheibeninnendurchmesser, die Scheibe ist hier also biegeweich.

Während nur mit Mühe eine minimale Abweichung zwischen den zwei Einspannungsbedingungen festgestellt werden kann, ist der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Positionen des Druckkammaußendurchmessers gut sichtbar. Der „Druckberg“ ist in Berechnungen nach der Halbraumtheorie breiter; der EHD-Staurand liegt höher; der Spalt ist stärker gekrümmt. Trotz der Verschiedenheit der Form unterscheiden sich in diesem Beispiel die auslegungsrelevanten Kenngrößen Maximaldruck und minimale Schmierspalthöhe um weniger als 2 % und werden so wahrscheinlich von anderen Modellierungsfehlern deutlich übertroffen. Mit steigenden Drücken und steigender Deformation sowie geringerer Laufflächenbreite – all dies sind Entwicklungsziele – wird die Abweichung jedoch steigen und irgendwann nicht mehr vernachlässigbar sein.

3.2 ungleiche Steifigkeit

Lebensdauerversuche an Druckkämmen wurden in der Vergangenheit an einem Zweischeibenprüfstand nach Abbildung 3 durchgeführt, bei welchem die Scheiben durch die fliegende

Lagerung einfach gewechselt werden können. Die Plattendicke entstammt einer Auslegung für den Verdichterbau, in welchem der Druckkamm mit einem Pressverband gefügt wird, welcher unter der exzentrisch angreifenden Axialkraft nicht aufklaffen soll. In Abbildung 4(e) ist das Simulationsergebnis unter Berücksichtigung ebendieser fliegenden Lagerung bei einer rechnerischen Pressung von 160 MPa zu sehen. Die Welleneinspannung erfolgt auf Höhe der Pendelrollenlager. Die Druckentwicklung und der Spalthöhenverlauf sind im Gegensatz zu den bisher betrachteten Ergebnissen in radialer Richtung asymmetrisch. Bei einer Erhöhung der rechnerischen Pressung über die in Abbildung 4 betrachteten 160 MPa kommt es lokal zu enormen Druckspitzen für deren exakte Quantifizierung ein örtlich deutlich feiner aufgelöstes Netz mit prohibitivem Rechenzeitbedarf notwendig wäre. Von anderen Maschinenelementen ist jedoch bekannt, dass die Druckspitze leicht ein Vielfaches des Spitzendrucks ohne Schiefstellung erreichen kann [12]. Neben dem geführten Nachweis der Existenz ist der Beleg einer konstruktiven Maßnahme zur Vermeidung der Drucküberhöhung durch das Kantentragen für die technische Anwendung erst einmal von größerer Relevanz.

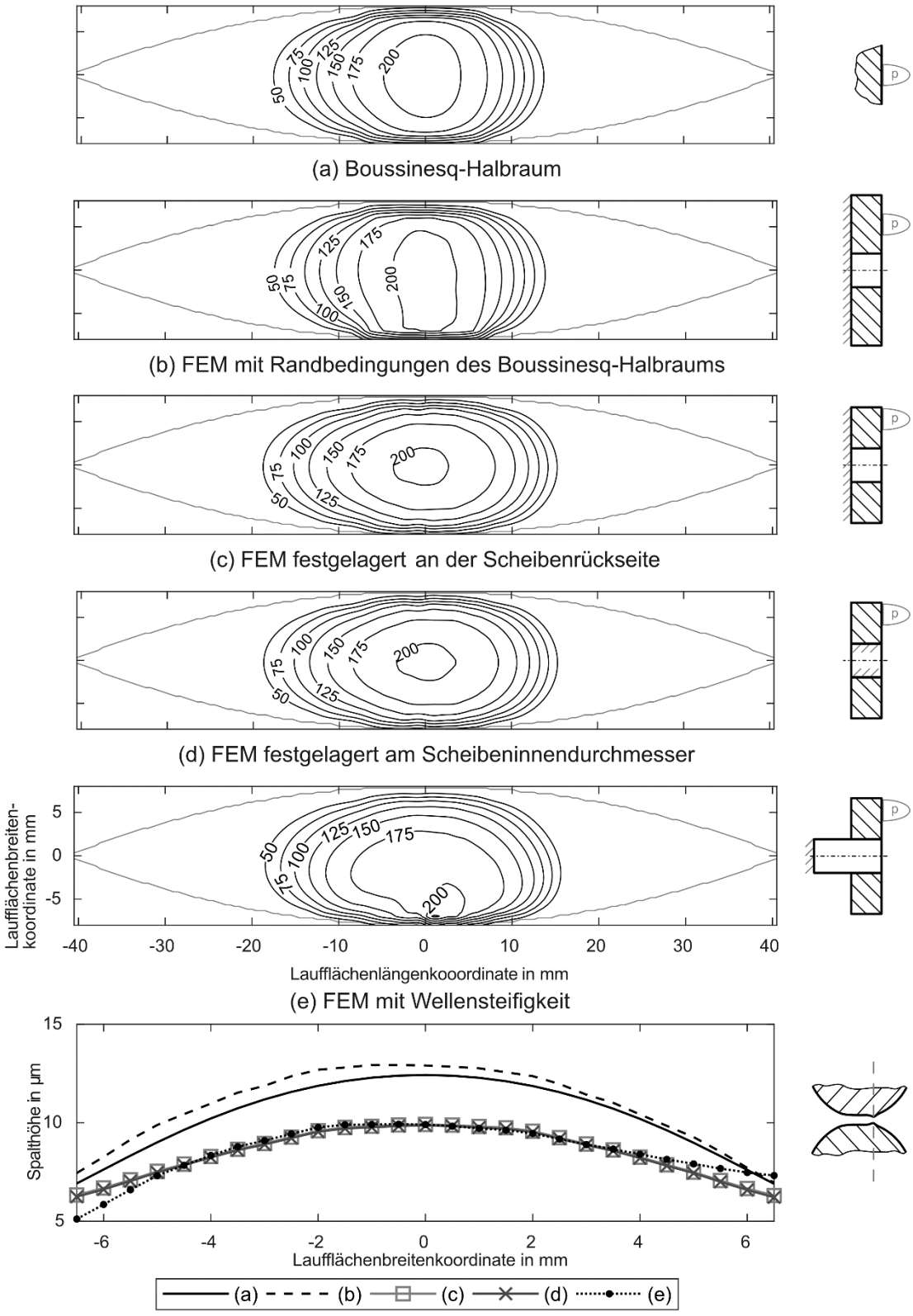
Abgesehen vom oft nur schwer umsetzbaren Vorschlag, noch steifer zu bauen, kann aus Abbildungen 4(c) und 4(d) die Empfehlung, mit gleicher Steifigkeit zu bauen, getroffen werden.

Während die Wellensteifigkeitsverhältnisse am Zweischeibenprüfstand für die reale Anwendung im Getriebe wenig Relevanz besitzen, da Verzahnungen üblicherweise nicht fliegend gelagert werden, und im Getriebe der Weg zwischen Axialkrafteinleitung und -ausleitung und somit die dadurch biegemomentenbelastete Wellenlänge deutlich kürzer ist, kommt die ungleiche Steifigkeit in der Anwendung bei der Plattendicke zum Tragen.

So werden nämlich bauraumbedingt üblicherweise dünne Druckkammscheiben mit Anlaufringen an der Radstirnseite gepaart, wobei das Rad deutlich breiter ist als die Druckkämme (Abbildung 1).

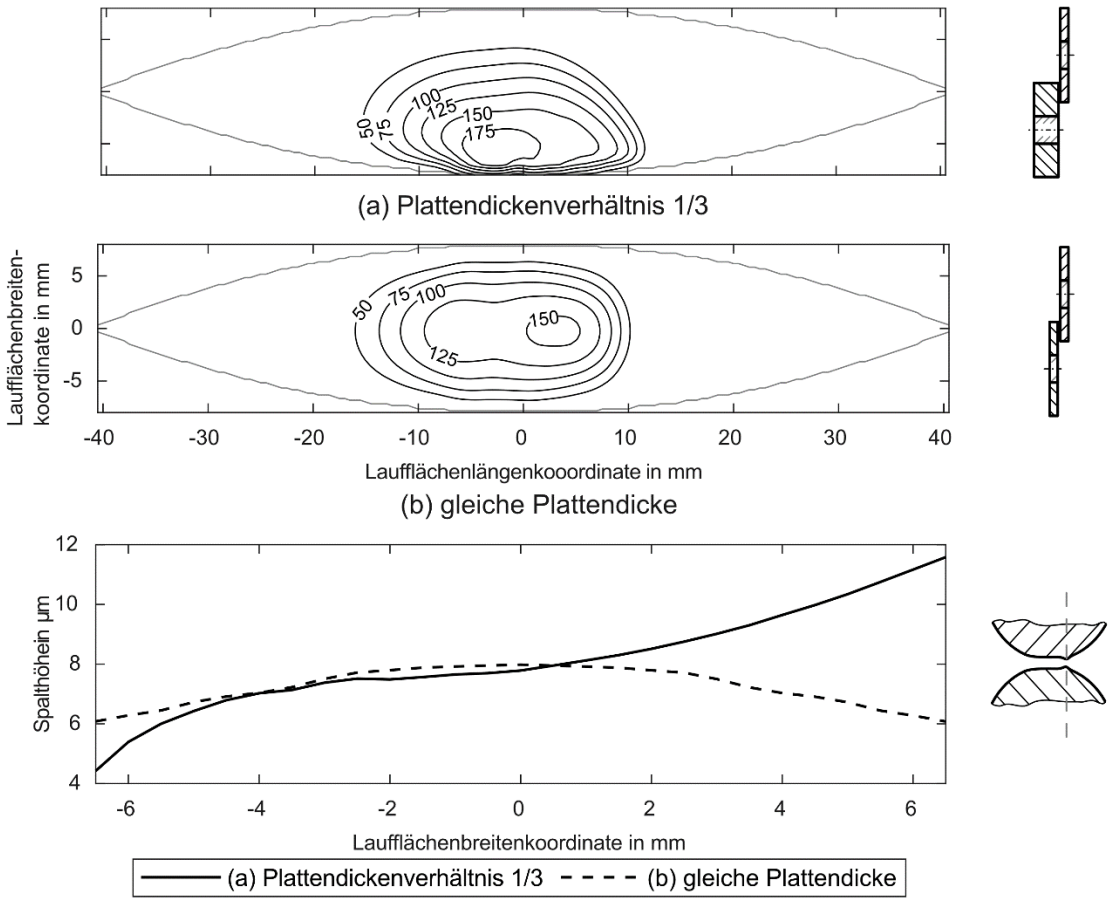
An einem weiteren am Institut vorhandenen Prüfstand (Vergleichsprüfstand aus [1]) beträgt die Druckkammbreite lediglich ein Drittel der Zahnradbreite.

Dieses Breitenverhältnis wird für die beschriebene Druckkammlagerung bei einer hier für deutliches Kantentragen genügenden rechnerischen Pressung von 120 MPa mit Festlagerung am Innendurchmesser untersucht.



(f) Spalthöhen bei der Laufflächenlängenkoordinate des EHD-Staurands
Legendeneintrag (a) bezeichnet die Randbedingung aus Unterabb. (a)

Abbildung 4: Simulationsergebnisse unter verschiedenen Randbedingungen
Unterabbildungen (a) bis (e) zeigen den Druck in MPa mit einer Stufung der Isobaren von 25 MPa



(c) Spalthöhen bei der Laufflächenlängenkoordinate des EHD-Staurands
Legendeneintrag (a) bezeichnet die Randbedingung aus Unterabb. (a)

Abbildung 5: Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Plattendickenverhältnissen
Unterabbildungen (a) und (b) zeigen den Druck in MPa mit einer
Stufung der Isobaren von 25 MPa

In Abbildung 5(a) sind bei der ungleichen Plattensteifigkeit, wie bereits aus Abbildung 4(e) bekannt, deutliche Asymmetrie sowie höhere Drücke als im Fall der gleichen Plattensteifigkeit in Abbildung 5(b) (beide dünn, d. h. 1/3 der ursprünglich angenommenen Breite) erkennbar. Der Spalthöhenverlauf in Abbildung 5(c) zeigt Schiefstellung sowie eine niedrigere minimale Spalthöhe. Der Schmierspalt ist im Fall der gleichen Plattendicke aufgrund der Plattenbiegung um 0,06° bzw. 6 % des Kegelwinkels gegenüber der Ausgangslage gekippt (Abbildung 4(d) um 0,01° – 1 %).

4 Fazit

Mit der vorgestellten Simulationstechnik kann der Beginn von schädlichem Kantentragen ermittelt werden. Darauf folgend können Konstruktionsvarianten untersucht werden, die dieses verhindern sollen. Hierzu wird der Hinweis auf das Erfordernis gleicher Steifigkeit gegeben. Wenn nicht ein Teil versteift werden soll, kann das andere möglicherweise durch Einstiche o. Ä. geschwächt werden. Sollen keine konstruktiven Gegenmaßnahmen ergriffen werden, kann stattdessen der genaue zulässige Betriebsbereich bestimmt werden.

Zusätzlich zu Abbildung 2 konnte ein weiteres starkes Indiz für Kantentragen im relevanten Lastbereich bei Prüfstandsversuchen zur ertragbaren Hertzschen Pressung von Druckkämmen gefunden werden. Mit einem konstruktiv verbesserten Prüfstand werden so höhere Belastungen möglich. Sollten experimentell deutliche Laststeigerungen erreicht werden, muss die Anwendbarkeit des Boussinesq-Halbraums erneut überprüft werden.

Literatur

[1] Heß, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben. 1. Aufl. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag, 2018

[2] Heß, M.: Untersuchung an Laufflächen von Druckkammlagern im Mischreibungsgebiet. In: *IMW – Institutsmitteilung* Bd. 41 (2016), S. 47–60

[3] Heß, M.: Ergebnis experimenteller Untersuchungen für Druckkammlager im Mischreibungsgebiet. Publikationsserver der TU Clausthal. https://doi.org/10.21268/20170718-120141 (2017)

[4] Linke, H.; Börner, J.: Stirnradverzahnung: Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. München: Hanser, 1996

[5] Barragan de Ling, F.: *Lubrication of Thrust Cones*. Cardiff, University of Wales, 1993

[6] Hamrock, B.; Schmid, S.; Jacobson, B.: Fundamentals of fluid film lubrication. 2. Aufl. New York: Marcel Dekker, 2004

[7] Woloszynski, T.; Podsiadlo, P.; Stachowiak, G.: Efficient Solution to the Cavitation Problem in Hydrodynamic Lubrication. In: *Tribology Letters* Bd. 58 (2015), Nr. 1

[8] Beckert, A.; Wendland, H.: Multivariate interpolation for fluid-structure-interaction problems using radial basis functions. In: *Aerospace Science and Technology* Bd. 5 (2001), Nr. 2, S. 125–134

[9] Buhmann, M.: Radial basis functions. In: *Acta Numerica* Bd. 9 (2000), S. 1–38

[10] Rendall, T.; Allen, C.: Unified fluid–structure interpolation and mesh motion using radial basis functions. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Bd. 74 (2008), Nr. 10, S. 1519–1559

[11] de Boer, A.; van Zuijlen, A.; Bijl, H.: Comparison of conservative and consistent approaches for the coupling of non-matching meshes. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Bd. 197 (2008), Nr. 49–50, S. 4284–4297

[12] Kushwaha, M.; Rahnejat, H.; Gohar, R.: Aligned and misaligned contacts of rollers to races in elastohydrodynamic finite line conjunctions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* Bd. 216 (2002), Nr. 11, S. 1051–1070

Modellbasierte IKT-Selektion für Methodentätigkeiten in der standortverteilten Produktentwicklung

Katharina Duehr, Jonas Kampermann, Patrick Taplick*, Iris Gräßler*, Albert Albers

IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 10, Geb. 10.23, 76131 Karlsruhe
E-Mail: katharina.duehr@kit.edu; Internet: http://www.ipek.kit.edu

*Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn
E-Mail: patrick.taplick@hni.upb.de; Internet: http://www.hni.uni-paderborn.de

Inhalt: *Durch die Globalisierung, den zunehmenden Wettbewerbsdruck sowie die wachsenden Kundenanforderungen setzen immer mehr Unternehmen auf die Vorteile global verteilter Entwicklungsnetzwerke. Die Verfügbarkeit neuer Technologien zur Unterstützung der standortverteilten Produktentwicklung treibt diese Entwicklung zusätzlich voran. Gepaart mit dem zunehmenden Auftreten agiler Ansätze führen die organisationalen Veränderungen zur steigenden Komplexität des Entwicklungsprozesses und fordern methodische Unterstützung. Die Vielzahl der verfügbaren Methoden sind jedoch bisher nur größtenteils auf die standortgebundene Anwendung ausgelegt. Der vorliegende Beitrag widmet sich daher der Erstellung eines Modells zur systematischen Unterstützung standortverteilter Methodenanwendung durch die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien.*

Stichwörter: *Standortverteilte Produktentwicklung, Entwicklungsmethoden, ASD – Agile Systems Design, IKT*

Model-based ICT selection for method activities in distributed product engineering

Abstract: *As a result of globalization, increasing competitive pressure and growing customer requirements, more and more companies are relying on the advantages of globally distributed development networks. The availability of new technologies to support distributed product development also drives this trend. Paired with the increasing occurrence of agile approaches, organizational changes lead to the increasing complexity of the development process and require methodical support. However, the large number of available methods are only designed for location-bound applications. Therefore, this contribution addresses the development of a model for the systematic support of location-distributed application of methods through the use of information and communication technologies.*

Keywords: *Distributed product development, Development methods, ASD – Agile Systems Design, ICT*

1 Einleitung

Der globale Wettbewerbsdruck, kürzere Produktlebenszyklen sowie die zunehmende Notwendigkeit, schnell auf sich verändernde Kundenanforderungen zu reagieren, sind aktuelle Trends, die den zurzeit vorherrschenden organisatorischen Wandel vorantreiben. Um auf diese Veränderungen reagieren zu können, setzen viele Unternehmen auf standortverteilte (virtuelle) Teams und agile Herangehensweisen. Standortverteilte Entwicklungsnetzwerke bieten Vorteile wie beispielsweise den vereinfachten Zugriff auf weltweit verteilte Kompetenzen oder den besseren Zugang zu globalen Märkten [1]. Es zeigt sich jedoch, dass der Fortschritt der Produktdigitalisierung eines Unternehmens oftmals einen deutlich höheren Reifegrad aufweist als die Digitalisierung der unternehmensinternen Arbeitsabläufe. Diese stellen jedoch einen der erfolgsrelevantesten Einflussfaktoren einer effektiven und effizienten, verteilten Zusammenarbeit dar. Die Produktentwicklung als kontinuierlicher Problemlösungsprozess war jeher dem Umgang mit Unsicherheiten unterworfen [2]. Mit dem zunehmenden Auftreten agiler Ansätze werden die Möglichkeiten, diesen entgegenzuwirken, immer größer. Agile Ansätze stoßen heutzutage jedoch aufgrund der steigenden Komplexität innerhalb der sozio-technischen Entwicklung mechatronischer Produkte an ihre Grenzen [3]. Verteilte Entwicklungsprozesse sowie auch agile Ansätze erhöhen die Komplexität des Entwicklungsprozesses und verlangen nach methodischer Unterstützung über den kompletten Produktentwicklungsprozess hinweg. Die Literatur weist eine Vielzahl von Methoden zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses auf [4]. Jedoch zeigt sich, dass diese meist nur für den Gebrauch in standortgebundenen Entwicklungsteams ausgelegt sind [5]. Um die bestehenden Methoden auf die Gegebenheiten standortverteilter Entwicklungsteams anzupassen, muss daher die Adaption der Methoden hin zu einem orts- und zeitunabhängigen Informationsfluss unterstützt werden. Um dies zu ermöglichen, existieren diverse Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Die große Anzahl von IKT erschwert jedoch die Selektion geeigneter IKT für die jeweilige Methode und erfordert individuelles Wissen über Methoden sowie IKT, das zurzeit nicht ausreichend vorhanden ist.

2 Stand der Forschung

2.1 ASD – Agile Systems Design

Nach Conboy [6] beschreibt Agilität die ständige Bereitschaft einer Methode, Veränderungen zu schaffen und sich einer Veränderung proaktiv, reaktiv oder interaktiv anzunehmen. Weiterhin beschreibt es die Lernfähigkeit aus Veränderungen, während ein Beitrag zum wahrgenommenen Kundennutzen geleistet wird. Der ganzheitliche Ansatz ASD – Agile Systems Design ermöglicht die Strukturierung agiler Entwicklungen von mechatronischen Systemen unter Berücksichtigung von Prinzipien, Methoden und Prozessen der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Auf den vier verschiedenen Prozessebenen Projekt-, Phasen-, Aktivitäts- und Methodendurchführungslevel wird dabei nach sequentiellen, hybriden und agilen Ansätzen unterschieden, die Entwicklungsteams je nach Situation wählen können. Das Methodendurchführungslevel zeigt, dass Methoden sequentiell nacheinander durchlaufen und bestimme Methoden zur Konkretisierung von Ergebnissen iterativ wiederholt werden können. [7]

2.2 Standortverteilte Produktentwicklung

Um auf kürzere Produktlebenszyklen und wachsende Produktkomplexität reagieren zu können und durch die fortschreitende Digitalisierung stellen sich Unternehmen für die Produktentwicklung zunehmend standortverteilt auf. Die Begriffe *verteilte Teams* und *virtuelle Teams* beschreiben diese Form der Zusammenarbeit. Heimburg und Radisch definieren virtuelle Teams über das Arbeiten in einer Gruppe mit dem Fokus auf einer gemeinsamen Aufgabe an unterschiedlichen Standorten [8]. Weiterhin fokussiert Krause den Informationsaustausch unterteilt in Koordination, Kooperation und Kommunikation bei der standortverteilten Bearbeitung [9]. Zur Interaktion zwischen den Teammitgliedern dienen laut Konradt und Hertel hauptsächlich elektronische Medien [10]. Die Bündelung verteilten Expertenwissens, verkürzte Entwicklungszyklen durch Zeitersparnisse bei asynchroner Zusammenarbeit, sowie Ressourcen- und Lohnunterschiede stellen dabei einen Ausschnitt der Chancen mehrerer Standorte dar [11]. Den Chancen stehen jedoch Herausforderungen in Form von

verlängerten Reaktionszeiten aufgrund verschiedener Zeitzonen, negativen Teamdynamiken durch nicht stattfindende informelle spontane Kommunikation oder Verlust von Informationen durch fehlerhaften Informationsfluss gegenüber [12]. Ahuja stellt zusammenfassend die kommunikativen Schwierigkeiten, begründet durch physische Distanz zwischen Teammitgliedern, in den Vordergrund [13]. Grieb folgert daraus, dass komplexe Vorgänge der verteilten Entwicklung mit einem methodischen Vorgehen unterstützt werden müssen [14].

2.3 Methoden der Produktentwicklung

Gemäß der Definition von Lindemann ist eine Entwicklungsmethode ein operationales, regelbasiertes Element, welches eine Vorgehensweise schrittweise beschreibt und ausgehend von einer Aufgabe oder einer Problemstellung eine Lösung erzeugt [15]. Die einzelnen Schritte von Methoden können durch überschneidungsfreie Grundtätigkeiten beschrieben werden [4]. Mit 26 überschneidungsfreien Grundtätigkeiten liefert Zanker den „Versuch“ einer abgeschlossenen Sammlung von Grundtätigkeiten, mit denen jeglicher Methodenablauf beschrieben werden kann [4]. Gericke et al. fügen der Definition von Methoden hinzu, dass diese als zielfokussierte Unterstützung eines Prozesses dienen und deren vollständiges Potenzial erst bei Anpassung an die entsprechenden Einsatzbedingungen geschöpft wird [16]. Dementsprechend stellt Birkhofer „Meet the design situation“ als das erste der von ihm verfassten zehn Gebote für den erfolgreichen Methodentransfer auf [17]. Der gezielte Einsatz von Produktentwicklungsmethoden führte in der Vergangenheit bereits zu signifikanten Effekten in der Entwicklungspraxis. So bewirkt der Einsatz geeigneter Methoden nach Albers et al. „die Strukturierung einzelner Aktivitäten in der Produktentwicklung, wodurch die jeweiligen Ergebnisse nachvollziehbarer werden“ [18]. Weiterhin wirkt sich der Methodeneinsatz positiv auf die Fehlerquote, Entwicklungszeit und Produktqualität aus. Trotz der wissenschaftlich belegten Vorteile von Methodenanwendung, ist in der Praxis häufig ein „zögerlicher“ Methodeneinsatz zu beobachten [19]. Während Methoden inklusive detaillierter Ablaufbeschreibungen zur Unterstützung der standortgebundenen Produktentwicklungsprozesse existieren [4], fehlt jedoch eine adäquate methodische und technische Unterstützung für standortverteilte Zusammenarbeit [20].

2.4 IKT in der standortverteilten Produktentwicklung

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) ist ein entscheidender Faktor zur Realisierung standortverteilter Teams. Gleichzeitig stellt die Selektion und Anwendung geeigneter IKT eine Herausforderung für den Erfolg dieser Teams dar. Richter et al. stellen heraus, dass eine Vielzahl der IKT zur Verfügung steht, aber häufig nicht effizient genutzt wird [21]. Die IKT lassen sich durch verschiedene Kriterien unterscheiden. Beispielsweise gibt es IKT, die zur synchronen und asynchronen Kommunikation geeignet sind [22]. Die Auswahl geeigneter IKT nach diesem Kriterium ist von der zeitlichen Übereinstimmung von verteilt agierenden Teammitgliedern abhängig. Mat et al. ordnen IKT in die Kategorien Kommunikation, Informationsaustausch, Koordination, Kooperation und Gruppenpflege ein [23]. Kommunikation beinhaltet synchrone und asynchrone Kommunikationsformen. Für die Kategorie Informationsaustausch werden Datenbanken bereitgestellt, die den Abruf der Informationen und Daten für die Teammitglieder ermöglicht. IKT für Koordination umfassen die Handhabung von Prozessen und Arbeitskapazitäten. Zur Kooperation werden IKT benötigt, die kollaborative Bearbeitung von Dokumenten ermöglichen. Um das Teamverhältnis zu stärken, werden Kommunikationsformen zur sozialen Interaktion verwendet. Die Kategorisierung von IKT zeigt, dass im Produktentwicklungsprozess nicht auf eine Lösung zurückgegriffen werden kann, sondern geeignete Formen identifiziert und miteinander verknüpft werden müssen.

3 Forschungsbedarf und Methodik

Die Forschung zu Entwicklungsmethoden für die mechatronische Systementwicklung beschäftigt sich fast ausschließlich mit der Konzeption von Methoden zum Einsatz im standortgebundenen Kontext, nicht aber mit der systematischen Adaption bestehender Methoden für die standortverteilte Anwendung [5]. Wissenschaftliche Arbeiten, die Methodenanwendung im standortverteilten Kontext thematisieren, beschränken sich entweder auf einige ausgewählte Methoden, oder betrachten Methoden als abgeschlossene Hilfsmittel für einzelne Prozessschritte, ohne die benötigten Funktionen von IKT für die Durchführung unterschiedlicher Tätigkeiten im Methodenablauf zu berücksichtigen. Um für Methodenanwender

den Mehrwert einer zielgerichteten Auswahlunterstützung geeigneter IKT für die Methodendurchführung zu schaffen, ergibt sich daher der Bedarf nach einer systematischen Unterstützung der Adaption bestehender Methoden für standortverteilte Entwicklungskontexte mit IKT zur Gewährleistung der ortsunabhängigen Übertragung des Informationsflusses während der Methodendurchführung. Im ersten Schritt sollen dazu folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie muss ein Standard zur Beschreibung von Methoden gestaltet werden, um die Adaption für verteilt agierende Teams zu unterstützen?
- Welche Kriterien müssen bei der Selektion geeigneter IKT für die standortverteilte Anwendung von Methoden betrachtet werden?
- Wie kann der Zusammenhang zwischen Methoden und der benötigten IKT zur standortverteilten Anwendung modelliert werden?

Zur Beantwortung wurden im Rahmen einer Literaturrecherche bestehende Ansätze zur Beschreibung von Methoden sowie die Besonderheiten standortverteilter Entwicklungsprozesse analysiert und zusammengetragen. Darauf aufbauend wurde ein Modell entwickelt, das die Zuordnung von IKT zu Methoden ermöglicht, um die Selektion geeigneter IKT für die Methodendurchführung zu unterstützen. Um den Umgang mit der Vielzahl an Methoden zu ermöglichen, wurde als Grundlage der Ansatz der Elementarmethoden für Grundtätigkeiten von Zanker [4] gewählt. Der Begriff der Methodentätigkeit wurde zur Zerlegung der Methoden in Standardschritte eingeführt. Diese ergänzen die von Zanker aufgeführten Grundtätigkeiten. Die Unterteilung von Methoden in Methodentätigkeiten erlaubt dabei eine generische Zuordnung der IKT zu Methodentätigkeiten unabhängig von der Methode. Zeitgleich wurden auf Basis einer Literaturrecherche IKT, die in verteilt agierenden Teams eingesetzt werden, ausfindig gemacht und gruppiert. Die Ansätze aus der Literatur wurden anschließend im Methodenmodell zur IKT Selektion zusammengetragen. Dabei bezieht sich der Betrachtungsraum des Modells auf synchrone, IKT-basierte Methodenanwendung in standortverteilten Produktentwicklungsteams. Das Modell beinhaltet vier Ebenen, deren Elemente durch logische Verknüpfungen gekoppelt sind und aufeinander aufbauen. Die Verknüpfungen ermöglichen dabei die Selektion geeigneter IKT für ausgewählte Methoden. Das Modell wurde mittels der Kriterien zur Bewertung von Modellen nach Little [24] validiert.

4 Das Ebenenmodell zur IKT-Selektion für Methodentätigkeiten

Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Modell richtet sich primär an Methodenentwickler, deren Aufgabe es ist, vorhandene Methoden an vorherrschende verteilte Entwicklungssituationen anzupassen. Dazu adressiert das Modell die Grundlagen zur Auswahl geeigneter IKT für einen ortsunabhängigen Informationsfluss während der synchronen interaktiven Tätigkeiten innerhalb der Methodendurchführung und unterstützt somit sekundär die Produktentwickler in der Anwendung der Methoden.

4.1 Die Ebenen des Modells

Vor dem Hintergrund einer bedarfsgerechten Selektionsunterstützung von IKT, bildet das Modell (vgl. Abbildung 1) die logische Struktur.
Für die Selektion geeigneter IKT können Methoden nicht als abgeschlossene Gebilde betrachtet werden, da die Durchführung unterschiedlicher Tätigkeiten innerhalb einer Methode unterschiedliche Funktionen von IKT fordern. Aus diesem Grund wurden methodenunabhängige Aktivitätenbausteine, genannt Methodentätigkeiten, identifiziert, die aneinandergereiht die elementaren Tätigkeiten zur Durchführung der Methoden bilden.

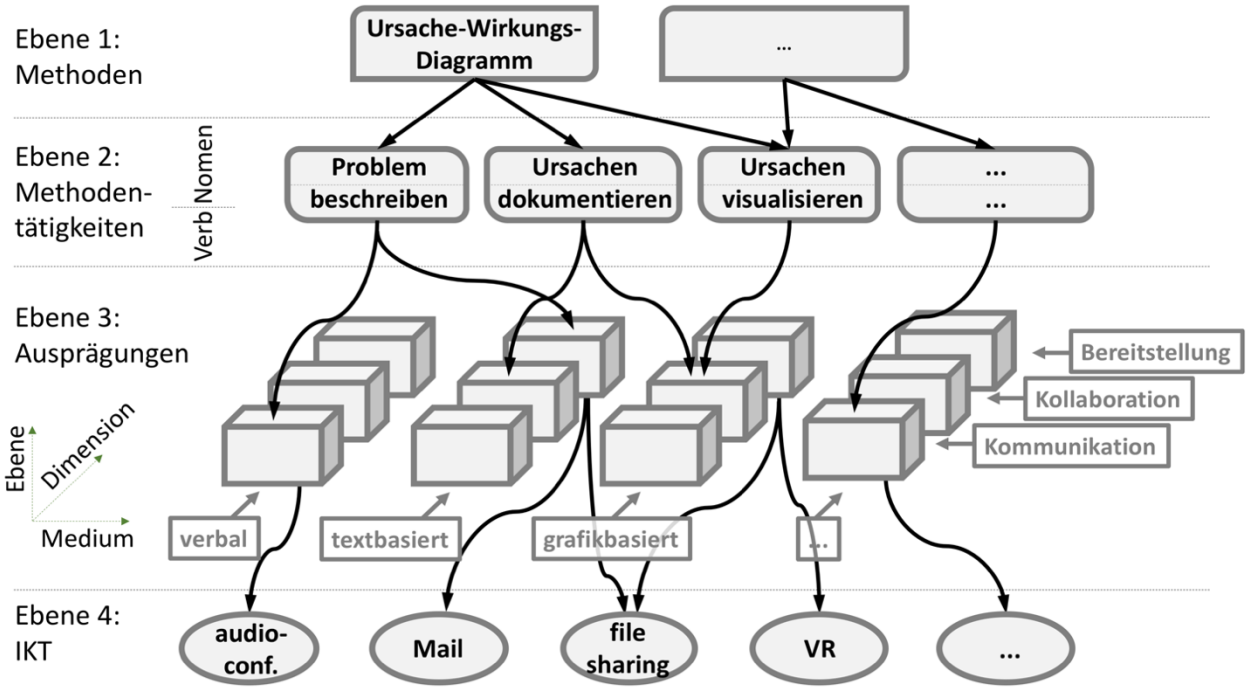


Abbildung 1: Aufbau des Ebenenmodells (Ausschnitt)

Die oberste Ebene umfasst alle betrachteten Methoden und zeigt dadurch den Kontext der darunterliegenden Ebenen auf. Jede Methode weist mehrere Verbindungen zu den Methodentätigkeiten der zweiten Ebene auf. Methodentätigkeiten sind dabei überschneidungsfreie Handlungen, wie zum Beispiel „Ursachen dokumentieren“ und folgen der Systematik, ein Nomen mit einem Verb zu kombinieren. Für die Zuordnung von geeigneten IKT zu den Methodentätigkeiten genügt das Verb der Methodentätigkeiten, um die benötigten Funktionen der IKT zu identifizieren. Durch die Unabhängigkeit der IKT vom Nomen werden im Modell die Verbindungen ausschließlich von den Verben aus Ebene 2 zu den Ausprägungen der Ebene 3 hergestellt. Die Ausprägungen, die eine Methodentätigkeit in einer standortverteilten Entwicklungssituation annehmen kann, werden über die Kategorisierung von der jeweiligen Interaktion nach Dimension und Medium dargestellt. Die Interaktionsdimensionen umfassen Kommunikation, Kollaboration und Informationsbereitstellung. Die Interaktionsmedien umfassen verbale, textbasierte, (statisch, dynamisch und immersiv) grafikbasierte, simulationsbasierte und gestengestützte Interaktion. Es ist möglich, dass eine Methodentätigkeit keine bis hin zu mehreren Ausprägungen aufweist. Am Beispiel der Methodentätigkeit „Ergebnisse dokumentieren“ ist ersichtlich, dass textbasiert, grafikbasiert und simulationsbasiert dokumentiert werden kann, es jedoch nicht möglich ist, etwas verbal zu dokumentieren. Je nach Ausprägung als Kombinationsmöglichkeit beider Interaktionskategorien müssen die IKT unterschiedliche Funktionen bereitstellen. Daher sind die Ausprägungen im letzten Schritt den IKT der Ebene 4 zugeordnet. Die IKT sind dabei nach unterschiedlichen Funktionen, wie beispielsweise „screen sharing“ oder „audio conference“, sortiert.

4.2 Nutzungsverhalten

Die Nutzung des Modells erfolgt grundsätzlich von Ebene eins zu Ebene vier, indem jede Methode mit den jeweiligen Methodentätigkeiten verbunden ist und diese wiederum einer oder mehreren Ausprägungen zugeordnet sind. Von den Ausprägungen existieren Verbindungen in die unterste Ebene der IKT. Die Auswahl einer Methode in Ebene 1 führt dazu, dass alle Methodentätigkeiten, die in der Methode auftreten, durch das Modell angegeben werden. Diese sind wiederum über die für den Modellnutzer nicht zwingend sichtbaren Ausprägungen mit den IKT der Ebene 4 verknüpft. Abbildung 1 zeigt beispielhaft das Vorgehen anhand der Methode „Ursache-Wirkungs-Diagramm“. Eine Methodentätigkeit des gesamten

Methodenablaufs ist „Problem beschreiben“. Diese Methodentätigkeit weist Verbindungen zu den beiden Ausprägungen „verbale Kommunikation“ und „textbasierte Bereitstellung“ auf. Die jeweils mit diesen Ausprägungen verbundenen IKT stellen die benötigten Funktionen zur Ausführung der Methodentätigkeit „Problem beschreiben“ bereit. Für dieses Beispiel könnte unter anderem die „verbale Kommunikation“ per „Telefonkonferenz“ erfolgen. Geht man diesen Prozess für alle weiteren Methodentätigkeiten durch, erhält man den Pool an geeigneten IKT zur Durchführung der Methode.

4.3 Validierung

Das entstandene Modell wurde mithilfe des *Decision-Calculus-Ansatzes* von Little [24] validiert. Sechs Modellkriterien werden dabei aufgeführt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Modellkriterien des Decision-Calculus-Ansatzes nach Little [24]

Kriterium	Erklärung
1. Einfachheit	Konzentration auf das Wesentliche, nur relevante Informationen
2. Benutzersicherheit	Keine unlogischen oder falschen Ergebnisse, unabhängig davon, wie der Benutzer das Modell bedient
3. Kontrollierbarkeit	Prüfbarer, vorhersagbarer und verständlicher Weg zum Ergebnis
4. Adaptionsfähigkeit	Möglichkeit der Integration neuer Erkenntnisse anzupassen
5. Vollständigkeit	Vorhandensein aller entscheidungsrelevanter Informationen
6. Bedienbarkeit	sinnvolle Benutzerschnittstellen

Vor dem Ziel IKT für die standortverteilte Methodenanwendung auszuwählen, bilden die Informationen zu Methoden, Methodentätigkeiten, die Gruppierung per Ausprägungen und die IKT alle entscheidungsrelevanten Elemente. Durch die Verbindungen zwischen diesen Elementen werden logisch zusammenhängende Pfade geschaffen, die somit die Funktionserfüllung ermöglichen. Damit kann der Forderung nach *Vollständigkeit* nachgekommen werden. Durch die Beschränkung auf die zuvor genannten funktionsrelevanten Elemente, wird auch der Forderung nach *Einfachheit* nachgekommen. Bedingt durch die komplexe Darstellung des Modells in Excel und die fehlende Automatisierung der Eingabe- und Ausgabeelemente ist das Kriterium der *Bedienbarkeit* nicht erfüllt. Für die Kriterien *Benutzersicherheit* und *Kontrollierbarkeit* ist zu bemerken, dass die Verbindungen zwischen den Modellelementen statisch sind. Der Nutzer kann daher keine Veränderungen am Modell vornehmen und

der Weg zum Ergebnis über die statischen Verbindungen ist stets verständlich, vorhersagbar und prüfbar. Die Darstellungsform in Excel birgt hingegen Fehlerpotenzial. Die Kriterien *Benutzersicherheit* und *Kontrollierbarkeit* werden somit bereits zu einem gewissen Grad erfüllt. Dies ist jedoch erst vollständig möglich, wenn das Modell zu einem intuitiv nutzbaren Werkzeug umgesetzt wird. Bezugnehmend auf die *Adaptionsfähigkeit* ermöglicht die generische Beschreibung der einzelnen Modellelemente und die logische, nicht geschlossene Modellstruktur sowohl die inhaltliche Adaption einzelner Elemente als auch die Erweiterung mit neuen Elementen. In der Validierung anhand der Modellkriterien zeichnen sich zwei Trends ab. Zum einen wirken sich Aspekte zu Inhalt und Funktionsweise des Modells positiv auf die Erfüllung der Kriterien aus. Zum anderen fällt die Darstellungsform in Excel in der Hälfte der Kriterien als verhindernder Faktor zur Erfüllung der Kriterien auf.

4.4 Potenziale und Handlungsempfehlungen

Die Literatur umfasst weitreichende Erkenntnisse zu standortverteilter Produktentwicklung, Entwicklungsmethoden und IKT. Wenig berücksichtigt ist hingegen die Verknüpfung dieser Themengebiete. Mit der Entwicklung des vorliegenden Modells wurde erstmalig die allgemeingültige Selektion von IKT für Methodentätigkeiten vorgenommen. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass die Nutzung bestehender Methoden mithilfe des Modells für die Anwendung in standortverteilter Entwicklung ermöglicht wird. Die in sich abgeschlossene Vollständigkeit des Modells auf den Ebenen 2 bis 4 ermöglicht es weitere Methoden hinzuzufügen. Betrachtet man weiterhin einzeln die Verbindungen der Ebene 3 und 4, kann festgestellt werden, dass sich das Modell nicht nur auf die Methodenanwendung in standortverteilten Entwicklungsteams bezieht. Da durch die Ausprägungen eine Gruppierung nach Interaktionseigenschaften vorliegt, kann die Zuordnung von IKT auf jegliche Situationen transferiert werden, in denen menschliche Interaktion über Standorte hinweg stattfindet. Zur vollen Entfaltung des Potenzials, muss das Modell benutzerfreundlich integriert werden. Dies deckt sich mit den Validierungserkenntnissen. Aufbauend auf solch einem „minimal viable product“ empfiehlt sich eine erneute Validierung mit besonderem Augenmerk auf der Verständlichkeit und Überschneidungsfreiheit der Verben der Methodentätigkeiten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund standortverteilt agierende Produktentwicklerteams bei der Selektion geeigneter IKT zur Methodenanwendung zu unterstützen, liefert dieser Beitrag ein allgemeingültiges Verständnis über den Aufbau von Methoden aus Methodentätigkeiten. Weiter erfordert die standortverteilte Durchführung von Methodentätigkeiten die Nutzung von IKT. Die in der Literatur bestehenden Erkenntnisse der Themengebiete IKT, Entwicklungsmethoden und standortverteilte Produktentwicklung wurden in einem Ebenenmodell zur systematischen Selektion von geeigneten IKT integriert. In weiterführenden Projekten wird dieses Modell zu einem intuitiv nutzbaren Werkzeug weiterentwickelt werden. Zusätzlich soll ermöglicht werden, die Randbedingungen der unternehmensspezifischen Entwicklungssituation in die Auswahl der IKT einfließen zu lassen.

Literatur

[1] Anderson, Edward G.; Chandrasekaran, Aravind; Davis-Blake, Alison; Parker, Geoffrey G.: *Managing Distributed Product Development Projects: Integration Strategies for Time-Zone and Language Barriers*. In: *Information Systems Research* Bd. 29 (2018), Nr. 1, S. 42–69

[2] Thomke, Stefan; Reinertsen, Donald: *Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments*. In: *California Management Review* Bd. 41 (1998), Nr. 1, S. 8–30

[3] Duehr, Katharina; Heimicke, Jonas; Breitschuh, Jan; Spadinger, Markus; Kopp, David; Haertenstein, Lars; Albers, Albert: *Understanding Distributed Product Engineering: Dealing with Complexity for Situation- and Demand-Oriented Process Design*. In: *Procedia CIRP* (2019)

[4] Zanker, Winfried: *Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden*, *Reihe Konstruktionstechnik* München. Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1999 — ISBN 978-3-8265-6558-8

[5] Walter, Benjamin; Albers, Albert; Haupt, Fabian; Bursac, Nikola: *Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor-Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab*. In: *27. Dfx-Symposium*, 2016, S. 283–295

[6] Conboy, Kieran: *Agility from First Principles: Reconstructing the Concept of Agility in Information Systems Development*. In: *Information Systems Research* Bd. 20 (2009), Nr. 3, S. 329–354

[7] Albers, Albert; Heimicke, Jonas; Spadinger, Markus; Reiß, Nicolas; Breitschuh, Jan; Richter, Thilo; Bursac, Nikola; Marthaler, Florian: *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design*: Karlsruhe, 2019

[8] Heimburg, Y.V.; Radisch, G.F.: *Virtuelle Teams erfolgreich führen: Ein Team, eine Aufgabe, verschiedene Standorte*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2001

[9] Krause, F.-L. (Ed.): *New tools and workflows for product development*. In: *Proceedings ; Production*

Technology Centre. Berlin, Germany : Fraunhofer-IRB-Verl., 1998

[10] Konradt, Udo; Hertel, Guido: *Management virtueller Teams: von der Telearbeit zum virtuellen Unternehmen*, Beltz Qualifikation. Weinheim : Beltz, 2002 — ISBN 978-3-407-36025-0

[11] Gaul, Hans-Dieter: *Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung (Produktentwicklung, 1. Aufl.)*. München, Technische Universität München, 2001

[12] Larsson, A; Törlind, P; Karlsson, L; Mabogunje, A; Leifer, L; Larsson, T; Elfström, B-O: *Distributed Team Innovation - A Framework for Distributed Product Development*. In: *Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm* (2003)

[13] Ahuja, J.: *Modelling the Success Factors of Virtual Team*. In: *Indian Journal of Science and Technology* Bd. 9 (2017), Nr. 48

[14] Grieb, Jöran Christopher: *Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse*, *Produktentwicklung*. 1. Aufl. München : Dr. Hut, 2008 — ISBN 978-3-89963-690-1

[15] Lindemann, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, *VDI*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005 — ISBN 978-3-540-14041-2

[16] Gericke, Kilian; Eckert, Claudia; Stacey, Martin: *What do we need to say about a design method?* In: *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*. Bd. 7: Design Theory and Research Methodology. Vancouver, Canada, 2017

[17] Birkhofer, H.; Jänsch, J.; Kloberdanz, H.: *An extensive and detailed view of the application of design methods and methodology in industry*. In: *Proceedings of ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design*. Melbourne, Australia, 2005 — ISBN 0-85825-788-2, S. 1675–1686

[18] Albers, A; Reiß, N; Bursac, N; Urbanec, J; Lüdcke, R: *Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application*. In: *Proceedings of NordDesign 2014*. Espo Finland / Melbourne Australia, 2014, S. 550–559

[19] Gericke, Kilian; Kramer, Julia; Roschuni, Celeste: *An Exploratory Study of the Discovery and Selection of Design Methods in Practice*. In: *Journal of Mechanical Design* Bd. 138 (2016), Nr. 10, S. 101–109

[20] Dooley, Lawrence; O'Sullivan, David: *Managing within distributed innovation networks*. In: *International Journal of Innovation Management* Bd. 11 (2007), Nr. 03, S. 397–416

[21] Richter, Timo; Huth, Tobias; Vietor, Thomas: *Model-based Support of the Conceptual Design in Distributed Product Development*. In: *Procedia CIRP* Bd. 36 (2015), S. 261–266

[22] Dai, Yun; Lu, Stephen; Liu, Ang: *Student pathways to understanding the global virtual teams: an ethnographic study*. In: *Interactive Learning Environments* Bd. 27 (2019), Nr. 1, S. 3–14

[23] Che Mat, Noor Azliza; Noor, Noor Maizura Mohamad; Mohemad, Rosmayati: *Development of Collaboration Model by Integrating Information and Communication Technology (ICT) Tools in Higher Education Institutions (HEI)*. In: *International Journal of Information and Education Technology* Bd. 8 (2018), Nr. 11, S. 798–803

[24] Little, John D. C.: Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus. In: *Management Science* Bd. 50 (2004), Nr. 12_supplement, S. 1841–1853

Modellbasierte Entwicklung von Mehrkörpersystemen mittels haptischer Feedbacksysteme

Jascha Norman Paris, Mathias Hüsing, Burkhard Corves

Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik
RWTH Aachen University
Templergraben 55, 52062 Aachen
E-Mail: paris@igmr.rwth-aachen.de; Internet: https://www.igmr.rwth-aachen.de

Inhalt: *Die Entwicklung von Produkten mit denen Nutzer direkt interagieren ist herausfordernd. Die menschlichen Eigenschaften, Wünsche und insbesondere Wahrnehmungen können nur schwer vorhergesagt oder simuliert werden. Aus diesem Grund erscheint es vorteilhaft virtuelle Prototypen über ein haptischen Feedbacksystem dem Entwickler oder zukünftigen Anwendern anfassbar und erlebbar darzustellen. Dies ermöglicht schnelles, günstiges und häufiges Validieren, wodurch Methoden wie das Human-Centered Design unterstützt werden. Dieser Beitrag zeigt ein Gesamtsystem zur modellbasierten Entwicklung von Mehrkörpersystemen, insbesondere von ungleichmäßig übersetzenden Getriebe. Um die Validierung verschiedener virtuellre Prototypen zu beschleunigen, wird die Echtzeitmodifikation von Systemparametern vorgestellt und diskutiert.*

Stichwörter: *Virtuelle Prototypen, Modellbasierte Entwicklung, Haptische Feedbacksysteme, Humand-Centered Design, Echtzeitsimulation*

Model-Based Development of Multi-Body Systems using Haptic Feedback Systems

Abstract: *The development of products with which users interact directly is challenging. The human characteristics, desires and especially perceptions are difficult to predict or simulate. For this reason, it seems advantageous to present virtual prototypes to the developer or future users in a touchable and experienceable way via a haptic feedback system. This enables fast, inexpensive and frequent validation, which supports methods such as human-centered design. This paper shows an overall system for model-based development of multi-body systems and especially mechanisms. The real-time modification of system parameters is presented and discussed in order to accelerate the possibility to validate different virtual prototypes.*

Keywords: *Virtual Prototyping, Model-Based Design, Haptic Feedback Systems, Human-Centered Design, Real-Time Simulation*

1 Einleitung und Motivation

Zur schnellen und kostengünstigen Entwicklung innovativer Produkte existieren verschiedene Methoden wie beispielsweise das *Rapid Product Development*. Dabei werden die frühen Entwicklungsphasen betont. In schnellen und kurzen Iterationszyklen wird frühes und häufiges Feedback berücksichtigt. Dazu sind die schnelle Erstellung und Verwendung physischer, virtueller oder hybrider Prototypen notwendig. Gleichzeitig ist eine Differenzierung gegenüber Marktbegleitern häufig nicht mehr über die technische Funktion möglich. [1]

In dieser Hinsicht ist insbesondere die Entwicklung von Produkten mit denen Nutzer direkt interagieren herausfordernd. Das Verhalten, die Erwartungen und die Eigenschaften der Nutzer sind schwer vorherzusagen. Das *human-centered design* stellt einen Lösungsansatz für die Entwicklung derartiger Produkte dar. Dabei werden die menschlichen Bedürfnisse und Fähigkeiten in den Vordergrund gestellt. Iterativ werden dazu die Schritte Beobachten, Ideengenerierung, Prototypenbau und Testen durchlaufen. [2]

Insgesamt ist festzustellen, dass die Verwendung von Prototypen essenziell ist für die Entwicklung von Produkten mit denen Nutzer direkt interagieren. Jedoch ist der Prototypenbau zeit- und kostenintensiv. Um dem entgegenzuwirken werden häufig virtuelle Prototypen oder *Rapid-Prototyping*-Technologien eingesetzt [1].

Eine Klasse von Produkten mit denen Nutzer direkt interagieren sind durch den Nutzer bewegte Mehrkörpersysteme. Dazu zählen insbesondere die ungleichförmig übersetzenden Getriebe bzw. Mechanismen. Diese können Möbeltüren, Autos, Sport- oder Rehabilitationsgeräte, Maschinengehäuse, Pressen oder andere Anwendungen darstellen, siehe auch Abb. 1. Bei all diesen Anwendungen ist die technische Funktion zumeist gelöst und zur Erfüllung der Kundenforderungen und –wünsche müssen eine empfundene hohe Qualität und eine angenehme Nutzererfahrung erreicht werden. Die Automobilindustrie ist ein gutes Beispiel für den betriebenen Aufwand bei der Gestaltung von Anbauteilen hinsichtlich der Nutzererfahrung. Um ergonomische Forderungen, eine hohe Qualität und eine angenehme Bedienung zu ermöglichen, werden in verschiedenen Anwendungen Dämpfer, zusätzliche Massen, verschiedene Lagerungen, Federn zur Kraftunterstützung oder zum Ausgleich der Gewichtskräfte verwandt. Aus der technischen Funktion resultieren zudem Begrenzungen

des Bewegungsbereichs von Mehrkörpersystemen in der Praxis. Auch eine Anpassung des Bewegungsverlaufs ist in den meisten Fällen möglich, da nur wenige Posen bspw. die Start- und Endlage vorgegeben sind.

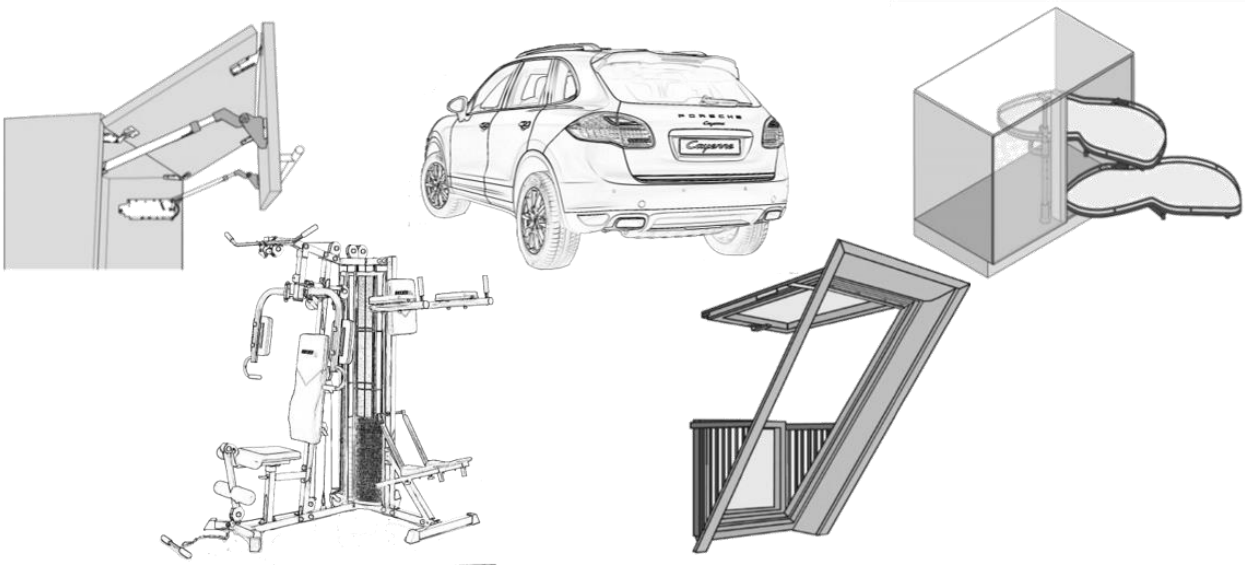


Abbildung 1: Beispiele für handbewegte Mechanismen. Bildquellen, bearbeitet (link oben nach rechts unten): Blum, Porsche, Kesseböhmer, Schmidt, Velux.

Zur Auslegung der Kinematik eines Mehrkörpersystems und den beschriebenen Zusatzfunktionen hinsichtlich der Ergonomie des Produkts existieren verschiedene Hilfsmittel. Dazu gehören Normen und Richtlinien, die Bewegungsbereiche und erreichbare Kräfte für Menschen darstellen, vergleiche bspw. DIN 33411. Zudem existieren komplexe biomechanische Modelle, bspw. *Anybody*, von Menschen mit denen Bewegungsabläufe simuliert werden können und eine Bewertung der Ergonomie dieser Abläufe möglich ist.

Dennoch ist damit die Bewertung des Komforts und der wahrgenommenen Qualität eines Produkts kaum möglich. Beispielhaft zeigt Abb. 2 verschiedene Kinematiken für eine Schranktür, die Anforderungen hinsichtlich Maximalkraft und Bewegungsraum des Anwenders erfüllen. Die Auswahl einer bestimmten Kinematik ist hinsichtlich der Nutzererfahrung auf Grundlage dieser Daten nicht möglich. Da die virtuelle Abbildung des menschlichen Empfindens schwierig ist, bietet es sich an virtuelle Prototypen für den Anwender haptisch erfahrbar zu machen. Dies wird heute mit physischen Prototypen realisiert.

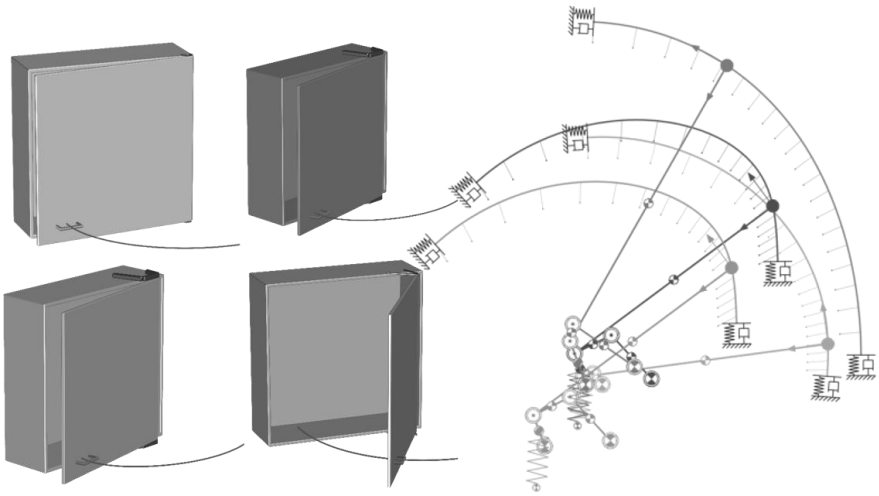


Abbildung 2: Vergleich verschiedener Kinematiken als Modell und kinematisches Schema für eine Schranktür.

2 Stand der Technik: Haptische Feedbacksysteme in der Produktentwicklung

Allgemein ist ein haptisches Feedbacksystem (HFS) ein Gerät, das einem Menschen über dessen haptische Sinnesorgane Informationen vermittelt. Dabei kann zwischen der taktilen Wahrnehmung über die Haut und der kinästhetischen Wahrnehmung, also dem Stellungssinn, unterschieden werden. Ein sehr einfaches HFS, bestehend aus einem Aktor und einer Informationsverarbeitung, ist der Vibrationsalarm eines Mobiltelefons. Um darüber hinaus eine bidirektionale haptische Interaktion zwischen Anwender und HFS zu ermöglichen, benötigt das HFS zusätzlich Sensoren zur Erfassung der Position und oder externer Kräfte. Dabei wird deutlich, dass ein HFS prinzipiell einen Manipulator bzw. Roboter darstellt. Umgekehrt sind teilweise auch Roboter als HFS einsetzbar, jedoch wird in der Regel auf spezialisierte Hardware zurückgegriffen.

HFS werden zur 3D-Eingabe bei Computern, in der Tele-Medizin zur Durchführung von Minimalinvasiven Eingriffen, in der Tele-Robotik zum Einsatz in gefährlichen Umgebungen, als Simulatoren bspw. in der Zahnmedizin, zur Montagesimulation, in der Unterhaltungsindustrie und zur Rehabilitation eingesetzt.

Thurfjell et al. beschrieben bereits 2002 die Möglichkeit, HFS als Ersatz für das *Rapid-Prototyping* im Rahmen des reinen *Virtual Prototyping* zu verwenden. Nutzerstudien zu Produkteigenschaften seien durchführbar und die Produktentwicklung über Standorte auf der ganzen Welt würde vereinfacht [3]. Daneben zeigen Bordegoni et al. die Verwendung von HFS bei der Modellierung mit Ton zur Virtualisierung der Produktentwicklung sowie die Evaluierung von Schaltern und Drehknöpfen mittels HFS [4]. Auch Ha et al. nutzen HFS für die Bereitstellung von virtuellen Prototypen in der Entwicklung von Drehknöpfen [5]. Die technische Umsetzung der haptischen Darstellung eines einfachen, simulierten Mehrkörpersystems zeigten erstmals Clover et al. [6]. Die Entwicklung eines universellen haptischen Feedbacksystems zur Bewertung virtueller Prototypen, das auch im Rahmen dieses Beitrags verwandt wird, zeigen Kölling et al. [7]. Prinzipielle Einsatzmöglichkeiten des Systems zeigt [8] und die Modellierung sowie Integratoren für die Simulation zeigt [9].

Gegenüber dem Stand der Technik und den eigenen Vorarbeiten der Autoren fokussiert dieser Beitrag die Modifikation des virtuellen Prototyps in Echtzeit, um damit eine schnelle, effiziente und agile Validierung in der Produktentwicklung zu ermöglichen.

3 Haptische Simulation von Mehrkörpersystemen

Am Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen wird das haptische Feedbacksystem RePlaLink entwickelt und für die haptische Simulation von Mehrkörpersystemen und insbesondere Getrieben eingesetzt. Abb. 3 zeigt den Aufbau des Gesamtsystems. Das Bewegungssystem, bestehend aus einer Kinematik, drei Antrieben, einem Sechs-Achsen-Kraftsensor und einem Handgriff, stellt die Hauptkomponente dar. Dazu kommt ein Trägerrahmen, der in Höhe und Orientierung verstellbar ist. Somit können, auch aufgrund des großen Arbeitsraums des RePlaLink, nahezu alle handbetätigten Mechanismen haptisch dargestellt werden. Die Steuerung des HFS erfolgt über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und die Servomotoren werden über die Servoverstärker geregelt und mit Energie versorgt. Für die Nutzung als HFS ist zusätzlich eine Visualisierung erforderlich, damit der Anwender die Bewegungen einordnen kann.

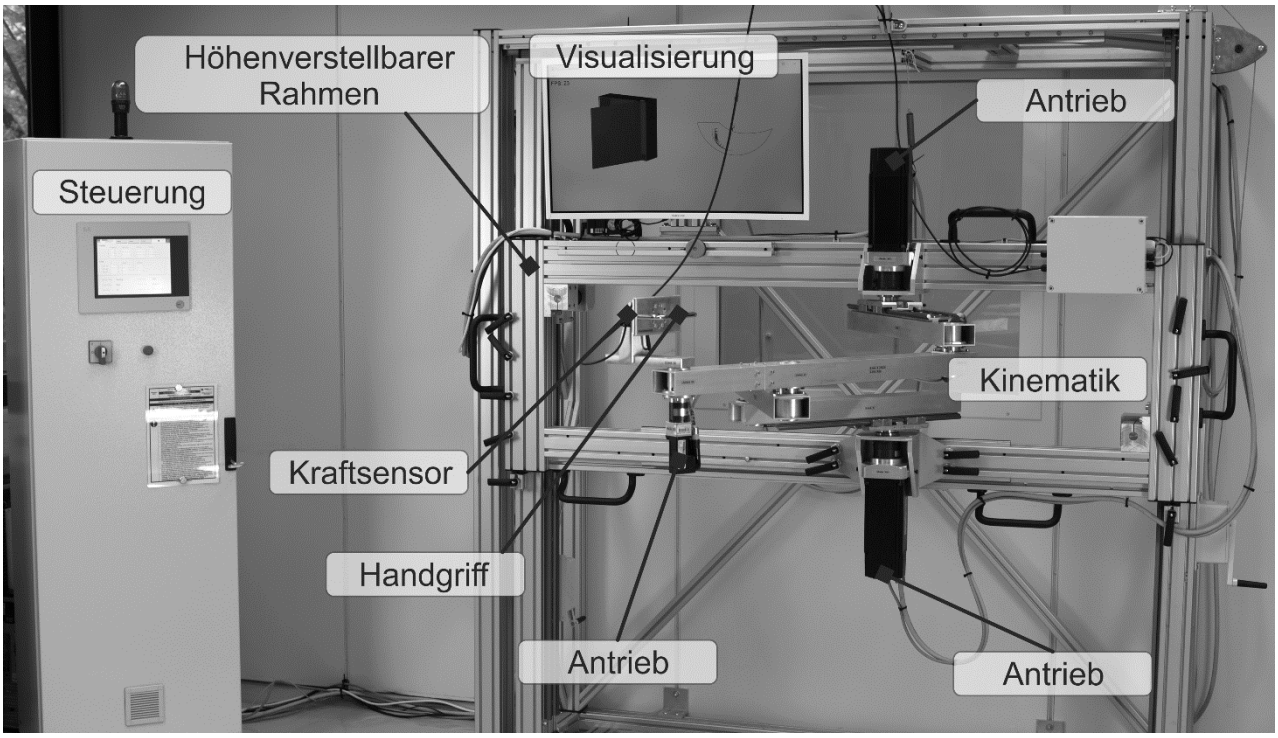


Abbildung 3: Komponenten des haptischen Feedbacksystems REPLALINK.

Den Ablauf bei der haptischen Simulation zeigt schematisch Abb. 4. Ein Nutzer greift den Handgriff des HFS und bringt Kräfte auf, die durch den Kraftsensor erfasst werden. Ein Mehrkörpersimulationsmodell des virtuellen Prototyps wird auf der SPS berechnet, indem die Vorwärtsdynamik mit den gemessenen Kräften als Eingangsgröße und einer Zykluszeit

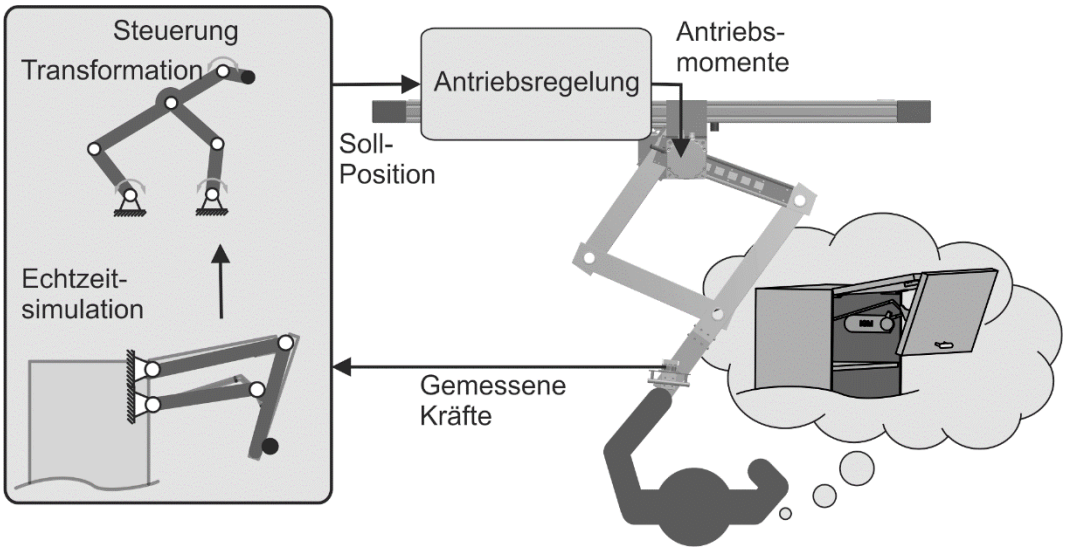


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Steuerung des REPLALINKS.

von 1,2 ms gelöst wird. Die Antriebe werden nun so geregelt, dass sie das Bewegungsverhalten des virtuellen Prototyps nachahmen. Somit hat der Anwender den Eindruck tatsächlich den virtuellen Prototypen anzufassen und zu bewegen.

Aus Kostengründen sind die meisten kommerziellen handbetätigten Mechanismen eben und besitzen häufig eine überschaubare Anzahl an Gliedern. Am meisten werden vier- und sechsgliedrige Getriebe eingesetzt, da mit Ihnen viele verschiedene Bewegungsbahnen und Übertragungsverhalten bei geringer Glied- und Gelenkanzahl umsetzbar sind. Aus diesem Grund wird hier beispielhaft ein parametrisches Modell eines viergliedrigen Getriebes mit einigen Komfortfunktionen verwendet, vergleiche Abb. 5. Zu den Zusatzfunktionen zählen Bewegungsgrenzen, Reibung und eine Unterstützungsfeder.

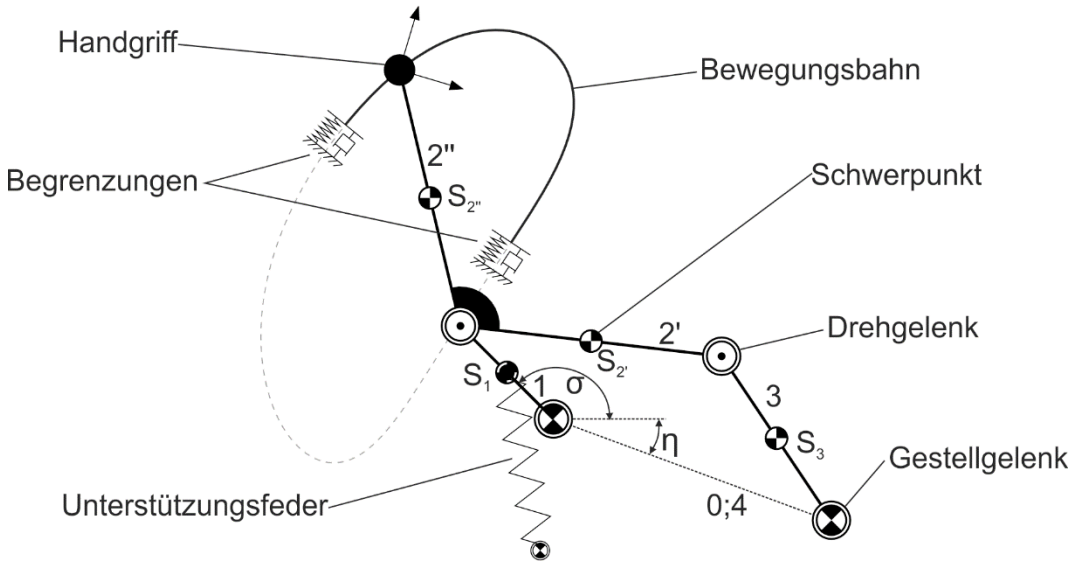


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines viergliedrigen Getriebes als virtueller Prototyp. Eine mögliche Anwendung ist eine Schranktür.

4 Echtzeitmodifikation von Mehrkörpersystemen

Für die effiziente Validierung von virtuellen Prototypen ist es wichtig die relevanten Eigenschaften schnell ändern zu können. Damit hat der Anwender die Möglichkeit verschiedene Varianten direkt nacheinander zu testen und der Zeitaufwand bei Studien sinkt. Klassisch wird ein Modell erstellt, auf die SPS geladen und dann wird die Echtzeitsimulation

gestartet und der Anwender kann mit den virtuellen Prototypen haptisch interagieren. Wünschenswert ist es jedoch, Parameter eines Mehrkörpersystems während der Interaktion verändern zu können. Dies darf nicht ruckartig geschehen, da dies für den Nutzer eine unerwartete Reaktion des Systems darstellt. Im schlimmsten Fall würde der Anwender durch eine schnelle Bewegung des REPLALINKS verletzt.

Die Bewegung des Handgriffes erfolgt stoß- und ruckfrei sowie ausreichend langsam, wenn auch die kinematischen Parameter in beschriebener Art angepasst werden. Eine derartige Änderung kann mittels einer Polynom-5-Parametertrajektorie erfolgen. Dazu wird ein Polynom fünften Grades (1) mit den Randbedingungen für stoß- und ruckfreie Übergange zum aktuellen Änderungs- und dem Endzustand (2-4) geplant, siehe auch beispielhaft Abb. 6. Je nach Größe der Änderungen sollten einige Sekunden für den Übergang verwendet werden.

$$p(t) = t^5 \cdot A + t^4 \cdot B + t^3 \cdot C + t^2 \cdot D + t \cdot E + F \tag{1}$$

$$p(0) = \text{Aktueller Parameter},\ p\left(t_{\text{Änderung}}\right) = \text{Neuer Parameter} \tag{2}$$

$$\dot{p}(0) = \text{Aktuelle Parameteränderung},\ \dot{p}\left(t_{\text{Änderung}}\right) = 0 \tag{3}$$

$$\ddot{p}(0) = 0, \ddot{p}\left(t_{\text{Änderung}}\right) = 0 \tag{4}$$

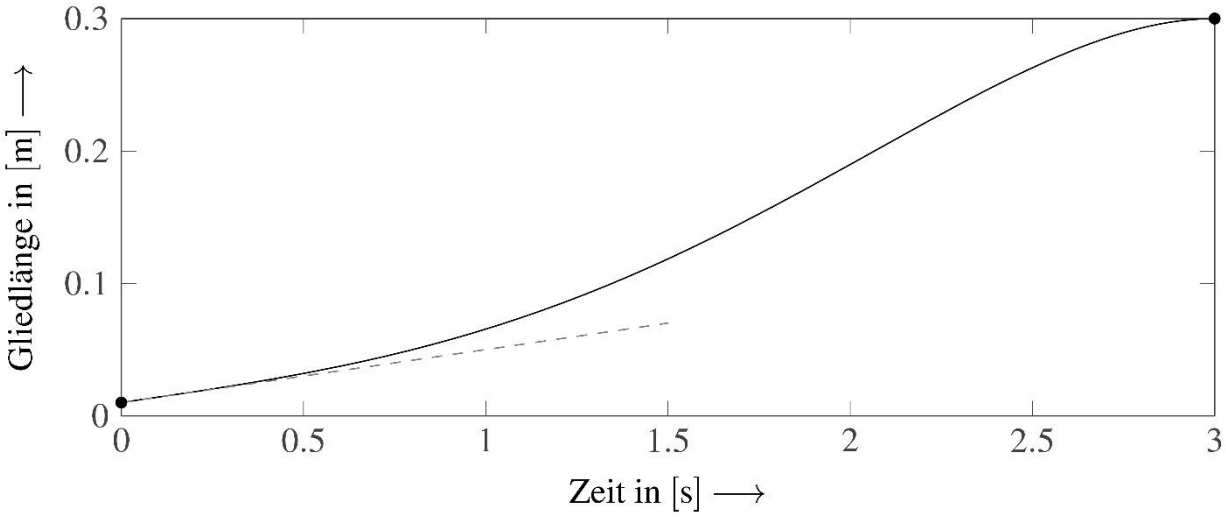


Abbildung 6: Polynom-5-Parametertrajektorie bei der Echtzeitmodifikation von Getriebeparametern.

Die Zustandsvariable, also die generalisierte Koordinate des virtuellen Prototyps stellt bei Getrieben in der Regel den Kurbelwinkel, hier σ, dar. Wird das Getriebe nicht bewegt und gleichzeitig einige Parameter des Getriebes verändert, kann beispielsweise die Bewegung in Abb. 7 (a) resultieren. Das heißt obwohl der Anwender das Getriebe nicht bewegt, erfolgt eine größere Bewegung scheinbar entlang der Bewegungsbahn des Getriebes. Deutlich problematisch ist dies, wenn das Getriebe dadurch in eine Bewegungsgrenze gedrückt wird und das Feder-Dämpfer-Element hohe Kräfte in das System induziert. Zur Abhilfe wird eine Zustandskorrektur, wie in Abb. 7 (b) gezeigt, verwandt. Bei einer Änderung der Parameter wird auch der Kurbelwinkel σ so verändert, dass die unbeabsichtigte Bewegung des Handgriffs minimiert wird.

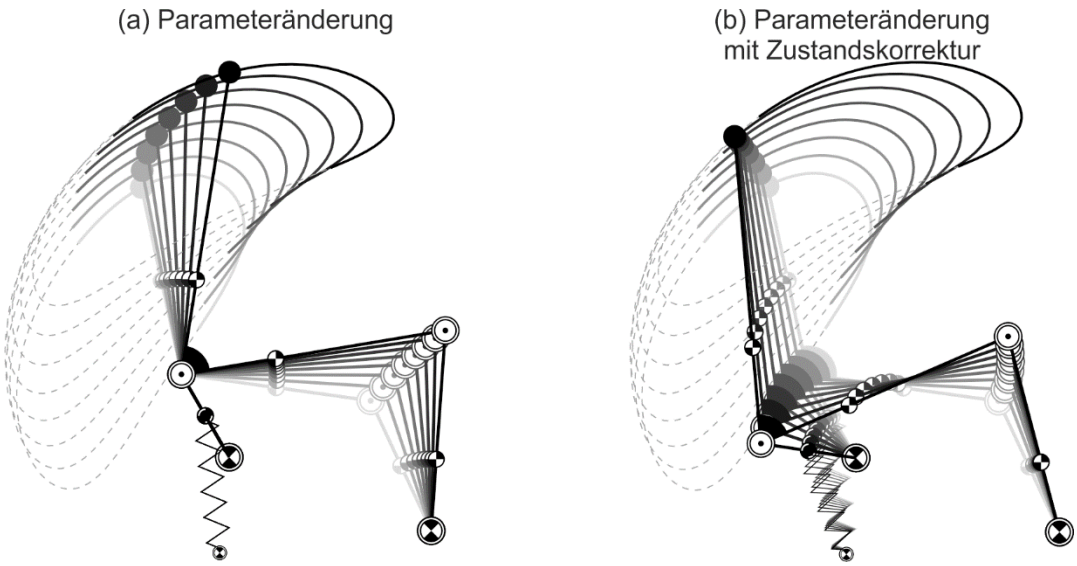


Abbildung 7: Beispielhafte Parameteränderung eines viergliedrigen Getriebes ohne (a) und mit (b) Zustandskorrektur.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt die modellbasierte Auslegung handbetätigter Mehrkörpersysteme mittels haptischer Darstellung virtueller Prototypen. Dazu wird die Motivation dargelegt und vergleichbare Ansätze zur Nutzung haptischer Feedbacksysteme bei der Produktentwicklung werden vorgestellt. Nach der Einführung des Gesamtsystems wird insbesondere auf die Echtzeitmodifikation von Mehrkörpersystemen eingegangen. Nur dadurch ist es möglich die Validierungs- und Testzyklus so effizient zu gestalten, dass eine interaktive Entwicklung

und Optimierung erfolgen kann. Dies ebnet den Weg für die agile Entwicklung von handbewegten Produkten. Durch ein haptisches Feedbacksystemen können Produkteigenschaften und Entwicklungsfortschritte auch Nicht-Technikern anfassbar und erlebbar dargestellt werden. Es können zukünftige Anwender eingeladen und regelmäßig befragt werden. Auch in frühen Phasen können Anforderungen und Randbedingungen auf ihre Gültigkeit überprüft werden.

Folgend muss das System im Vergleich zum klassischen Vorgehen für ein konkretes Anwendungsbeispiel getestet und validiert werden.

Literatur

[1] Bertsche, Bernd; Bullinger, Hans-Jörg: *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte — Rapid Prototyping.* Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-69879-1

[2] Norman, Donald: *Design of Everyday Things,* Basic Books, 2012. – ISBN 978-0-465-05065-9

[3] Lennart Thurfjell, John McLaughlin, Johan Mattsson, Piet Lammertse, (2002), *Haptic interaction with virtual objects: the technology and some applications*, Industrial Robot: An International Journal, Vol. 29 Iss: 3 pp. 210 – 215

[4] Monica Bordegoni, Giorgio Colombo, Luca Formentini: *Haptic technologies for the conceptual and validation phases of product design*. In: Computers & Graphics, Vol. 30, Iss. 3, 2006. – ISSN 0097-8493

[5] Ha, S.; Kim, L.; Park, S.; Jun, C.; Rho, H.: *Virtual Prototyping Enhanced by a Haptic Interface*, In: CIRP Annals, 58 (2009) 1

[6] Clover, C. L.; Luecke, G. R.; Troy, J. J.;McNeely,W. A.: *Dynamic Simulation of VirtualMechanisms with Haptic Feedback Using Industrial Robotics Equipment.* In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (1997)

[7] Kölling, T.; Paris, J. N.; Hüsing,M.; Corves, B.: *Optimierung des Entwicklungsprozesses von handbetätigten Bewegungseinheiten durch Simulation digitaler Prototypen in einem universellen haptischen Feedbacksystem*. In: Zentner, L. (Hrsg.), 10. Kolloquium Getriebetechnik, Univ.-Verl., 2013. – ISBN 978-3-86-360065-5

[8] Kölling, T.; Paris, J. N.; Hüsing, M.; Corves, B., *Handbetätigte Bewegungseinrichtungen ergonomiegerecht auslegen und frühzeitig qualifiziert bewerten - Einsatz haptischer Feedbacksysteme im Entwicklungsprozess von Mechanismen.* In: Bewegungstechnik: 17. VDI Getriebetagung, Düsseldorf: VDI-Verl., 2014. – ISBN 978-3-18-092237-9

[9] Paris J.N., Archut JL., Hüsing M., Corves B.: *Haptic Simulation of Mechanisms*. In: Kecskeméthy A., Geu Flores F. (eds) Multibody Dynamics 2019. IFToMM WC 2019. Computational Methods in Applied Sciences, vol 53. Springer, Cham

KT2019

Digitalisierung und Dokumentation im agilen Entwicklungsprozess

Automatisierte Baugruppenoptimierung hinsichtlich Produktanforderungen am Beispiel eines Drehschieberverdichters

Dennis Kaczmarek, Armin Lohrengel

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal
Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld
E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: https://www.imw.tu-clausthal.de/

Inhalt: *Die Notwendigkeit immer agiler auf Kundenwünsche eingehen zu können, ist im Zuge der Produktdiversifikation und aufgrund des globalen Wandels unausweichlich. Damit dieser Anforderung gerecht werden kann, müssen mit Hilfe von automatisierten Prozessen dem Ingenieur die Arbeit erleichtert werden. In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie mit Hilfe von Rechenmodulen und Nutzung des vorgestellten Verfahrens, hinsichtlich des Kundenwunsches, eine selbstoptimierende geometrische Anpassung des Produktes durchgeführt werden kann. Dabei werden Ansätze aus dem Bereich der nummerischen Optimierung genutzt und Vergleichskriterien aufgestellt, um so eine kundenangepasste Lösung zur Problemstellung automatisiert zu erstellen. Das angewendete Verfahren wird an dem Beispiel eines Drehschieberverdichters durchgeführt.*

Stichwörter: *Globaler Optimierung, Gradientenverfahren, Kundenorientierung, Vorauslegung, Drehschieberverdichter*

Automated assembly optimization with regard to product requirements using the example of a rotary vane compressor

Abstract: *The necessity for agile completion of customer wishes are inevitable in the course of product diversification and global change. Automated processes must make the work easier for the engineer. This article show, how a self-optimizing geometric adaptation of the product can be carried out with the help of calculation modules and the use of the presented method Approaches from the field of numerical optimization are used and comparison criteria are established in order to automatically create a customized solution to the problem. The applied procedure is carried out using the example of a rotary vane compressor.*

Keywords: *Global optmization, gradient descent, costomer focus, pre product design, rotary vane compressor*

1 Einleitung

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie mit Hilfe von verschiedenen nummerischen Verfahren eine Baugruppe eines Drehschieberverdichters optimiert werden kann. Es geht darum, die Baugruppe konstruktiv so zu ändern, dass bestimmte im Vorfeld definierte Vorgaben, wie festgelegte Druckdifferenzen, Reibleistungsminimierung oder aber auch Gewichtsoptimierungen erreicht werden können. Das Problem an Baugruppen mit gewissen Komplexitätsgrad ist, dass durch die Nichtlinearität des Modells keine eindeutigen optimalen Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen gefunden werden können. Lösungswege in der Praxis können in der Anwendung von heuristischen Methoden oder aber auch auf das Zurückgreifen von Erfahrungswissen gesehen werden.

Computertechnische Lösungen können hingegen mit Hilfe einer Modellierung der relevanten technischen Problemstellung wesentlich bessere Lösungen hervorbringen. Ansätze für die Lösung globaler Optimierungsprobleme an Produkten sind beispielsweise unter der Anwendung von evolutionären Algorithmen zu finden [1]. Evolutionären Algorithmen nutzen das „survival of the fittest“ Prinzip, indem eine *Startpopulation* (Bsp. Verdichter unterschiedlicher Geometrien) unter einer Zielfunktion betrachtet und die *Individuen* (Bsp. einzelner Verdichter) überleben lässt, welche die Zielfunktion am besten erfüllen. Dabei werden die Verluste mit Nachkömmlingen (Bsp. neue Verdichterkonfigurationen) in Form von Paarungen und Mutationen der überlebenden *Population* aufgefüllt. Diese Art von Mutationen und Paarungen können mehr oder weniger als stochastische Überlagerung angesehen werden. Da die evolutionären Algorithmen langsam konvergieren und meist Lösungen anbieten, welche nicht dem Ideal entsprechen, existieren ebenso hybride Lösungsverfahren, welche eine Kombination aus evolutionären Algorithmen und traditionell mathematischen Verfahren sind [2]. In dieser Arbeit soll ein Optimierungsverfahren vorgestellt werden, welches sich aus dem Gradientenverfahren und einer stochastischen Überlagerung zur globalen Optimallösungsfindung zusammensetzt. Dabei sollen die Anforderungen des Endanwenders in die Optimierung einfließen. Als Beispiel für das vorgestellte Konzept dient ein Drehschieberverdichter, welcher mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens konstruktiv angepasst wird, um so die gesetzten Anforderungen und Wünsche optimal zu erfüllen.

2 Vorstellung des Drehschieberverdichters – Modellierung

Als Basis der Optimierung wurde ein mathematisches Ersatzmodell des Drehschieberverdichters erstellt. Diese Modellbildung ist für die Anwendung des Baugruppenoptimierungsverfahrens notwendig. In Abbildung 1 ist ein Querschnitt des Drehschieberverdichters schematisch gezeigt. Der Rotor des Drehschieberverdichters ist exzentrisch zum Gehäuse gelagert und von einem Hohlzylinder umgeben, welcher den Verdrängerraum begrenzt. Dieser Rotor besitzt Schieber, die vom Rotor bis an den Hohlzylinder reichen und durch die Fliehkräfte sowie Druckkräfte des Verdichtungsmediums gegen den Hohlzylinder gedrückt werden. Durch die Rotation des exzentrisch gelagerten Rotors wird zwischen Rotor, Schiebern und Hohlzylinder eine konvergente Zelle erzeugt, die während der Drehung ihr Volumen verkleinert und das Medium verdichtet. Durch die Integration eines mitrotierenden Hohlzylinders wird die Relativbewegung zwischen Schieber und Stator erheblich reduziert.

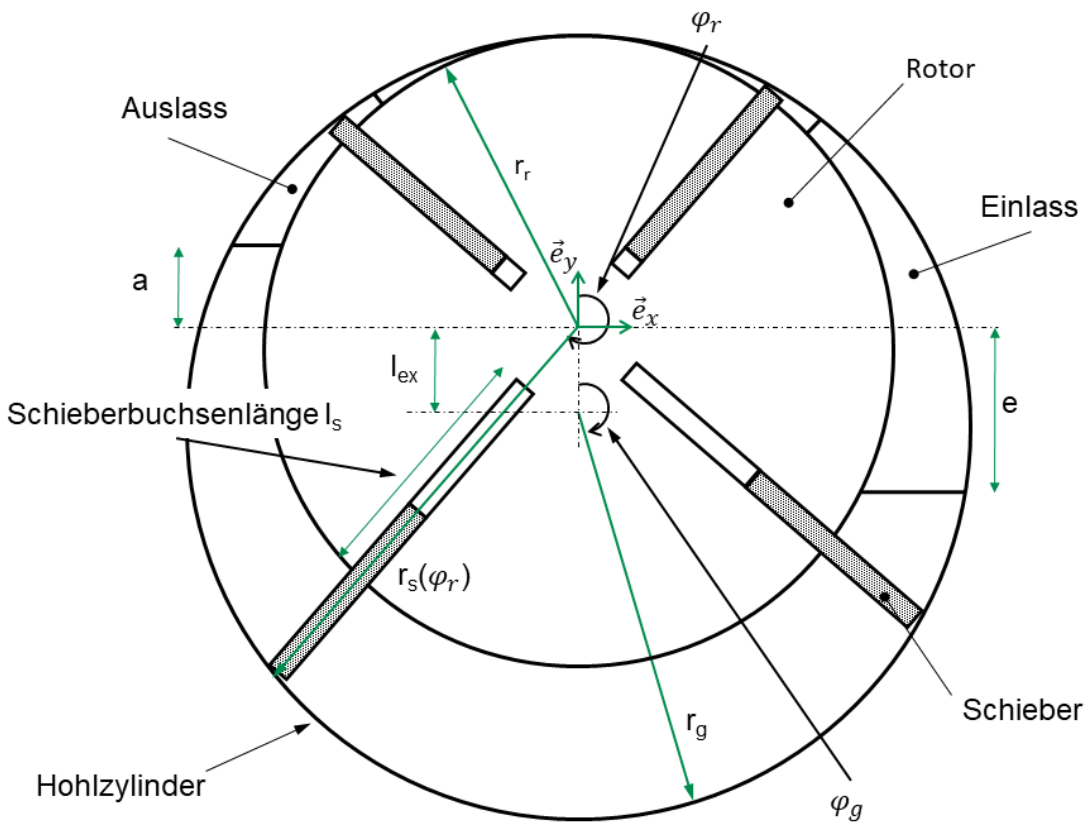


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung des Drehschieberverdichters

Zur Schmierung der relativ zueinander bewegten Teile (Schieber-Hohlzylinder, Hohlzylinder-Stator) und zur Abdichtung der konvergenten Zellen wird das Medium Wasser genutzt, welches gleichzeitig im Prozess zur Dampfbefeuchtung beziehungsweise Kühlung verwendet wird. Das benötigte Wasser soll durch eine Bohrung in der Nähe der Rotationsachse eingebracht und durch die Rotation in den Schmierspalt zwischen Gehäuse und Hohlzylinder befördert werden.

Die in Abbildung 1 gezeigten Grundgrößen entsprechen auch den Inputparameter des aufgebauten Berechnungsmodells. Im Zusammenhang mit der Modellerstellung wurden der Rotor, die Schieber, der umgebende Hohlzylinder und die Verdichterkammer separat betrachtet. Zusätzlich wurden unter allen Teilmodulen Schnittstellen definiert, welche die Wechselwirkung zwischen den Teilmodulen übergeben.

3 Vorstellung des Konzeptes zur Baugruppenoptimierung

Der erste exemplarische Ansatz zur Optimierung der Baugruppe ist in der nachfolgenden Abbildung 2 enthalten.

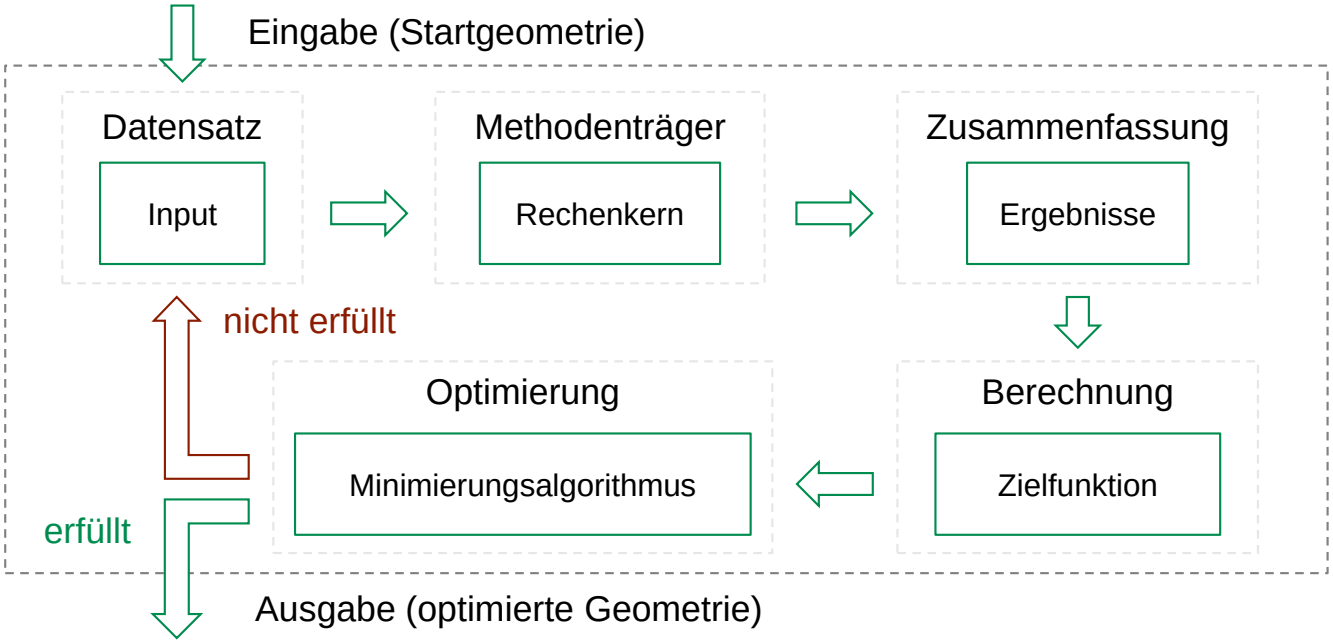


Abbildung 2: Konzept zur lokalen Optimierung einer Problemstellung

Die erwähnten Grundgrößen wurden als Inputparameter bereits in Kapitel 2 aufgezeigt, diese werden mit *Input* deklariert und dem *Rechenkern* übergeben. Dabei besitzt der *Re-*

chenkern das zuvor modellierte Ersatzmodell und generiert nach der Verrechnung die *Ergebnisse*. Diese *Ergebnisse* enthalten beispielsweise erreichte Druckdifferenzen, Masseströme oder andere Größen wie Massen, Kräfte, Spannungen und Geschwindigkeitsdifferenzen. Im darauffolgenden Schritt werden ausgewählte Systemgrößen in einer *Zielfunktion* verrechnet, diese *Zielfunktion* bildet eine Vergleichsgröße zwischen verschiedenen Geometrien ab. Je kleiner der Wert der Zielfunktion ist, desto besser entspricht die Geometrie dem Kundenwunsch. Diese *Zielfunktion* wird im Unterkapitel 3.1 näher erläutert. Nachdem die Zielfunktion berechnet worden ist, wird ein Optimierungsschritt mit Hilfe eines *Minimierungsalgorithmus* durchgeführt. Der *Minimierungsalgorithmus*, welcher in Unterkapitel 3.2 näher erläutert ist, verändert nun den *Input* in eine bessere Grundgrößenkonfiguration für einen erneuten Rechengang. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist.

3.1 Zielfunktion

Die *Zielfunktion* besitzt in dem Optimierungsprozess eine wichtige Rolle. In der *Zielfunktion* sollen zum einen die Anforderungen des Kunden beinhalten und zudem den Optimierungsprozess positiv beeinflussen. In dem Zusammenhang des hier vorgestellten Beispiels des Drehschieberverdichters können diese Kundenanforderungen zum Beispiel definierte Massenströme oder geometrische Einschränkungen sein. Eine gut zu optimierende *Zielfunktion* sollte nach Möglichkeit konvex aufgebaut sein, sodass konventionelle Optimierungsansätze (Bsp. Gradientenverfahren) zu einem Optimum führen können. Ansätze, eine solche *Zielfunktion* aufzubauen, können in der *Methode der kleinsten Quadrate* gefunden werden. Bei Zielfunktionen mit mehreren quadratischen Einträgen neigt allerdings das Verfahren zu einem nichtkonvexen Verhalten, was dazu führt, dass neben dem globalen Minimum zahlreiche Nebenminima erzeugt werden [3]. In dieser Arbeit wird der Ansatz der *Methode der kleinsten Quadrate* zur Erstellung der *Zielfunktion* genutzt und mit Hilfe des im Abschnitt 3.3 vorgestellten Verfahrens versucht, die Erzeugung von Nebenminima zu kompensieren. Dabei werden die Sollgrößen, wie beispielsweise Druckdifferenzen oder Masseströme mit Hilfe der *Methode der kleinsten Quadrate* und Minimierungsgrößen als linearer Faktor verrechnet. Als Beispiel folgt nun eine mögliche Zusammenstellung der Zielfunktion mit m Sollgrößen und k Minimierungsgrößen (in Anlehnung nach [3] & [4]):

$$K(x_i, x_n) = \underbrace{\sum_{i=1}^{m} g_i \cdot \frac{\left(x_{soll,i} - x_i\right)^2}{x_{soll,i}}}_{\text{Sollgrößen}} + \underbrace{\sum_{n=1}^{k} g_n \cdot \frac{x_n}{x_{ref,n}}}_{\text{Minimierungsgrößen}} + \underbrace{\sum_{p=1}^{l} g_p \cdot \left(\frac{x_p}{x_{ref,p}}\right)^{-1}}_{\text{Maximierungsgrößen}} \tag{1}$$

In die *Zielfunktion* fließen alle ungewünschten Systemgrößen jeweils mit Gewichtungsfaktoren positiv ein, sodass nach den gegebenen Umständen eine konvexe Funktion aufgestellt werden kann. Dieser Hintergrund führte auch zur Wahl der *Methode der kleinsten Quadrate* für die *Sollgrößen*, damit diese bei Verrechnung keine negativen Werte erreichen können. Zusätzlich bietet dieser Ansatz den Vorteil, keine Unstetigkeit in die Funktion durch Beträge zu überlagern. Jeder Term besitzt eine Normierung bezogen auf das womöglich beste Modell. Bei den *Sollgrößen* handelt es sich bei der Normierung um die zu erreichenden *Sollgrößen*. Die *Minimierungsgrößen* werden auf das beste erreichte Ergebnis mit geringsten *Zielfunktionswert* normiert. Der Vorteil dieser Normierung wird bei den *Minimierungsgrößen* ersichtlich, hier wird eine einheitliche Gewichtung der Einflussgrößen möglich. Als Beispiel zur Gewichtung verschiedener Teilaspekte der *Zielfunktion* sei hier folgendes praktisches Vorgehen am Beispiel des Drehschieberverdichters gezeigt:

$$K(\dot{m}_{\mathrm{ist}}, p_{ist}, W_{reib}) = \mathrm{A} \cdot \frac{(\dot{m}_{\mathrm{soll}} - \dot{m}_{\mathrm{ist}})^2}{\dot{m}_{soll}} + \mathrm{B} \cdot \frac{(\Delta p_{soll} - \Delta p_{ist})^2}{\Delta p_{soll}} + C \cdot \frac{W_{reib}}{W_{ref}} \tag{2}$$

$\dot{m}$ ≙ Massestrom

Δp ≙ Druckdifferenz

W_{reib} ≙ Reibleistung

Für die jeweiligen Einträge von A bis C können nun individuelle Gewichtungen eingesetzt werden. Dabei kann beispielsweise folgende Priorisierung angenommen werden:

Tabelle 1: Beispiel einer Priorisierungsabstufung

Priorisierung	Wert
Niedrig	1
Mittel	2
Hoch	3

Der Kundenwunsch kann entsprechend der Priorisierungstabelle entnommen werden

und in die Zielfunktion mit den vorgestellten Gewichtungen von A, B und C eingesetzt werden. Als Beispiel hier eine mögliche Form mit festgelegter Priorisierung:

$$K(\dot{m}_{\mathrm{ist}}, p_{ist}, W_{reib}) = 3 \cdot \frac{(\dot{m}_{\mathrm{soll}} - \dot{m}_{\mathrm{ist}})^2}{\dot{m}_{soll}} + 3 \cdot \frac{(\Delta p_{soll} - \Delta p_{ist})^2}{\Delta p_{soll}} + 2 \cdot \frac{W_{reib}}{W_{ref}} \tag{3}$$

Sofern mehrere Einträge vorhanden sind, lassen sich auch die Abstufungen der Priorisierungstabelle verfeinern.

3.2 Gradientenverfahren – Lokaler Suchansatz

Das *Gradientenverfahren* ist einer der einfachsten lokalen Suchansätze, mit dessen Hilfe es möglich ist, Funktionen zu minimieren. Es wird der Weg des steilsten Ab- / Aufstieges gewählt, sodass eine lokale Extremwertstelle einer Funktion gefunden werden kann [5]. In der nachfolgenden Abbildung 3 ist eine exemplarische Zielfunktion im dreidimensionalen Raum abgebildet.

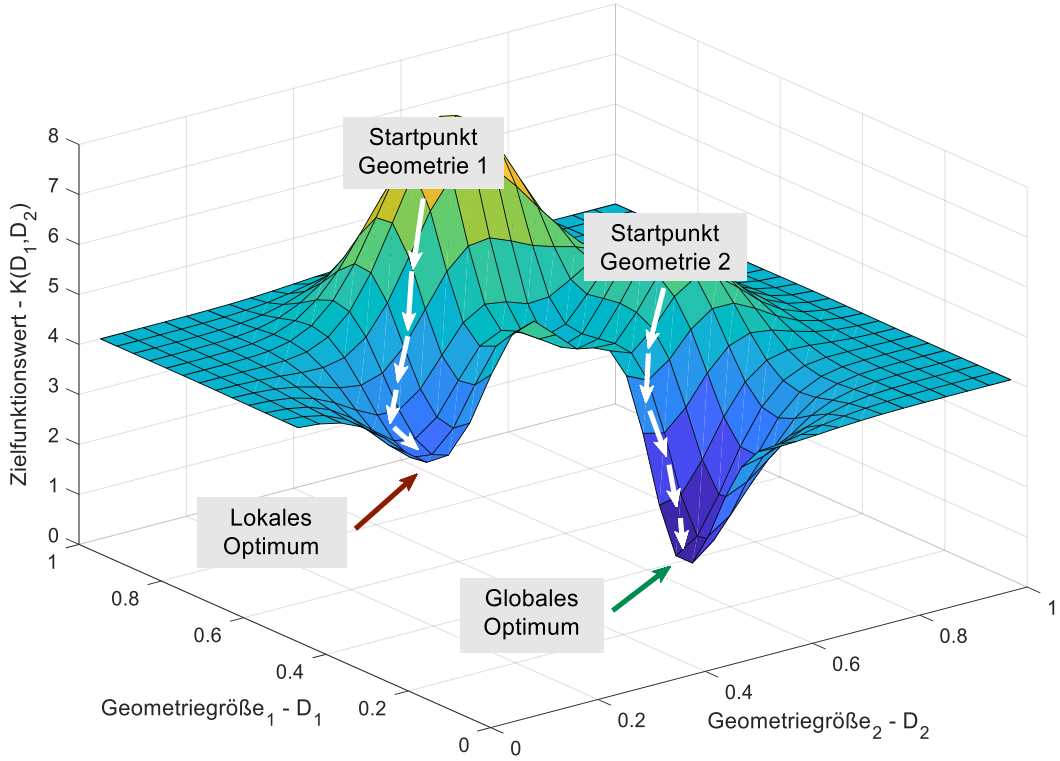


Abbildung 3: Problem des Gradientenverfahren

Die Funktionsweise des *Gradientenverfahrens* ist in den weiß abgebildeten Pfeilen dargestellt. Angefangen von einer *Geometrie 1* werden mit dem *Gradientenverfahren* die *Input* Parameter so abgeändert, dass die *Zielfunktion* minimiert wird. Dabei sind die frei variierbaren Geometrieparameter, die *Input* Parameter des Modells, entscheidend, wie flexibel die *Zielfunktion* verändert und welche Extrema erreicht werden können. In Abbildung 3 sind beispielsweise zwei frei variierbare *Input* Parameter für das *Gradientenverfahren* freigeschaltet.

Der Gradient berechnet sich unter Berücksichtigung der zwei variablen Geometrieparameter mit der Definition $\vec{x} = Input$ wie folgt:

$$\overrightarrow{\nabla K}(\dot{m}_{\mathrm{ist}}, p_{ist}, W_{reib}) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta K(\dot{m}_{\mathrm{ist}}, p_{ist}, W_{reib})}{\Delta x_1} \\ \frac{\Delta K(\dot{m}_{\mathrm{ist}}, p_{ist}, W_{reib})}{\Delta x_2} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Ausgehend von diesem Punkt, kann sich dem lokalen Minimum genähert werden, indem in der negierten Richtung des Gradienten die *Input* Parameter abgeändert werden.

Da die in dieser Arbeit verwendete *Zielfunktion* nicht konvex ist, entsteht ein Problem bei diesen Verfahren. Das *Gradientenverfahren* findet ausschließlich lokale Optimalstellen und beendet nach Erreichen des Abbruchkriteriums die Suche. Wird der gesamte *Betrachtungsraum* bewertet, kann jedoch eine bessere Konfiguration gefunden werden. Ein *Betrachtungsraum* definiert in diesem Beispiel die geometrischen Grenzbereiche der Konstruktion bzw. Baugruppe. So wird gewährleistet, dass nur festgeschriebene Geometrien bei der Suche betrachtet werden.

3.3 Globaler Suchansatz

Der globale Suchansatz soll das im Kapitel 3.2 aufgezeigte Problem des lokalen Suchers beheben, indem versucht wird, den gesamten *Betrachtungsraum* nach besseren konstruktiven Konfigurationen des Verdichters abzusuchen. In der nachfolgenden Abbildung 4 ist der generalisierte Ansatz dazu dargestellt.

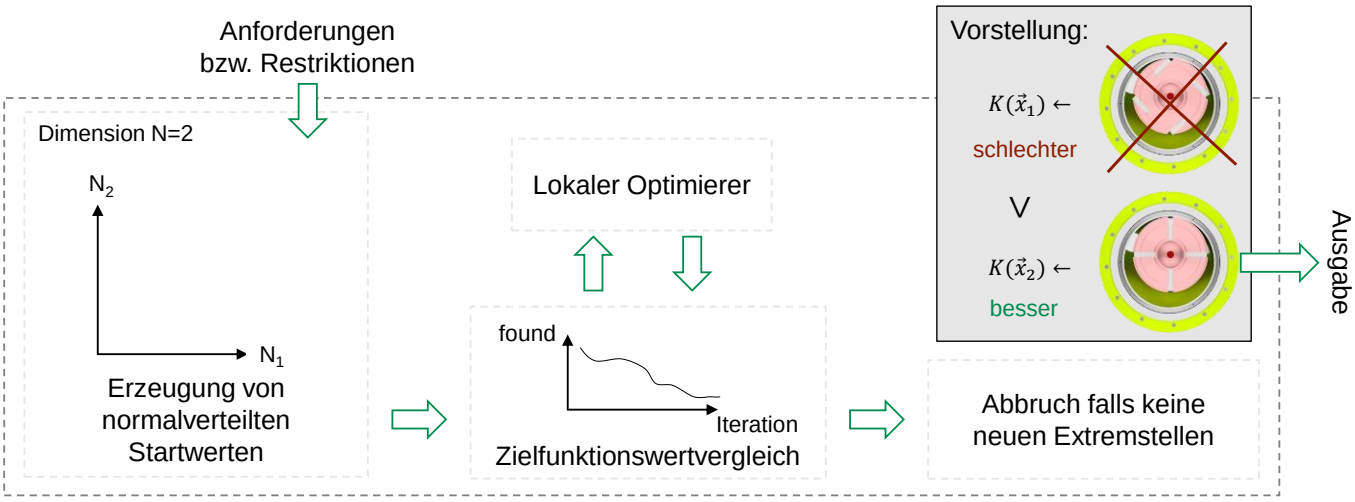


Abbildung 4: Globaler Sucher mit Hilfe des lokalen Suchansatzes

Zu Beginn wird ein *Betrachtungsraum* definiert, indem die Suchgrenzen, beispielsweise der zur Verfügung stehende Bauraum des Verdichters, festgelegt werden. Diese müssen für jeden *Input* Parameter festgelegt sein, damit keine Startgeometrie erzeugt wird, welche nicht den Anforderungen entspricht. In Abbildung 4 stehen die *Dimensionen* des *Betrachtungsraums* für die variablen *Input* Parameter des *lokalen Optimierers*. Innerhalb der festgelegten Grenzen werden normalverteilte Geometrien (*Input*) innerhalb des *Betrachtungsraums* erzeugt. Diese Startgeometrien sind der Ausgangspunkt für den lokalen Optimierer (hier: *Gradientenverfahren)*. So wird für jede übergebene Startgeometrie, ein lokales Optimum erzeugt und im *Zielfunktionswertvergleich* abgespeichert. Innerhalb des *Zielfunktionswertvergleiches* sind die ermittelten Zielfunktionswerte der *Zielfunktion* chronologisch abgelegt und werden mit Hilfe eines Zeitfensters betrachtet. Innerhalb dieses Zeitfensters können so chronologisch neu gefundene absolute Minimalstellen ermittelt und als Wert zur Weiterführung des Vorgangs genutzt werden. Unterschreitet die Anzahl der neu gefundenen absoluten Minimalstellen einen Grenzwert, findet der *Abbruch* des Verfahrens statt. So soll gewährleistet werden, dass in Bezug zum *Betrachtungsraum* ideale geometrische Grundgrößen gefunden und dabei die Kundenspezifikationen aufgrund der *Zielfunktion* eingehalten werden.

3.4 Ergebnisse aus der Praxis

Das vorgestellte Verfahren konnte bereits in der Praxis erprobt werden, die dazugehörigen Ergebnisse werden nun gezeigt. Es soll zu Beginn auf den Minimalstellenfindungsverlauf in Abbildung 6 eingegangen werden.

Chronologische Minimierung innerhalb eines Iterationsfensters

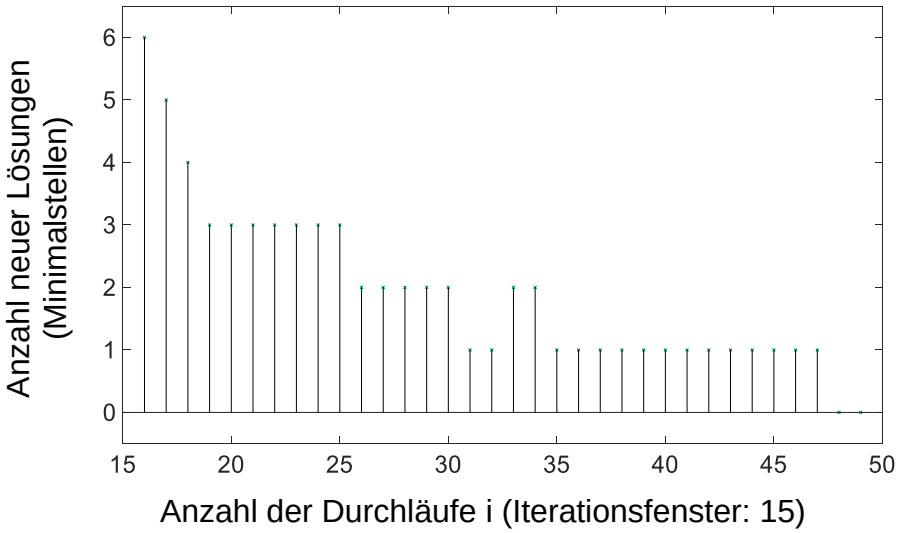


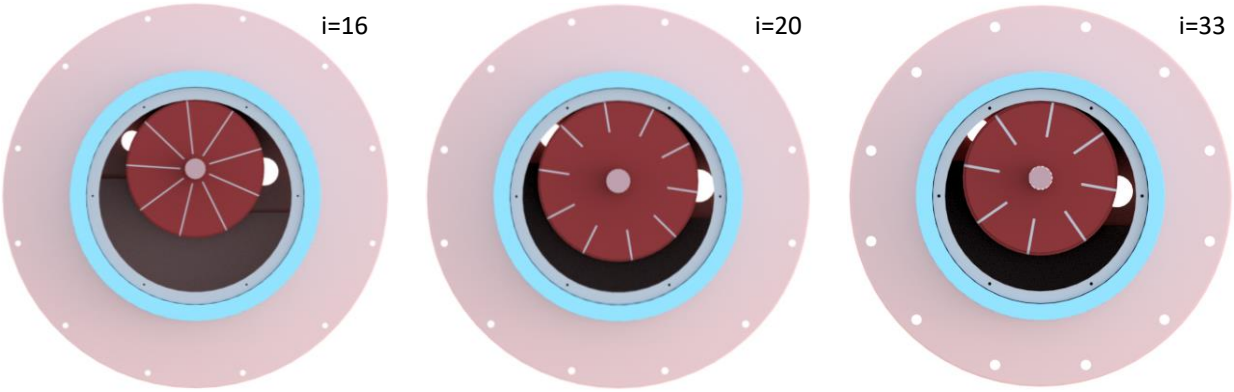
Abbildung 6: Gefundene Minimalstellen über ein Iterationsfenster

Die Abbildung zeigt eine sich reduzierende Anzahl von neu gefundenen Minimalstellen über dem Iterationsfenster von 15 zurückliegenden Zielfunktionswerten lokal gefundener, idealer Geometrien des Drehschieberverdichters. Es werden die in chronologischer Reihenfolge gefundenen neuen Minimalstellen bis zum 49. Rechenschritt ermittelt. Beispielsweise wurde im Durchlauf $i = 20$ in den zurückliegenden 15 Iterationsschritte drei bessere Lösungen in Folge gefunden. Die für dieses Verfahren verwendete *Zielfunktion* ist in der nachfolgenden Formel (5) dargestellt:

$$\mathrm{K}(\mathrm{W_{reib}}, \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{ist}}, \Delta \mathrm{p_{ist}}) = 1 \cdot \frac{W_{reib}}{W_{ref}} + 1 \cdot \frac{(\dot{m}_{soll} - \dot{m}_{ist})^2}{\dot{m}_{soll}} + 1 \cdot \frac{(\Delta p_{soll} - \Delta p_{ist})^2}{\Delta p_{soll}} \tag{5}$$

Die jeweiligen Einträge besitzen den gleichen Gewichtungsfaktor. Nachfolgend sind

eine Auswahl ermittelter Geometrien des Drehschieberverdichters, welche mit der *Zielfunktion* Formel (5) ermittelt worden sind, abgebildet.



$r_g = 144{,}4\ mm$	$r_g = 114{,}7\ mm$	$r_g = 82{,}5\ mm$
$r_r = 103{,}7\ mm$	$r_r = 96{,}2\ mm$	$r_r = 66{,}9\ mm$
$N = 9$	$N = 10$	$N = 8$
$f = 3{,}25\frac{1}{s}$	$f = 4{,}30\frac{1}{s}$	$f = 12{,}96\frac{1}{s}$
$\dot{m}_{ist} = 49{,}56\frac{kg}{h}$	$\dot{m}_{ist} = 49{,}96\frac{kg}{h}$	$\dot{m}_{ist} = 49{,}95\frac{kg}{h}$
$\Delta p_{ist} = 1{,}49\ bar$	$\Delta p_{ist} = 1{,}50\ bar$	$\Delta p_{ist} = 1{,}50\ bar$
$KW = 9{,}28$	$KW = 4{,}55$	$KW = 3{,}00$
Schlechte Konstruktion	**Mittlere Konstruktion**	**Gute Konstruktion**

Abbildung 7: Verdichtervergleich verschiedener ermittelter Geometrien

In der Abbildung ist links der beste Verdichter dargestellt, nach rechts werden die Verdichter angesichts der Zielfunktion ungeeigneter für den Endanwender. Mit dem Verfahren kann gezeigt werden, dass das Ziel einer automatisierten, konstruktiven Anpassung von Baugruppen unter Beachtung von systematisch ausgearbeiteten Anforderungen gelingen kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Eines der Ziele des hier vorgestellten Programms ist es, eine variable Baureihenentwicklung zu ermöglichen. Mit Hilfe dieser variablen Baureihenentwicklung soll es möglich sein unter Vorgabe von Randbedingungen, einen optimalen Drehschieberverdichter zu ermitteln. Dabei wird das Systemverhalten von verschiedenen miteinander in Wechselwirkung

stehenden Teilmodellen berücksichtigt und so ein komplexes Modell zur konstruktiven Dimensionierung des Drehschieberverdichters als Grundlage genutzt. Darüber hinaus sollen Normreihen als Grundlage zur Dimensionierung dienen und gleichzeitig CAD-Daten zur sofortigen Umsetzung der Konstruktion erstellt werden. Dann sind ein vollständig automatisierter Berechnungs- und Dimensionierungsablauf sowie fertigungsgerechte technische Zeichnungen und CAD-Daten zu den jeweiligen Geometrien möglich.

In Zukunft soll dieses Programm reale Messdaten von Prüfstandsversuchen verarbeiten können. Dadurch soll es möglich werden, mit Ansätzen der neuronalen Netze, die Aussagen des bisher implementierten Modells zu verbessern. Neuronale Netze sind in der Lage, gespeichertes Wissen schnell abzurufen und bieten so die Möglichkeit aufwändige Berechnungen zu umgehen, was hohe Priorität bei dem hier vorgestellten Verfahren hat. Als Grundlage eines neuronalen Netzes muss in diesem System die Differenz zwischen Modellvorhersage und Prüfstandsergebnissen gesehen werden. Wenn diese Differenz mit Hilfe von einer überlagerten Korrekturfunktion, in diesem Fall das neuronale Netz, geschlossen wird, können so die Genauigkeit sowie das Optimierungspotenzial des Produktes auf Basis der gewonnenen Daten nachhaltig ausgebaut werden. Die Datenerhebung kann beispielsweise bei dem Kunden selbst durch diverse Sensorik geschehen, wie es heute bereits bei verschiedenen Produkten geschieht.

Literatur

[1] Marc Thomas, Universität Dortmund Dissertation: Design und Analyse integrierter Schaltungen mit evolutionären Algorithmen, Dortmund, 2001

[2] Jakob Wilfried: Eine neue Methodik zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit Evolutionärer Algorithmen durch die Integration lokaler Suchverfahren. In: at - Automatisierungstechnik Bd. 52 (2004), Nr. 4–2004, S.198–199

[3] Klein Bernol: Zum Einsatz nichtlinearer Optimierungsverfahren zur rechnerunterstützen Konstruktion ebener Koppelgetriebe. In: Mechanism and Machine Theory Bd. 16 (1981), Nr.5, S.567–576

[4] I. Timar: Optimierung ebener Fachwerke mit mehreren Zielfunktionen. In: Forschung im Ingenieurwesen Bd. 68 (2004), Nr.3, S.121–125

[5] Vossen Laurenz, Göllmann Reinhold, Hübl Susan, Pulham Stefan, Ritter Henning, Schon Karlheinz, Schüffler Ursula, Vös Georg: Mathematik für Ingenieure: Verstehen, Rechnen, Anwenden. Springer, 2017

Klassifizierung von Normen zur Eignung für eine Maschinenumsetzbarkeit

André Loibl, Arun Nagarajah

Lehrstuhl für Produktentwicklungsprozesse und Datenmanagement, Universität Duisburg-Essen
Lotharstraße 1, 47057 Duisburg
E-Mail: andre.loibl@uni-due.de; Internet: http://www.uni-due.de/pep

Inhalt: *Wenn Maschinen oder andere Ausgabegeräte miteinander kommunizieren müssen, um z.B. autonom Prozesse in Fertigungsprozessen durchzuführen, müssen alle notwendigen Informationen für sie zugänglich sein. Heute sind die erforderlichen Informationen jedoch in Normen dokumentiert, die nur als PDF oder gar in Papierform vorliegen. Voraussetzung für die Verwendung von Informationen aus Normen ist daher, dass diese automatisch in Ausgabegeräten bereitgestellt werden. Ein genauerer Blick führt zu drei Reifegraden für die Verwendung von Standardinformationen in Ausgabegeräten: maschinenlesbar, maschinenumsetzbar und maschineninterpretierbar. Ausgehend von einer klaren Definition dieser Begriffe wird ein Ansatz zur Umsetzung maschinenumsetzbarer Normen entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass nicht alle Normen für maschinentaugliche Anwendungen geeignet sind, und daher ist der erste Schritt die Klassifizierung der Normen zur Identifizierung der entsprechenden Normen. Der zweite Schritt beschreibt, wie Informationen aus Normen modelliert werden können, um in maschinentauglicher Form zur Verfügung zu stehen.*

Stichwörter: *Normen, Industrie 4.0, Maschinenlesbar, Maschinenumsetzbar, Maschineninterpretierbar*

Classification of standards to determine their suitability for a machine-actionability

Abstract: *When machines or other output devices need to communicate with each other, for example, to autonomously perform processes in manufacturing processes, all the necessary information must be accessible to them. Today, however, the required information is documented in standards that are only available in PDF or even paper form. Thus, a prerequisite for using information from standards is that these are automatically provided in output devices. A deeper look leads to three levels of maturity for using standard information in output devices: machine-readable, machine-actionable and machine-interpretable. Starting from a clear definition of these terms an approach is developed to implement machine-actionable standards. It is assumed that not all standards are suitable for machine-actionable and therefore the first step is to classify the standards to identify the appropriate standards. The second step describes how information from standards can be modelled to be available in a machine-actionable form.*

Keywords: *Standards, Industry 4.0, Machine-readable, Machine-actionable, Machine-interpretable*

1 Einleitung

Eine Umfrage unter den Vorständen deutscher Industrieunternehmen ergab, dass die folgenden Konzepte im Zusammenhang mit Smart Factories bis 2022 interessant sind: Datenfähige Ressourcenoptimierung (bis zu 77%), vernetzte Fabrik (bis zu 60%), Übertragung von Produktionsparametern (bis zu 32%) [1].

Um diese Konzepte umzusetzen, ist es notwendig, dass Systeme und Maschinen Zugang zu digitalen Daten und Informationen haben. Ein wesentlicher Wissensträger für Informationen im Produktentwicklungsprozess sind Normen. [2] Wie sind diese Normen heute in Unternehmen verfügbar? Normen liegen in der Regel im PDF-Format vor, so dass ein automatischer Zugriff auf die relevanten Informationen in den Normen durch ein Ausgabegerät wie einer Maschine nicht möglich ist [3]. Zu diesem Zweck müssen diese Informationen vom Benutzer manuell aufbereitet und dem gewünschten Ausgabegerät zur Verfügung gestellt werden. Dieser manuelle Schritt muss im Hinblick auf die automatische Verknüpfung von Objekten, z.B. im Rahmen der "Smart Factory", automatisch durchgeführt werden. Bereits 2016 starteten DIN und VDE das Programm "Normung 2020" mit dem Ziel, umfassende Dienstleistungen und digitalisierte Produkte "rund um die Norm" anzubieten. Eine wichtige Anwendung ist die direkte Integration von Informationen in die Steuerung von Produkten oder Produktionsanlagen [4].

Ziel dieser Publikation ist es daher, die Voraussetzungen für eine maschinenumsetzbare Norm zu ermitteln und eine Klassifizierung zu entwickeln, um Normen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Maschinenumsetzbarkeit zu bewerten.

2 Definitionen

In Beiträgen zum Thema Bereitstellung von Informationen und Daten in Kombination mit Industrie 4.0 werden häufig Begriffe wie maschineninterpretierbar [5, 6], maschinenumsetzbar [7] oder maschinenlesbar [8, 9] verwendet. Sowohl in der Praxis als auch in den wissenschaftlichen Arbeiten gibt es jedoch keine klare Definition dieser Begriffe [7, 10, 11].

Teilweise werden unter dem gleichen Begriff unterschiedliche Definitionen und Reifegrade der verfügbaren Daten verstanden. Daher ist der erste Schritt die Klassifizierung und Definition der Begriffe, wie sie in diesem Beitrag verwendet werden.

Alle drei Begriffe sind im Rahmen von Industrie 4.0 zu verwenden und beschreiben unterschiedliche Stärken der Darstellungsformen und müssen hierarchisch angeordnet werden. (vgl. Abbildung 1) Mächtigkeit bedeutet, dass die Maschine je nach Reifegrad der Informationen mehr Möglichkeiten zur Verarbeitung der Informationen erhält. Diese Leistungssteigerung wird im Folgenden in den Definitionen der einzelnen Begriffe erläutert.

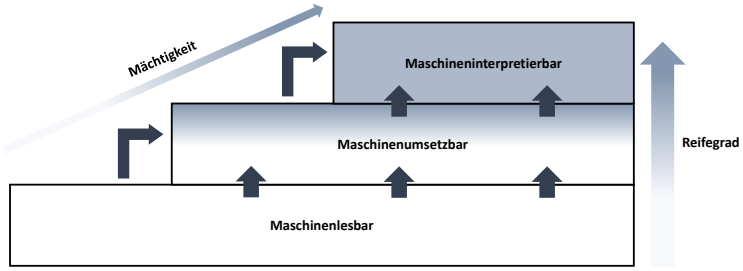


Abbildung 1: Hierarchische Einordnung der Begriffe Maschinenlesbar, Maschinenumsetzbar und Maschineninterpretierbar

Definition maschinenlesbar:

Physikalische Informationen werden in einem Ausgabegerät (z.B. einer Maschine) dargestellt (z.B. visualisiert).

In der Klassifikation der Mächtigkeit stellt maschinenlesbar die schwächste Form der Informationsverarbeitung dar. Das bedeutet, dass die physikalischen Informationen von der Maschine als einzelne, eigenständige, darstellbare Zeichen dargestellt werden. Diese Form der Darstellung kann verwendet werden, um die Informationen für den Benutzer darzustellen. Es gibt keine Semantik, Logik oder sinnvolle Verbindung zwischen diesen Zeichen. Darstellungsformen sind z.B. ein PDF-Dokument und mögliche Ausgabegeräte dafür können mobile Geräte, stationäre Computer, etc. sein.

Definition maschinenumsetzbar:

Die Operationen in einem Ausgabegerät werden automatisch auf der Grundlage von Modellen durchgeführt, die aus den physikalischen Informationen abgeleitet werden.

Ausgehend von der Semantik der physikalischen Informationen wird eine bestimmte Operation automatisch in einem Ausgabegerät erzwungen. Grundlage dafür sind die maschinenlesbaren Informationen. Die angegebenen Operationen werden automatisch aus den verschiedenen Informationsobjekten wie Werten, Tabellen, Formeln usw. abgeleitet.

Definition maschineninterpretierbar:

Die Entscheidung, die Operationen in einem Ausgabegerät optimal durchzuführen, wird autonom aus den physikalischen Informationen abgeleitet.

Das Ausgabegerät, z.B. in Form einer Maschinenbediensoftware, ist in der Lage, die optimalen Bearbeitungsvorgänge für ein Bauteil zu bestimmen und selbstständig durchzuführen. Somit stellt die maschineninterpretierbare Form die mächtigste Darstellungsform von Informationen dar. Die Informationen werden so dargestellt, dass Begriffe und Formeln durch Ontologien miteinander verbunden sind. So kann die Maschine die vorhandenen Daten automatisch in einen Kontext stellen und Anweisungen ausführen und inhaltliche Einschränkungen erkennen - automatische Rückschlüsse sind somit möglich. Qualitätsmerkmale, Toleranzen und Prüfprotokolle können automatisch generiert, akzeptiert und ausgewertet werden.

3 Stand der Technik

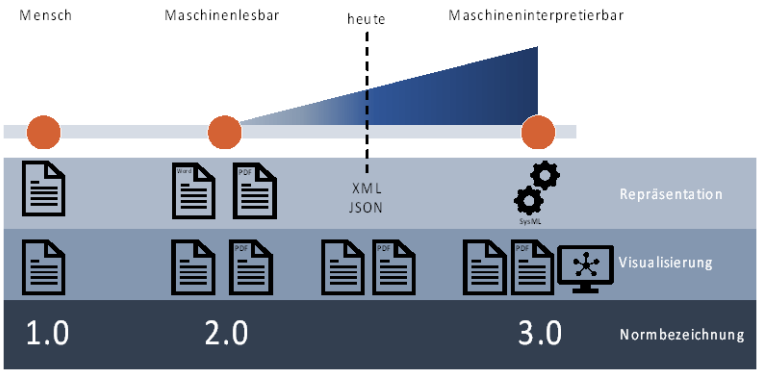


Abbildung 2: Chronologische Einordnung der Repräsentation von Norminhalten

Wenn heute mit Normen gearbeitet wird, liegen diese in Papierform oder als PDF-Dokumente vor [12]. (vgl. Abbildung 2) Der Anwender muss die Dokumente durchsuchen, um die Lösungen für seine Probleme zu finden. Das bedeutet, wenn er die für ihn relevanten Informationen gefunden hat, z.B. eine Berechnungsformel, Bemessungsvariablen für Normteile, Toleranzen oder Sicherheitsabstände, muss er diese manuell in seinen Prozess übernehmen. Die Informationen werden dann in diesen Prozessen verarbeitet, dies geschieht entweder durch das Wissen des Benutzers oder durch externe Programme, die die einzelnen Informationen verarbeiten können [13]. Daraus kann als Schlussfolgerung gesagt werden: Heute sind Normen so verfügbar, dass nur eine manuelle Bedienung möglich ist. Das

bedeutet, dass die Informationen unabhängig vom Originalbetriebssystem oder der Hardwareplattform originalgetreu reproduziert werden können, eine Weiterverarbeitung ist jedoch nicht automatisch möglich. Seit kurzem werden von DIN-Normen im XML-Format, mit dem Ziel der zentralen Speicherung und Weiterverwendung in verschiedenen Recyclingformen und Produkten, erstellt [14]. Zum Beispiel Suchfunktionen in Dokumenten. Hieraus lässt sich erkennen, dass man bereits heute nach alternativen und neutralen Datenformaten sucht, um Informationen in neutralen Modellierungsnotationen bereitzustellen. XML eignet sich zwar als Modellierungsnotation, aber die Inhalte sind in der aktuell verwendeten Form von XML nicht maschinenumsetzbar. Aus der heutigen Arbeitsweise mit Normen lässt sich ableiten, dass es nicht möglich ist, diese ohne großen zusätzlichen Aufwand seitens Dritter in eine I4.0-Umgebung zu integrieren.

4 Ziel der Arbeit

Um die Defizite gegenüber dem aktuellen Stand der Technik zu reduzieren, ist es das Ziel dieser Arbeit, die folgenden Forschungsfragen zu untersuchen: Wie können Norminhalte modelliert und in einer maschinenumsetzbaren Form zur Verfügung gestellt werden?

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Teilziele definiert:

Teilziel 1: Normen werden nach der Möglichkeit der maschinellen Konvertierbarkeit klassifiziert (formal zu abstrakt und Fokus auf formale Normen): Es wird davon ausgegangen, dass nicht alle bestehenden Normen für die Maschinenumrüstung geeignet sind. Daher sollte zunächst eine Methode entwickelt werden, um geeignete Normen durch Klassifizierung zu identifizieren.

Teilziel 2: Es wird eine geeignete Modellierungssprache identifiziert, um die Informationen in den Normen zu modellieren. Dabei wird ein Auswahlverfahren zur Ermittlung der geeigneten Modellierungssprache durchgeführt.

5 Methode zur Digitalisierung von Norminhalten

Aus den Teilzielen dieses Beitrags kann folgendes Vorgehensmodell (vgl. Abbildung 3) abgeleitet werden: Im ersten Schritt ist es Notwendig die Normen zu klassifizieren um anschließend im zweiten Schritt herauszufinden wie die Inhalte modelliert werden können.

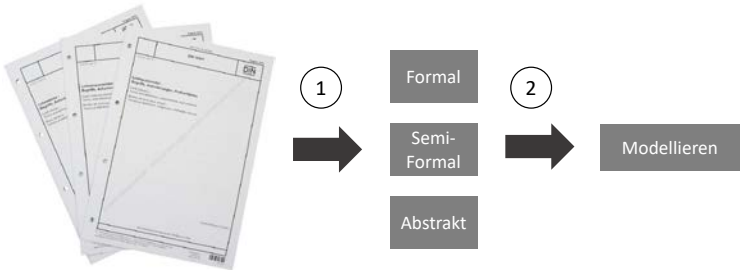


Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Digitalisierung von Norminhalten

5.1 Klassifizieren der Normen

Der Aufwand für die Digitalisierung von Informationen hängt von der Form ab, in der die Informationen zur Verfügung stehen, was bereits nach dem Stand der Technik nachgewiesen ist. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit ein Vorschlag für eine Klassifizierung von Informationen gemacht werden. Wie im Vorgehensmodell mit Schritt 1 (vgl. Abbildung 3) gezeigt, soll mit Hilfe dieser Klassifizierung es möglich sein, die in Dokumenten enthaltenen Informationen zu klassifizieren und dann abzuschätzen, wie viel Aufwand erforderlich ist, um die Informationen in einer maschinenumsetzbaren Form zur Verfügung zu stellen.

Der erste Schritt ist die Analyse, welche Objekte in Normen verwendet werden, um die Informationen darzustellen. Folgende Objekte können identifiziert werden: Texte, Formeln, Tabellen und Abbildungen. Diese Objekte können unterschiedliche Eigenschaften haben, daher sind für einige Objekte weitere Unterteilungen notwendig, um die Objekte in ihren Eigenschaften zu beschreiben.

Texte: Texte können unterschiedliche Eigenschaften haben: Sie können beschreibend sein, Eigenschaften spezifizieren, als Erklärung/Erklärung für Abbildungen oder Inhalte dienen und als konkrete Anweisungen formuliert werden.

Formeln: Formeln sind in Normen angegeben und werden zur Berechnung von Werten verwendet.

Tabellen: Tabellen können mit Zahlen oder Werten gefüllt werden, aber es gibt auch Tabellen, in denen verschiedene Klassen, die durch Eigenschaften beschrieben, zugeordnet werden.

Abbildungen: Es gibt verschiedene Funktionen die Abbildungen in Normen erfüllen. Zur Beschreibung der Berechnungswerte oder Bemessungsgrößen können Grafiken oder Diagramme verwendet werden. Ebenso können aber auch technische Zeichnungen oder bei Prozessen die entsprechenden Arbeitsablaufpläne angezeigt werden.

Tabelle 1: Bewertung der Eindeutigkeit der identifizierten Objekte

Objekt	Eigenschaft	Eindeutigkeit	Transformierbar
Text			
	Beschreibend	Niedrig	
	Eigenschaft	Hoch	
	Erklärung	Niedrig	
	Anweisung	Mittel	
Formel		Hoch	
Tabelle			
	Zahl	Hoch	
	Klassifizierung	Mittel	
Abbildung			
	Graph	Mitte	Tabelle
	Diagramm	Mittel	Tabelle
	Technische Zeichnung	Mittel	
	Prozessbeschreibung	Mittel	

Für eine Maschinenumsetzbarkeit wird diesen Objekten eine Eindeutigkeit zugeordnet, die in hoch, mittel und niedrig unterteilt ist. Je höher die Eindeutigkeit, desto besser sind die Objekte für die Maschinenumsetzbarkeit geeignet. Um die Übersichtlichkeit einiger Objekte zu erhöhen, ist es möglich, sie in andere Objekte zu transformieren. So können beispielsweise Diagramme in Tabellen umgewandelt werden.

Um die Objekte in drei Kategorien einzuteilen, werden die folgenden Regeln angewendet. Wenn es eine große Anzahl von Objekten gibt, die einen hohen Anteil an klar definierbaren Objekten haben, werden sie dem Formal zugeordnet; wenn sie einen mittleren Anteil haben, werden sie dem Semi-Formal zugeordnet, und wenn sie einen geringen Anteil haben, werden sie dem Abstract zugeordnet.

Definition abstrakte Norm:

Normen, die der Klasse abstrakt zugeordnet sind, bestehen meist aus Objekten, die eine geringe Eindeutigkeit aufweisen wie Texte, diese werden bei der maschinellen Bearbeitbarkeit nicht weiter berücksichtigt. Ein Beispiel dafür ist die ISO 9001.

Definition semi-formale Norm:

Semi-formale Normen sind Normen, die Informationen in verschiedenen Darstellungsformen enthalten. Einige davon beinhalten auch Textkomponenten, die Zustände beschreiben, Klassifizierungen ausgeben oder Prüfverfahren beschreiben. Aber auch zu einem großen Teil Informationen enthalten, die in der formalen Beschreibung vorliegen wie: Tabellen mit Werten oder mathematischen Formeln, oder aber beschreibende/erklärende/definitive Texte, die leicht in if/then-Anweisungen umgewandelt werden können. Es ist möglich, semi-formale Normen in formale Normen zu transformieren.

Definition formale Norm:

Als formale Norm können Normen klassifiziert werden, deren Informationen ein hohes Maß an Eindeutigkeit aufweisen, wie beispielsweise Formeln oder Tabellen mit Werten. Als Beispiel sei eine Norm zur Beschreibung von Bauteilgrößen (z.B. für Flansche) genannt. Formeln können auch zur Bestimmung von Dimensionierungsvariablen verwendet werden.

5.2 Auswahl einer geeigneten Modellierungssprache

Nach dem ersten Schritt des Vorgehensmodell der Klassifizierung einer Norm, folgt nun der zweite Schritt in dem die Inhalte in die Maschinenumsetzbarkeit überführt werden. (vgl. Abbildung 3) Hierzu wird untersucht welche Modellierungssprachen derzeit zur Verfügung stehen. Mithilfe dieser Modellierungssprache werden die Informationen in eine maschinenumsetzbare Form überführt, so dass die Inhalte dann in den jeweiligen Anwendungsbereichen zur Verfügung gestellt werden können.

Nach der Recherche in den verfügbaren Modellierungssprachen wurden JSON, XML, HTML und YAML als gängige Formate zur Datenstrukturierung gefunden. In Tabelle 2 wird eine Bewertung der Modellierungssprachen hinsichtlich der gestellten Anforderungen durchgeführt.

Tabelle 2: Bewertung der Anforderungen an die Modellierungssprache

Anforderung	XML	JSON	HTML	YAML
Universelle Anwendbarkeit	Hoch	Mittel	Niedrig	Mittel
Praktische Relevanz	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel
Komplexität der Sprache	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch
Open Source	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Lesbarkeit	Mittel	Hoch	Niedrig	Hoch
Automatische Weiterverarbeitung	Mittel	Hoch	Niedrig	Mittel
Änderungsmöglichkeit	Mittel	Hoch	Niedrig	Hoch
Ressourcennutzung	Mittel	Niedrig	Mittel	Mittel

Die universelle Einsetzbarkeit von JSON kann als Mittel eingestuft werden, da keine komplexen Auszeichnungen möglich sind und XML flexibler genutzt werden kann. In Bezug auf die praktische Relevanz kann JSON als hoch eingestuft werden, da es sich um eine vereinfachte Markup-Sprache handelt und eine standardisierte Struktur bietet, die klar definiert, wie die Daten dargestellt werden. In der Komplexität der Sprache ist XML höher zu klassifizieren, da es deutlich mehr Funktionen bietet als die Markup-Sprache und somit komplexe Markups ermöglicht. In Bezug auf die Verwendung von Open Source unterscheiden sich XML und JSON nicht und sind hier als hoch einzustufen. In Bezug auf die menschliche Lesbarkeit kann JSON als hoch eingestuft werden, da die Strukturierung der Daten für den Menschen natürlicher erscheint. Im Hinblick auf die automatisierte Weiterverarbeitung ist JSON aufgrund seiner direkten Umsetzbarkeit in JavaScript als hoch einzustufen. Auch die Möglichkeiten um Änderungen durchzuführen sind im Vergleich zu XML als deutlich einfacher einzuordnen und damit ebenso hoch. Der Bedarf an Ressourcenauslastung wird von JSON als gering eingestuft, da die Dateien kleiner als XML-Dateien sind und einen schnelleren Zugriff ermöglichen.

Somit wurde JSON als Modellierungssprache ausgewählt. Die Merkmale der geringen Komplexität der Sprache, die für den Menschen leicht zu lesen ist, eine sehr gute Möglichkeit zur weiteren automatischen Verarbeitung und ein geringer Ressourcenbedarf an das System führten zu dieser Entscheidung.

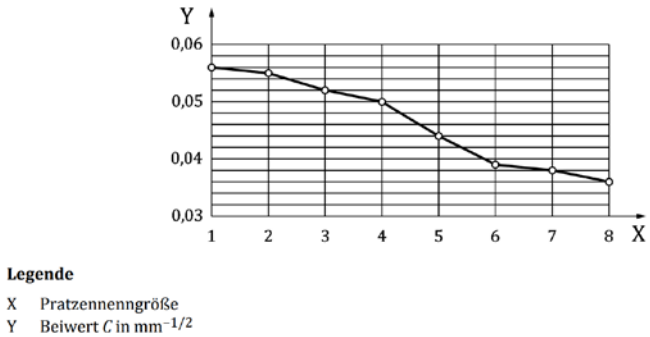
6 Validierung

Um das vorgestellte Vorgehensmodell zu validieren, wird nun die Norm DIN 28083 betrachtet, die Pratzen mit Verstärkungsblechen beschreibt. Die Norm besteht aus 11 Seiten und ist daher nicht sehr groß und für ein begrenztes Beispiel gut geeignet.

Der erste Schritt ist die Klassifizierung der Norm nach dem Vorgehensmodell. Es können folgende Objekte identifiziert werden:

Abbildungen mit technischen Zeichnungen, deren Eindeutigkeit als Mittel eingestuft wird. Tabellen mit Dimensionen, d.h. Zahlen, deren Eindeutigkeit als hoch einzustufen ist. Formeln, deren Eindeutigkeit ebenfalls hoch ist. Abbildungen mit Graphen, deren Eindeutigkeit als Medium einzustufen ist, aber durch eine Transformation in eine Tabelle, ist auch hier die Eindeutigkeit hoch. (vgl. Abbildung 4) Texte, die die Eigenschaften der Parameter beschreiben und somit als hoch einzustufen sind. Texte, die die Eigenschaften der Bezeichnung darstellen, deren Eindeutigkeit ebenfalls als hoch einzustufen ist.

Somit kann die Norm aufgrund ihrer hohen Eindeutigkeit als formal eingestuft werden und ihr Inhalt eignet sich für die Umsetzung als maschinenumsetzbaren Norm nach dem Vorgehensmodell.



Pratzennenngröße	Beiwert C in $mm^{-1/2}$
1	0,056
2	0,055
3	0,052
4	0,050
5	0,044
6	0,039
7	0,038
8	0,036

Abbildung 4: Transformation Graph zu Tabelle

Im zweiten Schritt soll exemplarisch gezeigt werden, wie dieser Graph transformiert in eine Tabelle nun im JSON-Format in ein maschinenumsetzbares Format gebracht wird. (vgl. Abbildung 5)

```
10    "Chapter":
11    {
12        "Table 1":
13        {
14          "Titel": "Determination of the coefficient C on the basis of the nominal bracket sizes",
15          "Table 1":
16          {
17            "nominal bracket size":
18            [
19              "1",
20              "2",
21              ".."
22            ],
23            "coefficient C":
24            [
25              "0,056",
26              "0,055",
27              ".."
28            ]
29          }
30        }
31    }
32  }
```

Abbildung 5: Darstellung der Tabelle im JSON-Format

7 Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, die ersten Grundlagen für maschinenumsetzbare Normen zu entwickeln, die im Rahmen von Smart Factory Lösungen eine wichtige Rolle spielen. Es wurde gezeigt, wie bestehende Normen klassifiziert werden können, um Normen zu identifizieren, die mit vertretbarem Aufwand maschinenumsetzbar gemacht werden können. Es wurde gezeigt, wie die Inhalte mit der Modellierungssprache JSON modelliert werden können. So konnte im Validierungsbeispiel gezeigt werden, dass die Methoden und Lösungen sowie das Verfahren geeignet sind, maschinenumsetzbare Normen zu erstellen.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit werden genutzt, um den Prozess zur Erstellung von Normen zu optimieren. Es wurde gezeigt, dass die Normen bereits nach der vorgestellten Methode klassifiziert und in eine maschinenumsetzbare Form gebracht werden können. Um Normen zukünftig direkt maschinenumsetzbar bereitzustellen wird das Duisburger 3M-Modell für maschinenumsetzbare Normen entwickelt. Das erste M steht für Modularisierung, die Zerlegung von Standardinhalten in Wissensmodule. Das zweite M steht für Modellierung, die Umsetzung der Wissensmodule in ein maschinenlesbares Format. Was als die höchste und mächtigste Ebene anzusehen ist. Und das dritte M, das Management. Die zur Bereitstellung und Verwaltung der Standardinhalte dient. Jedes einzelne M stellt einen so

großen Themenbereich an sich dar, dass in Zukunft eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Module erfolgen wird und dafür spezifische Methoden entwickelt oder erstellt werden.

Literatur

[1] Kantar EMNID, Smart Factory – Nutzung unternehmensrelevanter Konzepte in Deutschland 2017, PwC, 2017.

[2] Feldhusen, J., Grote, K.-H., Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 8. Aufl. Berlin: Springer, 201. – ISBN 978-3-642-29568-3, S. 152-199.

[3] Rieger, B., Benjamins, A., Text Mining in wissenschaftlichen Publikationen, 2014, S. 8.

[4] DKE, https://www.dke.de/de/normen-standards/normung2020, abgerufen am: 7.06.2019.

[5] Sinoara, R. A., Camacho-Collados, J., Rossi, R.G., Navigli, R. und Rezende, S. O., Knowledge enhanced document embeddings for text classification, Knowledge-Based Systems, Vol. 163, 2018.

[6] Fleischmann, H., Kohl, J. and Franke, J., A Reference Architecture for the Development of Socio-Cyber-Physical Condition Monitoring Systems, IEEE, 2016, DOI: 10.1109/SYSOSE.2016.7542963.

[7] Houy, C., Fettke, P. und Loos, P., Stilisierte Fakten der Ereignisgesteuerten Prozesskette – Anwendung einer Methode zur Theoriebildung in der Wirtschaftsinformatik, EPK 2009, S. 22-41, 2009.

[8] Studer, R., Benjamins, V.R. and Fensel, D., Knowledge Engineering: Principles and methods, Data & Knowledge Engineering, Vol. 25 (1997), pp. 161-197.

[9] Neururer, S. B., Lasierra, N., Peiffer, K. P. und Fensel, D., Formalizing the Austrian Procedure Catalogue: A 4-step methodological analysis approach, Jorunal of Biomedical Informatics, Vol. 60, 2016, S. 1-13.

[10] DIN-TERMinologieportal, https://www.din.de/de/service-fuer-anwender/din-term/suche-nach-benennung/wdc-dinterm-beg:din21:168267565?sourceLanguage=de&destinationLanguage=en, abgerufen am 07.06.2019.

[11] Büscher, C., Jeschke, S. and Meisen, T., Ontologiebasiertes Informationsmanagement für die Fabrikplanung, 18. IFF-Wissenschaftstage, 2015, S. 29-35.

[12] Beuth, https://www.beuth.de/de/erweiterte-suche/272754!search?alx.searchType=complex&searchAreaId=1&query=DIN+281&facets%5B276612%5D=&hitsPerPage=10, abgerufen am 12.06.2019.

[13] Manoharan, T., Köhler, P, Wissensbereitstellung als Service, 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 2018, S. 224-235.

[14] Wischhöfer, C., Standardisierung des ISO-XML Formats für Normen, DIN Mitteilungen, 2016.

Kopplung von Mixed Reality und einem digitalen Zwilling für den Wartungsprozess einer Industrieanlage

Steffen Kunnen, Dmytro Adamenko, Robin Pluhnau, Arun Nagarajah

Lehrstuhl für Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement, Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg
E-Mail: steffen.kunnen@uni-due.de; Internet: http://www.uni-due.de/pep

Inhalt: *Die Instandhaltung einer Industrieanlage beruht zum großen Teil auf veralteten Methoden und Prozessen. Sämtliche Wartungsinformationen werden analog dokumentiert und zeitversetzt in entsprechende Verwaltungssysteme überführt. Zukünftig sollen die Daten und Änderungen am realen Objekt ermittelt und in Echtzeit in das Verwaltungssystem übermittelt werden. Zur Datenerfassung im realen Umfeld eignet sich die Einbindung der erweiterten Realitäten. In diesem Beitrag wird ein systembasierter Ansatz vorgestellt, um Daten während der Servicephase einer Anlage in der Mixed Reality zu ermitteln und in Echtzeit an das PDM-System zu übertragen. Des Weiteren werden Anwendungsgebiete vorgestellt, in denen die generierten Datensätze verwendet werden können.*

Stichwörter: *Digitaler Zwilling, Extended Reality, Instandhaltung*

Coupling of Mixed Reality and a digital twin for the maintenance process of an industrial plant

Abstract: *The maintenance of an industrial plant is mainly based on outdated methods and processes. All maintenance information is documented in an analogue manner and transferred to the corresponding management systems at a later date. In the future, the data and changes will be determined on the real object and transferred to the management system in real time. The integration of the extended realities is suitable for data acquisition in the real environment. This paper presents a system-based approach for determining data in mixed reality during the service phase of a plant and transferring it to the PDM system in real time. Furthermore, application areas are presented in which the generated data sets can be used.*

Keywords: *Digital Twin, Extended Reality, Maintenance*

1 Einleitung

Der Wartungsprozess einer Industrieanlage ist ein weitestgehend manuell durchgeführter und analog dokumentierter Prozess. Das Serviceteam, das für die Durchführung der Wartung einer Anlage verantwortlich ist, führt während einer Servicephase, eine Sichtprüfung auf Schäden durch. Die Prüfungsergebnisse werden während der Begehung handschriftlich dokumentiert. Die dokumentierten Ergebnisse werden, nach der Prüfung und Klärung, in einem zweiten Schritt in ein Datenverwaltungssystem überführt. Der Gesamtprozess von der Begehung bis zur Generierung eines Serviceauftrages für Reparaturen an einer großen Kraftwerksanlage dauert heute etwa 3-4 Wochen.
Es werden einige Problemstellungen in der aktuellen Wartungssituation deutlich. Der Prozess ist ziemlich kosten- und zeitaufwendig. Durch die manuelle Dokumentation ist der Prozess anfällig für Fehler und die Informationsrückgewinnung für zukünftige Projekte nur minimal. Die schlechte und fehlerbehaftete Dokumentation führt dazu, dass während der Reparatur der Schäden Probleme durch schlechte oder fehlerhafte Abbildung des Anlagenzustands auftreten können. Die Informationen besitzen keine Durchgängigkeit, was in einem minimalen Lerneffekt für weitere Projekte resultiert. Die Konsequenzen für den aktuellen Wartungsprozess sind somit eine deutlich längere und kostenintensivere Wartungsphase. Gelingt es dem Betreiber nicht, während des Lebenswegs der Anlage, die AS-BUILT Dokumentation anzupassen und Änderungen der Anlage und des Betriebs schriftlich festzuhalten, verliert die AS-BUILT-Dokumentation ihre Wertigkeit und die Anpassungen und Änderungen müssen nachträglich identifiziert werden. Die schlechte Dokumentation des AS-IS Zustandes der Anlage führt zu einem Bruch in der Durchgängigkeit der Daten.

2 Stand der Technik

2.1 Wartungsprozess im Anlagenbau

Der Wartungsprozess einer Anlage startet mit der Kontaktaufnahme durch den Kunden, oder durch ein festgelegtes Wartungsintervall. Der Kontakt basiert im Regelfall auf dem telefonischen, elektronischen, oder analogen Weg. Ist eine Wartung seitens des Unternehmens möglich werden diesem die notwendigen Dokumente übermittelt. Diese Dokumente

umfassen neben den relevanten Informationen der Anlage auch den Umfang der Wartung. Anschließend kann ein Angebot erstellt werden, in dem ein Termin festgelegt und die Kosten sowie der Aufwand geplant sind. Wird der Auftrag angenommen wird der Inspektionsplan erstellt. In diesem Plan ist genau festgelegt welcher Mitarbeiter welche Aufgaben mit welchem Material erledigen kann. Anschließend die die Wartung durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt steht die Anlage still, sodass die Schäden ermittelt und kleine Reparaturen und Wartungsarbeiten durchgeführt werden können. Erst nach dem Abschluss der Wartung werden die ermittelten Daten verarbeitet und ein Inspektionsbericht angefertigt. [1]
Der Prozess der Inspektionsphase einer Anlage ist vereinfacht in Abbildung 1 dargestellt.

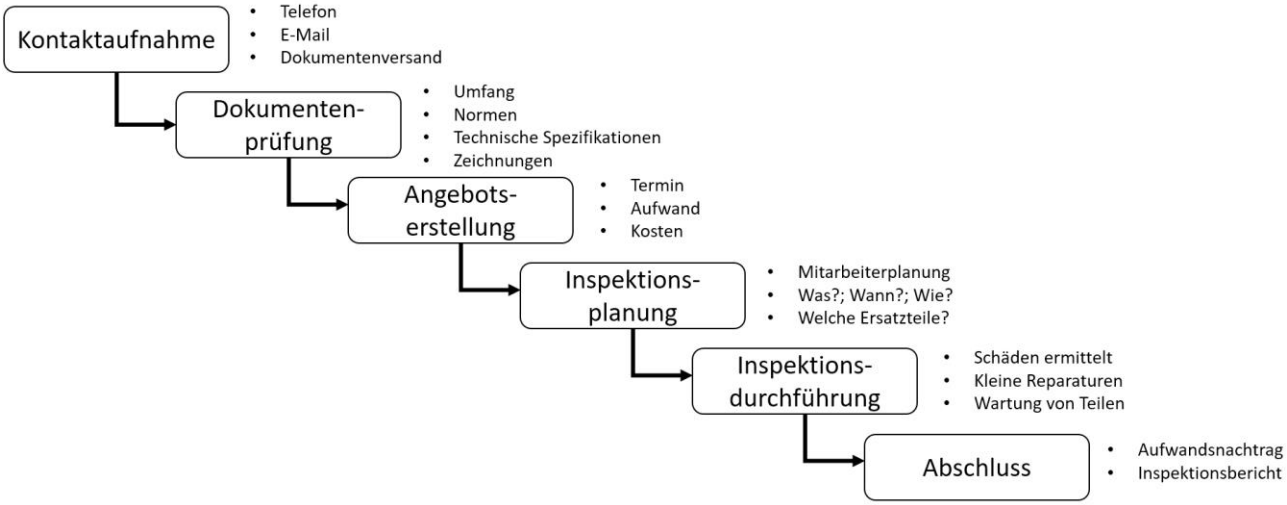


Abbildung 1: Inspektion einer technischen Anlage

Die Inspektionsplanung ist stark anhängig von der Qualität der vorliegenden Datensätze. Gerade bei großen Industrieanlagen sind vollständige Inspektionsberichte sowie frühere Wartungsunterlagen eher selten vorhanden. Eine Ursache für dieses Problem ist die analoge Dokumentation, die zeitversetzt oder gar nicht in die jeweiligen PDM Systeme überführt werden.

3 Zielsetzung

Jede Stillstandsphase bedeutet für den Betreiber einer Anlage eine große wirtschaftliche Belastung, da die Anlage in diese Zeit nicht produziert und somit keinen Gewinn einbringt. Damit die Wartungsphase einer Anlage effizient genutzt werden kann ist ein System

notwendig, das vorausschauend die notwendigen Aktivitäten plant und im besten Fall eine Vorhersage treffen kann, welche Komponenten wann gewartet oder getauscht werden müssen, sodass zukünftig ein reibungsfreier Betrieb gewährleistet werden kann. Um diesen Zustand einer Anlagenwartung zu erreichen eignet sich das Predictive Maintenance. Diese Methode ermöglicht dem Betreiber eine frühzeitige Vorhersage über bevorstehende Wartungsfälle. Damit Predictive Maintenance erfolgreich angewendet werden kann ist ein System notwendig, dass reale Betriebsdaten und -zustände ermitteln, verarbeiten und ausgeben kann. Dabei sollen die Daten durchgängig und in Echtzeit digital dokumentiert werden, sodass diese zu jedem Zeitpunkt verfügbar sind. Ein solches System bzw. eine solle Wartungsmethode führt zu einer reduzierten Durchlaufzeit von der Begehung der Anlage bis zum Anfertigen des Wartungsauftrages und somit zur Verkürzung des Stillstandsphase. Des Weiteren kann eine signifikante Reduzierung der relativen Fehler erreicht werden, in dem keine Daten verloren gehen und eine gute Qualität aufweisen. Die Betriebssicherheit wird erhöht, da Ausfälle durch fehlerhafte oder defekte Komponenten frühzeitig ermittelt und behoben werden können. Für den Betreiber bedeutet dies aus wirtschaftlicher Sicht eine optimale Ausnutzung der Stillstandszeit seiner Industrieanlage.

4 Datenerfassung und -bereitstellung

4.1 Extended Reality

Die verschiedenen Realitäten ermöglichen dem Nutzer, sich von der Beschränkung seiner Wahrnehmung der wirklichen Realität zu lösen und wie im Fall von Virtual Reality (VR) in gänzlich computergenerierte Welten "einzutauchen" oder durch Augmented Reality (AR) eine Anreicherung bzw. Überlagerung der wirklichen Umgebung mit zusätzlichen Informationen und interaktionsfähigen, digitalen Inhalten zu erleben.

Der Begriff Virtual Reality (VR) beschreibt eine in Echtzeit computergenerierte, virtuelle Realität, in die der Nutzer mit Hilfe von Technologien zur Interaktion und immersiven Wahrnehmung eintauchen kann. [2] [3]

Den Kontrast zur völligen Abschottung von der Umwelt bietet die Augmented Reality. Bei der AR erfolgt eine Überlagerung der realen Welt mit einem computergenerierten Bild bzw. dessen virtuellen Inhalten. Somit wird die Wahrnehmung der realen Welt durch die virtuellen

Inhalte erweitert (augmentiert). Der Nutzer hat die Möglichkeit sowohl mit der realen als auch mit der virtuellen Welt zu interagieren und die virtuellen Inhalte zu manipulieren. [3]
Je nach Anwendungsgebiet ist eine Kombination bzw. Vermischung beider Methoden notwendig. Die Mixed Reality (MR) bedeutet eine immersiv wahrgenommene Verschmelzung der virtuellen und realen Welt, sodass zwischen den realen und virtuellen Inhalten unterschieden werden kann. Abbildung 2 verdeutlicht die Abgrenzung zwischen den einzelnen Realitäten, die unter dem Oberbegriff der Extended Reality (XR) zusammengefasst werden. Eine Möglichkeit zur Abbildung der MR ist die Microsoft HoloLens. Diese ist ein autarker Computer, der es ermöglicht virtuelle Objekte und Daten in einem realen Raum anzuzeigen. Des Weiteren ist über Bewegungen des Anwenders eine Interaktion mit der virtuellen Umgebung möglich. Die HoloLens ist ein sogenannter Head-Mounted Display. Im Gegensatz zu den handelsüblichen VR-Geräten ist es durch das transparente Display möglich die reale Welt zu sehen. Die HoloLens bietet neben den Gesten des Anwenders auch die Möglichkeit einer Sprachsteuerung. Diese ist zum jetzigen Stand jedoch ausschließlich auf der englischen Sprache möglich. Eine Kombination aus Gesten- und Sprachsteuerung ermöglicht dem Anwender eine einfache Bedienung in der Mixed Reality. [4]

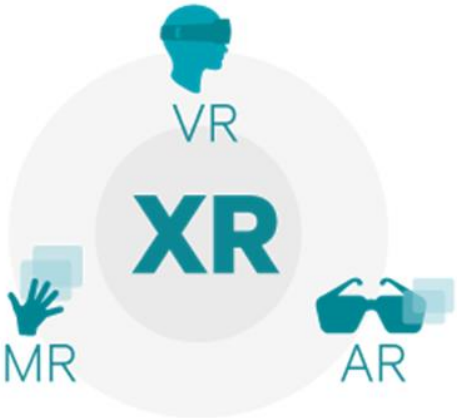


Abbildung 2: Einordnung der erweiterten Realitäten [5]

Für jede erweiterte Realität gibt es einen bevorzugten Anwendungsfall. Die Anwendungsfälle verdeutlichen zusätzlich die Schwachstellen dieser Methoden. In der VR kann sich der Nutzer die bereitgestellten Informationen ortsunabhängig anzeigen lassen, sodass eine interkontinentale Datenbereitstellung und Informationsbeschaffung möglich sind. Für die War-

tung einer Anlage bedeutet dies, dass es nicht mehr notwendig ist, dass eine Verantwortliche Person eine Entscheidung treffen kann, ohne die Probleme vor Ort gesehen zu haben. Durch die gegensätzliche Ausprägung der Realität eignet sich die MR/AR besonders für einen Einsatz unmittelbar an dem jeweiligen Problemfeld. Während der Anlagenbegehung kann ein Wartungsteam in Echtzeit auf relevante Informationen zugreifen und umgekehrt auch Informationen und Daten aufnehmen. Diese können anschließend aufbereitet und in der VR visualisiert werden.

4.2 Datenerfassung in der Mixed Reality

Die Wartungsphase der Anlage soll zukünftig mit der Mixed Reality unterstützt werden, sodass die Schäden während der Anlagenbegehung mit der Microsoft Hololens ermittelt werden können. Durch den Einsatz dieser Technologie können die Daten in Echtzeit an das PDM-System übermittelt werden. Die Hololens ermöglicht Bilder- oder Sprachaufzeichnungen. Durch die Überlagerung der virtuellen mit der realen Welt können anhand der Blickrichtung und der Position des Betrachters Bauteile oder Baugruppen anhand von Koordinatenpunkten oder -feldern ermittelt werden. Die aufgezeichneten Daten können somit eindeutig zugewiesen werden. Dies vereinfacht die Generierung eines Serviceauftrages, da alle relevanten Informationen vorliegen. Anhand von Abbildung 3 wird die MR-gestützte Wartungsphase verdeutlicht. Die aufbereiteten Daten können im letzten Schritt analysiert und zur Informationsrückgewinnung genutzt werden. Nachdem diese Informationen aufbereitet sind können sie für weitere Aktivitäten verwendet werden. Diese optionale Verwendung ist in der Abbildung durch den gestrichelten Verbindungspfeil dargestellt. Die Daten können somit für diese spezifische Anlage sowie zukünftige Wartungen anderer Anlagen verwendet werden.

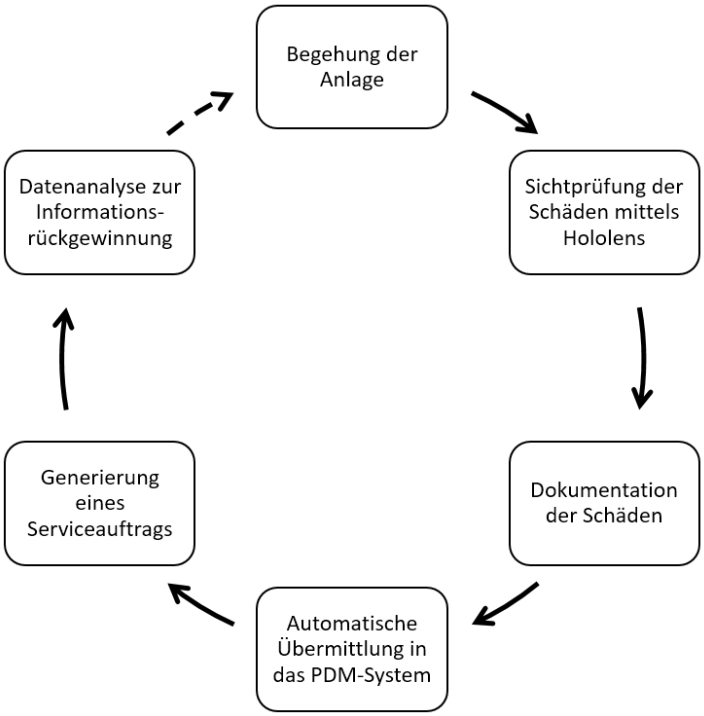


Abbildung 3: Prozess der optimierten Wartungsphase

4.3 Voraussetzungen einer übergreifenden Datenstruktur

Die Voraussetzung für ein solches Wartungsverfahren ist ein Datenmodell, das eine durchgehende Datenübertragung ermöglicht. Der Digitale Zwilling der Anlage ermöglicht eine durchgängige Datenverfügbarkeit. Um ein exaktes Abbild einer zur wartenden Anlage als digitalen Zwilling realisieren zu können, ist es erforderlich, alle verfügbaren Informationen in den Zwilling einfließen zu lassen. Dazu zählen neben den Umgebungsbedingungen und den Sensordaten auch Daten wie die Betriebseinstellungen, Inspektions- und Wartungsinformationen. Diese Daten müssen kontinuierlich an den Zwilling übermittelt werden, um stets ein aktuelles Abbild zu repräsentieren.

Zusätzlich muss ein digitaler Zwilling anpassbar sein, das heißt, ändert sich etwas an dem Objekt selbst oder an den Umgebungsbedingungen bzw. Betriebsbedingungen, müssen diese im digitalen Zwilling ohne großen Aufwand oder automatisch durch die vollständige Parametrisierung anpassbar sein.

Für den digitalen Zwilling werden neben physikalischen Modellen auch Technologien der künstlichen Intelligenz und maschinelles Lernen verwendet. Anhand der AI lassen sich Muster in den Daten erkennen und auf mögliche Störungen oder Anomalien schließen. Diese

verschiedenen physikalischen und analytischen Modelle müssen miteinander verknüpft werden und Daten untereinander austauschen, um ein Abbild zu realisieren, das stets aktuell ist. Die gesammelten Daten müssen abgespeichert, verwaltet und in ein Format umgewandelt werden, sodass diese für Algorithmen oder Simulationen verwendet werden können. Die unterschiedlichsten Daten, wie Daten von Sensoren, Simulationen aber auch Wartungsinformationen müssen kombiniert werden, um möglichst genaue Vorhersagen treffen zu können.

Um einen digitalen Zwilling überhaupt realisieren zu können, werden Technologien und eine ausreichende Infrastruktur benötigt, um Modelle und Simulationen zu erstellen, aber auch um Daten sammeln zu können und eine Kommunikation und Interaktion zwischen dem digitalen Zwilling und dem physischen Objekt zu ermöglichen.

Neben den Anforderungen, die erfüllt werden müssen, damit ein digitaler Zwilling einen Mehrwert erfüllt, spielt die Sicherheit des digitalen Zwillings eine weitere große Rolle. Da der digitale Zwilling über alle aktuellen und historischen Daten und Modelle des Objekts verfügt, muss der digitale Zwilling vor ungewollten Zugriff geschützt werden. Dabei müssen ebenfalls für verschiedene Nutzergruppen verschiedene Profile eingerichtet werden, sodass jeder nur die Informationen erhält, die er benötigt und erhalten darf.

4.4 Digitaler Zwilling

4.4.1 Definition

Der digitale Zwilling ist ein virtuelles Abbild eines realen Objektes. [6] Dieses Abbild beinhaltet alle Eigenschaften, Informationen und Zustände des Objektes. Der digitale Zwilling ist nicht ein einzelnes Modell, sondern besteht aus einer Vielzahl von miteinander verknüpften Modellen, Daten und Services.

4.4.2 Struktur

Grundsätzlich wird zwischen zwei Aufbaumethoden des digitalen Zwillings unterschieden. Eine Möglichkeit ist, ein festes System (Skelett) des zukünftigen Zwillings zu erstellen und dieses mit Betriebsdaten sowie Simulationsergebnissen und Verhaltensdaten zu versorgen. Die andere Möglichkeit ist der Aufbau einer spezifischen Datenstruktur, die die Sensordaten und sonstige Informationen ordnet und miteinander verknüpft.

Bei dem systembasierten Ansatz werden die Informationen über die einzelnen Elemente des physikalischen Objektes für jedes partiale Modell benötigt. Anhand dieser Modelle wird eine Struktur erstellt, die die Zusammenhänge zwischen den Komponenten des digitalen Zwillings definiert. Die einzelnen Partialmodelle werden im Betrieb mit den Sensordaten und anderen Informationen versorgt. Mit diesem Ansatz ist die klare Hierarchie innerhalb des Systems gewährleistet, sowie die vollständige Parametrisierung der Modelle und Prozesse ist möglich. Somit werden die What-If-Analysen besonders vereinfacht.
Bei dem datenbasierten Ansatz liegt der Fokus auf den Daten, die sich nach vordefinierten Faktoren strukturieren lassen. So können sich die Sensordaten von einem physikalische Objekt nach dessen verschiedenen Funktionalitäten oder Eigenschaften gliedern, so dass eine übersichtliche Datenstruktur entsteht. Die Daten können durch Algorithmen und Funktionen kombiniert mit maschinellem Lernen ausgewertet und analysiert werden. Dieser Ansatz steht bei den meisten IoT-Plattformen im Vordergrund. Bei dem datenbasierten Ansatz sind nicht zwingend die genauen technischen Details des physikalischen Objektes erforderlich. Zum Aufbau des digitalen Zwillings genügt es, vollständigen Zugriff auf alle Sensordaten und sonstigen Informationen zu haben. Der Aufbau eines datenbasierten digitalen Zwillings sieht vor, dass zunächst sichergestellt wird, dass alle benötigten Daten für Modelle zugänglich sind. Dazu wird eine Datenstruktur angelegt, auf die die verschiedenen Modelle und Services zugreifen können. Im Anschluss werden diese Modelle, Analysen und Funktionen erstellt, mit Daten verifiziert und dann bereitgestellt. Die Ergebnisse und Daten werden gespeichert. So kann das Verhalten des Objektes über einen längeren Zeitraum auf Basis der Daten verstanden werden. Um für den Endnutzer den Mehrwert und Informationen des digitalen Zwillings bereitzustellen, müssen abschließend Anwendungen erstellt werden.

4.5 Architekturmodell und Datenermittlung

Die notwendige Datenstruktur für den Wartungsprozess ist die in Abbildung 4 dargestellte Struktur. Die unterschiedlichen Farben verdeutlichen die Informationsverknüpfung bzw. den Datenaustausch zwischen einem realen Objekt und dem entsprechenden PLM-Element. Als Schnittstelle zwischen dem PLM-System und dem realen Objekt dient ein Systemmodell. Das Systemmodell ist das Referenzmodell für das reale Objekt.

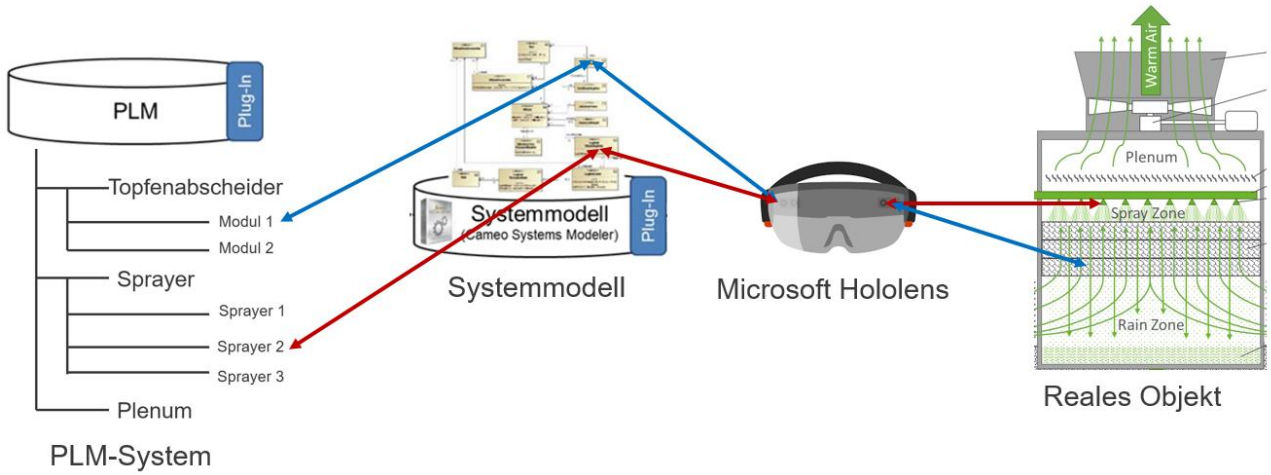


Abbildung 4: Architekturmodell zur Datenübertragung zwischen realem Objekt und dem PDM-System

Zur Positionsbestimmung und Orientierung gibt es in der Industrie verschiedene Ansätze. Die Basis bildet jedoch in jedem Fall ein Bezugssystem, welches zur scheinbaren und perspektivischen Verortung der virtuellen Umgebung in der Realen Umgebung dient. Des Weiteren kann aus ermittelten Koordinatenpunkten der Oberfläche ein räumliches Modell geschaffen werden, welches überlagert mit der Realität eine Positionsbestimmung mit anschließender Datenzuweisung ermöglicht. Um die Position und Orientierung (Lage) von Objekten in geschlossenen Räumen zu bestimmen, sind Verfahren nötig, die verschiedene Signale verwenden, welche hierfür erzeugt werden oder bereits vorhanden sind. Als wichtigste Verfahren lassen sich die Satellitentechnik, die inertiale Positionsbestimmung durch Sensordaten, optische Positionsbestimmung durch Marker sowie die hybriden Systeme nennen.

5 Anwendungsgebiet des Architekturmodells

5.1 Predictive Maintenance

Der Ansatz von Predictive Maintenance basiert auf der Echtzeitüberwachung und -diagnose von Systemkomponenten, Prozesse und Produktionsketten. Die primäre Strategie ist, Maßnahmen zu ergreifen, wenn Elemente oder Teile bestimmte Verhaltensweisen aufweisen, die normalerweise zur Folge haben bei Maschinenausfall, verminderter Leistung oder einem Abwärtstrend der Produktqualität.

Ursprünglich war die sogenannte präventive Wartung durch die Durchführung von Systemprüfungen in festgelegten Abständen in der Industrie breit im Einsatz, um den Zustand von Geräten, Maschinen oder Bauteilen in Maschinen zu analysieren. In den letzten Jahren findet der Predictive Maintenance Ansatz immer mehr Gebrauch in Infrastrukturmanagement, Kraftwerken, maritimen Systemen, Verwertungsanlagen und produzierenden Anlagen. Im Vergleich zur klassischen Qualitätskontrolle und Zustandsüberwachung, die grundsätzlich auf eine Art retrospektive und reaktive Weise arbeiten, d.h. Probleme wie starker Verschleiß und Ausfälle von Maschinen und Werkzeugen oder Abwärtstrends in der Produktionsqualität werden nach ihrem tatsächlichen Eintritt als gravierend anerkannt. [7]

Das Ziel der vorausschauenden Wartung Aspekt aller Art ist das Erkennen untypisches Systemverhaltens oder frühzeitige Erkennung von unerwünschten Trends. Im Idealfall soll diese Aussage so früh wie möglich, basierend auf langfristigen Vorhersagen, getroffen werden, um genug Zeit für angemessene Reaktion, zur Vermeidung des Stillstandes, Maschinen- und Komponentenausfälle, Risiken für das Personal oder niedriger Qualität des Produktes zu haben. Somit ist die Predictive Maintenance äußerst wichtig für die Reduzierung von Abfall-, Reparatur- und Produktionskosten und Erhöhung der Anlagenzuverlässigkeit sowie der Kundenzufriedenheit.

Der digitale Zwilling bietet die Funktionalität an, die Predictive Maintenance einer Anlage unterstützen kann. Die kontinuierliche Betriebsüberwachung und ganzheitliche Abbildung der Anlage zu jedem Zeitpunkt führt zu einer Betriebsdatenmenge, die ebenfalls kontinuierlich für die Lebensdauersimulationen verwendet werden kann. Somit können die Wartungsphasen genauer ermittelt und geplant werden. Visualisierung mittels AR / VR

Nachdem alle Daten erfolgreich in das PDM-System überführt, ausgewertet und ggf. simuliert wurden ist im letzten Schritt ein Reporting notwendig. Die Visualisierung der gesammelten Daten soll ebenfalls in der Extended Reality erfolgen. Dafür wird generell zwischen zwei Anwendungsgebieten unterteilt. In der komplett geschlossenen virtuellen Realität kann der Nutzer Schadensbilder ortsunabhängig betrachten. In einem vereinfachten Schalenmodell der Anlage können Schadensbereiche in unterschiedlichen Farben gefärbt dargestellt werden. Die gewählten Farben entsprechen der Ausprägung des Schadens bzw. dem Ausmaß. Sind nur bestimmte Bereiche betroffen kann ein Experte die notwendigen Informationen innerhalb der VR auswerten und eine Rückmeldung an das Unternehmen geben. Das zweite

Anwendungsgebiet ist die Visualisierung in der Mixed Reality. Die ausgewerteten und bereitgestellten Informationen können dem Serviceteam während der Wartung angezeigt werden. Sobald ein Schritt der Wartung abgeschlossen ist erfolgt eine Bestätigung durch den durchführenden Mitarbeiter, sodass auch diese Wartungsinformationen in das PDM-System überführt werden. Das Unternehmen ist somit zu jedem Zeitpunkt über den AS-IS Zustand der Anlage informiert.

6 Ausblick

Nachdem der theoretische Ansatz ausgearbeitet ist muss die Umsetzung für ein konkretes Beispiel erfolgen. Das Referenzmodell bzw. die Schnittstelle zwischen dem PDM-System und der Microsoft Hololens wird in Form eines SysML-Modells aufgebaut. Das Systemmodell orientiert sich dabei an der Produktstruktur des Validierungsobjektes. Sobald dieser Schritt erfolgt ist muss verdeutlich werden, wie die realen Daten zwischen den verschiedenen Systemen nahezu automatisch übertragen werden können, damit aus den Partialmodellen ein Gesamtmodell und somit der digitale Zwilling der Anlage entsteht.

Literatur

[1] H. Apel, Instanthandlungs- und Servicemanagement: Systeme mit Industrie 4.0. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018.

[2] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm und B. Jung, Hg., Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[3] D. Spath, E. Westkämper, H.-J. Bullinger und H.-J. Warnecke, Hg., Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation, 2017.

[4] J. Collins, H. Regenbrecht und T. Langlotz, „Visual Coherence in Mixed Reality: A Systematic Enquiry“, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Jg. 26, Nr. 1, S. 16–41, 2017.

[5] Unterschiede zwischen den erweiterten Realitäten. https://medium.com/@northof41/what-really-is-the-difference-between-ar-mr-vr-xr-35bed1da1a4e - Aktualisierungsdatum 12.07.2019

[6] D. T. Kuhn, Informatiklexikon - Digitaler Zwilling. Fraunhofer IESE, Kaiserslautern. https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling/

[7] E. Lughofer, M. Sayed-Mouchaweh, Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications. Cham: Springer International Publishing, 2019.

KT2019

Analyse und Vergleich verschiedener agiler Methoden

Sprintplanung in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von Referenzsystemelementen

Holger Wessels, Jonas Heimicke, Simon Rapp, Patric Grauberger, Thilo Richter, Sven Matthiesen, Albert Albers

KIT – Karlsruher Institut für Technologie
IPEK – Institut für Produktentwicklung
Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe
Email: sekretariat@kit.edu Internet: http://www.ipek.kit.edu

Inhalt: *Der Einsatz bereits bestehenden Produktwissens wird in agilen Ansätzen nicht durch spezifische Mechanismen in den Prozess eingebracht. Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, wie die Planung von Sprints in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von bestehendem Produktwissen unterstützt werden kann. Das Wissen steht den Entwicklern unter anderem in Form der Referenzsystemelemente und Entwicklungsgenerationen zur Verfügung. Es wird Untersucht, wie sich die Vorgehensweise im Projekt in Abhängigkeit der jeweiligen Variationsart am technischen System und der Verfügbarkeit über Wissen über den Gestalt-Funktions-Zusammenhängen der Referenzsystemelemente verändert. Als Untersuchungsumgebung dient ein studentisches Entwicklungsprojekt.*

Stichwörter: *Sprintplanung; Mechatroniksystemenetwicklung; Produktgenerationsentwicklung; Gestalt-Funktions-Zusammenhang.*

.

Sprint planning in mechatronic system development based on reference system elements

Abstract: *In agile approaches, the use of existing product knowledge is not introduced into the process through specific mechanisms. This paper examines how the planning of sprints in mechatronic system development can be supported on the basis of existing product knowledge. The knowledge is available to the developers in the form of reference system elements and development generations. It will be investigated how the approach in the project changes depending on the respective type of variation in the technical system and the availability of knowledge about the shape-function correlations of the reference system elements. A student development project serves as a research environment.*

Keywords: Sprint planning; mechatronic system development; product generation engineering; embodiment-function relation

1 Einleitung

Entwicklungsprozesse sind aufgrund von Unsicherheiten und Dynamik hinsichtlich einer Langfristplanung wenig robust. Diese sind jedoch keine neuartigen Phänomene, sondern stete Begleiter des Produktentwicklers. [1] Agile Ansätze, welche zum Teil aus dem Gebiet der Softwareentwicklung stammen, – bekannte Vertreter sind Scrum oder Design Thinking – stellen neuartige Antworten im Umgang mit Unsicherheiten dar [2]. Durch eine kurzfristige Planung iterativer Entwicklungsphasen gepaart mit einer *fail fast – fail often* – Mentalität versprechen sie eine zunehmende Robustheit in der Entwicklung von Produkten, beispielsweise gegenüber wechselnden Kundenanforderungen [3, 4]. Dabei gelangen Entwicklerteams durch den frühen und kontinuierlichen Einsatz von Prototypen bereits nach kurzen Entwicklungszeiten an essentielle Erkenntnisse hinsichtlich der Erfüllung angestrebter Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen. Allerdings ist die Übersetzung von Nutzenversprechen in konkrete technische Ziele in herkömmlichen agilen Ansätzen ein Produkt zufälliger jedoch durch das Schaffen von Freiheitsgraden provozierter Innovationsimpuls [5]. Der Einsatz bereits bestehenden Produktwissens wird in agilen Ansätzen nicht durch spezifische Mechanismen, sondern lediglich über die Erfahrung der Entwickler in den Prozess eingebracht [6]. Die Wahl der geeigneten Vorgehensweise (sequenziell/iterativ) als Resultat der Prozessgestaltung ist von zentraler Bedeutung. Hierzu fehlt es dem Entwickler bislang an geeigneter Unterstützung. Um ein erstes Verständnis hierfür zu generieren, soll im vorliegenden Beitrag untersucht werden, wie Sprints in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis der Referenzsystemelemente und Entwicklungsgenerationen in Abhängigkeit der jeweiligen Variationsart und der Verfügbarkeit über Wissen über den Gestalt-Funktions-Zusammenhang geplant werden.

2 Stand der Forschung

2.1 Der Prozess der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung unterliegt einer Vielzahl an Einflussfaktoren [7] die einen maßgeblichen Einfluss auf den Grad der Komplexität [8] im Entwicklungsprozess haben [9]. Werden Entwicklungsprojekte nun in einem sehr komplexen Kontext durchgeführt (bspw. das erstmalige Eintreten eines Unternehmens in ein hochdynamisches Umfeld), entbehrt einer

detaillierten Langzeitplanung die Stabilität der angenommenen Entwicklungsziele und demnach der Planungsstabilität [10]. Anders gesagt, lassen sich ständig ändernde Ziele eine Langzeitplanung auf Detailebene (Kapazitäten, Aktivitäten, Methoden, Anforderungen, …) instabil werden. Aus diesem Grund werden Projekte in einem komplexen Umfeld vorzugsweise unter der Nutzung agiler Ansätze durchgeführt, um gegenüber notwendigen Änderungen im Entwicklungsprozess reaktionsfähig zu sein [11]. Demgegenüber stehen die klassischen, plangetriebenen Ansätze, die ihre Stärken in einer detaillierten Projektplanung haben, die aber nur in einem robusten Umfeld zur Geltung kommen [4]. Diese Ansätze vereint, dass sie eine vollständige Definition der Anforderungen an das Produkt in der ersten Phase verlangen, bevor die technische Gestaltung des Produktes erfolgt [12]. In der Mechatroniksystementwicklung finden zunehmend agile Ansätze Anwendung in der Prozessgestaltung [2]. Da diese jedoch ihren Ursprung teilweise in der Softwareentwicklung haben und in ihrer Ausrichtung eher die Entwicklung von Software als diejenige von physischen Produkten unterstützten, stoßen diese Ansätze in der Mechatroniksystementwicklung schnell an ihre Grenzen [2, 5]. Der Ansatz des ASD – Agile Systems Design basiert auf der Annahme, dass innerhalb von Produktentstehungsprozessen Problemstellungen mit unterschiedlichen Komplexitätsstufen co-existieren [9]. Aus diesem Grund beinhaltet dieser Ansatz Prozesselemente, um sowohl sequenzielle Vorgehensweisen unter gut planbaren Rahmenbedingungen als auch iterative Vorgehensweisen zur Wahrung der Reaktionsfähigkeit gegenüber ungeplanten Änderungen im Entwicklungsumfeld zu verfolgen. Iterationen können dabei geplant (klares Vorsehen von wiederkehrenden, gleichen Aktivitäten zur inkrementellen Reifegradsteigerung) oder erwartet (Aktivitäten können nicht wiederkehrend geplant werden, Kapazitäten jedoch bereits vorgesehen werden) sein; Sequenzen sind fest geplante, einmalig durchgeführte Aktivitäten in einer vorgegebenen Reihenfolge. [10]

Unter Berücksichtigung der 9 Grundprinzipien zur agilen Entwicklung mechatronischer Systeme, denen der Ansatz des ASD – Agile Systems Design folgt, wird es Entwicklerteams ermöglicht, auf unterschiedlichen Prozessebenen zwischen sequenziellen und iterativen Vorgehensweisen zu wählen (siehe Abbildung 1). Das maßgebliche Kriterium für die betrachtete Granularität ist die zu planende Prozessebene, während das Maß für die Auswahl der jeweiligen Vorgehensweise die Planungsstabilität [9] der Prozesselemente (Ziele, Phasen, Aktivitäten, Methoden, …) ist. [10] Diese korreliert mit der Diskrepanz aus notwendigem und tatsächlich vorliegendem Wissen und unterstützt Entwickler in der situations- und bedarfsgerechten Kombination flexibler und strukturierender Prozesselemente [9].

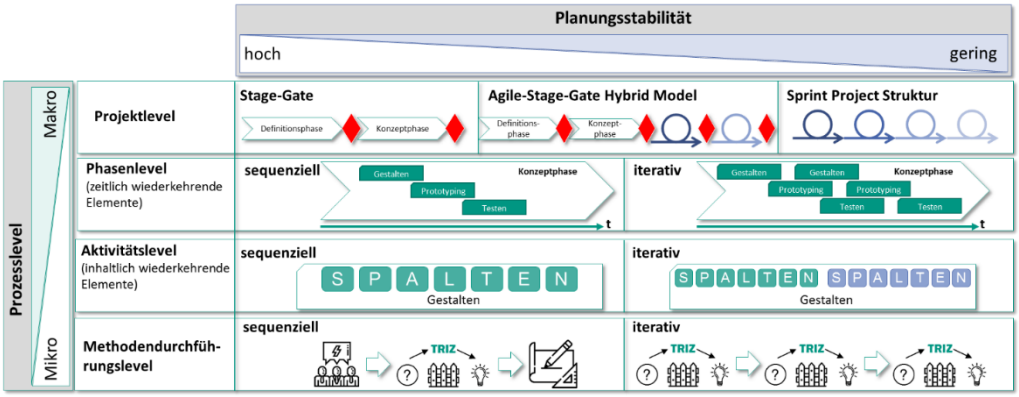


Abbildung 1: Wahl zwischen iterativem und sequenziellem Vorgehen auf unterschiedlichen Prozessebenen anhand der Planungsstabilität im ASD – Agile Systems Design [10] (übersetzt)

2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Das Modell der PGE– Produktgenerationsentwicklung beschreibt die Entwicklung einer neuen Produktgeneration auf Basis eines Referenzsystems. Die Elemente des Referenzsystems können verschiedenen Quellen entstammen, wie beispielsweise der Vorgängergeneration oder sich in der Vorentwicklung befindenden Teilsystemen [13]. Diese Referenzsystemelemente stellen mit ihrer Gestalt und Lösungsprinzipien die Grundlage für die (Weiter-) Entwicklung mechatronischer Systeme dar [13]. Das Referenzsystem wird mittels Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariation (PV, GV, ÜV) in die nächste Produktgeneration überführt.

Diese Variationsarten können auch als Aktivitätsmuster der Produktentwicklung verstanden werden. Erste Untersuchgen ergaben die Hypothesen, dass eine Prinzip- und Gestaltvariation andere Muster von Produktentwicklungsaktivitäten zur Folge haben als eine Übernahmevariation, bei welcher der Fokus beispielsweise auf der Validierung der Systemintegration liegt [15]. Mithilfe der Variationsarten und dem daraus resultierenden Neuentwicklungsanteil (PV und GV) und der Charakteristika der Referenzsystemelemente, wie beispielsweise der Herkunft, welche Einfluss auf das verfügbare Wissen hat, lässt sich bereits früh in der Produktentwicklung das Entwicklungsrisiko abschätzen [16].

Wie in [16] beschrieben, kann die Entwicklung einer neuen Produktgeneration in die Entwicklung verschiedener Entwicklungsgenerationen unterteilt werden. Die Entwicklungsgenerationen stellen dabei unterschiedliche Stadien von Prototypen dar.

2.3 Gestalt-Funktion-Zusammenhang in der Mechatroniksystementwicklung

Um Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) in der Konstruktion zu verstehen und nutzen zu können, kann der C&C²-Ansatz [17, 18] genutzt werden, mit dem Denkprozesse in der Konstruktion unterstützt werden. Er stellt spezielle Elemente bereit, die den Entwickler bei der Analyse und Synthese technischer Systeme unterstützen, indem mit ihnen visuelle Modelle der Zusammenhänge von Gestalt und Funktion gebildet werden können. Mit dem C&C²-Ansatz lässt sich das betrachtete System durch die drei Elemente Wirkflächenpaar, Leitstützstruktur und Connector unter Betrachtung der Grundhypothesen und Anwendungsregeln analysieren und dokumentieren [19]. Eine Übersicht über den C&C²-Ansatz und seine Elemente gibt Abbildung 2.

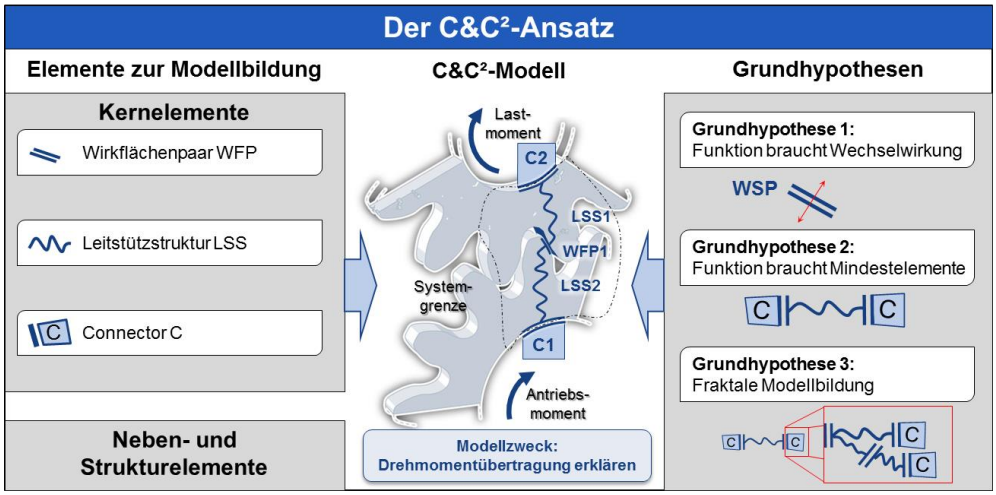


Abbildung 2 Übersicht über den C&C²-Ansatz und seine Elemente nach [20]

Hier sind links die drei Kernelemente dargestellt und rechts die drei Grundhypothesen. Aus diesen Bestandteilen wird unter Beachtung des Modellzwecks und einer Systemvisualisierung das C&C²-Modell (Mitte) gebildet.

In der Produktentwicklung hängt ein Teil des Projektrisikos direkt mit den vorliegenden GFZ zusammen. Dieses Risiko gilt es bei der Planung der Aktivitäten zu berücksichtigen. Abhängig davon, ob eine Gestalt dokumentiert ist oder nicht, und ob ihre Zusammenhänge zur Funktion aus Erfahrung oder Dokumentation bekannt sind, ergeben sich vier sogenannte Risikocluster. Ist die Gestalt dokumentiert und ihre Zusammenhänge zur Funktion ebenfalls explizit vorhanden (beispielsweise als FEM-Simulation oder statistische Modellgleichung aus Versuchen), so ist das Risiko in der Gestaltung gering. Ist die Gestalt nicht dokumentiert und liegen auch keine Erfahrungen zu den GFZ vor, so liegt ein hohes Risiko vor. [17]

3 Forschungsbedarf und Methodik

Als Forschungsumgebung für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Prozessplanung, Variationsarten und Kenntnis über den GFZ dient das Entwicklungsprojekt AIL – Agile Innovation Lab [21]. In AIL entwickelt ein studentisches Team, bestehend aus fünf Teilnehmern, selbstorganisiert ein Produkt mit hohem Innovationspotential. Der Entwicklungsprozess orientiert sich am ASD – Agile Systems Design. Hierzu erhielten die Studierenden zu Beginn eine kurze Einführung in die Möglichkeiten der Prozessplanung. Die Planung der einzelnen Phasen wurde von den Studierenden zum Großteil selbst übernommen und zu Beginn der jeweiligen Phase von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter abgenommen. Die Aktivitäten innerhalb der Phasen wurden von den Studierenden selbstständig durchgeführt und die Ergebnisse am Ende jeder Phase von dem Projektpartner gereviewed. In den einzelnen Phasen wurde von den Studierenden für die Referenzsystemelemente eine Einschätzung über die Kenntnis des GFZ vorgenommen. Des Weiteren wurden zu Beginn der Phasen die geplanten Variationen dokumentiert.

4 Analyse der Sprintplanung im Entwicklungsprojekts AIL – Agile Innovation Lab

Im analysierten Projekt wurde ein handgehaltenes Gerät zur Unkrautregulierung (UKR) auf befestigten Flächen entwickelt. Auf dem Markt sind hierzu laut Projektpartner derzeit drei verschiedenen Wirkprinzipien im Einsatz – mechanisch, thermisch, chemisch, wobei letzteres in diesem Projekt durch den Projektpartner ausgeschlossen wurde (

Abbildung 3).

Abbildung 3: Referenzsysteme

Im Weiteren Projektverlauf wurden aufgrund der Funktionalität auch die thermischen Verfahren durch das Projektteam ausgeschlossen. Das Unkrautregulierungssystem wurde in dem Projekt in die Teilsysteme *Untergrund*, *Tool* und den *Menschen* als Bediener gegliedert. Das Teilsystem Tool wurde im Laufe des Projekts weiter konkretisiert in die Subsysteme *Motor*, *Aufsatz*, *Antriebsstrang* und *Griff* (Abbildung 4).

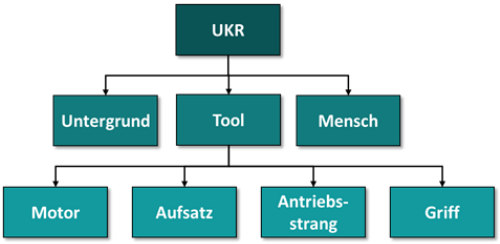


Abbildung 4: Systemarchitektur

Im Folgenden wird am Beispiel der Realisierung der Funktion *Unkraut regulieren* das Vorgehen im Projekt beschrieben. Der Entwicklungsprozess gliederte sich in sechs Phasen auf, für die in Tabelle 1 die jeweiligen Phasenziele und geplanten Umfänge der Entwicklungsgeneration aufgelistet sind. Das Phasenziel gliedert sich in Unterziele, welche auch zu realisierende Funktionen enthalten. Neben dem Phasenziel und den Umfängen der Entwicklungsgeneration wurden noch weitere Faktoren gesammelt. Für die Funktionen werden für jede Phase die zulässige Variationsart, das Referenzsystemelement, die geplante Vorgehensweise sowie die Kenntnis über den GFZ im Entwicklungsteam aufgeführt. Bei der Vorgehensweise wird abhängig des verfügbaren Wissens zwischen einer erwarteten Iteration (EI), geplanten Iteration (GI) und einer sequentiellen Vorgehensweise unterschieden.

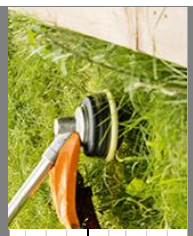
Tabelle 1 zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Vorgehensweise in der Phase und der zulässigen Variationsart sowie der Kenntnis über den GFZ besteht (Beispielhaft in der Tabelle grün hinterlegt). In der Analysephase wurden viele Iterationen erwartet, da das Ziel nicht klar und der GFZ für die Funktion *Unkraut regulieren* dem Entwicklungsteam nicht bekannt war. Während in der Release Phase für die Realisierung der Funktion *Unkraut regulieren* eine sequentielle Vorgehensweise geplant wurde. In dieser Phase kannte das Entwicklungsteam die wesentlichen Gestaltparameter zur Funktionsrealisierung und es ging in dieser Phase von einer Gestaltvariation aus. Des Weiteren kann der Tabelle entnommen werden, dass die Kenntnis über den GFZ im Projekt stetig zunahm.

Während in den ersten Phasen das System noch auf Gesamtsystemebene betrachtet wurde, wurde in den späteren Phasen Detailwissen über den GFZ auf Teilsystemebene

gesammelt, und so die Planbarkeit der Aktivitäten erhöht. Parallel nahm neben der Kenntnis über den GFZ auch der Anteil an Gestaltvariation für die Funktion *Unkraut regulieren* zu.

Während in den frühen Phasen mit hoher Unsicherheit über das Projektziel eine Prinzipvariation auf der Gesamtsystemeben zugelassen wurde, wurde auf den unteren Systemebenen verstärkt Gestaltvariationen zugelassen.

Tabelle 1: Analyse der zur Sprintplanung verfügbaren Informationen

Phase	Phasenziel im Sprintplanning	Zielsystem auf Gesamtproduktebene	C&C² Elemente	Funktion	zugelassene Variation	Referenzsystemelement		Entwicklungsgeneration	Vorgehensweise	GFZ	Systemebene und Referenzsystemelemen
		Ausschnitt aus Zielsystem			Auf Basis des Ziels	Herkunft	Element	zum Phasenabschluss			
Analyse	Wissensaufbau	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Freischneider	EG1: Wissensbasis, Funktionsprinzipien, Funktionsanalyse, ...	EI	RC4	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		EI	RC4	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		sequentiell	RC4	
Potentialfindung	Analyse des Kundenbedarfs und Nutzen	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Freischneider	EG2: Produktprofil	EI	RC4	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		GI	RC4	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		EI	RC4	
		Elektrischer Antrieb	C_2	Leistung bereitstellen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere		EI	RC4	
		Ergonomischer Griff	C_1	Bedienung ermöglichen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere		sequentiell	RC4	
Konzipierung	Erstellen erste technischer Lösungskonzepte sowie deren Machbarkeitsabschätzung	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Freischneider	EG2: Konzeptskizzen	EI	RC4	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		EI	RC4	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		sequentiell	RC4	
		Mechanisches Wirkprinzip	LSS_2	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Fadenkopf		EI	RC4	
		Geräteschnittstelle	C_2	Leistung übertragen	ÜV	Abteilung	Fadenkopf		EI	RC4	
		Durchmesser	RB		ÜV				EI	RC4	
		Elektrischer Antrieb	C_2	Leistung bereitstellen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere; EG2			RC4	
		Ergonomischer Griff	C_1	Bedienung ermöglichen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere			RC4	
Präzisierung	Konkretisierung eines technischen Lösungskonzepts und entwickeln erster Funktionsprototypen	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Freischneider	EG3: Konzeptzeichnungen mit Bewertungskriterien	EI	RC4	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		GI	RC4	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		sequentiell	RC4	
		Mechanisches Wirkprinzip	LSS_2	Unkraut regulieren	PV	Abteilung	Fadenkopf		GI	RC4	
		Geräteschnittstelle	C_2	Leistung übertragen	ÜV	Abteilung	Fadenkopf		GI	RC4	
		Durchmesser	RB		ÜV				GI	RC4	
		Elektrischer Antrieb	C_2	Leistung bereitstellen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere			RC4	
		Ergonomischer Griff	C_1	Bedienung ermöglichen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere			RC4	
Realisierung	Aufbau eines Funktionsprototypen	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	GV	Abteilung	Freischneider	EG4: Prototypen für Wirkprinzipien (Schneiden, ziehen, reiben)	EI	RC3	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		GI	RC3	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Abteilung	Freischneider		sequentiell	RC3	
		Mechanisches Wirkprinzip	LSS_2	Unkraut regulieren	GV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster		GI	RC3	
		Reiben motorisch	LSS_2	Unkraut regulieren	GV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster		GI	RC3	
		Geräteschnittstelle	C_2	Leistung übertragen	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster		GI	RC3	
		Durchmesser	RB		ÜV					RC3	
		Elektrischer Antrieb	C_2	Leistung bereitstellen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere			RC3	
		Ergonomischer Griff	C_1	Bedienung ermöglichen	ÜV	Andere Abteilung	Strauchschere			RC3	
Release	Erhöhen des technischen Reifegrades des Funktionsprototypen	Unkraut regulieren	LSS_3	Unkraut regulieren	GV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster	EG5: finaler Prototyp	Sequentiell	RC1/2	
		Schleudermeigung reduzieren	LSS_3	RB	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster		GI	RC1/2	
		Leistung < 3kW	C_2	RB	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster		Sequentiell	RC1/2	
		Mechanisches Wirkprinzip	LSS_2	Unkraut regulieren	GV	Entwicklungsteam	EG1		Sequentiell	RC1/2	
		Reiben motorisch	LSS_2	Unkraut regulieren	GV	Entwicklungsteam	EG1		Sequentiell	RC1/2	
		Borstenaufnahme	$LSS_{1/2/3/4/5/6/7/8}$	Borsten aufnehmen	GV	Entwicklungsteam	EG1		Sequentiell	RC1/2	
		Montagesschnittstelle	$WFP_{1/2/3/4/5}$	Montage ermöglichen	PV	Entwicklungsteam	EG1			RC1/2	
		Kantengängigkeit		Kanten reinigen	PV	Entwicklungsteam	EG1			RC1/2	
		Geräteschnittstelle	C_1	Leistung übertragen	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster			RC1/2	
		Durchmesser	RB		ÜV					RC1/2	
		Elektrischer Antrieb	C_2	Leistung bereitstellen	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster			RC1/2	
		Ergonomischer Griff	C_1	Bedienung ermöglichen	ÜV	Wettbewerbsprodukt	Skil Weedbuster			RC1/2	
			LSS_1							RC1/2	

Legende:
GI: Geplante Iteration
EI: Erwartete Iteration
ÜV Übernahmevariation
GV Gestaltvariation

4.1 Planen von Entwicklungsgenerationen als Sprint-Inkrement

In allen Phasen des Entwicklungsprozesses lässt sich ein vergleichbares Vorgehen zur Sprint-Planung beobachten. Dieses Vorgehen kann als Planung von Entwicklungsgenerationen auf Basis des jeweiligen Zustandes des Referenzsystems und der vorangehenden Entwicklungsgenerationen verstanden werden. Auch die Entwicklungsgenerationen, welche innerhalb des Sprints in Form weiterer Prototypen vorliegen, können Grundlage der weiteren Planung bspw. auf einer tieferen Detaillierungsebene sein. Grundsätzlich bildet der Abgleich zwischen der Zielsetzung der Entwicklungsphase, dem Referenzsystem sowie den vorangegangenen Entwicklungsgenerationen den Ausgangspunkt der Planung.

Auf Grundlage dieses Abgleichs wird für jedes Teilsystem der nächsten Entwicklungsgeneration der zulässige Lösungsraum durch Angabe der zulässigen Variationsart spezifiziert. Je nach zugelassener Variationsart sind für die weitere Entwicklung eines Teilsystems unterschiedliche Aktivitäten und deren Umfänge einzuplanen. Im Folgenden werden die zulässigen Variationsarten und dadurch planbare Entwicklungsaktivitäten im Detail beschrieben: Es existieren drei verschiedene Möglichkeiten an Variationsarten mit unterschiedlichen Folgen für die Planung des anstehenden Sprints:

- „Übernahmevariation“ (ÜV): Hier ist keine Veränderung der Wirkstruktur im betreffenden Teilsystem zugelassen. Das Teilsystem wird als „Blackbox“ betrachtet und Anpassungen finden falls notwendig an den Connectoren statt.
- „Gestaltvariation“ (GV): Hier kann sich die Wirkstruktur ändern, wobei das Funktionsprinzip beibehalten werden soll, also keine Wirkflächenpaare oder Leitstützstrukturen entfernt oder hinzugefügt werden sollen.
- „Prinzipvariation“ (PV): Bei zugelassener Prinzipvariation ändert sich die Wirkstruktur in Zahl und Anordnung der Elemente im Vergleich zum zugehörigen Referenzsystemelement. Das Funktionsprinzip wird dadurch verändert.

Die Unterteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme ist bei der Zuweisung zulässiger Variationsarten auch vom Wissenstand zum jeweiligen Zeitpunkt abhängig. Diese Unterteilung kann tendenziell bei weiter fortgeschrittenem Prozess feiner sein. Allerdings ist es auch

möglich, dass durch die vorhandenen Referenzsystemelemente mindestens in Teilen eine sehr detaillierte Vorgabe zulässiger Variationsarten erfolgen kann.

4.2 Entwicklungsaktivitäten in Abhängigkeit zugelassener Variationsarten

Je nach zugelassener Variationsart sind unterschiedliche Aktivitäten der Produktentstehung im Sprint, der die nächste Entwicklungsgeneration hervorbringt, notwendig. Bei **zugelassener Übernahmevariation** ist insbesondere zu validieren, ob die Connectoren für das übernommene TS noch ausreichend ähnlich zum Referenzsystem sind und daher von der gewünschten Funktionserfüllung ausgegangen werden kann. Hierbei kann u.a. die Herkunft des zugehörigen Referenzsystemelements eine Rolle spielen. Ergebnis dieser Aktivitäten ist das Wissen, ob die Übernahmevariation möglich ist oder eine Gestalt- oder Prinzipvariation zugelassen werden muss.

Bei **zugelassener Gestaltvariation** wird der mögliche Lösungsraum vorgegeben. Diese Variation wird häufig im experimentellen Erkenntnisgewinn (beispielsweise ein Vorgehen in Anlehnung an Design of Experiments) genutzt. Im Fokus steht hier die Anpassung der vorhandenen Wirkstruktur.

Bei **zugelassener Prinzipvariation** wird nach potenziellen Referenzsystemelementen gesucht, die zur Zielerreichung beitragen könnten. Um dies zu beurteilen wird der GFZ dieser Referenzsystemelemente analysiert. Der Aufwand für diese Analyse kann stark unterschiedlich sein. Dies hängt u.a. davon ab, in welchem Umfang der GFZ des betreffenden Referenzsystemelements und dessen Dokumentation bereits bekannt und verfügbar ist. Es besteht tendenziell ein höherer Aufwand und ein höheres Risiko.

5 Diskussion

In diesem Beitrag wurde eine Unterstützung für Entwickler in der situations- und bedarfsgerechten Kombination flexibler und strukturierender Prozesselemente vorgestellt. Es werden Variationen und damit verbundenen Entwicklungsaktivitäten zugelassen, die auf Basis des vorhandenen Wissens und der zur Verfügung stehenden Ressourcen umsetzbar erscheinen. Da diese Neudefinition von durchzuführenden Entwicklungsaktivitäten an jedem Meilenstein im Projekt geschieht, wird die Flexibilität im Projekt verbessert. Die „Blindleistung“ im Entwicklungsprozess soll minimiert werden, indem je nach Kenntnisstand über

das technische System unnötige Iterationen oder zu detaillierte Prozessplanung minimiert werden.

Eine Limitierung dieser Forschungsarbeit besteht darin, dass nur ein Entwicklungsprojekt aus einer speziellen Branche analysiert wurde. Branchenspezifische Besonderheiten aus anderen Branchen konnten deshalb in der entwickelten Unterstützung nicht berücksichtigt werden. Zur Validität der abgeleiteten Aussagen können aus dieser Forschungsarbeit keine Aussagen getroffen werden, da hierzu die Untersuchung mehrerer Entwicklungsprojekte und ein Vergleich zu einer Kontrollgruppe notwendig wäre.

6 Ausblick

In anschließenden Forschungsarbeiten sollen die beobachteten Zusammenhänge detaillierter analysiert werden, um die Reifegradsteuerung für den Projektleiter durch verbesserte Priorisierung und Ressourcenverteilung zu optimieren. Eine weitere Forschungsarbeit soll die Analyse von GFZ als Basis für das entwickelte Vorgehen detaillierter betrachten, um Hilfsmittel für Entwickler bereitzustellen, mit denen diese Zusammenhänge erfasst werden können.

7 Literaturverzeichnis

[1] S. Thomke and D. Reinertsen, “Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments,” *California Management Review*, vol. 41, no. 1, pp. 8–30, 1998.

[2] T. S. Schmidt, S. Weiss, and K. Paetzold, “Agile Development of Physical Products: An Empirical Study about Motivations, Potentials and Applicability,” *University of the German Federal Armed Forces*, 2017.

[3] B. Boehm and R. Turner, “Management Challenges to Implementing Agile Processes in Traditional Development Organizations,” *IEEE Softw.*, vol. 22, no. 5, pp. 30–39, 2005.

[4] B. Boehm and R. Turner, “Using risk to balance agile and plan- driven methods,” *Computer*, vol. 36, no. 6, pp. 57–66, 2003.

[5] J. Heimicke *et al.,* “Agile Innovative Impulses in the Product Generation Engineering: Creativity by Intentional Forgetting,” *Proceedings of 5th International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)*, no. 8, 183-190, 2018.

[6] B. Gloger, “Die Rollen – klare Verantwortlichkeiten,” in *Scrum: Produkte zuverlässig und schnell entwickeln*, B. Gloger, Ed., 5th ed., München: Carl Hanser Verlag, 2016, pp. 59–107.

[7] K. Gericke, M. Meißner, and K. Paetzold, “Understanding the context of product development,” *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies*, vol. 75, no. 3, 2013.

[8] J. Geraldi, H. Maylor, and T. Williams, “Now, let's make it really complex (complicated),” *Int Jrnl of Op & Prod Mnagemnt*, vol. 31, no. 9, pp. 966–990, 2011.

[9] J. Heimicke, G. Freire, J. Breitschuh, and A. Albers, “Determining degrees of complexity of different development situations within business processes in engineering sector,” *41st R&D Management Conference 2019 “The Innovation Challenge: Bridging Research, Industry and Society”*, 2019.

[10] A. Albers *et al.,* “A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD - Agile Systems Design,” *Procedia CIRP*, vol. in print, 2019.

[11] D. J. Snowden and M. E. Boone, “A Leader’s Framework for Decision Making,” *Harvard business review*, vol. 85, no. 11, pp. 68–77, 2007.

[12] K. Petersen and C. Wohlin, “The effect of moving from a plan-driven to an incremental software development approach with agile practices,” *Empir Software Eng*, vol. 15, no. 6, pp. 654–693, 2010.

[13] A. Albers, S. Rapp, M. Spadinger, T. Richter, C. Birk, F. Marthaler, J. Heimicke, V. Kurtz, H. Wessels, “The Reference System in PGE - Product Generation Engineering: A generalized Understanding of the Role of Reference Products and their Influence on the Development Process.,” *Proceedings of 22nd International Conference on Engineering Design ICED 2019*, 2019.

[15] A. Albers, S. Rapp, N. Peglow, T. Stürmlinger, J. Heimicke, F. Wattenberg, H. Wessels, “Variations as Activity Patterns: A Basis for Project Planning in PGE - Product Generation Engineering,” *Procedia CIRP*, in print, 2019.

[16] A. Albers, S. Rapp, C. Birk, and N. Bursac, “Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung,” Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP2017. Stuttgart, Germany, 2017.

[17] S. Matthiesen, “Prozess und Methoden der Gestaltung,” in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, B. Bender and K. Gericke, Eds., 9th ed.: Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2019, in print.

[18] A. Albers and S. Matthiesen, “Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme,” *Konstruktion*, vol. 54, no. 7, pp. 55–60, 2002.

[19] S. Matthiesen, Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells “Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen” zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme, 2002.

[20] S. Matthiesen, P. Grauberger, C. Sturm, and M. Steck, “From Reality to Simulation – Using the C&C2-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System,” *Procedia CIRP*, vol. 70, pp. 475–480, 2018.

[21] A. Albers, N. Bursac, J. Heimicke, B. Walter, and N. Reiß, “20 years of co-creation using case based learning: An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering,” in *Proceedings of the 20th ICL Conference*, M. E. Auer, D. Guralnick, and J. Uhomoibhi, Eds., Springer, 2017, pp. 636–647.

Alles im Fluss. Kanban und Scrum als Innovationswerkzeuge im Design Thinking für die agile Produktentwicklung.

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar: University of Applied Sciences Technology, Business and Design
Bereich Maschinenbau / Verfahrens- und Umwelttechnik, Lehrstuhl Konstruktion
E-Mail: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: *Design Thinking wurde als kundenorientierte Methode für das interdisziplinäre Schaffen von Softwarelösungen und später auch von Marketingstrategien geschaffen. Die Methode basiert vor allem auf Kundenverständnis und ein frühzeitiges Schaffen von Prototypen, die zwar noch nicht vollständig sind, aber gemeinsam mit dem Kunden getestet und weiterentwickelt werden können. Aus dem Bereich der Softwareentwicklung kommend und später in den Bereich der Fertigungsorganisation überführt, stammen die KANBAN- und SCRUM-Methode. Mit SCRUM und KANBAN werden strukturierte Aufgabenpakete geschaffen, die in kürzester Zeit in einem selbstorganisierenden Entwicklerteam zum transparenten Generieren von Problemlösungen und erster testbarer Prototypen führen sollen. Im vorliegenden Beitrag wird ein Arbeitsalgorithmus für interdisziplinäre Produktentwicklerteams präsentiert, in dem Bausteine aus Design Thinking, KANBAN und SCRUM im Rahmen der agilen Produktentwicklung für das kundenzentrierte und interdisziplinäre Schaffen von Produktideen und erster erfahrbarer physischer Produktmodelle zusammengeführt werden. Mit „Empathie", „Beobachtung", „Verstehen" aus dem Design Thinking werden kundenzentrierte Wünsche als To Do-Arbeitspakete (Back Logs, Sprint Logs) gemäß SCRUM und KANBAN definiert, die dann in einer definierten Doing-Zeiteinheit zu konkreten Produktideen reifen (Sprints) und am Ende als einfache an- und begreifbare Prototypen zwecks kunden- und anbieterseitiger Testung vorliegen (Dones). Genutzt wird hierfür ein für alle Beteiligten Transparenz schaffendes Kreative KANBAN-Board, dessen Anwendung am Projekt „Kokos" erörtert wird.*

Stichwörter: *Agile Produktentwicklung, Design Thinking, Innovationsmethodik, KANBAN, SCRUM.*

Everything flows. Kanban and Scrum as an innovation tool in Design Thinking for agile product development.

Abstract: *Design Thinking was established for customer specific methode for interdisciplinary conception of software solutions and marketing strategies. This methode based on customer understanding and a very early erection of prototypes. These prototyps are uncompleted, but can be tested by customers and design engineers. KANBAN- and SCRUM-Methode are from fields of Software Development and Production Engineering. You can create work packages of good structure for simple and fast creation of virtual solutions and prototypes. The methods are transparent for interdisciplinary team players. In this article a new model for agile product development is presented. The model use parts of Desgin Thinking, KANBAN and SCRUM. The new model uses for example views of „emphaty", „understanding" or „observation" from Design Thinking. Engineer's methode uses To do - work packages (Back Logs, Sprint Logs). In a limited time all team members create product ideas (doing phase). It's also a goal to produce first physical prototyps fo better discussion and firsts tests (done phase). A Creative KANBAN-Board was developed. Article presents the use of creative KANBAN-Board in Project „COCOS".*

Keywords: *Agile Product Development, Design Thinking, Innovation Methodology, KANBAN, SCRUM.*

Abbildung 1: Kreatives KANBAN-Board im Einsatz und erste Prototypen

1 Interdisziplinäre Produktentwicklung (Einleitung)

Jedes Produkt beginnt als unscharfe Produktidee, die im Laufe ihrer Weiterentwicklung immer konkretere Wesensmerkmale annimmt. Wird die so generierte Idee für gut befunden, erfolgt gemäß Abbildung 2 die eigentliche Produktentwicklung, gefolgt von der Fertigung, der Nutzung und letztendlich dem Recycling.

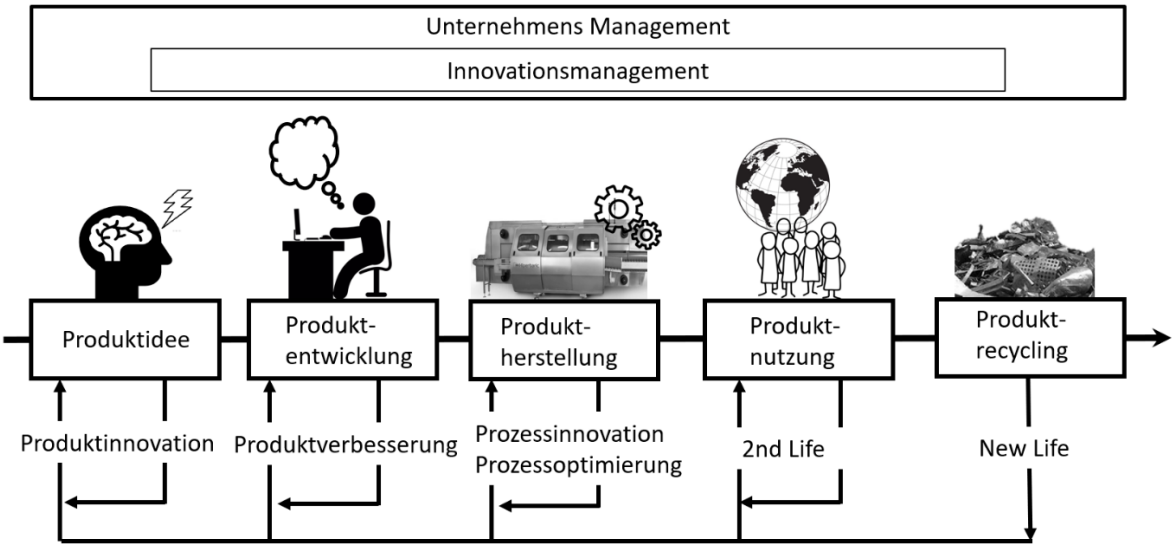


Abbildung 2: Produktlebenszyklus und Innovation [1]

Das jeweilige Endergebnis der einzelnen Abschnitte des Produktlebenszyklus ist heute nicht mehr das Ergebnis der jeweiligen Fachabteilung, sondern Ergebnis einer interdisziplinären Zusammenarbeit. Die beteiligten Akteure wie z.B. Management, Marketing, Vertrieb, Innovation, Konstruktion oder Fertigung verfügen für ihre Tätigkeit über fachgebietsspezifische Methoden, die beispielgebend in der Tabelle 1 aufgelistet sind. Vor allem durch unterschiedliche Begrifflichkeiten kommt es dabei immer wieder zu Problemen in der Zusammenarbeit. Notwendig ist in jedem Fall das Initiieren von Schulungen, die die jeweils andere Denk- und Sichtweise der Abteilungen vermitteln und so die Teammitglieder für ein besseres Verständnis untereinander sensibilisieren. Sinnvoll erscheint auch das Ansinnen, fachgebietsfremde Methoden auf eigene Tätigkeiten zu übertragen, bzw. mit eigenen Methoden zu erweitern. Längerfristig kann so in einem Unternehmen eine einheitliche Unternehmenssprache und auch Managementmethodik eingeführt werden.

Tabelle 1: Fachspezifische Arbeitsmethoden

Management Produktidee	Agile Projektentwicklung, SWOT,… Do-It-Ideas-Process, Design Thinking, ….
Produktentwicklung	Produktentwicklungsprozess z.B. VDI 2221ff., V-Modell,…
Produktherstellung Qualitätsmanagement	Kaizen, KVP, 9001 (PDCA),… KANBAN, SCRUM, SCRUMBAN,…

Werden die Methoden der unterschiedlichen Abteilungen analysiert, kann in den meisten Fällen nachgewiesen werden, dass die erlernten Methoden lediglich branchenspezifische Begrifflichkeiten verwenden - die eigentliche Vorgehensweise jedoch identisch ist. Ein sehr schönes Beispiel ist im Rahmen des Agilen Projektmanagements die Verwendung des Design Thinking, welches in gleicher Weise z.B. auch als Do-It-Ideas Process bzw. als Vorgehensweise in der Planungsphase des Produktentwicklungsprozesses nach VDI 2221 identifiziert werden kann. Eine entsprechende Zuordnung der einzelnen Begrifflichkeiten zu den eigentlichen Tätigkeiten ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

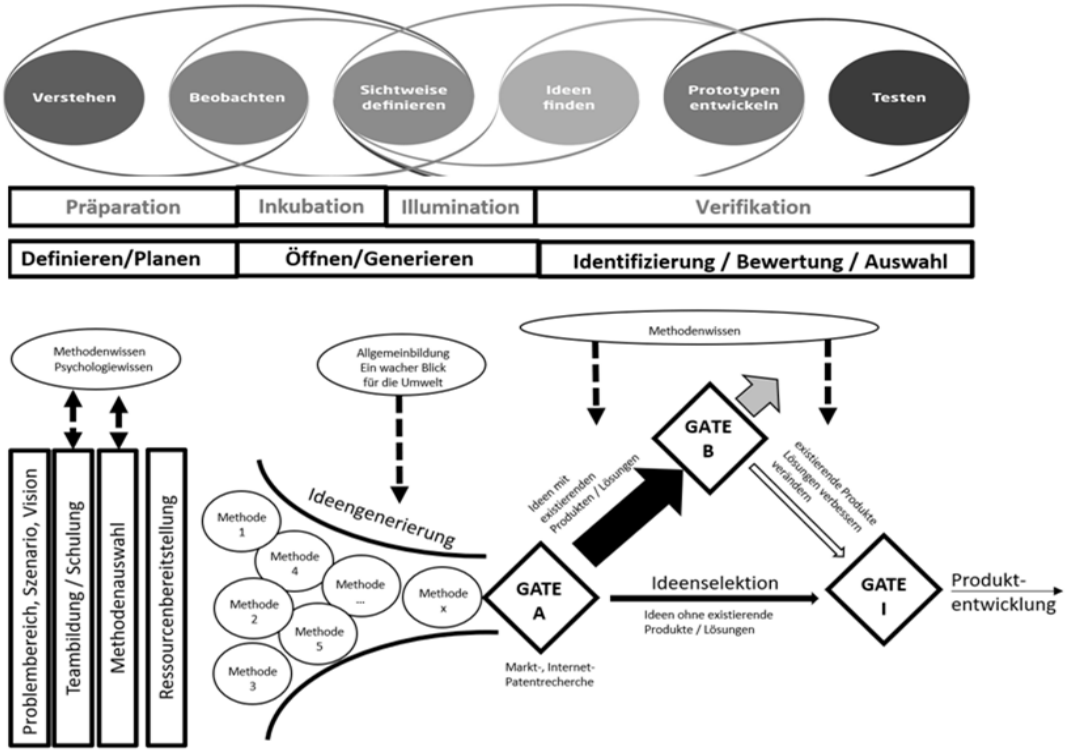


Abbildung 3: Design Thinking, Do-It-Ideenprozess und Konzeptphase im Vergleich [1]

2 Agile Produktentwicklung

Agile Produktentwicklung zielt auf die noch schnellere Entwicklung kundenorientierter Produkte. Anstatt längerer Entwicklungsphasen ganzer, vollendeter Produkte, sollen bei der agilen Produktentwicklung schneller Teilergebnisse anfassbar präsentiert werden. Unfertige aber greifbare Teilergebnisse stehen über der traditionellen Entwicklungsmethodik, nach der erst nach Vollendung sämtlicher Meilensteine ein Ergebnis zur Begutachtung vorliegt. Im herkömmlichen Produktentwicklungsprozess ist dieses i.d.R. ein virtuelles Produkt. Bei komplexen Produkten kann das mehrere Jahre Bearbeitungszeit bedeuten.

Als freie Methode zum Entwickeln von Produktideen gilt das Design Thinking. Nach einer Einarbeitung in das zu lösende Problemgebiet wird die Situation empathisch beobachtet und ein persönliches Verständnis und Gefühl für das Problem aufgebaut. Lösungen für das jeweilige Problem werden nicht nur virtuell, sondern auch als unmittelbarer Prototyp erstellt, um z.B. eine Bewertung zu ermöglichen und frühzeitig ein anfassbares Modell u.a. auch für den Kunden zu generieren und ggf. gemeinsam zu verändern.

Als Werkzeug für die schnellstmögliche Ideenentwicklung und Prototypenerstellung soll die KANBAN-Methode diskutiert werden, die gleichzeitig Bausteine der SCRUM-Methode verwendet. Abbildung 4 zeigt hierfür einen „agilen“ Arbeitsplatz, an dem Teams im „Vorbeigehen“ oder auch täglichem Verharren, an der Lösung von Problemen aktiv beteiligt werden und zu jedem Zeitpunkt Zwischenergebnisse sehen und diskutieren können.

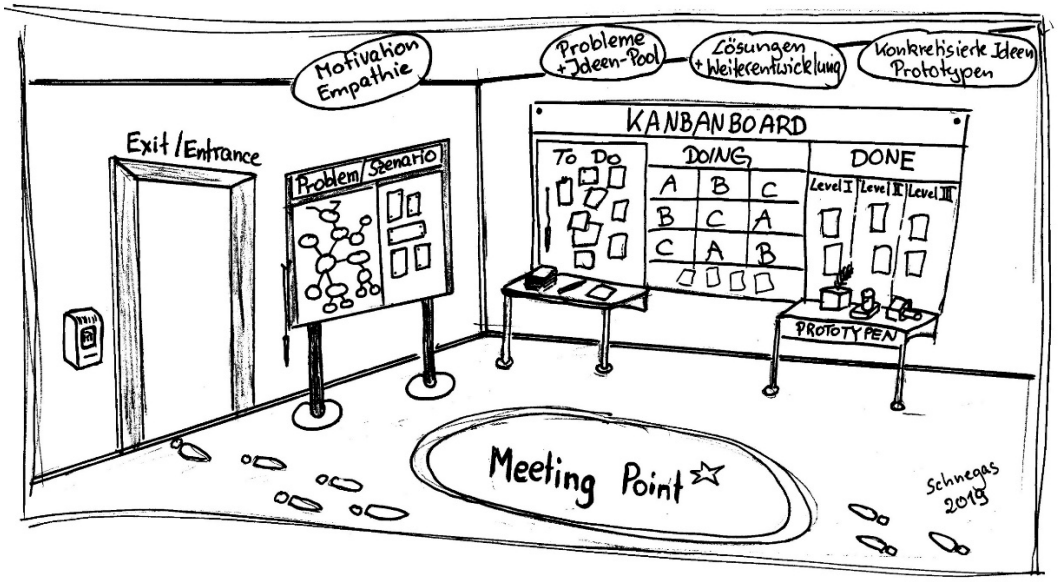


Abbildung 4: Agiler Arbeitsplatz für Produktentwicklung

Genutzt wird die KANBAN Methode, die im Rahmen des Qualitätsmanagements und hier vor allem des KAIZEN oder Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses in den 90er Jahren aus der Softwareentwicklung entlehnt wurde und heute vor allem im Fertigungsprozess Anwendung findet. Bei KANBAN, was im Japanischen „Kärtchen“ bedeutet, werden Probleme aber auch Ideen und sonstige Vorschläge auf Karten an eine Pin-Wand geheftet (TO DO). Ein Handlungsteam greift die „Kärtchen auf“ und entwickelt Lösungsvorschläge (DOING), die am Ende an der Pinwand vorgestellt, diskutiert und eingeführt werden (DONE). Die Pinwand ist so angeordnet, dass sie von allen betroffenen Teammitgliedern täglich gesehen werden kann (z.B. Eingangsbereich) und zum Verharren, Treffen und Diskutieren einlädt. Im folgenden Abschnitt soll die Anwendung des KANBAN für die schnelle Ideenentwicklung und das schnelle Erstellen von Prototypen vorgestellt werden, wie es noch nicht in der Praxis in der täglichen Arbeit angewandt wird.

3 Das KANDAN-Board für Produktinnovatoren

Werden Prozessverbesserungen in der Fertigung angestrebt bzw. neue Ideen für Folgeprodukte gesucht, werden i.d.R. Teamsitzungen einberufen, bei denen Lösungen spontan generiert werden sollen. Die Terminfindung ist gerade in kleinen Unternehmen mehr als schwierig, auch erweisen sich Zwangstermine mit Kreativitätstechnik nicht gerade als förderlich für das Generieren von erfolgreichen Produktideen. Eine Lösungsidee ist die Einführung eines KANBAN-Boards.

Im Design Thinking Prozess (siehe Abb. 3) erfolgt zunächst ein Briefing, mit dem die „Innovatoren“ in ein Problem eingeführt werden. Hintergründe, Situationen, Denkweisen werden dargelegt. Diese Problemdarlegung wird bei der KANBAN-Methode öffentlich mit Hilfe von Texten, Fotos, Filmen (wenn digital) auf einer Tafel realisiert (siehe Abb. 4 – Tafel Problem/Szenario).

Das eigentliche Herzstück der Methode ist das bereits beschriebene KANBAN-Board mit der Struktur TO DO, DOING, DONE, welches für unsere Belange modifiziert wurde.

Das Wesen einer kreativen Ideensuche ist das spontane Agieren ohne frühzeitige Bewertung. In Bezug auf das Problem/Szenario sind alle Abteilungsangehörige aufgerufen, problembezogene Lösungsideen auf kleinen Zetteln (Karten) zu notieren und in der Spalte TO

Do sichtbar zu veröffentlichen (siehe Abb. 5). In Anlehnung an das SCRUM ist die namentliche Angabe eines Problem/Ideen-Owners zwecks inspirierender Rückfragen möglich.
Da allgemeine Ideen noch keine Produkte sind, müssen die Grundideen weiterentwickelt und verfeinert werden. Hierzu ein Beispiel. Als Verbesserungsvorschlag wird z.B. die bessere Beleuchtung auf einer Treppe auf einer Karte angeregt. Als Lösungen sind z.B. Deckenlampen, Wandlampen aber auch leuchtende Treppen, leuchtende Handläufe oder-Leuchtmittel für den Treppennutzer denkbar.

Diese konkretisierten Produktideen sind das Ergebnis der Arbeit eines zuvor gebildeten nach Möglichkeit interdisziplinären „Ideen-Teams“. Empfohlen werden mindestens 3 Teamplayer (eindeutige Abstimmungsergebnisse) maximal 6 (Organisationsaufwand). In Phase 2 nehmen z.B. bei Dienstantritt die Teamplayer jeweils eine Ideen-Karte aus der Spalte To Do und generieren mindestens 3 bis 5 Produktideen am besten vor Ort. Eigene Favoriten sind z.B. mit grünen Punkten zu kennzeichnen. Die Ideen werden für alle sichtbar an das Board (Spalte 1) geheftet. Im Laufe des Bearbeitungsfortschritts wird nicht nur eine To Do-Karte entnommen, sondern auch die Ideenmappe eines anderen Teamplayers aus den Spalten 1 und 2. Gemäß Abb. 5 würde z.B. Teamplayer A eine To Do-Karte und die Mappen von C aus der Spalte 1 und 2 nehmen. In diesem Arbeitsgang können vorhandene Ideen weiterentwickelt werden, bzw. neue Ideen angefügt werden. Die eigentliche Bearbeitungszeit sollte nicht mehr als 5 Minuten je Karte bzw. Ideenmappe betragen, da nur so die Intuition gefördert wird. Eine Kennzeichnung der Favoriten ist auch hier erwünscht.

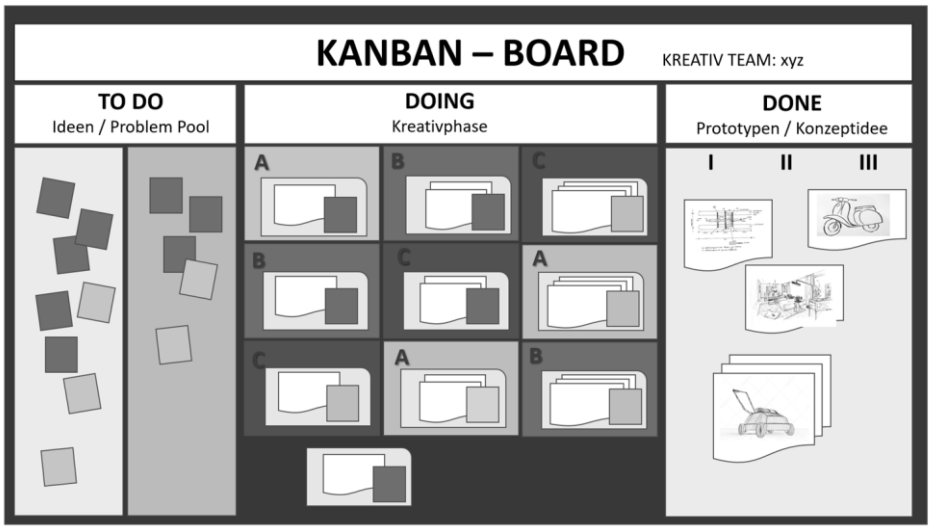


Abbildung 5: Modifiziertes KANBAN-Board

Ein weiterer Innovator ist der aus SCRUM bekannte Scrum-Master, der für den allgemeinen Ablauf verantwortlich zeichnet. In unserem System würde er täglich die Ideenmappen der Teamplayer C, A, B aus der 3. DOING Spalte entnehmen, sichten, nach Favoriten auswerten und als verfeinerte Produktidee in der Spalte DONE ausstellen. Denkbar und erwünscht ist ebenfalls das Erstellen erster Prototypen. Während alle anderen Innovatoren nur begrenzte Bearbeitungszeiten einplanen müssen, ist die Tätigkeit des Masters etwas arbeitsintensiver, aber immer noch eine Alternative zu einer größeren Gruppe, die freigestellt werden müsste.

Neben der Tätigkeit der Innovatoren sind alle anderen Abteilungsangehörige ebenfalls aufgerufen, die Zwischenergebnisse zu sichten und ggf. eigene Ideen zu generieren. Im Folgenden soll die Vorgehensweise an einem konkreten Beispiel demonstriert werden.

4 Das KANDAN-Board im Projekt „COCOS“

Abbildung 6 zeigt das KANBAN-Board für das Projekt „COCOS“, welches seit dem Sommersemester 2019 mit Studierenden der Internationalen Klasse unter Nutzung zufälliger Kontaktpersonen bearbeitet wird.

Abbildung 6: KANBAN-Board Projekt „COCOS“

Ausgangspunkt war die Feststellung indonesischer Studierender, dass in Deutschland unfassbar viele Kokos-Produkte zu sehr günstigen Preisen verfügbar wären. In Indonesien würden sehr viele Farmer Kokos-Nüsse für internationale Firmen zu Niedriglöhnen und Niedrigverkaufspreisen bereitstellen. Genutzt werden nur Kokoswasser, Kokosmark und stellenweise die Fasern. Neben den niedrigen Löhnen und Preisen stellen deshalb die riesigen Abfallberge der Kokosnuss ein Problem dar. Geboren war die Idee, aus den „Resten“ Produkte zu entwickeln, die eine zusätzliche Einnahmequelle darstellen können.

In Phase 1 wurden die Zustände erörtert und der gegenwärtige Markt analysiert und mit Hilfe von Mind Maps strukturiert. Die Ergebnisse wurden direkt auf dem KANBAN-Board für alle sichtbar visualisiert (siehe Abb. 6 und 7). Zusätzlich wurden Beispielprodukte gesammelt, um einen Einblick in das Produktportfolio des Marktes zu bekommen, welches gleichzeitig als Inspiration für neue Produkte dienen soll (siehe Abb. 8).

Abbildung 7: Problembeschreibung und Analyse, Zielstellung

Abbildung 8: Produkte des Marktes

In einem spontanen Meeting notierten die Studierenden mögliche Einsatzgebiete, die nach einer ersten Recherche Potenzial bieten könnten. Begriffe wie Musik, Küche, Schule, Möbel, Fotos, Spiele, Sonnenschutz u.a. wurden auf Karten notiert und an das Board geheftet. In den folgenden Tagen wurden durch 3 benannte Innovatoren Ideen-Kärtchen entnommen und Produktideen in 3 Stufen entwickelt, die in einer Art Galerie für alle Besucher ständig sichtbar waren und stellenweise ergänzt wurden. Abbildung 8 zeigt dieses Projektstadium. Bei der Erarbeitung der Ideen wurde ein Zeitintervall von 3 bis 5 Minuten je Karte realisiert.

Abbildung 9: KANBAN-Board To Do und Doing Bereich

Die Abbildungsserie 10 zeigt beispielgebend den Fortschritt beim Generieren von Projektideen zum Thema „Verpackung“. Wegen gegebener Ähnlichkeit wurden auch Ideen-Karten zu Geschenkbox, Einpacken, Schützen gleichzeitig betrachtet. Nach einer sehr kurzen Bearbeitungszeit wurden nach Bewertung vorliegender Ideen favorisierte Ideen ausgewählt

und zeichnerisch oder als Prototyp aufbereitet (siehe Abb. 11). Diese Ergebnisse sind Ausgangspunkt für den nächsten Meilenstein, bei dem nun konkrete zu realisierende Produkte ausgewählt werden sollen. Nachgewiesen werden konnte, dass in einer sehr kurzen Zeit ohne großem Personal- und intensivem Meeting-Aufwand anfassbare Produkte entwickelt werden können.

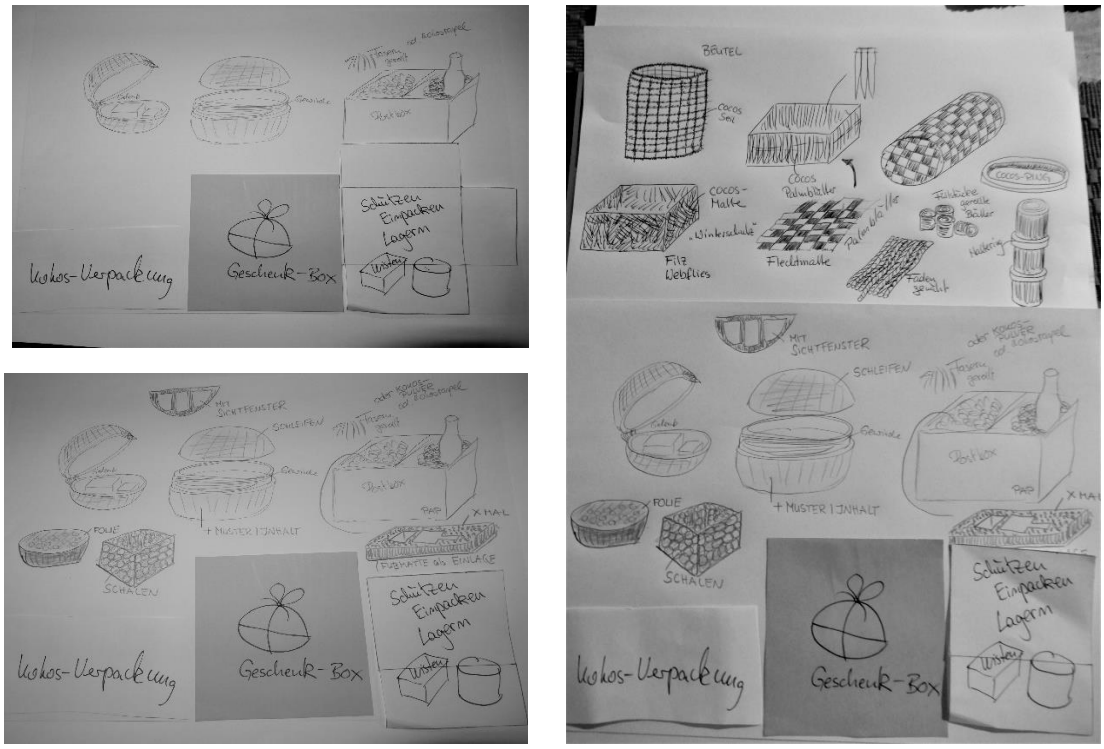


Abbildung 10: Beispiel für den 3stufigen Bearbeitungsfortschritt

Abbildung 11: Prototypen und Ideenskizzen (Done)

5 Digitale SCANBAN-Boards und Ausblick

Die KANBAN-Methodik ist ein einfach nutzbares Werkzeug, das je nach Projektcharakter mit einfachsten Mitteln angewendet werden kann. Im Projekt „COCOS“ waren das eine Papiertischdecke, Notizzettel und diverse Bastelmaterialien im Gesamtwert von ca. 20,- EUR. Im Zeitalter der Digitalisierung wird natürlich zwangsläufig die Frage nach einer digitalen Variante interessant. Der Markt bietet bereits einige Softwarelösungen an, die auf dem PC, dem Tablet aber auch dem Smartphone abgerufen werden können. Software-Preise um die 400,- bis 900,- EUR sprechen eine eigene Sprache. Eine psychologisch sinnvolle Anwendung konnte jedoch nach Tests nicht für konstruktive Belange bescheinigt werden. Folgende Einschränkungen können genannt werden:

- PCs sind nicht immer aktiv
- Bildschirme sind zu klein, Digitale Monitor-Wände zu teuer.
- Das gesamte KANBAN-Board ist nicht darstellbar und wenn viel zu klein.
- Zwischenergebnisse sind nicht erkennbar und ggf. veränderbar.
- In der Papierversion ist ein Blatt leichter zu transportieren.
- Der Aufwand für das Eingeben eines Stichwortes bzw. einer Skizze ist viel zu groß.
- Bedienung der PCs behindert eine kreative Entfaltung.
- Eventuelle Prozessstaus (nicht bearbeitete Karten, Mappen) sind nicht erkennbar.

Zusammenfassend muss eingeschätzt werden, dass eine digitale Version zu gegebener Zeit nicht sinnvoll ist.

Literatur

[1] Schnegas, Henrik*: Kreativitäts- und Innovationsmethoden / Entrepreneurship.*

[2] *Skript Hochschule Wismar, 2018/19.*

[3] Ziegler, Michael: *Agiles Projektmanagement. Independently publishing, 2018.*

[4] *Zimmermann, Ingo: Agle Projekte mit Scrum und Kanban starten. Create Space Independent Publishing Platform, 2016.*

Systematische Methoden und Vorgehensweisen waren schon immer Bestandteil der Produktentwicklung. In jüngster Zeit bekommt hierbei die agile Entwicklung physischer Produkte immer mehr Bedeutung, was sich nicht zuletzt am jüngst erschienen gleichnamigen VDI-Statusreport ableiten lässt. Es werden Beitragseinreichungen vor allem zu folgenden nicht ausschließlichen Themenbereichen erbeten:

- Digitalisierung und Dokumentation im agilen Entwicklungsprozess
- Agile Methoden des Model-Based Engineering
- Analyse und Vergleich verschiedener agiler Methoden
- Datenaustausch, Informationstransparenz und Cloudcomputing

IGMR Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik | RWTH AACHEN UNIVERSITY

DOI: 10.18154/RWTH-2019-08298