

Markus Döllken

**Entwicklung und Evaluation der ACAP-
Untersuchungsmethode zur prozessbasierten
Validierung von text- und grafikbasierten
Konstruktionsmethoden**

Development and evaluation of the ACAP-analysis
method for the process-based validation of textual
and graphical design methods

Band 171

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Forschungsberichte



Markus Döllken

**Entwicklung und Evaluation der ACAP-
Untersuchungsmethode zur prozessbasierten
Validierung von text- und grafikbasierten
Konstruktionsmethoden**

Development and evaluation of the ACAP-analysis method
for the process-based validation of textual and graphical
design methods

Band 171

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2024
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

Druck WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang
0711-99598220

ISSN 1615-8113

Entwicklung und Evaluation der ACAP- Untersuchungsmethode zur prozessbasierten Validierung von text- und grafikbasierten Konstruktionsmethoden

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Markus Döllken

Tag der mündlichen Prüfung: 15.11.2023
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nikola Bursac

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 171

Konstruktionsmethoden haben das Ziel, Konstruierende beim Gestalten ihrer Systeme zielgerecht zu unterstützen. Der Nachweis, ob und wie die Konstruktionsmethode tatsächlich Nutzen stiftet, ist das Ziel der Methodenvalidierung. Bei der ergebnisbasierten Methodenvalidierung wird durch die Beurteilung des Konstruktionsergebnisses nachgewiesen, dass Konstruierende mit Hilfe der Konstruktionsmethode in der Lage sind, „bessere“ Ergebnisse zu erzielen, die Methode also nützlich ist.

Der alleinige Nachweis des Nutzens der Konstruktionsmethode reicht allerdings zur Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden nicht aus. Neben der ergebnisbasierten Validierung der Konstruktionsmethode muss untersucht werden, ob die Methode tatsächlich Ursache der besseren Ergebnisse war und an welcher Stelle sie überhaupt und wenn ja, wie die Konstrukteurin und den Konstrukteur unterstützt hat. Mit Hilfe einer solchen Untersuchungsmethode können Schwachstellen in der Konstruktionsmethode aufgedeckt werden, um diese im nächsten Schritt zielführend weiterzuentwickeln.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Evaluation einer derartigen Untersuchungsmethode. Herr Markus Döllken stellt im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit die von ihm entwickelte „ACAP-Untersuchungsmethode“ zur prozess- und ergebnisbasierten Validierung text- und grafikbasierter Konstruktionsmethoden vor und wendet sie bei der Weiterentwicklung einer Konstruktionsmethode zur blechgerechten Gestaltung an.

Damit adressiert die vorgelegte Forschungsarbeit zwei für die Konstruktionsmethodik äußerst relevante Forschungsfelder:

1. Untersuchungsmethoden in der Validierung von Konstruktionsmethoden
2. Konstruktionsmethoden zur Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens in der Gestaltung

Erstmalig gelingt es Herrn Döllken durch eine fundiert durchgeführte Studie zu zeigen, dass die alleinige Validierung des Nutzens einer Konstruktionsmethode für deren Weiterentwicklung nicht ausreicht. Es gelingt Herrn Döllken, für jeden zu untersuchenden Anwendungsschritt fundiert objektiv messbare quantitative Metriken zu bestimmen und in einer Validierungsstudie einzusetzen. Die Forschungsergebnisse bezüglich der Untersuchungsmethode haben eine große Bedeutung für das Forschungsfeld „Methodenvalidierung“.

Außerdem zeigt Herr Döllken erstmalig, wie die während der Anwendung der Konstruktionsmethode erhobenen Daten Erkenntnisse ermöglichen, die bei der Weiterentwicklung der Methode helfen. Neben diesem zentralen Ergebnis entwickelt Herr Döllken eine Konstruktionsmethode zur fertigungsgerechten Konstruktion von Blechbauteilen, die einen großen Mehrwert für die Methodenforschung hat.

November, 2023

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Die zielgerichtete Verbesserung von Konstruktionsmethoden erfordert Validierungsstudien, die es ermöglichen, Schwierigkeiten bei der Anwendung der untersuchten Methoden zu erfassen und zu bewerten. Die bisherigen Validierungen von Konstruktionsmethoden legen ihren Schwerpunkt auf die Bewertung des Ergebnisses. Die Feststellung, dass die Ergebnisse einer Konstruktionsmethode nicht dem gewünschten Nutzen entsprechen, reicht jedoch für sich genommen als Grundlage für die Weiterentwicklung und Verbesserung nicht aus. Die Ursachen für den Nutzen oder Misserfolg einer Konstruktionsmethode liegen in der Anwendung durch die Konstruierenden. Entscheidend für die Anwendbarkeit ist, dass die Methodeninhalte gelesen, verstanden und korrekt angewendet werden.

Aktuelle Untersuchungsmethoden zur Validierung von Konstruktionsmethoden beschränken sich auf die Erhebung und Bewertung des Konstruktionsergebnisses und berücksichtigen die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode nicht. Dies hat zur Folge, dass keine Aussagen zu möglichen Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode getroffen werden können, so dass Weiterentwicklungspotenzial nicht erkannt wird.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Evaluation einer Untersuchungsmethode, die zusätzlich zum Nutzen einer Konstruktionsmethode auch Schwierigkeiten in deren Anwendbarkeit erfasst. Mit der Untersuchungsmethode soll eine aussagekräftige Validierung aufgrund von operationalisierten Metriken und statistisch auswertbaren Ergebnissen ermöglicht und Erkenntnisse bezüglich der Weiterentwicklung der jeweiligen Konstruktionsmethode gewonnen werden.

Die zu diesem Zweck neu entwickelte *ACAP-Untersuchungsmethode* untersucht die Anwendbarkeit und erfasst die Messgrößen Aufmerksamkeit, Verständnis und Korrektheit der Anwendung sowie den Nutzen der Konstruktionsmethode. Zur Evaluation der *ACAP-Untersuchungsmethode* wurde eine Konstruktionsmethode für die Blechkonstruktion in einer Laborstudie untersucht. Die Ergebnisse der Evaluation ergaben, dass die *ACAP-Untersuchungsmethode*: 1) Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode identifiziert; 2) den Nutzen der Konstruktionsmethode ermittelt; 3) die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen erfasst. Mit der *ACAP-Untersuchungsmethode* können so anhand von objektiven Metriken Ursachen für bestehende Schwierigkeiten identifiziert und für die Weiterentwicklung der untersuchten Konstruktionsmethode verwendet werden.

Abstract

The targeted improvement of design methods requires validation studies that make it possible to detect and evaluate difficulties in the application of the methods under study. Validations of design methods to date focus on evaluating the outcome. However, the finding that the outcome of a design method does not meet the desired benefit is not sufficient in itself as a basis for further development and improvement. The reasons for the benefit or failure of a design method lie in its application by the design engineers. It is crucial for the applicability that the method contents are read, understood and correctly applied.

Current analysis methods for the validation of design methods are limited to the survey and evaluation of the design outcome and do not consider the applicability of the design method. As a result, no conclusions can be drawn about possible difficulties in the applicability of the investigated design method, so that further development potential is not recognized.

The aim of this work is the evaluation of an analysis method which, in addition to the benefit of a design method, also detects difficulties in its applicability. The research method is intended to enable meaningful validation based on operationalized metrics and statistically evaluable results, and to gain insights regarding the further development of the respective design method.

The ACAP analysis method, which was newly developed for this purpose, examines applicability and measures attention, comprehension and correctness of application, as well as the usefulness of the construction method. To evaluate the ACAP analysis method, a design method for sheet metal construction was examined in a laboratory study. The results of the evaluation showed that the ACAP analysis method: 1) identifies difficulties in the applicability of the design method; 2) determines the benefit of the design method; 3) captures the impact of the identified difficulties on the benefit. Thus, using objective metrics, the ACAP analysis method can identify causes of existing difficulties and can be used for further development of the design method.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Ich möchte mich bei allen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen, für seine kompetente Betreuung, Offenheit und konstruktive Kritik bedanken. Seine wertvollen Hinweise und Diskussionen haben wesentlich zum Gelingen dieser Forschungsarbeit beigetragen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nikola Bursac danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Diskussionen zur blechgerechten Gestaltung, zum schnellen und langsamen Denken und zur Abstraktion von Forschungserkenntnissen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke meinen Kooperationspartnern aus der Industrie durch die unsere gemeinsamen Projekte stets fachlich herausfordernd und persönlich bereichernd waren.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Kolleginnen, Kollegen, Freundinnen und Freunden die mich in meiner Zeit am Institut begleitet haben. Ich habe eure konstruktiven Anregungen und eure Unterstützung immer sehr geschätzt. Dieser Austausch war und ist mir immer eine Freude. Ich möchte mich außerdem herzlich bei meinen studentischen Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern, meinen studentischen Hilfskräften, mit denen ich während meiner Zeit am Institut zusammenarbeiten durfte, sowie der Sekretariate, der Administration, der IT und den technischen Diensten für ihre Unterstützung bedanken.

Ein riesiges Dankeschön gilt meiner Familie. Danke für den Rückhalt den Ihr mir in dieser Zeit und auf dem Weg hierhin stets gegeben habt. Vielen Dank Papa für deine unschätzbare Geduld, deine präzise Formulierung und deinen Glauben an die Forschungsarbeit und an mich.

November, 2023

Markus Döllken

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Kurzfassung | i |
| Abstract | iii |
| Inhaltsverzeichnis | vii |
| Abbildungsverzeichnis | xi |
| Tabellenverzeichnis | xiii |
| Abkürzungsverzeichnis | xv |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Aufbau der Forschungsarbeit | 2 |
| 2 Grundlagen und Stand der Forschung | 5 |
| 2.1 Grundlagen..... | 5 |
| 2.1.1 Definition und Bedeutung von Konstruktionsmethoden..... | 6 |
| 2.1.2 Definition der Validierung von Konstruktionsmethoden..... | 8 |
| 2.1.3 Untersuchungsmethoden in der Konstruktionsforschung..... | 11 |
| 2.2 Validierung von Konstruktionsmethoden | 17 |
| 2.2.1 Ergebnisbasierte und prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden | 17 |
| 2.2.2 Untersuchungsmethoden zur Analyse der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden | 19 |
| 2.2.3 Zwischenfazit..... | 24 |
| 2.3 Bedeutung von Konstruktionsmethoden für die fertigungsgerechte Konstruktion | 26 |
| 2.3.1 Berücksichtigung der Fertigung bereits in der Phase der Konstruktion..... | 26 |
| 2.3.2 Zwischenfazit..... | 31 |
| 2.4 Fazit zum Stand der Forschung..... | 32 |
| 3 Motivation und Zielsetzung | 35 |
| 4 Forschungsfragen und Forschungsvorgehen | 37 |
| 5 Fallstudie zur ergebnisbasierten Validierung | 41 |
| 5.1 Beschreibung einer dualen Konstruktionsmethode für die blechgerechte Konstruktion | 41 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2 | Fallstudie zur ergebnisbasierten Validierung einer Konstruktionsmethode zur blechgerechten Konstruktion..... | 51 |
| 5.2.1 | Studienaufbau..... | 51 |
| 5.2.2 | Ergebnisse der Fallstudie..... | 56 |
| 5.2.3 | Diskussion | 59 |
| 5.3 | Fazit zur Fallstudie einer ergebnisbasierten Validierung | 61 |
| 6 | Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden | 63 |
| 6.1 | Ablauf der ACAP-Untersuchungsmethode..... | 64 |
| 6.1.1 | Operationalisierung und Datenerhebung..... | 66 |
| 6.1.2 | Datenanalyse | 74 |
| 6.2 | Fazit zur Entwicklung der ACAP-Untersuchungsmethode | 81 |
| 7 | Forschungsfrage 2: Evaluierung der ACAP-Untersuchungsmethode | 83 |
| 7.1 | Studienaufbau..... | 83 |
| 7.1.1 | Studienteilnehmende | 84 |
| 7.1.2 | Studienablauf und Aufgabenstellung..... | 84 |
| 7.1.3 | Experiment-Software und Hardware | 86 |
| 7.1.4 | Metriken | 87 |
| 7.1.5 | Datenanalyse..... | 88 |
| 7.2 | Ergebnisse der ACAP-Untersuchungsmethode | 89 |
| 7.2.1 | Ergebnisse zur Aufmerksamkeit..... | 89 |
| 7.2.2 | Ergebnisse zum Verständnis..... | 90 |
| 7.2.3 | Ergebnisse zur Anwendung | 91 |
| 7.2.4 | Ergebnisse zur Leistung..... | 92 |
| 7.2.5 | Ergebnisse zum Methodeninhalt Teileanzahl reduzieren | 93 |
| 7.2.6 | Ergebnisse zum Methodeninhalt Schweißnaht optimieren | 94 |
| 7.2.7 | Ergebnisse zum Methodeninhalt Flächentrennung | 94 |
| 7.2.8 | Fazit zu den Ergebnissen..... | 95 |
| 7.3 | Diskussion | 96 |
| 7.3.1 | Diskussion zur Konstruktionsmethode | 96 |
| 7.3.2 | Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode | 98 |
| 7.4 | Fazit zur ACAP-Untersuchungsmethode | 101 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 103 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 103 |
| 8.2 | Ausblick | 105 |
| | Literaturverzeichnis | I |
| | Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind | XII |

| | |
|------------------------|------------|
| Glossar | XV |
| Anhang A1 | XIX |
| Anhang A2..... | XXI |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|----------------|--|
| Abbildung 2.1: | Änderung der Gestalt bei Variation des Fertigungsverfahrens ..8 |
| Abbildung 2.2: | Vorgehen zur Validierung von Konstruktionsmethoden10 |
| Abbildung 2.3: | Die Anwendbarkeit als notwendige Bedingung für den Nutzen11 |
| Abbildung 2.4: | Einteilung der Untersuchungsmethoden.....12 |
| Abbildung 2.5: | Ergänzung der Untersuchung der Anwendbarkeit25 |
| Abbildung 2.6: | Gestaltungsregeln für die blechgerechte Konstruktion28 |
| Abbildung 2.7: | Ausschöpfung des Potenzials des Fertigungsverfahrens31 |
| Abbildung 4.1: | Forschungsvorgehen.....39 |
| Abbildung 5.1: | Restriktiver Methodeninhalt <i>Kollisionsanalyse</i>45 |
| Abbildung 5.2: | Opportunistischer Methodeninhalt <i>Teileanzahl reduzieren</i>48 |
| Abbildung 5.3: | Opportunistischer Methodeninhalt <i>Schweißnaht optimieren</i>49 |
| Abbildung 5.4: | Opportunistischer Methodeninhalt <i>Flächentrennung</i>50 |
| Abbildung 5.5: | Zusammenfassung des Studienablaufs.....52 |
| Abbildung 5.6: | Verteilung des Fertigungsaufwandes58 |
| Abbildung 6.1: | Ablauf der ACAP-Untersuchungsmethode65 |
| Abbildung 6.2: | Text- und grafikbasierte Bereiche der Konstruktionsmethode .70 |
| Abbildung 6.3: | Übersicht über die Schwierigkeiten80 |
| Abbildung 7.1: | Zusammenfassung des Studienablaufs.....84 |
| Abbildung 7.2: | Referenzbaugruppe zur Konstruktionsaufgabe86 |
| Abbildung 7.3: | Lesetiefe für Text und Abbildungen der Methodeninhalte90 |
| Abbildung 7.4: | Verständnis der Teilnehmenden für Methodeninhalte91 |
| Abbildung 7.5: | Korrekte Anwendung der Methodeninhalte92 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabelle 2.1: | Vergleich der Berücksichtigung der Anwendbarkeit in relevanten Veröffentlichungen zur Validierung von Konstruktionsmethoden..... | 23 |
| Tabelle 5.1: | Blechgerechte Methodeninhalte aus der Literatur (R: restriktiv, O: opportunistisch) | 43 |
| Tabelle 5.2: | Merkmale der Studienteilnehmenden | 54 |
| Tabelle 5.3: | Metriken zur Bewertung der Konstruktionsergebnisse..... | 56 |
| Tabelle 6.1: | Quantitative Datenerhebung der ACAP-Untersuchungsmethode für die Validierung von Konstruktionsmethoden: Phasen mit Metrik und Beispielwerten | 67 |
| Tabelle 6.2: | Exemplarische Darstellung der Analyse der Anwendung eines Studienteilnehmenden: Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte..... | 73 |
| Tabelle 6.3: | Werte zu Aufmerksamkeit und Verständnis sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen | 76 |
| Tabelle 6.4: | Werte zu Verständnis und Anwendung sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen | 77 |
| Tabelle 6.5: | Werte zu Anwendung und Leistung und deren Auswirkungen auf den Nutzen sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen | 78 |
| Tabelle 7.1: | Bewertung der Konstruktionsergebnisse von 25 Studienteilnehmenden..... | 93 |
| Tabelle 7.2: | Signifikante Korrelation zwischen der Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte und der Leistung | 94 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|--|
| DfM | Design for Manufacturing |
| DfSM | Design for Sheet Metal |
| DfAM | Design for Additive Manufacturing |
| AOI | Area of Interest |
| DRM | Design Research Methodology |
| ACAP | EN: Attention Comprehension Application Performance Analysis DE Aufmerksamkeit-Verständnis-Anwendung-Leistungs- Untersuchungsmethode |

1 Einleitung

Die Verbesserung von Konstruktionsmethoden hat das Ziel, ihren Nutzen zu erhöhen. Der Nachweis des Nutzens von Konstruktionsmethoden erfordert Validierungsstudien. Der Nutzen einer Konstruktionsmethode entsteht durch ihre Anwendung durch die Konstruierenden.

Bisherige Validierungen von Konstruktionsmethoden fokussieren sich auf deren Ergebnis (Shah, Smith & Vargas-Hernandez, 2003). Als Maßstab für den Nutzen der untersuchten Konstruktionsmethode gelten dementsprechend die Ergebnisse, die beispielsweise von Konstruierenden in Probandenstudien erarbeitet werden. Diese ergebnisbasierte Validierung stellt also lediglich fest, ob die Ergebnisse einem vordefinierten Nutzen entsprechen oder nicht. Das Problem ist, dass auf diese Weise keine Erkenntnisse zur Anwendung der jeweiligen Methode gewonnen werden. Bei der prozessbasierten Validierung wird die ergebnisbasierte Validierung dementsprechend um eine Untersuchung der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode ergänzt. Hierdurch werden Aussagen über den Nutzen der Konstruktionsmethode und zusätzlich über deren Anwendbarkeit ermöglicht.

Die zielgerichtete Verbesserung von Konstruktionsmethoden erfordert Validierungsstudien, die es ermöglichen, Schwierigkeiten bei der Anwendung der untersuchten Methoden zu erfassen und zu bewerten. Untersuchungsmethoden, die hierzu imstande wären, sind jedoch gemäß dem gegenwärtigen Stand der Forschung bislang nicht vorhanden.

Die Entwicklung einer neuen Untersuchungsmethode ist somit notwendig, die es ermöglicht, zusätzlich zum Nutzen auch die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden zu analysieren und zu bewerten. Damit die Konstruktionsmethode einen Nutzen erbringen kann, müssen deren Inhalte gelesen, verstanden und korrekt angewendet werden. Daher soll die Untersuchung der Anwendbarkeit mögliche Schwierigkeiten in der Aufmerksamkeit, im Verständnis und in der Anwendung der Konstruktionsmethode sowie deren Auswirkungen auf den Nutzen aufzeigen (Doellken, Nelius & Matthesen, Wiedereinreichung im Jahr 2023 am 14. Juli). Durch die Einteilung in diese Aspekte der Anwendbarkeit können Ursachen für die bestehenden Schwierigkeiten eingegrenzt und Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der jeweils untersuchten Konstruktionsmethode abgeleitet werden.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer neuen Untersuchungsmethode, mit der sich Erkenntnisse zu Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode wie auch zu Auswirkungen dieser Schwierigkeiten auf den Nutzen gewinnen lassen. Diese neue Untersuchungsmethode soll in der zweiten deskriptiven Studie aus der Forschungsmethodik der *Design Research Methodology (DRM)* (Blessing & Chakrabarti, 2009) eingesetzt werden. Der Titel der neu zu entwickelnden Untersuchungsmethode lautet *ACAP-Untersuchungsmethode – Attention Comprehension Application Performance Analysis*. Ihre Struktur und Aussagekraft wird in dieser Forschungsarbeit dargestellt.

Hierfür wird eine Fallstudie zur Validierung von Konstruktionsmethoden gemäß dem Stand der Forschung dargestellt. Es folgt eine Diskussion der Stärken und Schwächen der im Rahmen der Validierung verwendeten Untersuchungsmethode. Dabei wird deutlich, dass sie nicht geeignet ist, um Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode zu identifizieren. Die für diese Forschungsarbeit verwendete Konstruktionsmethode wurde im Rahmen eines mit einem Industriepartner durchgeführten Forschungsprojekts für die blechgerechte Konstruktion entwickelt. Der Zweck der Konstruktionsmethode ist es, die Fertigung bereits in der Konstruktion zu berücksichtigen, so dass die Effizienz des Konstruktionsprozesses verbessert wird. Denn moderne Fertigungstechnologien ermöglichen die schnelle, präzise und kostengünstige Herstellung von Blechteilen jeglicher Komplexität (Bursac, Krause, Batora & Ritzer, 2023).

1.1 Aufbau der Forschungsarbeit

Die Forschungsarbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Auf die Einleitung folgen die Grundlagen und der Stand der Forschung in Kapitel 2.

Kapitel 2 besteht aus drei Unterkapiteln. Im ersten dieser Unterkapitel werden die Grundlagen und Definitionen für die Forschungsarbeit erläutert. Im zweiten Unterkapitel werden die Untersuchungsmethoden für die Validierung von Konstruktionsmethoden beschrieben. Schließlich werden im dritten Unterkapitel die Konstruktionsmethoden für die fertigungsgerechte Konstruktion erläutert.

In Kapitel 3 werden aufbauend auf dem Stand der Forschung die Motivation und die Zielsetzung der Forschungsarbeit hergeleitet.

In Kapitel 4 werden die Forschungsfragen und das Forschungsvorgehen vorgestellt.

In Kapitel 5 wird eine Konstruktionsmethode entwickelt und diese gemäß dem aktuellen Stand der Forschung validiert. Weiterhin werden in diesem Kapitel auch die Stärken und Schwächen der im Rahmen der Validierung verwendeten Untersuchungsmethoden diskutiert. Schließlich wird auf Basis der Fallstudie der Bedarf an Methodvalidierung verdeutlicht.

In Kapitel 6 wird die Entwicklung der Untersuchungsmethode ACAP beschrieben und im Rahmen dessen wurden mehrere bestehende Untersuchungsmethoden miteinander kombiniert.

In Kapitel 7 wird die entwickelte ACAP-Untersuchungsmethode anhand einer Laborstudie evaluiert. In dieser Laborstudie wird die Konstruktionsmethode zur blechgerechten Konstruktion untersucht, siehe Kapitel 5. Aus der Evaluation lassen sich Maßnahmen zur Verbesserung der ACAP-Untersuchungsmethode ableiten.

Kapitel 8 fasst die Forschungsarbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Forschungsarbeit sowie der Stand der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden dargestellt.

In Kapitel 2.1 wird der Begriff der Konstruktionsmethode definiert sowie die Bedeutung von Konstruktionsmethoden erläutert. Es folgt eine Definition der Validierung von Konstruktionsmethoden und eine Darstellung der bestehenden Untersuchungsmethoden.

In Kapitel 2.2 werden, ausgehend vom aktuellen Stand der Forschung, zwei Arten der Validierung von Konstruktionsmethoden unterschieden: ergebnisbasierte und prozessbasierte.

Im Rahmen der prozessbasierten Validierung ist eine Untersuchung der Anwendbarkeit der jeweiligen Konstruktionsmethode von zentraler Bedeutung. Der Stand der Forschung zur Untersuchung der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden wird dargestellt und bewertet, insbesondere wird dabei auf die bisher eingesetzten Untersuchungsmethoden eingegangen. Diese werden hinsichtlich der Datenerhebung und Datenanalyse diskutiert.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit werden an einer Konstruktionsmethode für die fertigungsgerechte Konstruktion durchgeführt. In Kapitel 2.3 werden daher die Grundlagen der Konstruktionsmethoden für die Einbeziehung der Anforderungen der Fertigung an die Konstruktion aufgezeigt.

In Kapitel 2.4 wird ein Fazit zum aktuellen Stand der Forschung gezogen.

2.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu Untersuchungsmethoden und deren Bedeutung bei der Validierung von Konstruktionsmethoden erläutert. Dafür wird in Kapitel 2.1.1 eine Definition des Begriffs Konstruktionsmethode vorgestellt. Die Grundlagen zur Validierung von Konstruktionsmethoden werden in Kapitel 2.1.2 dargelegt. Eine Übersicht über die vorhandenen Untersuchungsmethoden zur Validierung von Konstruktionsmethoden findet sich in Kapitel 2.1.3.

2.1.1 Definition und Bedeutung von Konstruktionsmethoden

Im Folgenden wird die Definition des Begriffs Konstruktionsmethode dargestellt. Eine Konstruktionsmethode ist eine Form der Unterstützung eines Konstruktionsprozesses, dass eine zielorientierte Abfolge von Aktivitäten beinhaltet. Konstruktionsmethoden unterstützen Konstruierende dabei, das Ziel der Konstruktion effizient zu erreichen (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 173). Konstruktionsmethoden sind auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet, beispielsweise eine Reduzierung des Fertigungsaufwandes. Gericke, Eckert und Stacey (2017, S. 105) definieren den Begriff der Konstruktionsmethode wie folgt:

„[Eine Konstruktionsmethode ist] eine Spezifikation, wie ein bestimmtes Ergebnis erreicht werden soll. Dies kann Angaben dazu enthalten, wie Informationen dargestellt werden sollen, welche Informationen als Input für die Methode verwendet werden sollen, welche Werkzeuge verwendet werden sollen, welche Aktionen auf welche Weise durchgeführt werden sollen, wie die Aufgabe zerlegt werden soll und wie die Aktionen in eine Reihenfolge gebracht werden sollen“.

Die Definition einer Konstruktionsmethode enthält Angaben zur Darstellung der Informationen, zur Art und Anzahl der Informationen, zu den verwendeten Werkzeugen, zur Durchführung der Aktivitäten sowie zur Aufgabenerlegung und zur Reihenfolge der Aktionen.

Der Begriff der Konstruktionsmethode lässt sich nach Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 173) wie folgt gegenüber den Begriffen Strategie, Werkzeug und Hilfsmittel abgrenzen:

„[Konstruktions-]methoden sind damit konkreter als die Strategien, unter denen man eher eine flexible Leitidee versteht [...]. Werkzeuge sind noch konkretere Teilmethoden, sehr oft Computer-Werkzeuge, wie z. B. Simulationsmethoden FEM, BEM, MKS; [oder] Dokumentationsmethoden. Unter Hilfsmitteln schließlich kann man die körperlichen Objekte zur Abwicklung der Informationsverarbeitung des Entwickelns verstehen: z. B. Rechner, Zeichenbretter, Rapid Prototyping-Maschinen.“

Konstruktionsmethoden beinhalten eine Beschreibung von Vorgehensweisen, die den Denkprozess und das Vorgehen von Konstruierenden unterstützen sollen. Dabei soll jedoch Wert darauf gelegt werden, dass sie den Gestaltungsspielraum der Konstruierenden nicht unnötig einschränken (Lloyd, 2019).

Die Unterstützung durch Konstruktionsmethoden gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dies machen Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 178) an vier langfristigen Trends fest:

- Konstruierende lernen immer spezielleres Wissen, da eine zunehmende Steigerung an Wissen im naturwissenschaftlich-technischen Bereich stattfindet. Die Quantität an Veröffentlichungen, Patenten und neuen computerbasierten Dateiformaten steigt.
- Durch die Erweiterung des vorhandenen Wissens steigt auch die Vielfalt der Anforderungen in Bezug auf die hergestellten Produkte. So nimmt in diesem Kontext die Zahl der Ziele, Meinungen und Einflüsse zu. In Anbetracht dieser Zunahme der Vielfalt ergibt sich die Notwendigkeit zur Ermittlung des Wesentlichen und zur Beschränkung auf dieses.
- Durch die steigende Vernetzung der Fachdisziplinen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik findet eine natürliche technische Evolution statt, so dass es zur Entstehung komplexerer Systeme kommt. Die Konstruierenden verstehen die Funktionen der Maschinen nicht mehr bis ins Detail.
- Ein weiterer Faktor ist die Anforderung einer immer kürzeren Entwicklungszeit, aus der für die Konstruierenden ein hoher Zeitdruck resultiert. Gleichzeitig ergibt sich die Aufgabe, die Qualität zu verbessern, den Fertigungsaufwand zu reduzieren und die Fertigung zu flexibilisieren.

Die genannten vier Trends tragen dazu bei, dass Konstruktionsmethoden für Konstruierende zunehmend an Bedeutung gewinnen. Sie sollen es erleichtern, Schwierigkeiten und Fehler während der Konstruktion zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass es zu Schwierigkeiten bei der Anwendung von Konstruktionsmethoden kommen kann. Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich gerade mit diesen Schwierigkeiten in der Anwendung der Konstruktionsmethode.

Beispiel zur Berücksichtigung der Fertigung in der Konstruktion

Dies wird im Folgenden an dem spezifischen Bereich des fertigungsgerechten Gestaltens dargestellt. In der Gestaltung werden auf Basis des ausgewählten Lösungskonzepts die geometrischen und stofflichen Merkmale eines Produkts festgelegt und wird so das herstellbare Produkt definiert (Matthiesen, 2021). Die Konstruierenden beeinflussen zum Beispiel durch die Wahl des Fertigungsverfahrens auch die Gestalt des Bauteils. Dies veranschaulicht Abbildung 2.1 mit verschiedenen Varianten der Fertigung eines Produktes. Der

Fertigungsprozess beeinflusst in diesem Beispiel die Gestalt indirekt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 573).



Abbildung 2.1: Änderung der Gestalt bei Variation des Fertigungsverfahrens aus Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 574)

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich mit der Validierung einer neu entwickelten Konstruktionsmethode für die blechgerechte Konstruktion. Der Blechbearbeitungsprozess birgt ein hohes Potenzial für die Konstruktion von 3D-Teilen aus kostengünstigen 2D-Rohlingen. Hieraus ergeben sich die Vorteile einer Gewichtseinsparung, einer Zeitreduktion und einer Reduzierung des Fertigungsaufwandes. Darauf wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen.

2.1.2 Definition der Validierung von Konstruktionsmethoden

Die Definition der Validierung von technischen Produkten und Systemen nach VDI2221 Blatt1:2019-11, S. 10 lautet wie folgt:

„[Die Validierung ist eine] *Prüfung, inwieweit die Testresultate tatsächlich das darstellen, was durch den Test bestimmt werden soll. Anmerkung: Auf technische Systeme übertragen, ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier gehen die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Umgangssprachlich ist Validierung die Beantwortung der Frage: „Wird das richtige Produkt entwickelt?“*

Gemäß der Definition muss bei einer Validierung ein objektiver Nachweis des geforderten Gebrauches oder der Anwendung erbracht werden. Für die Validierung von Konstruktionsmethoden werden weitere Kriterien beschrieben, die den Anwender in die Validierung mit einbeziehen. In Ergänzung dazu beschreiben Kroll und Weisbrod (2020), dass die Validierung von Konstruktionsmethoden kognitive Prozesse und individuelle Vorgehensweisen von Konstruierenden beinhalten muss. Frey und Dym (2006) schlagen vor, dass Konstruktionsmethoden wie Medikamente validiert werden sollten, so dass Daten zur Anwendung der betreffenden Konstruktionsmethode in der Industrie ähnlich wie bei klinischen Studien erhoben und bewertet werden. Olewnik und Lewis (2005) nennen drei Kriterien, die bei der Validierung von Entscheidungsmethoden berücksichtigt werden sollten: 1) die Methode muss logisch sein, 2) die Methode muss aussagekräftige und zuverlässige Informationen bereitstellen und 3) die Datenaufnahme der Validierung darf die Konstruierenden nicht beeinflussen. Diese Kriterien für die Validierung von Entscheidungsmethoden gelten ebenso für die Validierung von Konstruktionsmethoden.

Der vorstehende Absatz zeigt, dass die Definition der Validierung von technischen Produkten und Systemen je nach Einsatzgebiet mit weiteren Anforderungen einhergeht. Zur Validierung von Konstruktionsmethoden ist es notwendig, die Definition der Konstruktionsmethode von Gericke et al. (2017), siehe Kapitel 2.1.1, und die Definition der Validierung von technischen Produkten und Systemen nach VDI2221 Blatt1:2019-11 als Ausgangspunkt zu nehmen und miteinander zu verbinden. Eine solche Verbindung dieser Definitionen zu einer neuen Definition der Validierung von Konstruktionsmethoden wurde von Eisenmann, Grauberger, Üreten, Krause und Matthiesen (2021, S. 625) veröffentlicht und für diese Forschungsarbeit ins Deutsche übersetzt:

„Die Methodenvvalidierung umfasst alle Forschungsaktivitäten, in denen untersucht wird, ob eine Konstruktionsmethode ihren Zweck im Rahmen des für sie vorgesehenen Kontexts erfüllen kann.“

Die Validierung von Konstruktionsmethoden ist Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Die vorliegende Forschungsarbeit folgt dem Vorgehen der Validierung nach Pedersen, Emblemsvåg, Bailey, Allen und Mistree (2000). Danach wird die Validierung im *Validation Square* in Felder eingeteilt, siehe Abbildung 2.2. Dabei wird unterschieden zwischen strukturellen und leistungsbezogenen sowie theoretischen und empirischen Feldern. Die strukturelle Validierung der Konstruktionsmethode kann qualitativ erfolgen. Hierbei wird untersucht, ob die untersuchte Konstruktionsmethode Konstruierende in ihrer Tätigkeit unterstützt. Die leistungsbezogene Validierung der Konstruktionsmethode kann quantitativ erfolgen.

Hierbei wird analysiert, inwieweit bessere Konstruktionsergebnisse erzielt werden können. Sowohl die Validierung der Struktur als auch die Validierung der Leistung bestehen aus theoretischen und empirischen Untersuchungen. Bei der Validierung von Konstruktionsmethoden sind somit mehrere Aktivitäten zu unterscheiden. Bei der empirischen Validierung der Leistung werden der Nutzen der Konstruktionsmethode und die Anwendung der Methode selbst untersucht. Pedersen et al. (2000) beschreiben weder, wie eine solche empirische Studie aussehen sollte, noch, welche Metriken dabei verwendet werden sollten. Die vorliegende Forschungsarbeit konzentriert sich auf die empirische Validierung der Leistung durch eine quantitative Datenanalyse von Laborstudien.

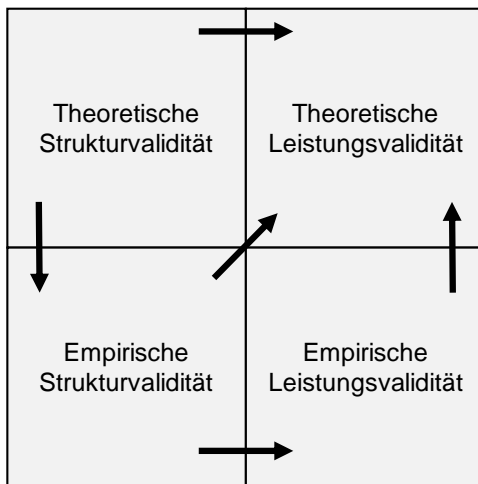


Abbildung 2.2: Vorgehen zur Validierung von Konstruktionsmethoden im *Validation Square* von Pedersen et al. (2000, S. 385)

Die Einbeziehung der Anwendung und des Nutzens in die Validierung von Konstruktionsmethoden erfordern ein objektives Messverfahren. Bei der Validierung einer Konstruktionsmethode können laut Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 187) zwei Arten von Messverfahren zum Einsatz kommen: subjektive und objektive. Die subjektive Messung beinhaltet die Befragung von Konstruierenden. Auf diese Weise soll ermittelt werden, wie die betreffenden Konstruierenden die Anwendung und den Nutzen der untersuchten Konstruktionsmethode erleben. Im Gegensatz dazu wird bei der objektiven Messung anhand von quantitativen Daten der Nutzen der Konstruktionsmethode, beispielsweise durch Konstruktionsergebnisse, gemessen. Als nützlich gilt eine Konstruktionsmethode dann, wenn die Entwicklung der Produkte erfolgreicher ist und in kürzerer Zeit bewältigt werden kann. In der

vorliegenden Forschungsarbeit sollen objektive Messverfahren zur Ermittlung der Anwendbarkeit und des Nutzens einer Konstruktionsmethode verwendet werden.

Die Anwendung einer Konstruktionsmethode setzt ihre Anwendbarkeit voraus. In Anlehnung an Kroll und Weisbrod (2020) lässt sich die Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode in Lehrfreundlichkeit, Verständnis, Korrektheit der Anwendung und Benutzerfreundlichkeit einteilen, siehe Abbildung 2.3. Die Anwendbarkeit kann als „*Methodenüben statt nur Methodenwissen*“ verstanden werden (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 186). Sie ist nach Kroll und Weisbrod (2020) wiederum eine notwendige Voraussetzung für den Nutzen einer Konstruktionsmethode. Der Nutzen beinhaltet die Effektivität und die Leistung.

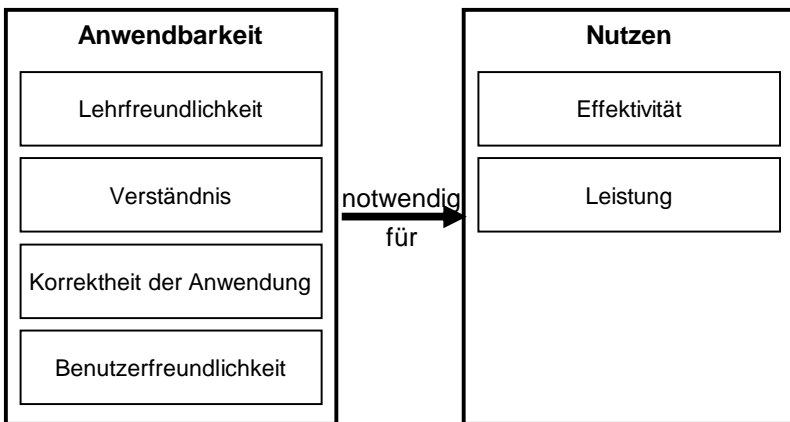


Abbildung 2.3: Die Anwendbarkeit als notwendige Bedingung für den Nutzen bei der Validierung von Konstruktionsmethoden nach Kroll und Weisbrod (2020)

2.1.3 Untersuchungsmethoden in der Konstruktionsforschung

Im Folgenden werden die Grundlagen zu Untersuchungsmethoden im Bereich der Konstruktionsforschung beschrieben. Für die Validierung von Konstruktionsmethoden kann eine Vielzahl an Untersuchungsmethoden eingesetzt werden. Die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethode setzt dabei eine Definition der an die Untersuchung gestellten Anforderungen voraus; konkret sind in diesem Zusammenhang zu nennen: das Ziel, die Forschungsfrage, eine deskriptive Studie im Feld oder ein Experiment im Labor, die Studiendauer und die Bereitschaft der Teilnehmer (Ahmed, 2007). Die Auswahl einer bestimmten

Untersuchungsmethode ist Teil eines ganzheitlichen Forschungsvorgehens (Blessing & Chakrabarti, 2009; Eisenmann et al., 2021; Pedersen et al., 2000). Das systematische Forschungsvorgehen im Bereich der Konstruktionsforschung wird in der *DRM* beschrieben und beinhaltet insbesondere die Validierung in der zweiten deskriptiven Untersuchung (Blessing & Chakrabarti, 2009), siehe Kapitel 2.2.2. In der Konstruktionsforschung werden Untersuchungsmethoden aus den Sozialwissenschaften verwendet und an die Untersuchung angepasst (Ahmed, 2007). Nach Hussy, Schreier und Echterhoff (2013, S. 27) können Untersuchungsmethoden in qualitative und quantitative Datenerhebungs- und Datenanalysemethoden eingeteilt werden, siehe Abbildung 2.4. Die Wahl der Untersuchungsmethode hat Einfluss auf das Studiendesign.

| Untersuchungsmethode | | |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| | Qualitativ | Quantitativ |
| Datenerhebungsmethode | Befragung | Beobachten durch Eye Tracking |
| | Teilnehmendes Beobachten | Zählen Protokolle & Dokumente |
| | ... | ... |
| Datenanalysemethode | Diskursanalyse | Beschreibende Methoden |
| | Inhaltsanalyse | Signifikanztests |
| | ... | ... |

Abbildung 2.4: Einteilung der Untersuchungsmethoden in qualitative und quantitative Datenerhebungs- und Datenanalysemethoden nach Hussy et al. (2013, S. 27)

In der Konstruktionsforschung werden sowohl qualitative als auch quantitative Untersuchungsmethoden benötigt. Qualitative Untersuchungsmethoden ermöglichen die Untersuchung von Ursachen und die Bildung von Hypothesen oder Theorien. Quantitative Untersuchungsmethoden dagegen ermöglichen die empirische Prüfung von Hypothesen und erlauben es, die Ausprägungsstärke quantitativ zu beschreiben. Die gemäß dem aktuellen Stand der Forschung bislang eingesetzten qualitativen Untersuchungsmethoden sind nicht in der Lage, operationalisierte Metriken für den Erkenntnisgewinn zu liefern.

Untersuchungsmethoden für Konstruktionsmethoden

Ahmed (2007) stellt eine Übersicht über etablierte Untersuchungsmethoden in der Konstruktionsforschung zusammen. Diese können auch für die Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden:

- **Gesprächsanalyse**
Bei der Gesprächsanalyse liegt der Fokus auf einem Dialog der Teilnehmenden. Der Dialog kann in Abschnitte mit einer Folge von Sätzen eingeteilt werden. Ein Dialog kann mündlich oder schriftlich stattfinden, der transkribierte Text wird ausgewertet.
- **Teilnehmende Beobachtung**
Die Forschenden nehmen selbst als Teilnehmende an der Studie teil. Meist handelt es sich hierbei um Beobachtungen von Gruppen, in denen die Forschenden selbst eine Rolle einnehmen.
- **Protokollanalyse**
Verbalisierte Informationen werden während der Beobachtung direkt protokolliert. Bei der Aufgabebearbeitung sollten die Gedanken laut ausgesprochen werden.
- **Dokumentenanalyse**
Dieses Verfahren dient der Analyse von Sachverhalten aus vorliegenden Dokumenten.
- **Befragungen**
Bei einer Befragung geht es darum, Wissen und Meinungen zu einem Thema zu erheben. Sie kann schriftlich oder mündlich erfolgen.
- **Beobachtung**
Das Verhalten der Konstruierenden wird in spezifischen Situationen beobachtet. Die Forschenden planen die Situation entsprechend dem Zweck der Beobachtung und wählen die Datenerhebung aus.

In der vorliegenden Forschungsarbeit werden die folgenden drei Untersuchungsmethoden kombiniert verwendet: *Dokumentenanalyse*, *Befragung*

und *Beobachtung*. Die drei Untersuchungsmethoden werden im Folgenden detailliert vorgestellt:

Dokumentenanalyse beschreibt ein Verfahren zur Analyse von Sachverhalten aus vorliegenden Dokumenten. Die hierfür herangezogenen Dokumente können dabei in Archiven vorliegen, aus aktuellen realen Konstruktionsprojekten stammen oder das Ergebnis von Laborstudien darstellen. Beispiele für relevante Dokumente sind Konzeptzeichnungen, Konstruktionszeichnungen, Testberichte, Berechnungen und Bewertungen (Ahmed, 2007). Der Vorteil der Dokumentenanalyse besteht darin, dass die Forschenden während der Erstellung der Dokumente nicht anwesend sein müssen. Es ist sinnvoll, die Dokumentenanalyse mit anderen Untersuchungsmethoden zu kombinieren (Lowe, McMahon & Culley, 2004).

Befragungen werden mit dem Ziel durchgeführt, Wissen und Meinungen zu einem bestimmten Thema zu erheben. Eine Befragung kann schriftlich oder mündlich erfolgen. Die Daten werden zumeist retrospektiv aufgenommen und beinhalten eine voreingenommene Sichtweise (Ahmed, 2007). Ein Nachteil der Befragung besteht darin, dass der Versuchsleiter Einfluss auf die Gesprächsatmosphäre haben kann, was die Aussagekraft der Ergebnisse reduziert. Durch den Einsatz von Fragebögen kann dieser ungewünschte Effekt verringert werden. Die Antworten sind abhängig davon, wie gut der Befragte seine Verhaltensweisen reflektieren und artikulieren kann. Es wird zwischen offenen und geschlossenen Fragen unterschieden. Bei offenen Fragen gestaltet sich die Analyse der Daten aufwändig, da die Antworten in diesem Fall transkribiert werden müssen, bevor eine weitere qualitative oder quantitative Datenanalyse durchgeführt werden kann. Bei geschlossenen Fragen gibt der Befragte das Maß seiner Zustimmung zu einer Aussage auf einer Likert-Skala an.

Beobachtungen erfassen das Verhalten in spezifischen Situationen. Die Forschenden planen die beobachtete Situation gemäß dem Zweck der Beobachtung und gestalten die Datenerhebung in entsprechender Weise. Eine Beobachtung kann im Feld, im Entwicklungssimulator oder auch in einer Laborumgebung vorgenommen werden. Die Beobachtung im Feld, im Sinne einer realen Umgebung, hat dabei den Vorteil, dass natürliche Verhaltensweisen erfasst werden können. Nach Duehr, Grimminger, Rapp, Albers und Bursac (2022) ist die Validierung von Konstruktionsmethoden im Feld aus heutiger Sicht noch nicht ausreichend methodisch unterstützt. Die Beobachtung in einem Entwicklungssimulator, im Sinne einer Forschungsumgebung hat den Vorteil, dass die Teilnehmenden nicht die Rolle eines Studienteilnehmenden, sondern die eines Entwickelnden einnehmen (Bursac et al., 2023). Entwicklungsprozesse können so in einem Entwicklungssimulator möglichst realitätsnah und bei höherer Kontrolle

und Gestaltung der Randbedingungen untersucht werden als im Feld (Albers, Walter, Wilmsen & Bursac, 2018). In einem Labor, also einer künstlich geschaffenen Umgebung, können dagegen die Bedingungen besser kontrolliert werden, allerdings lassen sich die hier beobachteten Verhaltensweisen nicht ohne Weiteres auf das Feld übertragen. Daher ist es anzustreben, dass die Laborumgebung mit einer realen Umgebung und einer realen Konstruktionsaufgabe vergleichbar ist. Beobachtungen werden in Echtzeit durchgeführt und vermeiden eine Voreingenommenheit der Konstruierenden, wie sie sich bei Befragungen und Gesprächen ergibt (Ahmed, 2007). In Beobachtungsstudien werden klassische Datenerhebungsmethoden wie Video- und Audioaufnahmen genutzt, die zumeist zwischen 60 und 120 Minuten in Anspruch nehmen. Solche Aufnahmen liefern jedoch kein vollständiges Bild eines Konstruktionsprozesses; vielmehr können hierbei lediglich Ausschnitte aus dem Vorgehen während der Konstruktion erhoben werden. Die Datenerhebung und Datenanalyse gestalten sich zeitaufwändig, da die Transkription und die Klassifizierung der Daten deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen als die Aufnahme selbst.

Die Datenerhebungsmethode *Eye-Tracking* ist Bestandteil der Untersuchungsmethode *Beobachtungen*. *Eye-Tracking* wird in der Forschungsarbeit intensiv genutzt und deshalb detaillierter beschrieben. Bei *Eye-Tracking* handelt es sich um die Aufzeichnung und Nachverfolgung von Blickbewegungen. Im vorliegenden Zusammenhang sind Letztere deshalb von Interesse, weil bei Konstruktionsmethoden die meisten Informationen von den Konstruierenden visuell aufgenommen werden. Dabei wird die visuelle Informationsaufnahme mit den Bewegungen der Augen in Verbindung gebracht. In diesem Zusammenhang können verschiedene Ereignisse unterschieden werden. Die Fixierung eines Objektes, auch Stimulus genannt, bei der das Auge nahezu stillsteht, wird als Fixation bezeichnet. Eine Fixation dauert zwischen 200 und 300 ms und gilt als die Zeitdauer, in der Informationen aufgenommen werden. Dahingegen wird die schnelle Bewegung des Auges, die zwischen 30 und 80 ms dauert, als Sakkade bezeichnet (Holmqvist et al., 2011, S. 515). Eine Sakkade liegt zwischen zwei Fixationen.

Die in der Konstruktionsforschung übliche Hardware wird in Remote-Systeme und mobile *Eye-Tracking*-Brillen eingeteilt. Remote-Systeme sind stationäre, an einem Monitor angebrachte *Eye-Tracking*-Systeme. Je nach Untersuchung können stationäre Remote-Systeme, die meist unter einem Monitor montiert werden, dazu beitragen, die Beeinflussung der Konstruierenden zu verringern. Remote-Systeme sind nützlich, um Blickverläufe auf dem Monitor aufzuzeichnen. *Eye-Tracking*-Brillen werden von den Probanden wie herkömmliche Brillen getragen. Sie sind mit verschiedenen Kameras ausgestattet. Infrarotkameras erfassen die Bewegung des

Auges und eine Szenenkamera nimmt die Umgebung aus der Sicht der Konstruierenden auf. Nach der Kalibrierung der Eye-Tracking-Brille, kann der Blick in Echtzeit auf dem Video der Szenenkamera dargestellt werden.

Bei der Analyse von Blickbewegungen werden qualitative und quantitative Verfahren unterschieden. Bei einer qualitativen Analyse wird das Video der Blickbewegung betrachtet. Eine quantitative Analyse kann mit einer Vielzahl von Metriken erfolgen (Holmqvist et al., 2011, S. 212). Eine übliche Vorgehensweise ist etwa die, dass wichtige Bereiche, sogenannte Areas of Interest (AOIs), identifiziert werden, um dann die Blickbewegung im Hinblick auf diese Bereiche zu analysieren. Eine AOI beschreibt einen bestimmten Bereich auf dem Stimulus. Gegenstand der Analyse können sein: die Dauer der Fixationen auf einen solchen Bereich auf dem Stimulus, der Zeitpunkt, zu dem der Bereich zum ersten Mal betrachtet wurde, oder die Reihenfolge der Blickbewegung. Für die Zuordnung der Augenparameter zu AOIs kann sowohl von manuellen als auch von automatisierten Verfahren Gebrauch gemacht werden (Holmqvist et al., 2011, S. 249).

Kombination verschiedener Datenerhebungsmethoden

In der Konstruktionsforschung sollte eine Kombination verschiedener Datenerhebungsmethoden zum Einsatz kommen. Um Daten von unterschiedlicher Detailtiefe, Qualität und Zuverlässigkeit zu sammeln, wird ein unterschiedlicher Aufwand betrieben, je nach verwendeter Datenerhebungsmethode und unter Berücksichtigung des begrenzten Zeitraums, in dem die Konstruierenden für die Studie zur Verfügung stehen (Lowe et al., 2004). Lohmeyer und Meboldt (2016) empfehlen die Kombination von Datenerhebungsmethoden, um so die Möglichkeit zu erhalten, zusätzliche quantitative biometrische Messungen vorzunehmen. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit soll als biometrisches Messverfahren nur das Eye-Tracking verwendet werden. Lohmeyer und Meboldt (2016) heben hervor, dass klassisch erhobene Daten durch eine Kombination mit biometrischen Messungen größere Bedeutung gewinnen und hinsichtlich vorher nicht bekannter Vorgehensweisen ausgewertet werden können.

Die Protokollanalyse hat die Untersuchungen seit den Anfängen der Konstruktionsmethodik dominiert. In den letzten Jahren wurde eine kleine, aber wachsende Zahl von Studien mit biometrischen Messungen in der Konstruktionsforschung durchgeführt, bei denen Elektroenzephalografie (EEG), funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI) und Eye-Tracking eingesetzt wurden (Gero & Milovanovic, 2020).

Die Validierung von Konstruktionsmethoden benötigt eine Untersuchungsmethode, die mehrere Datenerhebungsmethoden beinhaltet und diese miteinander verknüpft.

Bisher werden im Stand der Forschung hauptsächlich Untersuchungsmethoden beschrieben, die auf dem Einsatz einzelner Datenerhebungsmethoden basieren. Auf dieses Fehlen verknüpfter Datenerhebungsmethoden in der Konstruktionsforschung weisen vor allem Hay, Cash und McKilligan (2020) hin. Durch eine Verknüpfung verschiedener Datenerhebungsmethoden wird dabei die Möglichkeit eröffnet, die Anwendbarkeit und den Nutzen von Konstruktionsmethoden zu berücksichtigen. Diese können mit nur einer Datenerhebungsmethode allein nicht erhoben und analysiert werden.

2.2 Validierung von Konstruktionsmethoden

Im folgenden Kapitel wird die Validierung von Konstruktionsmethoden erläutert. Hierfür wird in Kapitel 2.2.1 auf die Einteilung in ergebnisbasierte und prozessbasierte Validierung eingegangen. Daraufhin werden in Kapitel 2.2.2 die Untersuchungsmethoden im Umfeld der Validierung von Konstruktionsmethoden beschrieben und von der ergebnisbasierten und der prozessbasierten Validierung abgegrenzt werden. Ebenso werden in diesem Zusammenhang die Anforderungen an die Datenerhebung und die Datenanalyse von Denkprozessen diskutiert. Das Kapitel 2.2 schließt mit einem Zwischenfazit in Kapitel 2.2.3 ab.

2.2.1 Ergebnisbasierte und prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden

In Veröffentlichungen zu Untersuchungsmethoden in der Konstruktionsforschung und der Untersuchung von gestalterischem Denken wird eine Einteilung in ergebnisbasierte (Shah et al., 2003) und prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden vorgenommen (Ahmed, 2007; Gero & Milovanovic, 2020).

Ergebnisbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden

Die ergebnisbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden hat das Ziel, den Nutzen dieser Methoden nachzuweisen. Als Maßstab für den Nutzen einer Konstruktionsmethode gelten die Ergebnisse, die von Konstruierenden unter Anwendung dieser Methode erzielt werden (Frey & Dym, 2006). Konkret kann bei einer ergebnisbasierten Validierung zum Beispiel ein Vergleich der Konstruktionsergebnisse mit und ohne Konstruktionsmethoden vorgenommen werden, was eine quantitative Bewertung ermöglicht (Pedersen et al., 2000). In der Forschungspraxis wird vor allem von der ergebnisbasierten Validierung Gebrauch gemacht, bei der die Bewertung der Konstruktionsmethoden anhand der Konstruktionsergebnisse erfolgt. Ein Beispiel für die ergebnisbasierte Validierung ist

die Studie von Corremans (2011). In dieser Untersuchung wurde der Nutzen einer Konstruktionsmethode gemessen, indem die Ergebnisse einer ersten Konstruktionssitzung mit den Ergebnissen einer zweiten Konstruktionssitzung verglichen wurden. Die Studienteilnehmenden waren hierbei jeweils Studierende. Die Ergebnisse zeigen, dass einige Studierende die in der Studie vorgegebene Konstruktionsmethode in unzureichender Weise anwendeten. Zu den Vorgehensweisen und den Schwierigkeiten in der Anwendung der Konstruktionsmethode wurden dagegen keine Daten erhoben.

Prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden

In der prozessbasierten Validierung wird die Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode und ihr Nutzen untersucht. Als Maßstab für die prozessbasierte Validierung gelten die Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode und deren Auswirkungen auf den Nutzen (Ahmed, 2007; Gero & Milovanovic, 2020). Bei der Untersuchung der Anwendbarkeit wird festgestellt, ob Inhalte gelesen, verstanden und korrekt angewendet werden. Corremans (2011) formuliert die Forderung in diesem Zusammenhang, dass Daten zur Methodenanwendung objektiv erhoben und analysiert werden sollten. Zur Validierung von Konstruktionsmethoden anhand ihrer Anwendbarkeit liegen bereits mehrere Studien vor (Corremans, 2011; Kroll & Weisbrod, 2020; Prabhu, Miller, Simpson & Meisel, 2020b; Reimlinger, Lohmeyer, Moryson & Meboldt, 2019; Shah et al., 2003). Am Beispiel von Studien der Ideenfindung heben Shah et al. (2003) jedoch hervor, dass es schwierig ist, kognitive Prozesse anhand von Protokollstudien zu beobachten. Vor allem die Datenerhebung und die Datenanalyse von prozessbasierten Studien ist erschwert, da bestehende Untersuchungsmethoden die Anwendbarkeit noch nicht ausreichend berücksichtigen. Die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden sollen differenziert im Hinblick darauf analysiert werden, inwiefern Inhalte nicht verstanden oder Methodenschritte nicht angewendet werden. Die Vielfalt der Untersuchungsmethoden und die verwendeten Metriken werden in Kapitel 2.2.2 vorgestellt.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird für die prozessbasierte Validierung von einem Ansatz Gebrauch gemacht, der maßgeblich auf der *zweiten deskriptiven Studie* der *DRM* basiert. Mit der *DRM* verfolgen Blessing und Chakrabarti (2009) das Ziel, eine systematische und allgemeingültige Struktur für Forschungsarbeiten speziell aus dem Bereich der anwendungsorientierten Methodenforschung in der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen. Dabei wird das Forschungsvorgehen in vier Phasen eingeteilt: 1) Einordnung des Forschungsthemas in den Stand der Forschung, 2) Aufbau des Forschungsgegenstandes durch empirische Analysen in

der *ersten deskriptiven Studie*, 3) Entwicklung der Methode im Rahmen der *präskriptiven Studie* und 4) Validierung der entwickelten Methode in der *zweiten deskriptiven Studie*. Darin wird die Anwendbarkeit der Methode, *application evaluation*, in Verbindung mit dem Nutzen der Methode, *success evaluation*, erfasst und bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand der Analyse empirischer Daten und resultiert in der Ableitung von Verbesserungsbedarf. Während die *DRM* ein Vorgehen zur Entwicklung von Metriken mit Beispielen erläutert, sollen in dieser Forschungsarbeit Metriken zur Anwendbarkeit und zum Nutzen von Konstruktionsmethoden entwickelt, definiert und im Hinblick auf ihre Aussagekraft hinsichtlich des Nutzens einer Konstruktionsmethode evaluiert werden. Die Untersuchungsmethoden für die prozessbasierte Validierung werden in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

2.2.2 Untersuchungsmethoden zur Analyse der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden

Im folgenden Kapitel wird auf die Validierung von Konstruktionsmethoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und die hierfür verfügbaren Untersuchungsmethoden eingegangen.

Für eine Verbesserung der Validierung von Konstruktionsmethoden empfehlen die Ansätze des *Validation Square* und der *DRM* die Entwicklung von Metriken zur Konstruktionsforschung. Kroll und Weisbrod (2020) bewerten die Anwendbarkeit der Ideen-Konfigurations-Bewertung (ICE) in einer Fallstudie in Bezug auf Lehrfreundlichkeit, Verständlichkeit, Benutzerfreundlichkeit und Korrektheit der Anwendung. Die Daten wurden anhand von Konstruktionsberichten der Konstruierenden, reflektierenden Fragebögen und verbaler Selbsteinschätzung erhoben. Die Dokumente wurden von den Konstruierenden während der empirischen Studie erstellt.

Weiterhin wird in der Konstruktionsforschung darauf hingewiesen, dass zusätzlich zur Bewertung der Konstruktionsergebnisse auch das Verständnis und die Anwendung berücksichtigt werden sollten. So haben Reimlinger et al. (2019) in ihrer Studie zusätzlich die Aufmerksamkeit untersucht. Aus dem Blickverhalten der Teilnehmenden wurden Rückschlüsse auf die Tiefe gezogen, mit der sie die Konstruktionsmethoden gelesen hatten. Weiterhin findet sich in der Studie eine Einteilung der Studienteilnehmenden in Novizen und Experten. Die Verwendung der Konstruktionsmethoden wurde mit Hilfe von Eye-Tracking untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Novizen mehr von der Verwendung von Konstruktionsmethoden profitieren als Experten. Dabei erzielten diejenigen Novizen, die angaben, einen größeren Nutzen aus der Bereitstellung von

Konstruktionsmethoden zu ziehen, eine bessere Leistung. Die Datenerhebungsmethode des Eye-Trackings sollte anders als in der beschriebenen Studie allerdings um eine Untersuchung des Verständnisses und der korrekten Anwendung der Methode ergänzt werden. Erst durch eine solche Ergänzung lassen sich Ursachen von Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit eingrenzen und Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der untersuchten Konstruktionsmethode ableiten.

Damit eine Konstruktionsmethode korrekt angewendet werden kann, müssen die Methodeninhalte gelesen, dann verstanden und zuletzt angewendet werden. Der Grundgedanke dieser Forschungsarbeit basiert auf der Idee der *Target Search Analysis* von Bojko (2013, S. 241) und deren Erweiterung durch Mussnug, Sadowska, Moryson und Meboldt (2018). Bojko (2013) hat eine Untersuchungsmethode zur qualitativen Interpretation von Eye-Tracking-Daten erarbeitet. Diese Untersuchungsmethode kann für Aufgaben genutzt werden, in denen Teilnehmende nach einem bestimmten Ziel suchen, wie beispielsweise ein Produkt im Regal oder eine Schaltfläche auf einer Webseite. Die *Target Based Analysis* von Mussnug et al. (2018) dient hingegen dem Zweck, mit Eye-Tracking-Daten die Gebrauchstauglichkeit von Produkten zu bewerten. Die Untersuchungsmethode soll ein Vorgehen zur Interpretation von Videodaten bereitstellen.

Bei der prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden sollten bereits genutzte Untersuchungsmethoden aus der Usability-Forschung zur Erfassung und Analyse der Aufmerksamkeit zum Einsatz kommen. Bojko (2013, S. 241) hat hierfür die Untersuchungsmethode der *Target Search Analysis* in vier Stufen entwickelt. Mussnug et al. (2018) haben diese Untersuchungsmethode zum Modell der *Target Based Analysis* für Usability-Studien von Produkten erweitert. Mussnug et al. (2018) definieren die Interaktion mit Produkten in vier Phasen:

- Wahrnehmungserfolg oder Auffindbarkeit
- Erfolg des Verständnisses oder Erkennbarkeit
- Erklären von Fehlern oder Handhabung
- Erkennen von Problemen oder Vorbereiten/Abwarten

Die Interaktion mit Produkten gliedert sich in eine Reihe von Schritten, bei denen mit verschiedenen Bedienelementen interagiert werden muss. Bei der Interaktion mit jedem dieser Bedienelemente lassen sich die oben genannten Phasen unterscheiden. Zuerst muss das nächste Bedienelement visuell gefunden werden. Die Phase endet mit der ersten Fixation des Anwenders auf dem Bedienelement. In der zweiten Phase muss der Anwender das zu bedienende Element als solches

erkennen. Nach Mussnug et al. (2018) endet diese Phase, wenn der Anwender sich für die Interaktion mit dem Bedienelement entscheidet, beispielsweise danach greift. Die dritte Phase umfasst die Interaktion des Anwenders mit dem Bedienelement und endet mit dem Abschluss der Interaktion. Die letzte Phase umfasst die Dauer, in der das jeweilige Produkt die getätigte Eingabe verarbeitet. Sie endet, sobald der Anwender mit der Suche nach dem nächsten Bedienelement beginnt.

Die Unterteilung der Interaktion ermöglicht eine strukturierte Analyse der Interaktion und gibt Richtungen für die Produktoptimierung vor. Fehler in der Phase *Auffinden* deuten auf eine schlechte Sichtbarkeit der betreffenden Elemente hin. Zur Verbesserung können Bedienelemente beispielsweise farblich hervorgehoben oder im direkteren Sichtfeld platziert werden. Langes Verweilen in der Phase *Verstehen* deutet darauf hin, dass das zugehörige Bedienelement nicht verständlich ist, so dass es sich empfiehlt, die Funktionalität durch klare Hinweise oder intuitivere Bedienkonzepte zu verbessern. Fehler in der *Handhabung* deuten auf Optimierungspotenzial bei der eigentlichen Handhabung hin. Hier können beispielsweise Einführschrägen oder große Bedienelemente die Interaktion vereinfachen. Eine lange Dauer beim *Vorbereiten/Abwarten* kann durch eine Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit des jeweiligen Produkts optimiert werden.

Usability-Studien von Produkten beinhalten eine strikte Abfolge der Interaktionen. Dieses Vorgehen erleichtert die Datenanalyse, da hierdurch Probleme in klar definierten Interaktionen festgestellt werden können. Für die Untersuchung eines Produkts hinsichtlich seiner Usability-Freundlichkeit sollte von einer vorgegebenen Reihenfolge der Interaktionen Gebrauch gemacht werden, so dass Abweichungen einzelner Anwender leicht erkannt und die Daten vieler Anwender miteinander verglichen werden können.

In der Forschung zu Konstruktionsmethoden kommt eine solche vorgegebene Reihenfolge dagegen nicht zum Einsatz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anwendung von Konstruktionsmethoden auf einem iterativen Vorgehen beruht, so dass hier – anders als bei den in Usability-Studien untersuchten Produkten – nicht von einer exakt vorgegebenen Reihenfolge einzelner Arbeitsschritte Gebrauch gemacht werden kann. Dementsprechend ist der Vergleich der Vorgehensweise der Teilnehmenden in Validierungsstudien mit größeren Schwierigkeiten verbunden als in Studien zur Usability von Produkten. In letzteren kann grundsätzlich ein Mustervorgehen definiert werden – beispielsweise gibt es nur eine sinnvolle Abfolge zum Austausch einer Druckerpatrone. Zwar lassen sich auch bei der Validierung von Konstruktionsmethoden eine Musterlösung und ein Mustervorgehen definieren,

allerdings können auch andere Vorgehensweisen zum Erfolg führen. Daher können Untersuchungsmethoden aus dem Bereich der Usability nur teilweise für die Validierung von Konstruktionsmethoden angewendet werden (Doellken, Zapata, Nelius & Matthiesen, 2021). Somit müssen diese Untersuchungsmethoden auf die Validierung von Konstruktionsmethoden an die spezifischen Anforderungen angepasst und entsprechend erweitert werden, so dass sich mit ihnen Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden erfassen und bewerten lassen.

Die vorgestellten Phasen von Mussgnug et al. (2018) sollten auf die prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden angewendet werden, da auch diese auf einer Interaktion beruhen. Die Begriffe sollten für die Validierung von Konstruktionsmethoden vereinheitlicht und an die Begriffe von Kroll und Weisbrod (2020) angepasst werden. Dabei sind die Metriken von Kroll und Weisbrod (2020) auf die Validierung von Konstruktionsmethoden zu übertragen und hinsichtlich der quantitativen Daten und der Aufmerksamkeit zu verbessern. Das Verständnis der Methodeninhalte und die korrekte Anwendung der Methodenschritte werden bereits in früheren Ansätzen zur prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden berücksichtigt (Jänsch & Birkhofer, 2004; Kroll & Weisbrod, 2020). Die Aufmerksamkeit auf Inhalte gibt Hinweise darauf, welche Methodeninhalte nicht gelesen wurden. Hierdurch sollte die Möglichkeit eröffnet werden, die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen oder Misserfolg zu identifizieren. Durch das Eingrenzen der Ursachen von Schwierigkeiten können Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der untersuchten Konstruktionsmethode abgeleitet werden. In Tabelle 2.1 wird dargestellt, welche Aspekte der Anwendbarkeit in den relevanten Veröffentlichungen zur prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden berücksichtigt werden.

Tabelle 2.1: Vergleich der Berücksichtigung der Anwendbarkeit in relevanten Veröffentlichungen zur Validierung von Konstruktionsmethoden

| | Validation Square: Pedersen et al. (2000) | DRM: Blessing und Chakrabarti (2009) | ICE: Kroll und Weisbrod (2020) | Profitieren von Konstruktionsmethoden: Reimlinger et al. (2019) | Design method validation: Eisenmann et al. (2021) |
|-----------------------------|--|---|---|---|--|
| | berücksichtigt | berücksichtigt | berücksichtigt | berücksichtigt | berücksichtigt |
| Leistung | methodisch unterstützt | methodisch unterstützt | Metrik: Anzahl an Ideen | Metrik: Nutzen- Aufwand- Verhältnis | methodisch unterstützt |
| Aufmerksam- keit | nicht berücksichtigt | nicht berücksichtigt | nicht berücksichtigt | berücksichtigt Metrik: Verweildauer auf AOs | nicht berücksichtigt |
| Verständnis | nicht berücksichtigt | berücksichtigt methodisch unterstützt | berücksichtigt Metrik: Anzahl verstandener Methodeninh alte | nicht berücksichtigt | berücksichtigt methodisch unterstützt |
| Anwendung | nicht berücksichtigt | berücksichtigt methodisch unterstützt | berücksichtigt Metrik: Maß korrekt angewende- ter Methoden- schritte | nicht berücksichtigt | berücksichtigt methodisch unterstützt |

Für die Validierung von Konstruktionsmethoden werden Daten zur Anwendbarkeit und zum Konstruktionsergebnis erhoben. Um statistisch signifikante und zuverlässige Forschungsergebnisse zu erzielen, ist hierfür ein ressourcenintensiver Datenerhebungs- und -analyseprozess vonnöten. Die Durchführung von Studien mit großen Stichproben ist mit hohem Aufwand verbunden, wie in der Literaturübersicht von Dinar et al. (2015) beschrieben wird. Beispiele für die Datenerhebung zur prozessbasierten Validierung sind: Protokolle, Dokumentationen, Videoaufzeichnungen der direkten Beobachtung oder Aufzeichnungen aus der Dritten-Person-Perspektive, optional ergänzt durch die Datenerhebungsmethode des lauten Denkens, Interviews und Fragebögen. Die aufgezeichneten Daten werden anschließend eingehend analysiert. Dazu werden die aufgezeichneten Videos abgespielt und relevante Phänomene systematisch in einem Bewertungsbogen notiert. Die Auswertung der Bewertungsbögen setzt eine entsprechende Interpretation durch die Forschenden voraus. Die Objektivität der Datenanalyse ist ein häufiges Problem in der Konstruktionsforschung, da es an standardisierten Datenanalysemethoden mangelt, wie dies in Meta-Analysen, Literaturübersichten und Fallstudien beschrieben wird (Eisenmann et al., 2021; Pedersen et al., 2000; Shah et al., 2003).

2.2.3 Zwischenfazit

Die Validierung von Konstruktionsmethoden lässt sich in zwei Arten einteilen: Bei der ergebnisbasierten Validierung wird nur das Ergebnis einer Konstruktionsmethode bewertet, wohingegen bei der prozessbasierten Validierung zusätzlich auch die Anwendbarkeit der betreffenden Methode bewertet wird. Grundsätzlich besteht das Ziel bei der Validierung einer Konstruktionsmethode darin, deren Nutzen nachzuweisen. Der Nutzen besteht dabei in der Erreichung eines bestimmten Methodenziels. Um die Validierung von Konstruktionsmethoden zu verbessern, haben Forschende prozessbasierte Erweiterungen zur ergebnisbasierten Validierung entwickelt. Nach dem Stand der Forschung muss die Untersuchung der Anwendbarkeit berücksichtigt werden, zum Beispiel das Verständnis der Methodeninhalte und die Anwendung der Methodenschritte. Die Aufmerksamkeit als weiterer Aspekt wird dabei noch nicht untersucht. In der Usability-Forschung eingesetzte Datenerhebungsmethoden zur Aufmerksamkeit können im Rahmen der Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden. Mit dieser Form der Datenerhebung, insbesondere durch Eye-Tracking, kann die Untersuchung der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden ergänzt werden, wobei sich eine Unterteilung in Aufmerksamkeit, Verständnis, Anwendung und Leistung empfiehlt. In dieser Forschungsarbeit beinhaltet die prozessbasierte Validierung der untersuchten Konstruktionsmethode eine Untersuchung der Anwendbarkeit sowie der Auswirkungen der Anwendbarkeit auf den Nutzen. Eine

Darstellung findet sich in Abbildung 2.5. Die Abbildung veranschaulicht die durch diese Forschungsarbeit gegenüber dem Stand der Forschung geleistete Weiterentwicklung. Während Daten zur Lehr- und Benutzerfreundlichkeit nicht erhoben werden, erfolgt eine quantitative und objektive Datenerhebung zur Anwendbarkeit, insbesondere zur Aufmerksamkeit. Dabei soll untersucht werden:

- Aufmerksamkeit: welche Methodeninhalte nicht gelesen werden.
- Verständnis: welche Methodeninhalte nicht verstanden werden.
- Anwendung: welche Methodenschritte nicht korrekt angewendet werden.
- Leistung: ob das Konstruktionsergebnis die gewünschte Leistung darstellt.

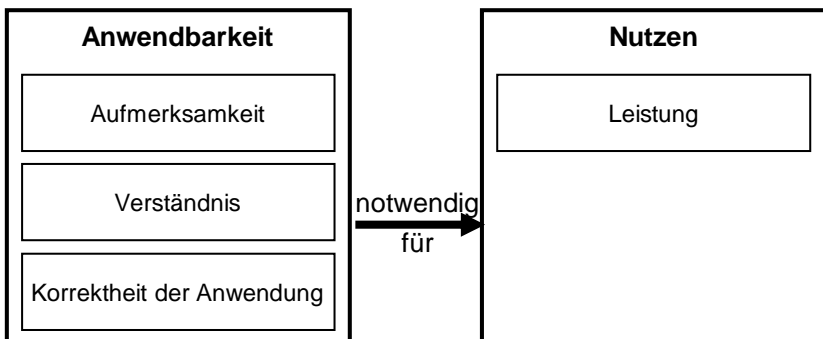


Abbildung 2.5: Ergänzung der Untersuchung der Anwendbarkeit bei der prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden um die Aufmerksamkeit

Bislang fehlt es im Bereich der prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden an Untersuchungsmethoden, die zusätzlich zur Bewertung der Ergebnisse quantitative Daten zur Anwendbarkeit erheben, um so eine differenzierte Analyse der Schwierigkeiten der untersuchten Konstruktionsmethoden vornehmen zu können. Ausgehend von der Annahme, dass die Datenanalyse von Beobachtungen mit einem hohen Aufwand verbunden ist (Dinar et al., 2015), werden bislang Datenerhebungsmethoden für Dokumente mit textbasierten und grafikbasierten Beschreibungen von Konstruktionsmethoden verwendet. Dagegen fehlen Untersuchungsmethoden für die quantitative und objektive Analyse von Konstruktionsmethoden. Zudem bieten die vorhandenen Untersuchungsmethoden nicht die Möglichkeit, Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der betreffenden Konstruktionsmethode zu untersuchen (Doellken et al., Wiedereinreichung im Jahr 2023 am 14. Juli; Eisenmann et al., 2021).

2.3 Bedeutung von Konstruktionsmethoden für die fertigungsgerechte Konstruktion

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode für die fertigungsgerechte Konstruktion validiert, siehe Kapitel 5 und 7. Daher werden im Folgenden die zur Verfügung stehenden Konstruktionsmethoden beschrieben.

2.3.1 Berücksichtigung der Fertigung bereits in der Phase der Konstruktion

Um eine fertigungsgerechte Konstruktion zu gewährleisten und die vorhandenen CAD-Konstruktionen zu optimieren, entwickeln Forschende ständig neue Konstruktionsmethoden, Werkzeuge und Techniken im DfM¹. Die Konstruktionsmethoden der fertigungsgerechten Konstruktion zielen darauf ab, Schwierigkeiten während der Fertigung sowie den Fertigungsaufwand eines Produktes zu reduzieren (Boothroyd, 1994). Duale Konstruktionsmethoden, die eine Kombination aus restriktiven und opportunistischen Methoden darstellen, wurden im Zusammenhang mit konzeptionellen Konstruktionsmethoden für DfM und spezifisch für die additive Fertigung in DfAM² entwickelt (Laverne, Segonds, Anwer & Le Coq, 2015; Prabhu, Miller, Simpson & Meisel, 2020a).

Restriktive Methoden befassen sich mit den Einschränkungen durch Fertigungsprozesse und dienen zur Verbesserung der Qualität und der Herstellbarkeit einer Konstruktion (Laverne et al., 2015). Der Zweck restriktiver Methoden besteht im Anpassen bestehender Konzepte an einen Fertigungsprozess.

Opportunistische Methoden konzentrieren sich auf die Möglichkeiten von Fertigungsprozessen. Sie führen zu einer Verringerung des Fertigungsaufwandes durch die Entwicklung fertigungsgerechter Konzepte (Laverne et al., 2015).

Duale Methoden setzen sich aus restriktiven und opportunistischen Methoden zusammen, um so die Vorteile beider Ansätze miteinander zu kombinieren. Es gibt eine Vielzahl von Beispielen für die Entwicklung von Strategien (Yang, Page & Zhao, 2019), Arbeitsblättern (Booth et al., 2017), maßgeschneidertem Wissen (Laverne, Segonds, D'Antonio & Le Coq, 2017), Heuristiken (Bloesch-Paidosh

¹ DfM ist die Abkürzung von „Design for Manufacturing“

² DfAM ist die Abkürzung von „Design for Additive Manufacturing“

& Shea, 2019) und Vorlesungen für Studierende (Prabhu, Miller, Simpson & Meisel, 2020c).

Beispiele restriktiver Methoden

Die Beispiele der restriktiven Konstruktionsmethoden unterscheiden sich je nach Fertigungsverfahren. Die Nichtbeachtung von Restriktionen kann einen erhöhten Fertigungsaufwand nach sich ziehen oder auch zur Folge haben, dass die betreffende Konstruktion nicht hergestellt werden kann. Zur Berücksichtigung von Restriktionen werden von Forschenden restriktive DfM-Methoden entwickelt. Diese Methoden tragen dazu bei, die Herstellbarkeit von Konstruktionskonzepten zu gewährleisten. Dabei konzentrieren sie sich auf die Einschränkungen des jeweiligen Fertigungsprozesses und geben beispielsweise Hinweise auf die Angabe von Maßen für die maximale Kastenhöhe und die minimale Schenkellänge.

Viele Methoden wurden zu diesem restriktiven Zweck entwickelt und verbessert (Chiu & Okudan, 2010). Das Spektrum reicht von Checklisten bis hin zu Katalogen (Roth, 2000), Konstruktionsrichtlinien (Feldhusen & Grote, 2013; Lindemann, 2016; Reimlinger et al., 2019), Tabellenkalkulationsmodellen (La Trobe-Bateman & Wild, 2003), gemischter produkt-/prozessbasierter DfM-Methodik (H. W. van Vliet & van Luttervelt, 2004), Ansätzen der künstlichen Intelligenz für Konstruktionsmuster (Krahe et al., 2021) und Konstruktionsmethoden zur Entscheidungsunterstützung (Xiao, Seepersad, Allen, Rosen & Mistree, 2007). Die Konstruktionsmethoden zielen darauf ab, das Bewusstsein auf die Grenzen der Fertigung zu lenken, die Konstruktionszeit für ein Bauteil zu verkürzen, die Herstellbarkeit zu bewerten und die erforderlichen Informationen der verwendeten Werkzeuge zu beachten (J. W. van Vliet, van Luttervelt & Kals, 1999). Zusammengefasst unterstützen die derzeit vorhandenen DfM-Methoden Konstrukteure darin, bereits vorhandene Details der Gestalt restriktiv an die Fertigung anzupassen.

Notwendiges Kriterium Herstellbarkeit in restriktiven Methoden

Die Herstellbarkeit umfasst 1) die Auswahl von Material, Geometrie und Fertigungsverfahren, 2) die Bewertung der Herstellbarkeit in Abhängigkeit der Stückzahl und 3) die Verbesserung von Konstruktionen, um die Fertigung zu vereinfachen (Ramana & Rao, 2005; H. W. van Vliet & van Luttervelt, 2004). La Trobe-Bateman und Wild (2003) definieren die Herstellbarkeit als „diejenigen Elemente der Produkt- und Prozessgestaltung, die die Fähigkeit einer Fabrik beeinflussen können, die Anforderungen des Unternehmens zu erfüllen“ (S. 109).

Die bestehenden DfM-Methoden geben in erster Linie spezifische fertigungsgerechte Hinweise zur Verbesserung eines Konzepts. Expertenwissen

wird in Regeln formuliert, die für bestimmte Anwendungen bestimmt sind. Die Art des Wissens- und Strategietransfers wird meist in Form von Tabellen und guten versus schlechten Beispielen dargestellt, wie in Abbildung 2.6 aus Feldhusen und Grote (2013, S. 636) gezeigt.

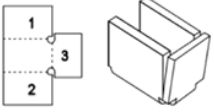
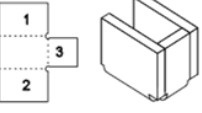
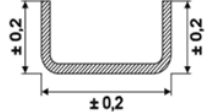
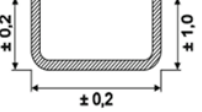
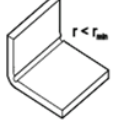
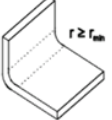
| Verfahren | Gestaltungsregeln | Nicht blechgerecht | blechgerecht |
|-----------|---|---|---|
| Biegen | Beachten der Rückfederung beim Biegen |  |  |
| Biegen | Ein Biegeschenkel muss die Toleranz aufnehmen |  |  |
| Biegen | Beachten von Mindestwerten für Biegeradien |  |  |

Abbildung 2.6: Gestaltungsregeln für die blechgerechte Konstruktion aus Feldhusen und Grote (2013, S. 636)

Dementsprechend werden Restriktionen in den DfM-Methoden erläutert, die für die fertigungsgerechte Konstruktion in fortgeschrittenen Konzeptphasen entwickelt wurden. Das Optimierungspotenzial für die Gestalt der Konstruktion ist deutlich höher, wenn die fertigungsgerechten Konstruktionshinweise zu einem frühen Zeitpunkt im Konstruktionsprozess einbezogen werden, um so den Fertigungsaufwand zwischen verschiedenen Konzepten abzuwägen (Nowack, 1997). Die meisten DfM-Methoden sind auf den Einsatz in einer späteren Konstruktionsphase ausgelegt (Chiu & Okudan, 2010). Besonders beim Einsatz in einer frühen Phase können Konstruktionsmethoden jedoch dazu beitragen, den Fertigungsaufwand zu reduzieren. Anschließend wird das Konzept nur noch an die Fertigung angepasst.

Konstruktionsziel Fertigungsaufwand reduzieren in opportunistischen Methoden

Der Fertigungsaufwand ist die am häufigsten verwendete Metrik zur Bewertung der Kosten eines Konzepts (Rehman & Guenov, 1998; Selvaraj, Radhakrishnan &

Adithan, 2009; Takai & Banga, 2014). Die bestehenden Methoden und Modelle zur Abschätzung des Fertigungsaufwandes definieren und klassifizieren Kostentreiber, die es ermöglichen, den notwendigen Fertigungsaufwand in jeder Phase des Konstruktionsprozesses zu bewerten. Wenn der Fertigungsaufwand als Kriterium für die Auswahl von Konzepten in der frühen Phase des Entwurfs verwendet wird, ist es empfehlenswert, die Kostentreiber sorgfältig auszuwählen, um eine genaue Schätzung des Fertigungsaufwandes zu erhalten (Takai & Banga, 2014). Durch die Kenntnis der Kostentreiber können Konstruierende ihre Konzepte im Hinblick auf die Kosten analysieren. Allerdings werden sie hierdurch nicht notwendigerweise in die Lage versetzt, kostengünstigere Konzepte zu entwickeln (Doellken, Zimmerer & Matthiesen, 2020). Gute Konstruktionsmethoden ermöglichen neben der Anpassung, der Verwerfung, der Neuerstellung auch nach Albers, Reiß, Bursac, Urbanec und Ludcke (2014) die Entwicklung von Konzepten und Produkten in mehreren Generationen. Zur Gewährleistung der Herstellbarkeit und der Reduktion der Fertigungskosten sollten neue Konzepte nach dem Anteil der Teilsysteme analysiert werden, die neu entwickelt wurden, und nach den Teilsystemen, die übernommen wurden (Albers, Bursac, Urbanec & Lüdcke, 2014). Eine neue Produktgeneration basiert immer auf mindestens einem bestehenden Produkt.

Die meisten DfM-Methoden dienen zur Anpassung bestehender Konzepte an das Fertigungsverfahren. Dagegen fehlen Konstruktionsmethoden, die die Entwicklung neuer Konzepte ermöglichen und gleichzeitig die Funktionserfüllung und den Fertigungsaufwand berücksichtigen (Nowack, 1997). Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass das Potenzial zur Reduktion von Fertigungskosten in der Konstruktion nicht voll ausgeschöpft wird.

Duale Konstruktionsmethoden der fertigungsgerechten Konstruktion

Die Berücksichtigung der blechgerechten Fertigung bereits in der Konstruktion geht laut 15 interviewten Konstrukteurinnen und Konstrukteuren noch immer mit großen Herausforderungen einher (Doellken, Zimmerer & Matthiesen, 2020). Das Problem besteht darin, dass die meisten Konstruktionsmethoden für die fertigungsgerechte Konstruktion lediglich die Restriktionen von Fertigungsprozessen mit Konstruktionshinweisen zur Ermöglichung der Herstellbarkeit berücksichtigen. Es fehlen jedoch Konstruktionsmethoden und erfolgreiche Vorgehensweisen, die von Konstruierenden angewandt werden können, um das Potenzial der Fertigungsprozesse zu nutzen (Doellken, Zimmerer & Matthiesen, 2020).

Die Anwendung opportunistischer Methoden ist vielversprechend, weil darin empfohlen wird, den Lösungsraum auszunutzen, um das technische Problem zu lösen. Opportunistische Methoden sollen den Fertigungsaufwand reduzieren,

wohingegen restriktive Methoden benötigt werden, um die Herstellbarkeit zu berücksichtigen, wie in Abbildung 2.7 exemplarisch dargestellt. Die bedeutendsten Studien, die den Einfluss der restriktiven und der dualen Konstruktionsmethoden auf das Konstruktionsergebnis vergleichen, wurden mit Studierenden im Grundstudium untersucht (Prabhu et al., 2020b, 2020c). In einer dieser Studien wurde untersucht, wie sich drei verschiedene Schulungen unterschiedlich auf die Konstruktionsergebnisse auswirken. Die Wirkung der Schulungen in Bezug auf die Nutzung wurde anhand von Veränderungen in 1) der Selbstwirksamkeit der Studienteilnehmenden und 2) der technischen Qualität ihrer Konzeptergebnisse gemessen. Die Daten wurden mit Hilfe von Fragebögen und Dokumentationen der Konzepte erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass zwar alle drei Schulungen zu ähnlichen Veränderungen in der opportunistischen Selbstwirksamkeit der Studienteilnehmenden geführt haben. Diejenigen Studienteilnehmenden, die nur die restriktive Schulung erhielten, zeigten dabei jedoch den größten Anstieg ihrer restriktiven Selbstwirksamkeit. Alle drei Gruppen wiesen eine ähnliche Abnahme der technischen Qualität ihrer Konzeptergebnisse nach dem Besuch der Schulungen auf. Eine mögliche Erklärung für die Abnahme der technischen Qualität lieferte die Analyse der Konzeptergebnisse: Vereinfachung der Geometrie. In der genannten Studie konnten keine Rückschlüsse auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Schulungsinhalte gezogen werden, da das Verständnis nicht abgefragt wurde. Die Erkenntnisse bezogen sich somit lediglich auf die Konstruktionsergebnisse, aber nicht auf die Schwierigkeiten der Studierenden. Eine weitere Untersuchung im DfAM-Bereich zeigte, dass die Konstruktionsergebnisse der Studierenden bei einer dualen Methode einen tendenziell geringeren Fertigungsaufwand aufweisen als bei einer restriktiven Methode. Dieser Unterschied konnte jedoch nicht statistisch signifikant nachgewiesen werden (Prabhu et al., 2020b).

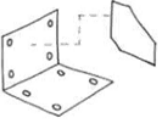

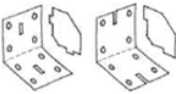

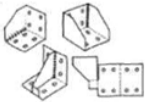

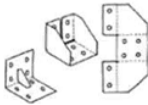

| Winkel | Fertigungs- verfahren | Gestaltungsregel | Wirtsch. Optimierung |
|---|---|--|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> - Sägen - Bohren - Entgraten - Verspannen - Schweißen - Richten - Verputzen | Restriktive Regel: - Konstruktion mittels vorhandener Halbzeuge |  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - Laserschneiden - Biegen - Schweißen - Richten - Verputzen | Restriktive Regel: - Fügehilfen vorsehen und so Vorrichtungs- aufwand reduzieren |  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - Laserschneiden /Stanzen - Biegen - Schweißen - Richten - Verputzen | Opportunis- tischer Hinweis: - Teileanzahl reduzieren |  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - Laserschneiden /Stanzen - Biegen | Opportunis- tischer Hinweis: - Schweißen ersetzen |  |

Abbildung 2.7: Ausschöpfung des Potenzials des Fertigungsverfahrens durch Berücksichtigung der Fertigung während der Konstruktion aus Feldhusen und Grote (2013, S. 645) – je größer das blaue Kreissegment, desto besser ist die wirtschaftliche Optimierung

In dieser Forschungsarbeit wird die Konzeptentwicklung untersucht, worin die opportunistischen Methoden ihren Mehrwert zeigen können. Das ist ebenfalls bei einem großen Anteil der Veröffentlichungen zum Konstruktionsprozess zu sehen, bei dem weiterhin der Fokus auf die konzeptionelle und kreative Konstruktion gelegt wird (Hay et al., 2020).

2.3.2 Zwischenfazit

Die Berücksichtigung der Anforderungen der Fertigung bereits während der Konstruktion bleibt für Konstruierende weiterhin eine Herausforderung. Deshalb wurden viele Methoden entwickelt, die Konstruierende bei der Bewertung der

Herstellbarkeit unterstützen sollen. Die Herstellbarkeit einer Konstruktion kann durch erfahrene Konstrukteurinnen und Konstrukteure, Simulationsprogramme sowie mit Hilfe von Konstruktionsmethoden bewertet werden. Zusätzlich zur Gewährleistung der Herstellbarkeit ist ein Reduzieren des Fertigungsaufwandes notwendig. Der Fertigungsaufwand ist ein häufiger Grund für das Verwerfen und Neuerstellen von Konzepten oder wiederum für das Anpassen einer Konstruktion an den Fertigungsprozess.

Duale Konstruktionsmethoden bestehen aus einer Kombination von restriktiven und opportunistischen Methoden und versprechen einen Mehrwert für die Berücksichtigung der Fertigung bereits in der Konstruktion. Aus gestalterischer Sicht konzentrieren sich restriktive Methoden vor allem auf die Optimierung bereits vorhandener Details und weniger auf konzeptionelle Tätigkeiten. Ein Hauptnutzen von DfM besteht darin, fertigungsgerechte Konzepte zu entwickeln, um den Fertigungsaufwand zu verringern.

Es besteht Untersuchungsbedarf, inwieweit Konstruktionsmethoden prozessbasiert validiert werden können. Der Nachweis des Nutzens dualer Konstruktionsmethoden kann dann verwendet werden, um den Transfer der dualen Methoden auf andere Fertigungsverfahren zu gewährleisten.

2.4 Fazit zum Stand der Forschung

Aus der Betrachtung des Stands der Forschung wird deutlich, dass die bestehenden Untersuchungsmethoden die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden nicht ausreichend berücksichtigen.

Die Validierung von Konstruktionsmethoden sollte daher zusätzlich zur Untersuchung des Nutzens auch eine Untersuchung der Anwendbarkeit beinhalten. Mit Hilfe von Untersuchungsmethoden lassen sich Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode identifizieren. Solche Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden können verschiedene Ursachen haben und sich auf die Aufmerksamkeit, das Verständnis und die Anwendung beziehen.

In der prozessbasierten Validierung kann eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden eingesetzt werden. Es fehlen jedoch Untersuchungsmethoden, die operationalisierte Metriken zu Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode und den Auswirkungen dieser Schwierigkeiten auf ihren Nutzen erheben und bewerten.

Bisherige ergebnisbasierte Validierungen von Konstruktionsmethoden beschränken sich auf eine Bewertung der Ergebnisse der untersuchten Konstruktionsmethode. In aktuellen prozessbasierten Validierungsstudien werden das Verständnis und die korrekte Anwendung untersucht, jedoch fehlt eine Untersuchung der Aufmerksamkeit. Es besteht jedoch ein Bedarf, die Aufmerksamkeit in prozessbasierte Validierungsstudien einzubeziehen, um zu erkennen, wie intensiv die Texte und Grafiken der Konstruktionsmethoden gelesen werden.

Durch das Eingrenzen möglicher Ursachen der festgestellten Schwierigkeiten lassen sich zielgerichtet Möglichkeiten zur Verbesserung der betreffenden Konstruktionsmethode ableiten. Es fehlen Untersuchungsmethoden, die 1) quantitativ und objektiv die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden untersuchen, 2) Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden identifizieren und 3) die Auswirkungen dieser der Schwierigkeiten auf den Nutzen identifizieren.

Den Ausgangspunkt der vorliegenden Forschungsarbeit bildet eine Konstruktionsmethode für den Bereich der blechgerechten Konstruktion. Konstruktionsmethoden für konzeptionelle Tätigkeiten wurden in jüngster Zeit für DfAM unter dem Begriff duale Konstruktionsmethoden entwickelt. Es fehlt jedoch an dualen Methoden für die blechgerechte Konstruktion, die das Potenzial zur Reduzierung des Fertigungsaufwandes vermitteln. Diese sollten zum einen restriktive und zum anderen opportunistische Konstruktionsmethoden beinhalten. Restriktive Konstruktionsmethoden bedeuten aus gestalterischer Sicht die Anpassung bereits vorhandener Details an die Fertigung. Opportunistische Methoden hingegen konzentrieren sich auf die Möglichkeiten von Fertigungsprozessen und führen zu einer Verringerung des Fertigungsaufwandes.

3 Motivation und Zielsetzung

Die Validierung von Konstruktionsmethoden muss eine Untersuchung des Nutzens und eine Untersuchung der Anwendbarkeit umfassen. Aus der Untersuchung des Nutzens kann gefolgert werden, ob die Konstruktionsmethode die Konstruierenden unterstützt. Durch die Untersuchung der Anwendbarkeit können dagegen Schwierigkeiten bei der Methodenanwendung erfasst werden, wodurch die Grundlage für eine zielgerichtete Weiterentwicklung der betreffenden Konstruktionsmethode geschaffen wird.

An dieser Stelle ergibt sich das Problem, dass vorhandene Untersuchungsmethoden der Methodenvvalidierung keine Untersuchung der Anwendbarkeit vorsehen. Daher liegen keine operationalisierten Metriken zu Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden vor und es ist keine zielgerichtete Weiterentwicklung möglich.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Evaluation einer Untersuchungsmethode, die zusätzlich zum Nutzen auch Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode erfasst. Dies soll es ermöglichen, die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen oder Misserfolg zu identifizieren. Durch das Eingrenzen der Ursachen von Schwierigkeiten können Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der betreffenden Konstruktionsmethode abgeleitet werden.

Dementsprechend gilt es herauszuarbeiten, welche Anforderungen eine Untersuchungsmethode in diesem Zusammenhang erfüllen muss. Zu diesem Zweck wurde eine Fallstudie durchgeführt, in der die ergebnisbasierte Validierung einer Konstruktionsmethode anhand einer dem Stand der Forschung entsprechenden Untersuchungsmethode vorgenommen wurde, siehe Kapitel 5. Im Rahmen dieser Validierung sollen die Stärken und Schwächen der verwendeten Untersuchungsmethode diskutiert und die Anforderungen an eine Untersuchungsmethode für die prozessbasierte Validierung abgeleitet werden.

Da die meisten Konstruktionsmethoden über Text und Abbildungen dokumentiert und vermittelt werden, soll die Untersuchungsmethode für diese Art von Dokumenten geeignet sein. Um die Ursachen möglicher Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit eingrenzen zu können, soll die Untersuchungsmethode die Aufmerksamkeit, das Verständnis, die Anwendung und den Nutzen von Konstruktionsmethoden einzeln erfassen.

4 Forschungsfragen und Forschungsvorgehen

Um das Ziel dieser Forschungsarbeit zu erreichen, soll eine Untersuchungsmethode entwickelt und evaluiert werden. Die zu entwickelnde Methode trägt den Titel *Attention Comprehension Application Performance Analysis*, kurz: ACAP-Untersuchungsmethode.

Hierzu werden folgende Forschungsfragen aufgestellt:

- Forschungsfrage 1: Wie kann die Validierung von Konstruktionsmethoden durch eine Untersuchungsmethode unterstützt werden?
- Forschungsfrage 2: Welche Erkenntnisse können mit der ACAP-Untersuchungsmethode in einer Laborstudie zur Validierung einer Konstruktionsmethode gewonnen werden?

Zu Forschungsfrage 1:

Die neu zu entwickelnde Untersuchungsmethode soll in der *zweiten deskriptiven Studie aus der Forschungsmethodik* der DRM eingesetzt werden und bestehende Untersuchungsmethoden einbeziehen. Sie soll wie folgt strukturiert sein:

- Ziel und Zweck der Untersuchung
- Prozess der Datenerhebung und Datenanalyse
- text- und grafikbasierte Beschreibung der Konstruktionsmethoden

Es werden quantitative und objektive Metriken definiert:

- Aufmerksamkeit auf die Methodeninhalte
- Verständnis der Methodeninhalte
- Anwendung der Methodenschritte
- Ergebnis und Nutzen der Methodenanwendung

Diese Struktur und die Definition der Metriken ist für die Aussagekraft der Untersuchungsmethode von grundlegender Bedeutung. Hierdurch soll die bestehende Validierung von Konstruktionsmethoden durch die Einbeziehung der Anwendbarkeit verbessert werden.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird eine Beschreibung der ACAP-Untersuchungsmethode einschließlich ihrer Struktur und Metriken vorgelegt. Es wird also eine Untersuchungsmethode zur prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden entwickelt, anhand deren die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode wie auch die Auswirkungen dieser Schwierigkeiten auf den Nutzen erfasst und bewertet werden können.

Zu Forschungsfrage 2:

Eine Konstruktionsmethode aus dem Bereich der Blechkonstruktion wird im Rahmen einer Laborstudie untersucht. Als Untersuchungsmethode kommt dabei die ACAP-Untersuchungsmethode zum Einsatz. Auf diese Weise sollen Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit und des Nutzens der Konstruktionsmethode gewonnen werden. Bei der Untersuchung der Anwendbarkeit sollen insbesondere die Schwierigkeiten und deren Auswirkungen auf den Nutzen der Methode herausgestellt werden. Durch das Eingrenzen der Ursachen der identifizierten Schwierigkeiten lassen sich Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ableiten.

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage werden die Ergebnisse dieser Untersuchung hinsichtlich der gewonnenen und fehlenden Erkenntnisse zur Konstruktionsmethode diskutiert. Diese Diskussion ermöglicht wiederum eine Evaluation der ACAP-Untersuchungsmethode, wobei die Stärken und Schwächen sowie das Potenzial für die Weiterentwicklung dieser Untersuchungsmethode aufgezeigt werden sollen.

Das wissenschaftliche Vorgehen zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen wird zusammenfassend in Abbildung 4.1 dargestellt. Auf der Abbildung werden jeder Forschungsfrage jeweils das Forschungsvorgehen sowie die Forschungsergebnisse zugeordnet.

Klärung der Forschung

| | |
|---|---|
| <p>Stand der Forschung in Kapitel 2</p> | <p>Das Problem ist, dass bisherige Untersuchungsmethoden im Rahmen der Validierung von Konstruktionsmethoden die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit nicht untersuchen.</p> |
| <p>Zielsetzung in Kapitel 3</p> | <p>Entwicklung und Evaluation einer Untersuchungsmethode, die neben dem Nutzen auch die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden erfasst und die Ursachen von Schwierigkeiten für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode eingrenzt.</p> |
| <p>Fallstudie in Kapitel 5</p> | <p>Ergebnisbasierte Validierung einer Konstruktionsmethode, um Stärken und Schwächen der verwendeten Untersuchungsmethode zu diskutieren und die Anforderungen an eine Untersuchungsmethode für die prozessbasierte Validierung abzuleiten.</p> |

| <i>Fragen</i> | <i>Forschungsvorgehen</i> | <i>Forschungsergebnisse</i> |
|---|--|--|
| <p>FF1: Unter- suchungs- methode in Kapitel 6</p> | <p>Entwicklung einer Untersuchungsmethode für die prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden</p> | <p>Entwickelte ACAP-Untersuchungsmethode</p> |
| <p>FF2: Evaluation von ACAP in Kapitel 7</p> | <p>Einsetzen der ACAP-Untersuchungsmethode in Laborstudie, um Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit und deren Auswirkung auf den Nutzen zu identifizieren</p> | <p>Evaluation der Metriken der ACAP-Untersuchungsmethode</p> |

Abbildung 4.1: Forschungsvorgehen

Als Grundlage für die Beantwortung von Forschungsfrage 1 wird zunächst der Bedarf für eine Erweiterung der ergebnisbasierten Untersuchungsmethoden erhoben. Zur Ermittlung der Schwächen der ergebnisbasierten Untersuchungsmethoden wird eine Konstruktionsmethode nach dem bisherigen ergebnisbasierten Vorgehen gemäß dem aktuellen Stand der Forschung validiert. In Kapitel 5 wird in diesem Sinne die ergebnisbasierte Validierung einer Konstruktionsmethode beschrieben, um dann die Stärken und Schwächen der im

Rahmen der Validierung verwendeten Untersuchungsmethoden zu diskutieren. Daraus werden Anforderungen für die ACAP-Untersuchungsmethode abgeleitet. Den Ausgangspunkt dieser Forschungsarbeit bildet eine Konstruktionsmethode unter Berücksichtigung der fertigungsgerechten Konstruktion in der Blechbearbeitung. Hierbei wird der Nutzen der Konstruktionsmethode untersucht.

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage setzt eine Beschreibung der bestehenden Untersuchungsmethoden voraus. Dementsprechend wurden die Metriken dieser Untersuchungsmethoden in Kapitel 2.2.2 erklärt und miteinander verglichen. Auf die Erläuterung der verschiedenen Möglichkeiten zur Datenerhebung und -analyse folgt eine Darstellung der neu entwickelten Untersuchungsmethode einschließlich ihrer Strukturierung sowie der eingesetzten Metriken. Dabei werden unterschiedliche Metriken zur Validierung kombiniert. Die ACAP-Untersuchungsmethode zur prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden stellt die Beantwortung und das Ergebnis der ersten Forschungsfrage dar.

Die zweite Forschungsfrage umfasst die Evaluierung der ACAP-Untersuchungsmethode in einer Laborstudie, siehe Kapitel 7. Den Gegenstand dieser Laborstudie bildet eine Konstruktionsmethode zur blechgerechten Konstruktion, siehe Kapitel 5. Die Aufgabe für die Konstruierenden besteht dabei in der Optimierung einer Konstruktion für die Fertigung aus Blech. Die Untersuchung bezieht sich dann auf die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode durch die Konstruierenden. Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage werden zum einen die durch die ACAP-Untersuchungsmethode gewonnenen Erkenntnisse zu den Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit und deren Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode diskutiert; zum anderen wird hierfür eine Diskussion der ACAP-Untersuchungsmethode vorgenommen, im Zuge deren diese evaluiert wird. So können aus der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage die künftigen Forschungsbedarfe zur Weiterentwicklung der ACAP-Untersuchungsmethode abgeleitet werden.

5 Fallstudie zur ergebnisbasierten Validierung

Das Ziel der Fallstudie war es, eine ergebnisbasierte Validierung mit Hilfe der am häufigsten verwendeten Untersuchungsmethode, der Dokumentenanalyse, durchzuführen, um die Schwächen einer solchen Validierung zu erkennen und mögliche Anforderungen an eine prozessbasierte Validierung abzuleiten. Dazu wird in Kapitel 5.1 eine Konstruktionsmethode zur blechgerechten Konstruktion beschrieben, um dann in Kapitel 5.2 die Validierung dieser Methode im Rahmen der Fallstudie zu zeigen.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Identifying Opportunistic Methods in Design for Manufacturing: An Experimental Study on Successful Approaches on the Manufacturability and Manufacturing Effort of Design Outcome“ (Doellken, Arndt, Nelius & Matthiesen, 2021). Bei Teilen der Kapitel 5.1 und 5.2 des folgenden Textes handelt es sich um unveränderte Auszüge aus der genannten Veröffentlichung. Neben der Übersetzung ins Deutsche wurden lediglich die Nummerierungen und Begrifflichkeiten an den Kontext der vorliegenden Arbeit angepasst.

5.1 Beschreibung einer dualen Konstruktionsmethode für die blechgerechte Konstruktion

Eine bisher ungelöste Herausforderung in der blechgerechten Konstruktion ist es, das Potenzial zur Reduzierung des Fertigungsaufwandes zu nutzen (Doellken, Zimmerer & Matthiesen, 2020). Die meisten Konstruktionsmethoden für die fertigungsgerechte Konstruktion vermitteln lediglich die Restriktionen von Fertigungsprozessen zur Ermöglichung der Herstellbarkeit, siehe Kapitel 2.3.1. Es fehlt jedoch an opportunistischen Methoden, die es Konstruierenden ermöglichen könnten, das Potenzial zur Reduzierung des Fertigungsaufwandes zu nutzen. In dieser Forschungsarbeit wird erstmalig ein Ansatz zur Zusammenführung restriktiver und opportunistischer Methoden für die blechgerechte Konstruktion zu einer dualen Konstruktionsmethode gezeigt. Um die Eignung der Untersuchungsmethode zur Identifikation von Weiterentwicklungspotenzial zu überprüfen, ist eine neue und bislang unerprobte Konstruktionsmethode mit voraussichtlich größerem Potenzial erforderlich. Im Folgenden werden die

Methodeninhalte der dualen Konstruktionsmethode im Einzelnen beschrieben. Dafür wurden opportunistische Methodeninhalte mit Hilfe erfolgreicher Vorgehensweisen von Konstrukteurinnen und Konstrukteuren entwickelt. Die duale Konstruktionsmethode steht online zur Verfügung (Doellken, Arndt, Buehlmeier & Matthiesen, 2020). Tabelle 5.1 zeigt die restriktiven und opportunistischen Methodeninhalte für die blechgerechte Konstruktion. Hierbei geht es um den Biegeprozess mit vorherigem Laserschneiden. Die restriktiven Methodeninhalte wurden im Rahmen einer Co-betreuten Masterarbeit von Kuppinger (2021) aus dem Stand der Forschung herausgearbeitet. Die fünf relevantesten Restriktionen wurden von Experten aus dem Bereich der Blechkonstruktion bestätigt. Die opportunistischen Methodeninhalte wurden im Rahmen von zwei Co-betreuten Bachelorarbeiten von Arndt (2019) und Buehlmeier (2019) aus erfolgreichen Vorgehensweisen von Konstrukteurinnen und Konstrukteuren herausgearbeitet.

Tabelle 5.1: Blechgerechte Methodeninhalte aus der Literatur (R: restriktiv, O: opportunistisch)

| | Blechgerechte Methodeninhalte | Literatur |
|-----------|---|---|
| R1 | Toleranzkette abhängig von der Reihenfolge der Biegungen | (Hagenah, 2003; Vin, Streppel & Kals, 1996) |
| R2 | Kollisionen bei der Fertigung – Überbiegung der Teile | (Hoffmann, Geißler & Geiger, 1992; Jiménez, 2012; Leu, 1997; Radin, Shpitalni & Hartman, 1997) |
| R3 | minimal und maximal zulässige Abmessungen | (Feldhusen & Grote, 2013; Klocke, 2017; Meyer, 1986; Siegert, 2015) |
| R4 | Materialanisotropie aufgrund des Walzprozesses | (Banabic, 2000) |
| R5 | Bruchverhalten bei Biegungen | (Siegert, 2015) |
| O1 | Bauteile bei geringem Fertigungsaufwand – einteilige Komponenten | (Qattawi, 2016) |
| O2 | Funktionsintegration unter Nutzung des verfügbaren Konstruktionsbauraums | (Grauberger et al., 2020; Mesa, Maury, Arrieta, Corredor & Bris, 2018) |
| O3 | Ersetzen und Vermeiden kostspieliger Verbindungen durch gebogene Konstruktionen | (Crampton, Magleby & Howell, 2017; Doellken, Arndt, Nelius & Matthiesen, 2021; Klocke, 2017; Y. Zhang et al., 2017) |
| O4 | kosteneffiziente Leichtbauweise | (Klein, 2013) |

Restriktive Methoden

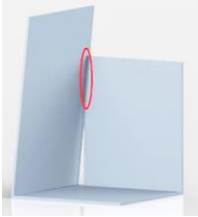
Restriktive Methoden sind für Konstruierende unerlässlich, da sie die Herstellbarkeit berücksichtigen (Laverne et al., 2015).

Der Methodeninhalt R1 zur Toleranzkette ist eine zentrale Einschränkung, die sich aus dem Fertigungsprozess ergibt. Es muss beachtet werden, dass Toleranzen mit jeder nachfolgenden Biegung weitergegeben werden und sich so aufsummieren (Hagenah, 2003; Vin et al., 1996).

Methodeninhalt R2 beinhaltet die Restriktion zur Verhinderung von Kollisionen beim Biegen. Hierbei ist zu beachten, dass das Bauteil mit sich selbst oder der Biegemaschine kollidiert, wenn beispielsweise eine Überbiegung nicht berücksichtigt wird (Hoffmann et al., 1992; Jiménez, 2012; Leu, 1997; Radin et al., 1997). Die Beschreibung des restriktiven Methodeninhaltes wurde auch mit Hilfe von Videos umgesetzt, in denen die Biegesimulation von kollidierenden Blechbauteilen zu sehen ist. Hierbei wurde auf mögliche Kollisionen aufmerksam gemacht. Die zugehörige Darstellung findet sich auf Seite 16 der online zur Verfügung stehenden Konstruktionsmethode (Doellken, Arndt et al., 2020).

Kollisionsanalyse

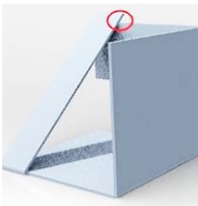
Kollision innerhalb des Bauteils



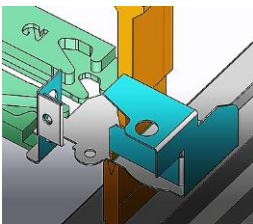
Vorsicht, wenn sich 2 Biegekanten kreuzen → Schenkel dürfen nicht miteinander verbunden sein



Wenn die Winkelsumme der Biegewinkel entlang einer Biegeachse mehr als 180° ist, oder mehr als 3 Biegungen vorhanden sind, besteht Gefahr für Kollision



Vorsicht auch bei mehr als 2 Biegeachsen. Es besteht die Möglichkeit, dass die Schenkel sich in den Weg kommen



Anzahl Biegungen und Biegewinkel entlang einer Achse wurden nicht berücksichtigt → Biegereihenfolge nicht richtig

Abbildung 5.1: Restriktiver Methodeninhalt *Kollisionsanalyse* zur blechgerechten Konstruktion aus (Doellken, Arndt et al., 2020)

Methodeninhalt R3 beinhaltet geometrische Restriktionen zur minimalen Schenkellänge, zur Auflage des Werkstücks auf der Matrize und zur maximalen Schachtelhöhe, bei deren Überschreitung eine Kollision mit dem Werkzeug erfolgt (Meyer, 1986; Siegert, 2015). Mit zunehmender Materialstärke vergrößert sich der minimale Biegeradius (Klocke, 2017; Siegert, 2015), Bohrungen werden weiter von Biegungen entfernt oder freigeschnitten (Feldhusen & Grote, 2013), Falze werden unmöglich und Merkmale wie Gewindedurchzüge können nicht gefertigt werden.

Methodeninhalt R4 beinhaltet Restriktionen hinsichtlich der Materialeigenschaften. Dabei ist die durch das Walzen entstehende Anisotropie zu berücksichtigen, bei der das plastische Verhalten des Rohlings mit der Richtung variiert (R4) (Banabic, 2000). Methodeninhalt R5 beinhaltet Restriktionen zu Biegungen, die verhindern sollen, dass eine große plastische Verformung an den Biegungen zu einem Bruch führt (Siegert, 2015). Eine Schwäche restriktiver Methoden besteht darin, dass sie ausschließlich auf die Vermeidung von Fehlern ausgerichtet sind. Aus ihnen entstehen keine weiteren Konzepte, so dass durch den Einsatz dieser Methoden Potenziale in der Konstruktion verloren gehen (Robertson & Radcliffe, 2009).

Opportunistische Methoden

Opportunistische Methoden heben die Möglichkeiten hervor und unterstützen die Konstruierenden dabei, den verfügbaren Konstruktionsbauraum weiter auszuschöpfen und dabei Gewicht, Zeit und Fertigungsaufwand zu sparen; ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 5.2 (Doellken, Arndt et al., 2021).

Methodeninhalt O1 beinhaltet die Möglichkeit, im Blechbearbeitungsprozess aus kostengünstigen 2D-Rohlingen 3D-Bauteile zu konstruieren. Insgesamt wird derzeit das Potenzial in der Konstruktion aufgrund der kognitiv anspruchsvollen Berücksichtigung der Fertigung nicht ausgeschöpft (Doellken, Zimmerer & Matthiesen, 2020; Feldhusen & Grote, 2013). So zeigen zum Beispiel kognitiv anspruchsvolle Origami-Konstruktionen das Potenzial einteiliger Bauteile (Qattawi, 2016).

Methodeninhalt O2 beinhaltet die Möglichkeit einer Integration von Funktionen in Bezug auf mehrere Bauteile (Mesa et al., 2018). Er basiert dabei auf dem Contact-and-Channel-Ansatz, einer Methode zur Bildung von Modellen, die das Denken in der Konstruktion unterstützt (Grauberger et al., 2020). So können die Ursachen für Systemverhalten in den konstruktiven Details identifiziert werden, indem die Modelle den Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion beschreiben. Durch das Verständnis der Zusammenhänge ist es möglich, die Gestalt zu vereinfachen, indem beispielsweise ungenutzte Reststruktur für die Erfüllung weiterer Funktionen verwendet wird. Dies kann zur Einsparung von Bauteilen führen.

Methodeninhalt O3 beinhaltet das Ersetzen und Vermeiden kostspieliger Verbindungen durch gebogene Konstruktionen. Hierbei ist zu beachten, dass eine Verringerung der Anzahl und Länge der Schweißnähte oder gar eine Ersetzung der Schweißnähte durch Biegekanten zu einer Reduzierung des Fertigungsaufwands führen (Crampton et al., 2017), siehe Abbildung 5.3. Ebenso lässt sich der Fertigungsaufwand senken, indem das Biegen mit Verbindungstechniken wie Crimpen (Klocke, 2017), Clinchen (Y. Zhang et al., 2017), Clipverbindungen und Mikroverbindungen (Feldhusen & Grote, 2013) realisiert wird.

Das Ersetzen von Schweißnähten durch Biegekanten kann durch Flächentrennung ermöglicht werden (Doellken, Arndt et al., 2021). Konstruierende sehen sich mit der Schwierigkeit konfrontiert, neue und kreative Konzepte in Blech zu entwickeln. Die hier beschriebene opportunistische Methode bietet durch die damit verbundene Trennung bestehender Flächen eine Regel zur Entwicklung neuer und besserer Konzepte. Dazu werden Flächen eines bestehenden Blechbauteils getrennt und mit anderen Flächen kombiniert. Dies führt insgesamt zu einer Vereinfachung der verwendeten Blechbauteile, siehe Abbildung 5.4. Eine Darstellung der dualen Konstruktionsmethode ist online verfügbar (Doellken, Arndt et al., 2020).

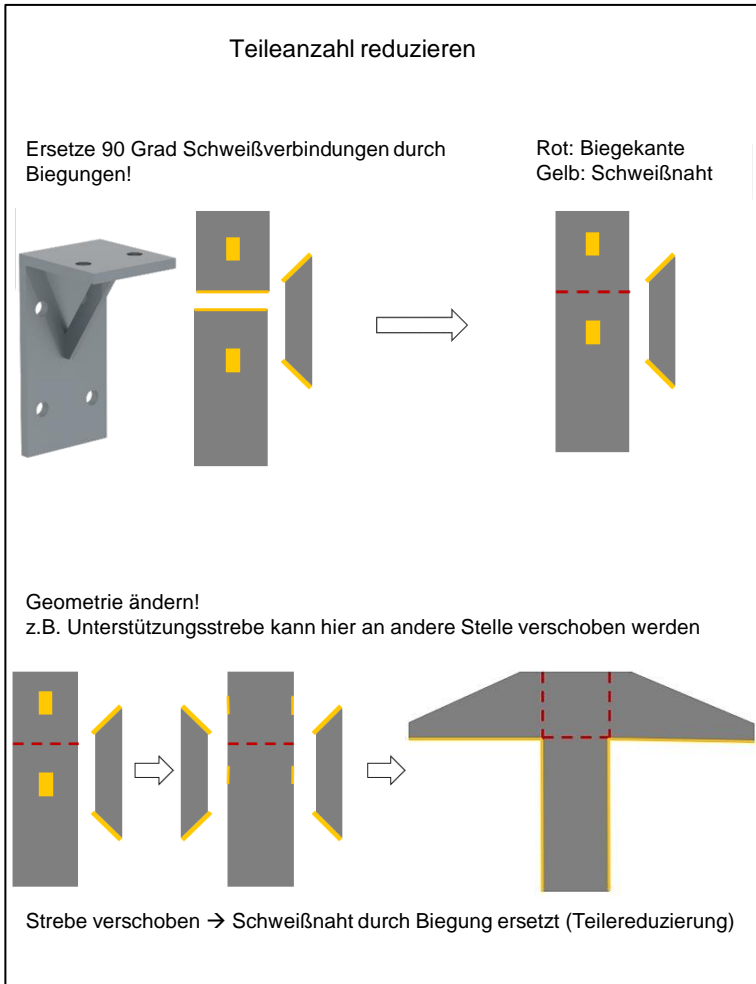


Abbildung 5.2: Opportunistischer Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* zur blechgerechten Konstruktion aus (Doellken, Arndt et al., 2020)

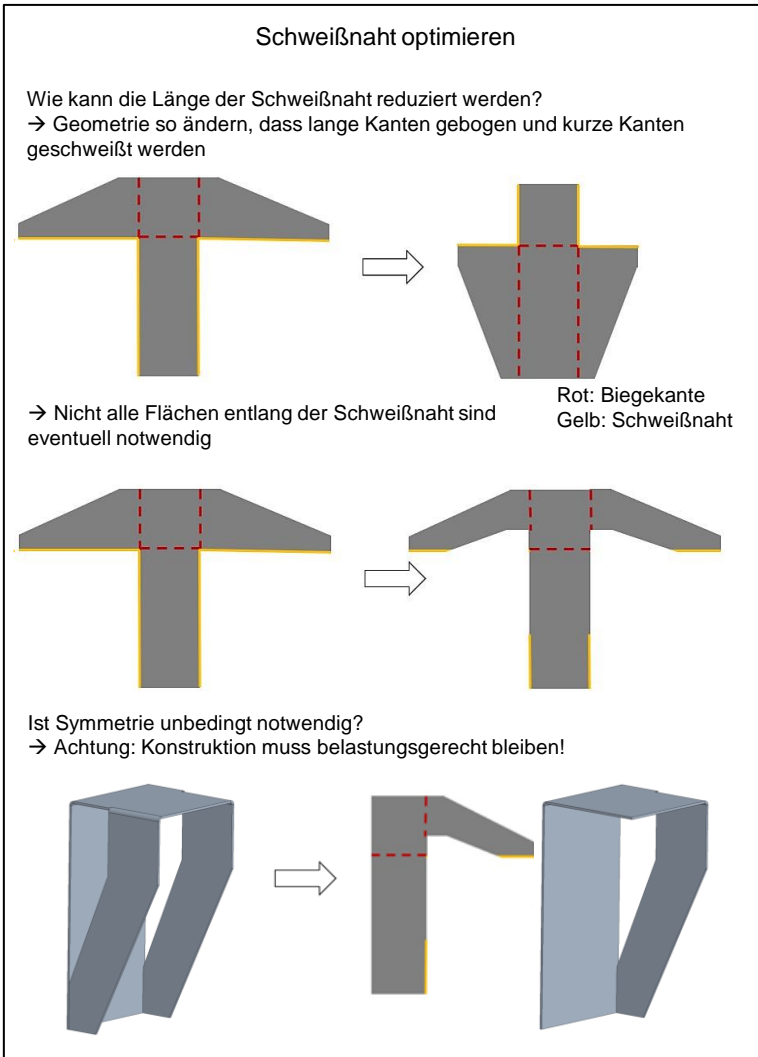


Abbildung 5.3: Opportunistischer Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren* zur blechgerechten Konstruktion aus (Doellken, Arndt et al., 2020)

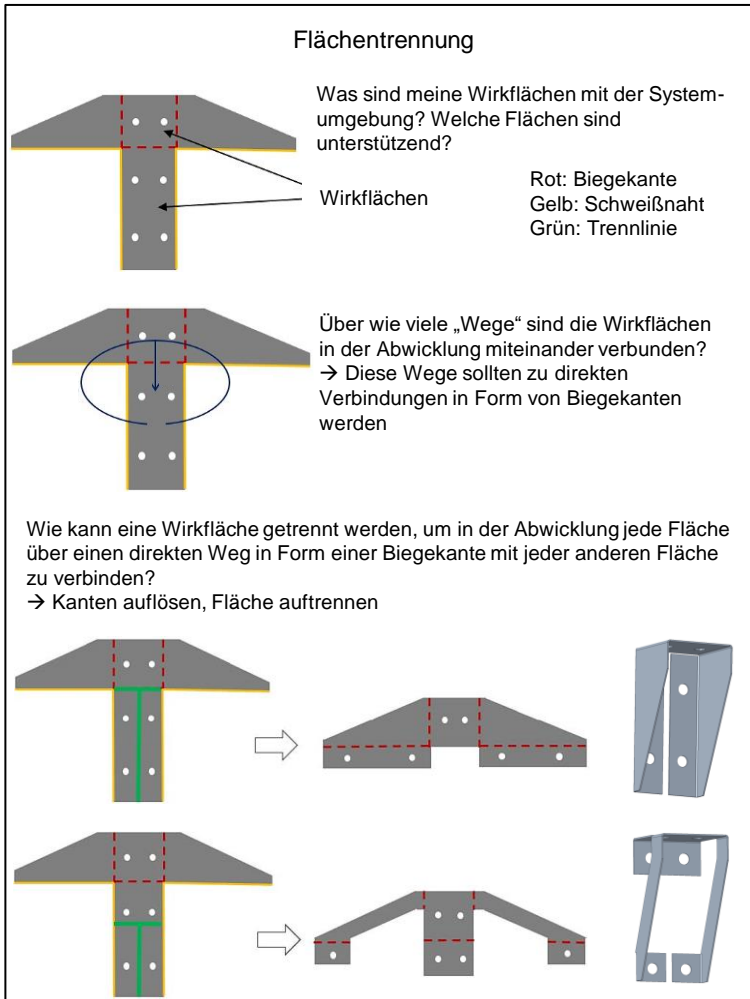


Abbildung 5.4: Opportunistischer Methodeninhalt *Flächentrennung* zur blechgerechten Konstruktion aus (Doellken, Arndt et al., 2020)

Methodeninhalt O4 ermöglicht die Entwicklung von Konzepten zur Realisierung einer kosteneffizienten Leichtbauweise. Dies kann zum einen mit Hilfe von Laserschneid- und Stanztechnik in gering belasteten Bereichen des Bauteils erreicht werden; zum anderen lässt es sich durch eine Verstärkung der Steifigkeit von Blechteilen durch Sicken, Falze, Biegungen und Materialverdoppelungen erreichen (Klein, 2013). Durch eine Kombination dieser Möglichkeiten lassen sich gewichtsarme und kostengünstige Konstruktionen entwickeln.

5.2 Fallstudie zur ergebnisbasierten Validierung einer Konstruktionsmethode zur blechgerechten Konstruktion

Dieses Kapitel gliedert sich in drei Teile: Studienaufbau, Ergebnisse und Diskussion. Das Ziel der ergebnisbasierten Validierung war es, die Schwächen dieser Untersuchungsmethode in einer solchen Validierung zu erkennen und Anforderungen an eine prozessbasierte Validierung abzuleiten.

5.2.1 Studienaufbau

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit dem Studienablauf, der Aufgabenstellung, den Studienteilnehmenden und der Datenanalyse.

Studienablauf

Die Fallstudie wurde als Laborstudie durchgeführt. Die Teilnehmenden wurden in vier Gruppen eingeteilt. Zwei Gruppen erhielten die **restriktive Konstruktionsmethode** und die anderen zwei Gruppen erhielten die **duale Konstruktionsmethode** als Unterstützung. Jeweils eine **restriktive** und eine **duale** Gruppe setzten sich aus Studierenden zusammen, während sich die anderen beiden Gruppen aus Konstrukteurinnen und Konstrukteuren zusammensetzten. Die Fallstudie war in fünf Schritte unterteilt, wie in Abbildung 5.5 dargestellt.

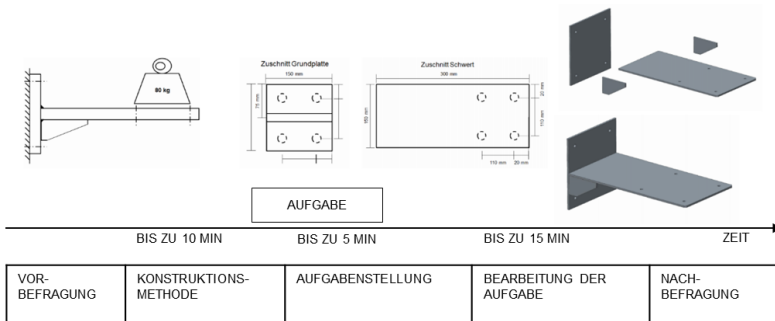


Abbildung 5.5: Zusammenfassung des Studienablaufs

Im Folgenden werden die fünf Schritte beschrieben, die von den Teilnehmenden am Arbeitsplatz mit Rechner durchgeführt wurden, um den Einfluss der Studienleitung zu reduzieren:

- **Vorbefragung:** In der Vorbefragung wurde eine Einverständniserklärung der Teilnehmenden zur Studienteilnahme eingeholt und wurden die bisherigen Erfahrungen in der Konstruktion von Blechprodukten erhoben.
- **Interaktion mit den Konstruktionsmethoden:** Die Teilnehmenden hatten zehn Minuten Zeit, sich mit der vorgesetzten **restriktiven** oder **dualen Konstruktionsmethode** für die blechgerechte Konstruktion vertraut zu machen. Die Methodeninhalte wurden in der Laborstudie über ein Tablet präsentiert.
- **Lesen der Aufgabenstellung:** Das in der Aufgabenstellung formulierte Ziel war es, die Anzahl der Teile, der Prozessschritte und der Schweißnähte eines Halterungswinkels zu reduzieren. Die Aufgabenstellung wurde am Bildschirm gelesen.
- **Bearbeitung der Aufgabe:** Konzepte wurden mit Stift und Papier gezeichnet. Die Teilnehmenden sollten sich dabei für ein Konzept entscheiden. Die Konzepte wurden von den Teilnehmenden ohne Zeitdruck abgegeben.
- **Nachbefragung:** In der Nachbefragung wurden die folgenden demografischen Merkmale der Teilnehmenden erhoben: Geschlecht, Alter und allgemeine Berufserfahrung.

Aufgabenstellung

Die in der Fallstudie gestellte Aufgabe bestand darin, einen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierten Halterungswinkel zu konstruieren, siehe Abbildung 5.5. Das Fertigungsverfahren wurde vorgegeben, der Halterungswinkel sollte auf einer Maschine mit einer Laserschneid- und Biegevorrichtung gefertigt werden. Das Ziel der Aufgabenstellung war es, die Anzahl der Teile, der Prozessschritte und der Schweißnähte zu reduzieren. Die Teilnehmenden wurden aufgefordert in Einzelarbeit ein oder mehrere Konzepte zu erstellen und sich nach der Konzepterstellung für ein endgültiges Konzept zu entscheiden. Die Bearbeitung der Aufgabe erfolgte mit Stift und Papier.

Studienteilnehmende

Bei den Teilnehmenden der Fallstudie ($N=74$) handelte es sich um Konstrukteurinnen und Konstrukteure aus Industrieunternehmen in Deutschland und um Studierende mit Schwerpunkt Konstruktion im Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die Konstrukteurinnen und Konstrukteure ($N=28$; 4 weiblich und 24 männlich) wurden aus zehn Industrieunternehmen rekrutiert; alle Konstrukteurinnen und Konstrukteure waren in der Konstruktion tätig und hatten Erfahrung in der Konstruktion von Blechprodukten. Die Studierenden ($N=46$; 6 weiblich und 40 männlich) hatten alle einen Bachelorabschluss im Studiengang Maschinenbau und studierten für einen darauf aufbauenden Master-Abschluss. Tabelle 5.2 zeigt die deskriptiven Statistiken zu Alter, Berufserfahrung und Vorerfahrungen aller Teilnehmenden.

Vor Beginn der Fallstudie wurden die Teilnehmenden gebeten, ihre Vorerfahrungen in der blechgerechten Konstruktion auf einer fünfstufigen Likert-Skala (0 = keine Erfahrung, 4 = Experte) zu bewerten.

Tabelle 5.2: Merkmale der Studienteilnehmenden

| | N | Alter (Jahre) | | | Berufserfahrung (Jahre) | | | Vorerfahrung (0–4) |
|-------------------------------------|----|---------------|-----|------------|-------------------------|-----|------------|--------------------|
| | | Min | Max | Mean (sd) | Min | Max | Mean (sd) | Median |
| Restriktiv | | | | | | | | |
| Konstrukteurinnen und Konstrukteure | 12 | 25 | 49 | 33.3 (7.5) | 1 | 20 | 7.4 (5.5) | 3 |
| Studierende | 26 | 20 | 31 | 24.4 (2.4) | 0 | 2 | 0.3 (0.5) | 1 |
| Dual | | | | | | | | |
| Konstrukteurinnen und Konstrukteure | 16 | 23 | 50 | 33 (7.4) | 1 | 16 | 7.7 (5.3) | 3 |
| Studierende | 20 | 19 | 31 | 23.9 (2.7) | 0 | 2 | 0.35 (0.7) | 1 |

Datenanalyse

Die Konzepte wurden hinsichtlich der Herstellbarkeit und der Verringerung des Fertigungsaufwandes qualitativ analysiert und von drei Experten der Blechkonstruktion bewertet. Konzepte, die nicht die Funktion erfüllten, wurden aus der anschließenden Datenanalyse und Bewertung der Herstellbarkeit und des Fertigungsaufwandes ausgeschlossen. Die Vorgehensweise bei der Konzeptbewertung ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

- Bewertung der Funktionserfüllung der Konstruktion,
- Bewertung der Herstellbarkeit und
- Bewertung des Fertigungsaufwandes.

Für die Bewertung im Rahmen der Fallstudie wurden die folgenden Kriterien festgelegt:

Funktionserfüllung: Die Funktionserfüllung setzt voraus, dass die geforderte Kraft gehalten werden kann. Bei fehlender Funktionserfüllung werden die Herstellbarkeit und der Fertigungsaufwand nicht mehr bewertet.

Herstellbarkeit: Die Kriterien für die Bewertung der Herstellbarkeit waren die Blechdicke und die Kollisionsfreiheit innerhalb der Herstellung. Bei fehlender Herstellbarkeit wird der Fertigungsaufwand nicht mehr bewertet.

Fertigungsaufwand: Das Kriterium für die Bewertung des Fertigungsaufwandes waren die erforderlichen Kosten. Diese wurden in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe entsprach einem hohen Fertigungsaufwand und die zweite und dritte entsprachen einem mittleren beziehungsweise niedrigen Fertigungsaufwand mit einer Kostenreduktion von bis zu 60 %. Es handelt sich hierbei um Werte, die in einer Vorstudie in Zusammenarbeit mit einem Fertigungsdienstleister ermittelt worden sind.

Mit Hilfe der Dokumentenanalyse wurden die Konzepte bewertet und wurde ein Vergleich zwischen den Konzepten der restriktiven und der dualen Konstruktionsmethode vorgenommen. Dazu wurde anhand der unabhängigen Gruppen der Mann-Whitney-U-Test (Mann & Whitney, 1947) durchgeführt. Die Normalitätsverteilung wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Ein p-Wert unter 0,05 wurde als statistisch signifikant angesehen und die Effektgröße nach (Cohen, 1992) wurde berechnet.

Tabelle 5.3: Metriken zur Bewertung der Konstruktionsergebnisse

| Metrik | Wertebereich | | | Beschreibung | |
|---------------------------------|-----------------------------|------------|----------------|---|--|
| Funktions- erfüllung | ja | – | nein | Bewertung, ob die geforderte Kraft gehalten werden kann | |
| Herstell- barkeit | Kollision | ja | – | nein | Bewertung, ob das Konzept ohne Kollision gefertigt werden kann |
| | Blech- dicke [mm] | $x < 3$ | $3 \leq x < 6$ | $6 \leq x$ | Bewertung, ob die Blechdicke die Herstellbarkeit beeinflusst |
| Fertigungs- aufwand | | niedrig | mittel | hoch | Bewertung der Herstellkosten |
| | Fertigungs-2 schritte | | 3 | $3 < x$ | Fertigungszeit und -aufwand steigen durch das Schweißen und die Montage. |
| | Anzahl Bauteile | 1 | 2 | $3 \leq x$ | Bewertung der Anzahl der Bauteile |
| | Anzahl Schweiß- nähte | 0 | $0 < x \leq 2$ | $2 < x$ | Bewertung der Anzahl der Schweißnähte |
| | Anzahl Biegungen | $0 \leq 2$ | $2 < x \leq 4$ | $4 < x$ | Bewertung der Anzahl der Biegungen |

5.2.2 Ergebnisse der Fallstudie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fallstudie beschrieben, siehe Abbildung 5.6. Die Abschnitte sind aufgeteilt nach den Kriterien der Analyse: Funktionserfüllung, Herstellbarkeit und Fertigungsaufwand.

Funktionserfüllung

Für die Konstrukteurinnen und Konstrukteure wie auch für die Studierenden verschlechtert die duale Methode die Funktionserfüllung der Konzepte. Mit der dualen Methode erfüllten drei von 16 Konzepten der Konstrukteurinnen und Konstrukteure nicht die Funktion, so dass sie in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt wurden. Die Konzepte der Konstrukteurinnen und Konstrukteure

erfüllten mit Hilfe der restriktiven Methode die geforderte Funktion. Mit der dualen Methode erfüllten die Konzepte von fünf der 20 Studierenden nicht die Funktion, wohingegen es bei den Studierenden mit der restriktiven Methode vier von 26 waren.

Bei der weiteren Analyse wurden Konzepte, die nicht die Funktion erfüllten, nicht berücksichtigt. Die neue Stichprobengröße für die restriktive Methode betrug $N = 12$ für die Konstrukteurinnen und Konstrukteure und $N = 22$ für die Studierenden, während sie für die duale Methode $N = 13$ für die Konstrukteurinnen und Konstrukteure und $N = 15$ für die Studierenden betrug.

Herstellbarkeit

Zwischen der Anwendung der restriktiven und dualen Methode konnte kein statistisch signifikanter Unterschied in der Herstellbarkeit der Konstruktionsergebnisse von Konstrukteurinnen, Konstrukteuren und Studierenden gefunden werden ($Md = 1$, $n = 34$, $U = 437,0$, $z = -1,15$, $r = 0,15$, $p = 0,25$).

Die Bewertung der Konzepte der Studierenden zeigte in der qualitativen Analyse eine positive Tendenz zu einer höheren Anzahl von herstellbaren Konzepten bei Anwendung der dualen Methode. Die Konzepte der Studierenden, die als nicht herstellbar bewertet wurden, wiesen zwei Schwierigkeiten auf: (1) geschlossene Profile, die zu einer Kollision im letzten Biegeschritt während der Fertigung führten, und (2) eine fehlende Berücksichtigung der Rückfederung des Bauteils.

Fertigungsaufwand

Für die Bewertung des Fertigungsaufwandes wurden sowohl bei der restriktiven ($n = 4$) als auch bei der dualen Methode ($n = 1$) nicht herstellbare Konzepte entfernt. Die fünf Konzepte, die nicht herstellbar waren, stammten von Studierenden.

Die von den Konstrukteurinnen und Konstrukteuren entwickelten Konzepte zeigten mit der dualen Methode ($Md = 1$, $n = 13$) einen signifikant geringeren Fertigungsaufwand als mit der restriktiven Methode ($Md = 2,5$, $n = 12$, $U = 35,0$, $z = 2,48$, $r = 0,50$, $p = 0,013$). Das entspricht einem mittleren Effekt nach Cohen (1992).

In Abbildung 5.6 ist dargestellt, dass die duale Methode im Vergleich zur restriktiven Methode einen positiven Einfluss auf den Fertigungsaufwand der Konzepte der Studierenden hatte. Der Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant.

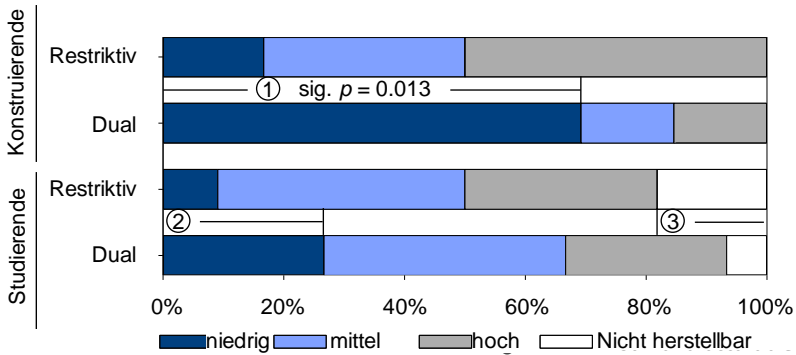


Abbildung 5.6: Verteilung des Fertigungsaufwandes der Konzepte der Konstrukteurinnen, Konstrukteure und Studierenden, aufgeteilt nach restriktiver oder dualer Methode. Die Daten stellen einen Prozentsatz der Teilnehmenden in Bezug auf die jeweilige Methode und die Konstruktionsergebnisse dar. (1) Die von den Konstrukteurinnen und Konstrukteuren auf Grundlage der dualen Methode entwickelten Konzepte weisen einen signifikant geringeren Fertigungsaufwand (dunkelblau – niedrig) auf als jene, die unter Verwendung der restriktiven Methode erarbeitet worden sind. (2) Die duale Methode hat im Unterschied zur restriktiven Methode einen positiven Einfluss auf den Fertigungsaufwand (dunkelblau – niedrig) der Studierendenkonzepte. (3) Die von den Studierenden auf Grundlage der dualen Methode entwickelten Konzepte weisen eine höhere Herstellbarkeit (weiß – nicht herstellbar) auf als jene, die unter Verwendung der restriktiven Methode entstanden sind.

Die duale Methode führte im Unterschied zur restriktiven Methode zu einer Veränderung der Konstruktionsergebnisse in Bezug auf Herstellbarkeit und Fertigungsaufwand. Konkret kam es unter Verwendung der dualen Methode zu einer Reduzierung der Anzahl der Bauteile sowie der Schweißnähte und zu einer Erhöhung der Anzahl der Biegungen. Dadurch konnte der Fertigungsaufwand deutlich gesenkt werden.

Die Konzepte der Studierenden tendierten zu einer höheren Herstellbarkeit und einem niedrigeren Fertigungsaufwand. Bei den Konstruktionsergebnissen der Studierenden war jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der Gruppe mit der restriktiven und der Gruppe mit der dualen Methode festzustellen.

5.2.3 Diskussion

Die Fallstudie hatte zum Ziel, die Schwächen der ergebnisbasierten Untersuchungsmethode zu erkennen und mögliche Anforderungen an eine prozessbasierte Untersuchungsmethode abzuleiten. Die Konstruktionsergebnisse wurden mit Hilfe der Dokumentenanalyse erhoben und bewertet. In den folgenden Abschnitten werden die Konstruktionsergebnisse jeweils für die Herstellbarkeit und den Fertigungsaufwand beschrieben.

Die Konzepte aller Konstrukteurinnen und Konstrukteure, die an der Studie teilnahmen, erfüllten die Anforderung der Herstellbarkeit – unabhängig davon, ob die restriktive oder die duale Methode zum Einsatz gekommen war. Anders verhielt es sich bei den Studierenden. Hier fielen die Ergebnisse bezüglich der Herstellbarkeit bei der dualen Methode besser aus als bei der restriktiven Methode. Die Konzepte der Studierenden, die als nicht herstellbar bewertet wurden, wiesen folgende Schwächen auf: 1) geschlossene Profile, die zu einer Kollision im letzten Biegeschritt während der Fertigung führten, und 2) eine fehlende Berücksichtigung der Rückfederung des Bauteils.

Der Fertigungsaufwand der Konstruktionsergebnisse bei den Konstrukteurinnen und Konstrukteuren wurde bei der Verwendung der dualen Konstruktionsmethode im Vergleich zur restriktiven Konstruktionsmethode signifikant reduziert. Gleichzeitig konnte dieser Unterschied bei den Studierenden nicht festgestellt werden. Die Konzepte der Studierenden wiesen weiterhin folgende Schwächen auf: 1) die Anzahl an Teilen blieb hoch und 2) die Optimierung der Schweißnähte wurde nicht ausreichend angewendet.

Die duale Methode stellt für eben diese Schwierigkeiten bezüglich der Herstellbarkeit und des Fertigungsaufwands spezifische Methodeninhalte bereit. Daraus kann gefolgert werden, dass die Studierenden die Methodeninhalte entweder nicht gelesen oder nicht verstanden haben, so dass sie die Methodeninhalte nicht anwenden konnten. Allein aus der Betrachtung der Konstruktionsergebnisse lässt sich nicht schlussfolgern, welche Ursache diese vorliegenden Schwierigkeiten haben. Dabei muss diese Ursache jedoch gefunden werden, um die Konstruktionsmethode weiterentwickeln zu können.

Mit der ergebnisbasierten Validierung lässt sich ebenfalls nicht erklären, warum die Konstrukteurinnen und Konstrukteure bei der Optimierung der Schweißnähte erfolgreich waren, während dies bei den Studierenden nicht der Fall war. Die Methodeninhalte zur Reduktion des Fertigungsaufwandes wurden beiden Gruppen mit Hilfe der dualen Methode vermittelt. Mit der Dokumentenanalyse konnte

festgestellt werden, dass die Optimierung der Schweißnähte in den Konzepten der Studierenden nicht ausreichend angewendet wurde. Für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode insbesondere für die Studierenden bedarf es Erklärungen, warum die Methodeninhalte nicht angewendet wurden. Über Vermutungen hinaus ist die ergebnisbasierte Validierung nicht in der Lage, Erkenntnisse über die Schwierigkeiten zu liefern. Diese Schwierigkeiten müssen mit der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode in Zusammenhang stehen (Doellken, Zapata et al., 2021; Eisenmann et al., 2021). Denn erst, wenn Erkenntnisse darüber vorliegen, ob die Texte und Grafiken der Konstruktionsmethode gelesen, verstanden und angewendet wurden, kann eine Verbesserung der Methodeninhalte erreicht werden. Aus der Fallstudie wurden folgende Anforderungen an eine prozessbasierte Untersuchungsmethode abgeleitet: Es muss untersucht werden,

- ob die Studierenden ausreichend *Aufmerksamkeit* auf wichtige Inhalte richten (Doellken, Zapata et al., 2021; Toreini, Langner & Maedche, 2020);
- ob die Studierenden die Methodeninhalte *verstanden* haben und
- ob die Studierenden in der Lage sind, die Methodeninhalte *anzuwenden*.

Hierbei ist zu diskutieren, ob die ergebnisbasierte Validierung in der Lage ist, weitere Daten zur Verfügung zu stellen. Dazu werden die Stärken und Schwächen der Dokumentenanalyse in der ergebnisbasierten Validierung im Folgenden zusammengefasst. Die Stärken der Dokumentenanalyse in der ergebnisbasierten Validierung sind:

- Bewertung des Nutzens der Konstruktionsmethode anhand erstellter Konzepte
- Verwendung von Dokumenten unterschiedlicher Art, teilweise eigens für die Studie erhoben oder im Konstruktionsprozess anfallend
- Vergleich von Dokumenten über Studien, Aufgabenstellungen und Teilnehmende hinweg
- geringe Beeinflussung der Studienteilnehmenden durch die Studienleitung

Die Schwächen der Dokumentenanalyse in der ergebnisbasierten Validierung sind:

- Beeinflussung in der Bewertung der Konzepte durch Expertenmeinung
- keine Datenerhebung zur Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode
- Es fehlt eine Kombination mit Befragung und Beobachtung (Ahmed, 2007).
- Aus der Dokumentenanalyse lassen sich keine Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der untersuchten Konstruktionsmethode ableiten.

5.3 Fazit zur Fallstudie einer ergebnisbasierten Validierung

Die duale Konstruktionsmethode wurde in der Fallstudie mit einer bestehenden Untersuchungsmethode ergebnisbasiert validiert. Die sich daraus ergebenden Schwächen der Untersuchungsmethode wurden erkannt und im Rahmen der Diskussion dargestellt.

Dazu wurden zunächst die nach dem Stand der Forschung bestehenden Konstruktionsmethoden beschrieben. Die ergebnisbasierte Validierung der dualen Konstruktionsmethode für die blechgerechte Konstruktion erfolgte auf Grundlage eines Vergleichs mit der restriktiven Methode. Der Vergleich ergab, dass die Konstrukteurinnen und Konstrukteure durch die Anwendung der dualen Konstruktionsmethode Konzepte mit einem signifikant reduzierten Fertigungsaufwand erarbeiteten. Bei den Studierenden waren dagegen keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der Herstellbarkeit und des Fertigungsaufwandes festzustellen.

Aus der ergebnisbasierten Validierung ergibt sich die Erkenntnis, dass die duale Methode weiter verbessert werden sollte. Die Studierenden sollten dazu befähigt werden, den Fertigungsaufwand zu reduzieren und herstellbare Konzepte zu erstellen. Mit Hilfe der in dieser Fallstudie angewendeten Untersuchungsmethode kann jedoch nicht erklärt werden, warum die Ergebnisse der Studierenden mit der restriktiven und mit der dualen Methode nicht signifikant voneinander abwichen. Es liegen keine Daten vor, mit denen die Anwendung der Konstruktionsmethode verbessert werden kann. Deutungen der Ergebnisse hinsichtlich Aufmerksamkeit, Verständnis und Anwendung der Methodeninhalte können nur vage formuliert werden. Somit wird eine Untersuchungsmethode benötigt, die es ermöglicht die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit und deren Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode zu analysieren.

6 Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Dieses Kapitel befasst sich mit der ersten Forschungsfrage, die wie folgt lautet:

Forschungsfrage 1: Wie kann die Validierung von Konstruktionsmethoden durch eine Untersuchungsmethode unterstützt werden?

In dieser Forschungsarbeit wird die Entwicklung einer Untersuchungsmethode für die prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden dargestellt. Ausgangspunkt sind die in Kapitel 2.2.2 dargestellten bestehenden Untersuchungsmethoden. Im Folgenden wird die neu entwickelte Untersuchungsmethode beschrieben. Diese soll dazu imstande sein, Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode und deren Auswirkungen auf den Nutzen objektiv zu analysieren. Des Weiteren soll es anhand dieser Untersuchungsmethode möglich sein, die Aspekte Aufmerksamkeit, Verständnis, Anwendung und Leistung in Validierungsstudien zu erheben. Für die Datenerhebung werden die Beobachtung, die Befragung und die Dokumentenanalyse eingesetzt. Die Metriken der neuen Untersuchungsmethode sind die Lesetiefe, die Anzahl richtig beantworteter Fragen, die Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte und die Bewertung der Konstruktionsergebnisse. Die Untersuchungsmethode soll aufgrund ihrer festgelegten Struktur und ihrer Metriken über diese Forschungsarbeit hinaus grundsätzlich auf alle text- und grafikbasierten Konstruktionsmethoden anwendbar sein. Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage besteht in einer Darstellung ebendieser prozessbasierten Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden. Die neue Untersuchungsmethode trägt den Titel: *Attention Comprehension Application Performance Analysis: ACAP-Untersuchungsmethode*¹. Sie soll in der *zweiten deskriptiven Studie* aus der Forschungsmethodik der *DRM* eingesetzt werden.

¹ Auf Deutsch: Aufmerksamkeit-Verständnis-Anwendung-Leistungs-Untersuchungsmethode

Dieses Kapitel basiert auf den Veröffentlichungen „ Evaluation of ACAP Analysis Method for Process-Based Validation of Textual and Graphical Design Methods Novel Research Method for Process-Based Validation of Design Support: an ACAP-Analysis Case Study“ (Doellken, Nelius & Matthiesen, 20223 (Wiedereinreichung am 14. Juli 2023)) und „Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: a study on eye movements in exploiting design guidelines“ (Doellken, Zapata et al., 2021). Bei Teilen des Kapitels 6.1 des folgenden Textes handelt es sich um unveränderte Auszüge aus den genannten Veröffentlichungen. Neben der Übersetzung ins Deutsche wurden lediglich die Nummerierungen und Begrifflichkeiten an den Kontext der vorliegenden Arbeit angepasst.

6.1 Ablauf der ACAP-Untersuchungsmethode

Der Ablauf der ACAP-Untersuchungsmethode ergibt sich aus Abbildung 6.1 und wird im Folgenden beschrieben.

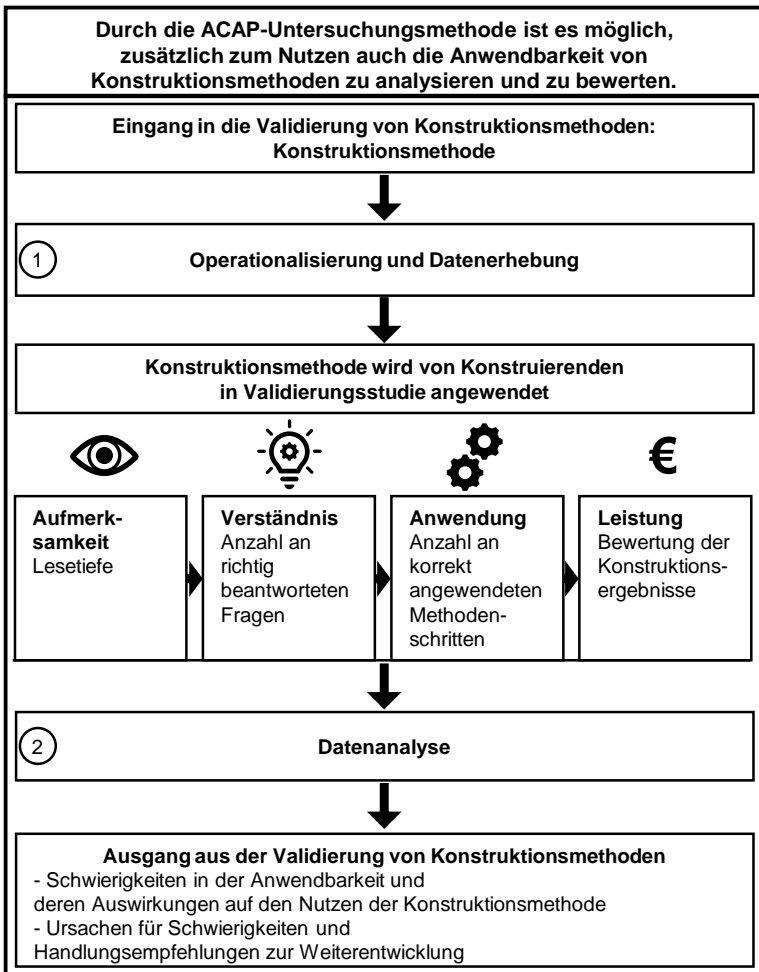


Abbildung 6.1: Ablauf der ACAP-Untersuchungsmethode: zwei Schritte zur Validierung von Konstruktionsmethoden, übersetzt aus Doellken et al. (Wiedereinreichung im Jahr 2023 am 14. Juli)

6.1.1 Operationalisierung und Datenerhebung

Der erste Schritt der ACAP-Untersuchungsmethode ist die Operationalisierung der Aufmerksamkeit, des Verständnisses, der Anwendung und der Leistung und der Datenerhebung zur Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode, wie in Abbildung 6.1 dargestellt.

Die ACAP-Untersuchungsmethode kann im Rahmen einer Validierungsstudie mit nur einer Gruppe von Konstruierenden eingesetzt werden. Ebenso kann die ACAP-Untersuchungsmethode im Rahmen einer Validierungsstudie mit Kontroll- und Testgruppe durchgeführt werden. Im letzteren Fall ist zusätzlich ein Vergleich der Leistung beider Gruppen möglich. Auf diese Weise können zwei Konstruktionsmethoden miteinander verglichen werden. Hierfür erhalten beide Gruppen die gleiche Aufgabenstellung, wobei ihnen unterschiedliche Konstruktionsmethoden zur Verfügung gestellt werden. Zu empfehlen ist die Datenerhebung aufgrund von Einzelarbeit; eine Gruppenarbeit würde die Aussagekraft der erhobenen Daten reduzieren. Nach Duehr, Hirsch, Albers und Bursac (2020) werden sich die Herausforderungen einer Gruppenarbeit in sich global entwickelnden Unternehmen ändern und zukünftig mit einer verteilten Produktentwicklung konfrontiert sein, so dass diese verteilt an den gleichen Aufgaben arbeiten müssen, da die zunehmende Komplexität der Produkte eine intensivere Zusammenarbeit erfordert. Die Laborumgebung sollte eine effektive Bearbeitung der Aufgabenstellung ermöglichen und arbeitsnah gestaltet sein. In Tabelle 6.1 ist die Struktur der Anwendbarkeit mit quantitativen Metriken und Beispielwerten dargestellt. Dabei gelten die folgenden wechselseitigen Abhängigkeiten:

- Die Aufmerksamkeit ist eine notwendige Voraussetzung für das Verständnis.
- Das Verständnis ist eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung.
- Die Anwendung ist eine notwendige Voraussetzung für die Leistung.

Tabelle 6.1: Quantitative Datenerhebung der ACAP-Untersuchungsmethode für die Validierung von Konstruktionsmethoden: Phasen mit Metrik und Beispielwerten

| Phase | Metrik | Beispielwerte |
|---|---|--|
| Aufmerksamkeit Bojko (2013); Duchowski (2017); Holsanova, Rahm und Holmqvist (2006); Holmqvist et al. (2011) | Lesetiefe: Quotient von Verweildauer und AOI-Bereich (ms/cm^2) | Erhebung mit Eye-Tracking- Gerät; niedrige Lesetiefe $< 5 ms/cm^2$ (Werbung) geringe Lesetiefe $34 ms/cm^2$ (Zeitungsartikel) höhere Lesetiefe $50 ms/cm^2$ (Tabloid Zeitungsgröße) hohe Lesetiefe $207 ms/cm^2$ (beliebteste Zeitungsartikel) – aus Holsanova et al. (2006) |
| Verständnis Jänsch und Birkhofer (2004); Kroll und Shihmanter (2011); Kroll und Weisbrod (2020) | Anzahl an richtig beantworteten Fragen zum Inhalt der Konstruktionsmethode | Mehrfachauswahl Fragebogen 0–4 falsch, richtig |
| Anwendung Eisenmann et al. (2021); Jänsch und Birkhofer (2004); Kroll und Weisbrod (2020) | Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten | Bewertung der Konstruktions- ergebnisse 0–5 nicht angewendet, korrekt angewendet |
| Leistung Blessing und Chakrabarti (2009); Corremans (2011); Pedersen et al. (2000) | Erreichen des Ziels der Konstruktionsmethode | Bewertung der Konstruktions- ergebnisse Fertigungsaufwand: niedrig, mittel, hoch Herstellbarkeit: ja, nein Funktionserfüllung: ja, nein |

Aufmerksamkeit

Die ACAP-Untersuchungsmethode stellt dar, wie die Aufmerksamkeit im Detail erfasst und analysiert wird. Als Metrik für die Aufmerksamkeit wird hierbei die

Lesetiefe eingesetzt; diese gibt an, wie intensiv die textbasierten und grafischen Inhalte gelesen wurden (Holmqvist et al., 2011, S. 525). Die Metrik der Lesetiefe umfasst zusätzlich zu den Fixationen auch die Sakkaden und wird durch den Quotienten zwischen Verweildauer und Bereich des Interesses, sogenannte Areas of Interest (AOIs), berechnet. Für jede AOI und jeden Konstruierenden wird der Quotient der Verweildauer in *ms* zur AOI-Fläche in *cm²* berechnet.

Die Lesetiefe ist eine objektive Metrik für die Beobachtung der Aufmerksamkeit der Konstruierenden auf einzelne Inhalte der Konstruktionsmethode. Die Informationsaufnahme ist für das Verständnis der Methodeninhalte und die Anwendung der Methodenschritte entscheidend. Ziel dabei ist es, in objektiver Weise die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode zu identifizieren. Mit der Lesetiefe können insbesondere AOIs identifiziert werden, die von den Konstruierenden überlesen wurden. Hierdurch lassen sich nicht verstandene Methodeninhalte erklären.

Eine mögliche Ursache dieser Schwierigkeiten könnte durch eine unzureichende Darstellung und Positionierung der Informationen erklärt werden. In der Forschung wird diesbezüglich von einem wahrnehmungsbedingten Fehler gesprochen (Bojko, 2013, S. 248). Nach Bojko (2013) kann dies mit einer Vielzahl von Ursachen zusammenhängen, einschließlich einer suboptimalen Platzierung und visuellen Präsentation der Informationen. So kann es beispielsweise dazu kommen, dass eine Grafik bei der Betrachtung übergangen wird, weil sie zu viele Informationen enthält. Eine weitere Ursache für eine niedrige Lesetiefe ist die, dass konkurrierende Inhalte die Aufmerksamkeit auf sich ziehen (Bojko, 2013, S. 249). Für die Reduzierung konkurrierender Inhalte werden nach Bojko (2013) folgende Schritte empfohlen: die Änderung eines irreführenden Aussehens, die Kennzeichnung konkurrierender Inhalte oder die Änderung der Position eines Inhalts.

Die Lesetiefe ist sowohl beim Lesen von Texten als auch bei der Betrachtung von Grafiken messbar. Die Datenerhebung erfolgt über das in Kapitel 2.1.3 beschriebene Eye-Tracking-Gerät. Diese Technik ermöglicht die Gewinnung von Hinweisen für die Umgestaltung von Texten und Grafiken.

Die Konstruktionsmethode wird in text- und grafikbasierte Bereiche, auch AOIs genannt, strukturiert. Die Auswahl der AOIs erfolgt gemäß einer von Holmqvist et al. (2011, S. 304) vorgeschlagenen Strategie, nämlich jener der Stimulus-generierten AOIs. Eine AOI kann dabei ein Satz oder ein Absatz, ein Ausschnitt aus einer Abbildung oder auch eine ganze Abbildung sein. Abbildungen oder Text mit unterschiedlichen Farben und klaren Kanten können als verschiedene AOIs ausgewählt werden. Methodenschritte können somit AOIs zugeordnet werden. Je

feiner die AOIs strukturiert sind, desto differenzierter können Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der Inhalte festgestellt werden. Die Forschenden sollten die AOIs in Bezug auf die zu beantwortende Forschungsfrage festlegen. Mit zunehmender Anzahl an AOIs steigt jedoch der Auswertungsaufwand.

Beispiele für Lesetiefe

Das Erheben der Daten zur Lesetiefe lässt sich über einen Bildschirm standardisiert und kontrolliert durchführen. Die Eye-Tracking-Aufzeichnung kann dabei über eine Software automatisiert ausgewertet werden. Holsanova et al. (2006) konnten je nach verwendeten Stimuli unterschiedliche Lesetiefen messen. Die Datenerhebung wurde mit einem Eye-Tracking-Gerät durchgeführt. Die AOIs können in einer Analysesoftware festgelegt werden, so dass eine automatisierte Auswertung der Lesetiefe pro AOI für jeden Teilnehmenden vorgenommen werden kann. Die niedrigste Lesetiefe von weniger als 5 ms/cm² wurde bei Werbungen gemessen. Zeitungsartikel wurden von den Teilnehmenden im Durchschnitt mit 34 ms/cm² gelesen und Zeitungsartikel in Tabloid-Zeitungsgröße mit durchschnittlich 50 ms/cm². Die höchste Lesetiefe war bei den beliebtesten Zeitungsartikeln zu verzeichnen, mit durchschnittlich 207 ms/cm². Die Lesetiefe bei Konstruktionsmethoden kann von den beschriebenen Werten abweichen, da sie von Schriftgröße, Anteil weißer Fläche und Größe der AOIs abhängig ist. Hierin unterscheiden sich Konstruktionsmethoden von Werbeflächen.

Beispiel zu text- und grafikbasierten Bereichen der Konstruktionsmethode

Ein Beispiel ist der Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren*; dieser wurde in sieben AOIs aufgeteilt. Dabei wurde zunächst jeder Bereich mit beschreibenden Sätzen als eine AOI definiert, so dass sich insgesamt drei AOIs ergaben. Weiterhin wurde jede der vier Abbildungen als eine AOI deklariert. Ein weiteres Beispiel ist der Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren*; dieser wurde in sechs AOIs unterteilt, drei Abbildungen und drei textbasierte Beschreibungen. Schließlich wurde der Methodeninhalt *Flächentrennung* in sechs AOIs unterteilt, vier Abbildungen und zwei textbasierte Beschreibungen. Die zwei textbasierten Beschreibungen bestanden jeweils aus mehreren Sätzen, da diese inhaltlich zusammengehören. Die geschilderten Methodeninhalte können in der Konstruktionsmethode (Doellken, Arndt et al., 2020) eingesehen werden beziehungsweise in den Abbildungen: *Teileanzahl reduzieren* in Abbildung 5.1, *Schweißnaht optimieren* in Abbildung 5.2 und *Flächentrennung* in Abbildung 5.3.

Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden

| | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|
| TZ AOI1 Teil Energie 90 Grad Schweißverbindungen durch Biegungen? Rot: Biegekante Gelb: Schweißnaht | | SO AOI1 Schweißnaht optimieren Wie kann die Länge der Drosselnaht reduziert werden? → Geometrie so ändern, dass lange Kanten gelingen und kurze Kanten geschweißt werden | | FT AOI1 Flächenentzerrung Was sind meine "Kritischen Flächen" einer Umveränderung? Rot: Biegekante Gelb: Schweißnaht Grün: Transbrise | |
| TZ AOI2 | | SO AOI2 → Nicht alle Flächen sind gleichwertig relevant | | FT AOI2 Wie viele "Wägel" sind die Wärfächen in der Abwicklung miteinander verbunden? → Diese Wägel sollten so gestalten, Veränderungen in Form von Biegekanten werden | |
| TZ AOI3 | | SO AOI3 Rot: Biegekante Gelb: Schweißnaht | | FT AOI3 Wie kann eine Würfelfläche über einen direkten Weg zu verbinden? → Kanten aufheben, Fläche aufheben | |
| TZ AOI4 Geometrie ändern! z.B. Umveränderungsstelle kann hier an andere Stelle verschoben werden | | SO AOI4 | | FT AOI3 Abwicklung jede Fläche über andere Fläche | |
| TZ AOI5 | | SO AOI5 Ist Symmetrie unbedingt → Anfertigung, Montage, Transport | | FT AOI4 | |
| TZ AOI6 | | SO AOI6 | | FT AOI5 | |
| TZ AOI7 Stelle verschieben → Schnitt → Schnitt → Umveränderung | | | | FT AOI6 | |

Abbildung 6.2: Text- und grafikbasierte Bereiche der Konstruktionsmethode; TZ: Teileanzahl reduzieren; SO: Schweißnaht optimieren; FT: Flächentrennung; AOI: Bereich des Interesses

Verständnis

Für das Messen des Verständnisses wurde ein eigener Fragebogen entwickelt. Die Anzahl an richtig beantworteten Fragen ist ein quantitatives Maß für das Verständnis der wesentlichen Inhalte der Konstruktionsmethode (Kroll & Weisbrod, 2020). Die Fragen sind spezifisch für jede Konstruktionsmethode und betreffen die Methodeninhalte und deren Verständnis.

Häufig falsch beantwortete Fragen werden als kritisch eingestuft. Hierbei ist es notwendig, den Schwellwert der Anzahl an falsch beantworteten Fragen festzulegen und je nach Konstruktionsmethode anzupassen, um den Inhalt als verstanden oder nicht verstanden einzustufen. Das Verständnis ist sowohl beim Lesen von Texten als auch bei der Betrachtung von Grafiken messbar. Die Datenaufnahme zum Verständnis und die Auswertung des Fragebogens können mit einer Analysesoftware automatisiert vorgenommen werden. Die Befragung ermöglicht die Überprüfung von wichtigen Methodeninhalten auf die Präzision der Formulierung sowie die Eindeutigkeit der Texte und Grafiken.

Beispiel zu Fragen in einem Fragebogen

Als Frageformat können geschlossene Fragen im Antwort-Wahl-Verfahren verwendet werden. Das Nichtankreuzen richtiger Antworten und das Ankreuzen falscher Antworten führen zu Punktabzug. In der Punkteauswertung können in der

Summe keine Negativpunktzahlen erzielt werden. Nachfolgend werden Beispiele zu Formulierungen in den Fragestellungen zu den Methoden dargestellt:

Frage 1: Schweißnähte können durch Biegungen ersetzt werden – was muss dabei beachtet werden?

- die Position der Schweißnaht beziehungsweise des angeschweißten Teiles
- die Kantenlänge
- die Herstellbarkeit
- die Beibehaltung der Geometrie

Frage 2: Wie kann ein geschweißtes Bauteil hinsichtlich des Fertigungsaufwandes optimiert werden, ohne dass dadurch die Belastbarkeit sinkt?

- durch eine Änderung der Abwicklung des Bauteils
- durch ein kraftflussgerechtes Entfernen von Flächen
- durch ein Auflösen der Symmetrie und ein Erhöhen der Blechstärke
- durch eine Geometrieänderung von Biegekanten

Frage 3: Wo können Flächen sinnvoll getrennt werden?

- innerhalb der Wirkfläche
- außerhalb der Wirkfläche
- besonders an Schweißnähten
- besonders an Biegungen
- überall möglich

Anwendung

Die Konstruktionsmethode muss korrekt angewandt werden, damit ihr beabsichtigter Nutzen erzielt werden kann (Eisenmann et al., 2021). Die Anwendung wird erhoben durch die Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte (Kroll & Weisbrod, 2020). Dafür werden Bewertungsbögen eingesetzt, die eine Analyse der korrekten Anwendung der Methodenschritte ermöglichen. Hierbei spielen allein die Methodenschritte eine Rolle, die für die Konstruktionsaufgabe anzuwenden sind. Häufig nicht korrekt angewendete Methodenschritte werden als kritisch eingestuft. Je nach Konstruktionsmethode wird der Schwellwert der Anzahl an die nicht korrekt angewendeten Methodenschritten angepasst.

Für die Bewertung der Anwendung jedes einzelnen Methodenschrittes ist es effizient, die während der Aufgabenbearbeitung erzeugten Dokumente zu analysieren. Kroll und Weisbrod (2020) haben die Anwendung der Methodenschritte mit Hilfe eines Bewertungsbogens ausgewertet, der durch die Konstruierenden ausgefüllt wurde. Dies hat den Nachteil, dass hierdurch die Aufmerksamkeit der Konstruierenden in Bezug auf die eigentliche Konstruktionsaufgabe abnimmt. Dieser Nachteil kann dadurch vermieden werden, dass Methodenschritte mit Hilfe indirekter Aufzeichnungen der Anwendung dokumentiert werden. Dies gelingt durch die Verwendung von Videoaufzeichnungen sowie von Bewertungsbögen, die durch den Studienleiter ausgefüllt werden. Für den Fall, dass Methodenschritte nicht korrekt angewendet werden, müssen diese auf die Verständlichkeit der Formulierung überprüft werden. Hierzu gehört beispielsweise eine Prüfung der Einfachheit, der Gliederung und der Orientierung sowie der Kürze und Prägnanz (Langer, Schulz von Thun & Tausch, 2019). Kritische Methodenschritte werden präziser formuliert und es werden Alternativen für die grafische Darstellung entwickelt.

Beispiel zu Bewertungsbogen

Ein Beispiel für die Erhebung der Anwendung im Bewertungsbogen zeigt Tabelle 6.2. In dem Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* bestand die korrekte Anwendung darin, die Schweißnähte durch Biegungen zu ersetzen und die Position der Stützstrebe zu ändern. In dem Beispiel wurden die Methodeninhalte *Schweißnaht optimieren* und *Flächentrennung* der Konstruktionsmethode auch korrekt angewendet.

Tabelle 6.2: Exemplarische Darstellung der Analyse der Anwendung eines Studienteilnehmenden: Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte

| Methoden- inhalt | Methodenschritt | Studienteilnehmer 25 |
|-----------------------------|---|-----------------------------|
| Teileanzahl reduzieren | Schweißnähte durch Biegungen ersetzen | 1 – nicht angewendet |
| | unzugängliche Schweißnähte durch Biegungen ersetzen | 1 – nicht angewendet |
| | Position der Stützstrebe ändern oder entfernen | 0 – angewendet |
| | Referenzbauteil abwickeln | 0 – angewendet |
| | Schweißnähte in Referenz markieren | 0 – nicht angewendet |
| Gesamt TZ | | 2 |
| Schweißnaht optimieren | Abwicklung ändern | 0 – nicht angewendet |
| | lange Kanten biegen, kurze Kanten schweißen | 0 – nicht angewendet |
| | Symmetrie aufheben, Blechdicke erhöhen | 1 – angewendet |
| | Schweißecken weglassen, um die Schweißlänge zu reduzieren | 1 – angewendet |
| Gesamt SO | | 2 |
| Flächen- trennung | Wirkflächen auftrennen | 1 – nicht angewendet |
| | Wirkflächen mit geändertem Kraftfluss über Biegungen wieder verbinden | 1 – angewendet |
| | Kraftfluss zeichnen | 0 – angewendet |
| Gesamt FT | | 2 |

Leistung

Die Leistung wird aus den mit der jeweiligen Konstruktionsmethode verbundenen Zielen abgeleitet; ein mögliches Ziel bildet hier beispielsweise das Reduzieren des Fertigungsaufwandes. Die Leistung wird gemessen durch die Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Zielen der Konstruktionsmethode. Der Schwellwert für eine

niedrige Leistung wird festgelegt und an die jeweilige Konstruktionsmethode angepasst. Konstruktionsergebnisse, die eine geringe Leistung aufweisen, werden als kritisch eingestuft. Die Analyse von Aufmerksamkeit, Verständnis oder Anwendung ist dabei notwendig, um eine niedrige Leistung zu erklären.

Beispiel zu Leistung

Die Erhebung der Leistung erfolgt anhand einer Bewertung der Konzepte. Diese werden hinsichtlich der Herstellbarkeit und der Verringerung des Fertigungsaufwandes bewertet. Die Herstellbarkeit und der Fertigungsaufwand werden bei Konzepten nicht ausgewertet, die die erwartete Funktion nicht erfüllen. Die Metriken zur Konzeptbewertung sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

6.1.2 Datenanalyse

Im Folgenden wird die Datenanalyse als der zweite Schritt in der ACAP-Untersuchungsmethode beschrieben, siehe Abbildung 6.1. Die Datenanalyse erfolgt auf Basis der quantitativen Daten der folgenden Metriken: Lesetiefe, Anzahl an richtig beantworteten Fragen, Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten und Bewertung der Konstruktionsergebnisse, siehe Tabelle 6.1. Das Vorgehen bei der Datenanalyse gliedert sich in zwei Schritte: Datenaufbereitung und Analyse der Schwierigkeiten.

Datenaufbereitung

Der erste Schritt der Datenanalyse ist die Datenaufbereitung. Zu dieser gehört es, dass beispielsweise die Daten zur Aufmerksamkeit und zum Verständnis einem Methodeninhalt zugeordnet werden können. Die Zuordnung der Fixationen zu den ausgewählten AOIs kann manuell oder automatisiert erfolgen. Die Daten werden hinsichtlich einer niedrigen, mittleren und hohen Aufmerksamkeit klassifiziert. Die Antworten der Teilnehmenden werden mit Hilfe des Bewertungsbogens ausgewertet. Die korrekte Anwendung der Methodenschritte wird mit Hilfe der Konzeptzeichnungen und des Videos der Teilnehmenden im Bewertungsbogen dokumentiert. Die Leistung der Konzeptzeichnung wird anhand der Dokumente festgelegt.

Die Analyse der Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode innerhalb einer Gruppe von Konstruierenden soll zeigen, ob die korrekte Anwendung der Methodeninhalte signifikant mit der Leistung der Konstruktionsergebnisse korreliert und ob dies einer hohen Effektstärke entspricht. Die Daten müssen so aufbereitet werden, dass in der quantitativen Datenanalyse die Spearman-Korrelation (Cohen,

1992) verwendet werden kann, wenn nicht normalverteilte Daten vorliegen. Durch die Spearman-Korrelation können ungerichtete lineare Zusammenhänge untersucht werden, so dass keine kausalen Aussagen getroffen werden dürfen. Die Korrelationsanalyse hat geringe Anforderungen an die Verteilung der Daten in der Grundgesamtheit und wird als nichtparametrisches Verfahren bezeichnet. Ein Vorteil dieser Analyse ist, dass die Daten bei kleinen Stichproben nicht normalverteilt und die Variablen lediglich ordinalskaliert sein müssen.

Analyse der Schwierigkeiten und ihrer Auswirkungen auf den Nutzen

Im zweiten Schritt der Datenanalyse werden die Schwierigkeiten und deren Auswirkungen auf den Nutzen identifiziert, mögliche Ursachen der bestehenden Schwierigkeiten in Texten, Grafiken, Fragen und Methodenschritten eingegrenzt und Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Konstruktionsmethode abgeleitet. Dazu gehört, dass eine Übersicht über die Lesetiefe, die Anzahl an richtig beantworteten Fragen und die Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten erstellt wird.

Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Im Folgenden werden Werte im Hinblick auf Aufmerksamkeit und Verständnis aufgeführt und mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen angegeben (siehe Tabelle 6.3):

Tabelle 6.3: Werte zu Aufmerksamkeit und Verständnis sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen

| Werte | | mögliche Ursachen | Handlungsempfehlungen |
|---------------------|---------|---|--|
| Aufmerk- samkeit | | Verständnis | |
| niedrig | niedrig | schlechte Darstellung schlechte Platzierung | Attraktivität der Texte und Grafiken steigern |
| niedrig | hoch | Methodeninhalt bereits bekannt | weitere Vermittlung des Methodeninhaltes nicht empfohlen |
| hoch | niedrig | Methodeninhalt nicht verständlich beschrieben, beispielsweise aufgrund eines irreführenden Satzbaus oder einer nicht eindeutigen Abbildung | Gewährleistung einer eindeutigen und gut verständlichen Beschreibung des Methodeninhaltes |
| hoch | hoch | Methodeninhalt ist gut beschrieben | – |

Im Folgenden werden Werte im Hinblick auf Verständnis und Anwendung aufgeführt und mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen angegeben (siehe Tabelle 6.4):

Tabelle 6.4: Werte zu Verständnis und Anwendung sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen

| Werte | | mögliche Ursachen | Handlungsempfehlungen |
|----------------------------|---------|--|---|
| Verständ- Anwendung nis | | | |
| niedrig | niedrig | Methodeninhalt nicht verständlich beschrieben, beispielsweise aufgrund eines irreführenden Satzbaus oder einer nicht eindeutigen Abbildung | Gewährleistung einer eindeutigen und gut verständlichen Beschreibung des Methodeninhaltes |
| niedrig | hoch | Methodeninhalt bereits bekannt | weitere Vermittlung des Methodeninhaltes nicht empfohlen |
| hoch | niedrig | Methodeninhalt nicht anwendbar, beispielsweise aufgrund einer nicht eindeutigen Beschreibung | Aufteilung der Methodeninhalte in kleinere handhabbare Schritte |
| hoch | hoch | Methodeninhalt ist verständlich – beschrieben und gut anwendbar | |

Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Im Folgenden werden Werte im Hinblick auf Anwendung und Leistung aufgeführt, deren Auswirkung auf den Nutzen, mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen angegeben (siehe Tabelle 6.5):

Tabelle 6.5: Werte zu Anwendung und Leistung und deren Auswirkungen auf den Nutzen sowie mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen

| Werte | | Auswirkung auf den Nutzen | mögliche Ursachen | Handlungsempfehlungen |
|-----------|----------|------------------------------------|---|--|
| Anwendung | Leistung | | | |
| niedrig | niedrig | keine Auswirkung auf den Nutzen | Methodeninhalte nicht anwendbar, beispielsweise aufgrund einer nicht eindeutigen Beschreibung | Aufteilung der Methodeninhalte in kleinere handhabbare Schritte |
| niedrig | hoch | keine Auswirkung auf den Nutzen | Methodeninhalte bereits bekannt | Vermittlung des Methodeninhaltes nicht empfohlen |
| hoch | niedrig | keine Auswirkung auf den Nutzen | Zweck des Methodeninhaltes entspricht nicht dem Nutzen | weitere Vermittlung und Anwendung des Methodeninhaltes nicht empfohlen |
| hoch | hoch | positive Auswirkung auf den Nutzen | Methodeninhalte ist gut anwendbar und führt zu einem Nutzen | – |

Beispiel einer Analyse von Schwierigkeiten und ihren Auswirkungen

Mit der ACAP-Untersuchungsmethode können Methodeninhalte mit einer geringen Lesetiefe, falsch verstandene Fragen und nicht korrekt angewendete Methodenschritte identifiziert werden. In Abbildung 6.3 wurden die Schwierigkeiten der Konstruktionsmethode den AOIs zugeordnet: 1) Dreiecke zeigen AOIs mit geringer Lesetiefe, 2) Kreise zeigen AOIs mit falsch beantworteten Fragen und 3)

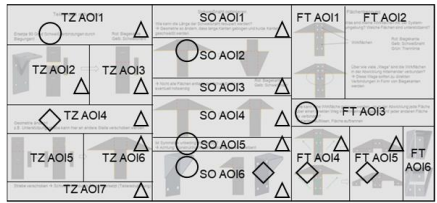
Rauten zeigen AOIs mit nicht korrekt angewendeten Methodenschritten. Ein Vorteil der ACAP-Untersuchungsmethode ist, dass diese eine grafische Darstellung bietet, die einen Überblick über die Ergebnisse gewährt. Diese Darstellung ermöglicht es, schnell von Ergebnissen zu Erkenntnissen zu gelangen, indem die Schwierigkeiten präzise identifiziert und mögliche Ursachen eingegrenzt werden können.

Die Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode und deren Auswirkungen auf den Nutzen können beispielsweise wie folgt dargestellt werden.

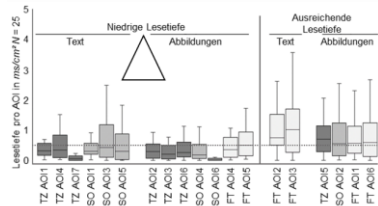
Die Analyse gelangt zu den folgenden Ergebnissen:

- Die Methodeninhalte wurden zu großen Teilen nicht gelesen, aber verstanden.
Aufmerksamkeit: 6 von 7 AOIs nicht gelesen
Verständnis: 2 von 3 Antworten richtig ausgewählt
- Das Verständnis und die Anwendung fielen hoch aus.
Anwendung: 4 von 5 Methodenschritten korrekt angewendet
- Die korrekte Anwendung der Methodenschritte führte zu einer hohen Leistung.
Leistung: positive lineare Korrelation zwischen Anwendung und Leistung vorhanden
- Die korrekte Anwendung könnte damit erklärt werden, dass die Methodeninhalte bereits bekannt waren und vermutlich leicht anzuwenden sind.
- Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist das Kürzen oder Streichen des entsprechenden Methodeninhaltes.

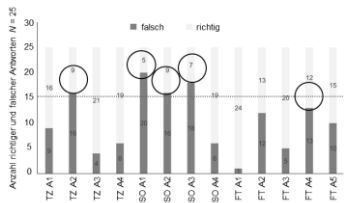
Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden



1) Dreiecke zeigen AOs mit geringer Lesetiefe



2) Kreise zeigen AOs mit falsch beantworteten Fragen



3) Rauten zeigen AOs mit nicht korrekt angewendeten Methodenschritten

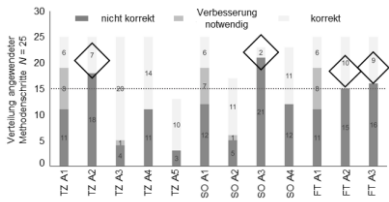


Abbildung 6.3: Übersicht über die Schwierigkeiten gemäß der ACAP-Untersuchungsmethode. Die Schwierigkeiten der Konstruktionsmethode werden bestimmten AOs zugeordnet: 1) Dreiecke zeigen AOs mit geringer Lesetiefe, 2) Kreise zeigen AOs mit falsch beantworteten Fragen und 3) Rauten zeigen AOs mit nicht korrekt angewendeten Methodenschritten.

6.2 Fazit zur Entwicklung der ACAP-Untersuchungsmethode

In Kapitel 6 wurde die Entwicklung der ACAP-Untersuchungsmethode beschrieben. Bei dieser wurden mehrere bestehende Untersuchungsmethoden miteinander kombiniert aufgelistet in Tabelle 6.1 und dargestellt in Abbildung 6.1. Die ACAP-Untersuchungsmethode zur Untersuchung der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode beinhaltet zwei Schritte: 1) die Operationalisierung und Datenerhebung und 2) die Datenanalyse.

Im Rahmen der Operationalisierung und Datenerhebung sollen objektive und quantitative Metriken für die Analyse der Aufmerksamkeit, des Verständnisses, der Anwendung und des Nutzens der untersuchten Konstruktionsmethode gewonnen werden. Die Datenanalyse gliedert sich in zwei Schritte: die Datenaufbereitung sowie die Analyse der Schwierigkeiten.

In der Datenanalyse werden zunächst mögliche Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit identifiziert. Es folgen eine Eingrenzung der Ursachen dieser Schwierigkeiten anhand der vorhandenen Texte und Grafiken sowie eine Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode. Nach dem bisherigen Stand der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden konnte sich diese Datenanalyse allein auf die Untersuchung des Verständnisses, der Anwendung und des Nutzens beziehen. Das Neue der ACAP-Untersuchungsmethode ist, dass hierdurch auch Daten zur Aufmerksamkeit für die Datenanalyse zur Verfügung gestellt werden können, um so das Verständnis, die Anwendung und den Nutzen bewerten zu können. Ebenso wird hierdurch das Aufstellen möglicher Interpretationen der Ergebnisse für eine effizientere Problemeingrenzung durch mehrere Metriken ermöglicht. Dies eröffnet die Möglichkeit, quantitative und objektive Aussagen zu den bestehenden Schwierigkeiten und deren Auswirkungen zu treffen. Als Metriken kommen im Rahmen der ACAP-Untersuchungsmethode zum einen solche zum Einsatz, die in der Forschung zu Konstruktionsmethoden gebräuchlich sind – siehe Kroll und Weisbrod (2020) sowie Jänsch und Birkhofer (2004); zum anderen wurde auf Metriken aus anderen Forschungsbereichen zurückgegriffen – siehe Holsanova et al. (2006) zur Lesetiefe bei allgemeinen Texten sowie Mussnug et al. (2018) zur Usability physischer Produkte. Eine diesbezügliche Übersicht findet sich in Tabelle 6.1.

Die entwickelte prozessbasierte Untersuchungsmethode ermöglicht die Validierung von Konstruktionsmethoden und erfüllt die auf Grundlage des Stands der Forschung wie auch der durchgeführten Fallstudie ermittelten Anforderungen. So ist es anhand dieser Untersuchungsmethode möglich, Zusammenhänge zwischen der

Forschungsfrage 1: Vorstellung der ACAP-Untersuchungsmethode zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Anwendbarkeit und dem Nutzen der untersuchten Konstruktionsmethode zu ermitteln. Die ACAP-Untersuchungsmethode erweitert dabei die Validierung, indem sie die Ursachen von Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode aufzeigt und so die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Erhöhung des Nutzens ermöglicht.

7 Forschungsfrage 2: Evaluierung der ACAP-Untersuchungsmethode

Dieses Kapitel befasst sich mit der zweiten Forschungsfrage, die wie folgt lautet:

Forschungsfrage 2: Welche Erkenntnisse können mit der ACAP-Untersuchungsmethode in einer Laborstudie zur Validierung einer Konstruktionsmethode gewonnen werden?

Die ACAP-Untersuchungsmethode wurde in einer Laborstudie angewendet und evaluiert. Diese Laborstudie baut auf der Fallstudie zur text- und grafikbasierten Konstruktionsmethode für die blechgerechte Konstruktion auf, die in Kapitel 5 vorgestellt wurde. Mit Hilfe der ACAP-Untersuchungsmethode können innerhalb der prozessbasierten Validierung die gewonnenen Erkenntnisse zur Konstruktionsmethode diskutiert werden. Mittels einer solchen Diskussion können die Metriken der ACAP-Untersuchungsmethode evaluiert werden. Die hierbei ermittelten Stärken und Schwächen bieten eine geeignete Grundlage, um zukünftigen Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung der ACAP-Untersuchungsmethode abzuleiten.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Evaluation of ACAP Analysis Method for Process-Based Validation of Textual and Graphical Design Methods“ (Doellken, Nelius & Matthiesen, 2023 (Wiedereinreichung am 14. Juli 2023)). Bei Teilen der Kapitel 7.1, 7.2 und 7.3 des folgenden Textes handelt es sich um unveränderte Auszüge aus der genannten Veröffentlichung. Neben der Übersetzung ins Deutsche wurden lediglich die Nummerierungen und Begrifflichkeiten an den Kontext der vorliegenden Arbeit angepasst.

7.1 Studienaufbau

In folgendem Abschnitt wird der Studienaufbau beschrieben. Hierfür wird auf die Studienteilnehmenden, den Studienablauf, die verwendete Experiment-Software, die verwendete Hardware und die Datenanalyse eingegangen. Die Anwendung der ACAP-Untersuchungsmethode erfolgt im Rahmen einer Laborstudie, die auf der Fallstudie aus Kapitel 5.2 basiert. Die Studie wurde im Rahmen einer Co-betreuten Masterarbeit von L. Zhang (2021) durchgeführt.

7.1.1 Studienteilnehmende

An der Studie nahmen 25 Studierende (3 weiblich, 22 männlich) mit einem Durchschnittsalter von 22,6 Jahren ($sd = 1,95$) teil. Es handelte sich hierbei um Studierende aus den Fachrichtungen Maschinenbau oder Mechatronik und Informationstechnik. Sie erhielten 20 Euro als finanziellen Anreiz und unterzeichneten eine schriftliche Einverständniserklärung zur freiwilligen Teilnahme und zum Datenschutz.

7.1.2 Studienablauf und Aufgabenstellung

Der Studienablauf gliedert sich in fünf Schritte und basiert auf der Fallstudie aus Kapitel 5. Die Teilnehmenden nahmen jeweils einzeln teil und erhielten die gleichen Anweisungen und Informationen zum Studienablauf. Die fünf Schritte des Studienablaufs werden im Folgenden beschrieben und sind in Abbildung 7.1 darstellt:

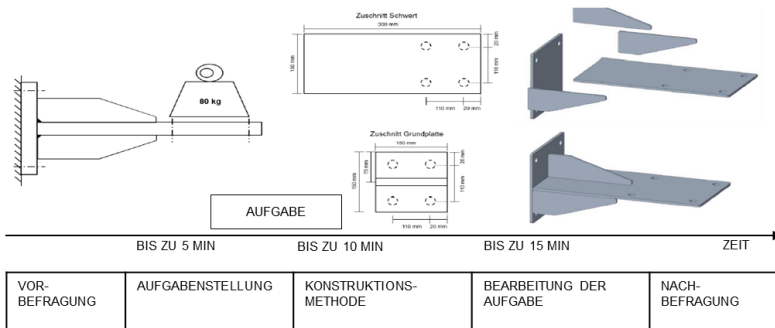


Abbildung 7.1: Zusammenfassung des Studienablaufs und Trennung der Schritte Aufgabenstellung sichten, Konstruktionsmethode begutachten und Aufgabe bearbeiten

- **Vorbefragung:** In der Vorbefragung wurde eine Einverständniserklärung zur Studienteilnahme eingeholt und wurden die bisherigen Erfahrungen in der Konstruktion von Blechprodukten erhoben.
- **Aufgabenstellung:** Der Kalibrierung des Eye-Tracking-Systems folgte die Verteilung der Aufgabenstellung an die Teilnehmenden. Die Aufgabe beinhaltete die Entwicklung eines auf Herstellbarkeit und Fertigungsaufwand optimierten Halterungswinkels. Die Teilnehmenden wurden gebeten, ein oder mehrere Konzepte zu erstellen und nach der Konzepterstellung ein

Konstruktionsergebnis auszuwählen. Ein Erklärvideo zeigte die Funktionen einer handelsüblichen 2D-Laserschneidmaschine und einer Biegemaschine sowie handelsübliche Werkzeuge, Stempel und Matrizen. Die Aufgabenstellung lautete wie folgt (siehe auch Anhang A1):

Ihre Firma hat eine handelsübliche 2D-Laserschneidmaschine und Biegemaschine für Blech erworben. Es werden handelsübliche Werkzeuge, Stempel und Matrizen verwendet. Im Zuge dieser Neuanschaffung sollen Sie neue Konzepte ausarbeiten, so dass bestehende Bauteile kostengünstiger gefertigt werden können. Ein Beispiel ist der unten abgebildete 5-teilige Winkel, der eine Last von 80 kg tragen soll. Die jährliche Stückzahl beträgt 1200 Stück. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf wirtschaftlichen Gestaltungsrichtlinien wie der Reduzierung von Arbeitsprozessen (aktuell 5) oder der Anzahl benötigter Teile (5) und Schweißnähte (8). Das Bohrmuster und der verwendete Werkstoff Baustahl sollen unverändert bleiben. Die Materialstärke kann angepasst werden.

- Interaktion mit der Konstruktionsmethode: Die Teilnehmenden hatten zehn Minuten Zeit, sich mit drei Methodeninhalten, *Teileanzahl reduzieren*, *Schweißnähte optimieren* und *Flächentrennung*, vergleiche Abbildung 5.2 bis Abbildung 5.4, vertraut zu machen. Die Methodeninhalte wurden in der Laborstudie auf einem Monitor angezeigt; es handelte sich sowohl um textbasierte als auch um grafische Elemente.
- Bearbeitung der Aufgabe: Konzepte wurden mit Stift und Papier gezeichnet. Der vorgegebene Halterungswinkel, wie in Abbildung 7.2 oben dargestellt, bestand aus fünf Teilen und acht Schweißnähten. Eine Beispiellösung mit einem Teil und ohne Schweißnähte ist unten in Abbildung 7.2 zu sehen.
- Nachbefragung: In der Nachbefragung wurde mit Hilfe eines Fragebogens das Verständnis der Teilnehmenden bezüglich der Konstruktionsmethode erhoben. In einem zweiten Fragebogen wurden die demografischen Daten erhoben.

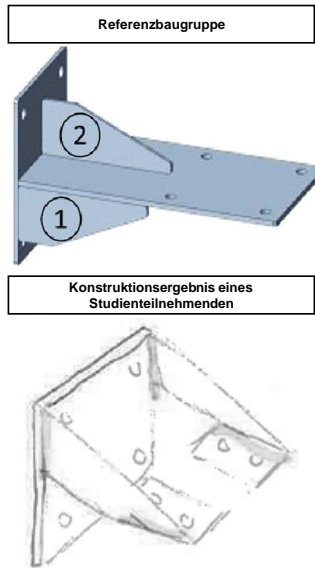


Abbildung 7.2: Referenzbaugruppe zur Konstruktionsaufgabe bestehend aus fünf Teilen, keine Biegung, Nummern 1 und 2 sind austauschbare Schweißnähte und Stützstreben; unten: Konstruktionsergebnis bestehend aus einem Teil und fünf Biegungen

7.1.3 Experiment-Software und Hardware

Der Einfluss des Studienleiters wurde durch den Einsatz der Experiment-Software OpenSesame v.3.2.6 (Mathôt, Schreij & Theeuwes, 2012) minimiert, die den Teilnehmenden die relevanten Informationen zur Verfügung stellte. Die Konstruktionsmethode wurde den Teilnehmenden über einen Bildschirm präsentiert. Dies ermöglichte eine standardisierte und kontrollierte Eye-Tracking-Aufzeichnung. Die Augenbewegungen wurden mit einer Frequenz von 250 Hz mit dem Remote-Eye-Tracking-Gerät Tobii Pro Fusion aufgezeichnet. Es wurde eine Fünf-Punkte-Kalibrierung durchgeführt. Als Eingabegeräte für den Computer wurden eine Maus und eine Tastatur bereitgestellt. Weiterhin wurden Lösungsblätter, Stifte und Marker zur Verfügung gestellt, um die Konzepte bei der Bearbeitung der Aufgabe zu zeichnen. Die Software Tobii Pro Lab wurde für die Fixationserkennung verwendet. Die Fixationen wurden durch einen voreingestellten

Geschwindigkeit-Schwellwert-Identifikations-Algorithmus (I-VT) (Olsen & Matos, 2012) ermittelt.

7.1.4 Metriken

In folgendem Abschnitt wird erläutert, wie die Metriken in der Laborstudie erhoben wurden und welche Skalen dabei Verwendung fanden.

Aufmerksamkeit als Lesetiefe

Die Konstruktionsmethode wurde im Rahmen einer Co-betreuten Bachelorarbeit von Zapata (2020) in AOIs unterteilt, wie in Abbildung 6.2 dargestellt. In dieser Forschungsarbeit wurde die Lesetiefe gemäß dem Stand der Forschung in Bezug auf das Lesen einer Tageszeitung mit $0,5 \text{ ms/cm}^2$ als tief bewertet. Die Begründung liegt darin, dass die Lesetiefe von der Schriftgröße, dem Anteil weißer Fläche und der Größe der AOIs abhängig ist. Diese Werte unterscheiden sich bei Konstruktionsmethoden und Werbeflächen deutlich voneinander. Insgesamt konnten die Eye-Tracking-Aufzeichnungen von allen 25 Teilnehmenden für die Analyse verwendet werden.

Verständnis

Das Verständnis von text- und grafikbasierten Inhalten wurde anhand der Anzahl an richtig beantworteten Fragen in einem Fragebogen erhoben. Der Fragebogen enthielt drei für die Studie entwickelte Fragen, wobei gemäß dem Antwort-Wahl-Verfahren jeweils eine Mehrfachauswahl möglich war, siehe Kapitel 6.1.1. Die Analyse erfolgte standardisiert mittels eines Bewertungsbogens. Beim Antwort-Wahl-Verfahren werden für jede Frage mehrere vorformulierte Antworten zur Wahl gestellt, wobei jeweils die richtig angekreuzten sowie die richtig nicht angekreuzten Antworten bewertet werden. Das Nichtankreuzen richtiger Antworten wie auch das Ankreuzen falscher Antworten führte zu Punktabzug. In den Aufgaben konnten keine Negativpunktzahlen erzielt werden. Der Methodeninhalt mit einer hohen Anzahl an falsch gewählten Antworten wurde als kritisch eingestuft.

Anwendung

Die Korrektheit der Anwendung wurde durch die Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte gemessen, eine Metrik, die in diesem Zusammenhang ein geeignetes Maß darstellt. Die Analyse wurde anhand eines Bewertungsbogens durchgeführt, siehe Anhang A2, wobei sowohl die Konzeptzeichnungen als auch die Videoaufzeichnungen im Rahmen des Bewertungsprozesses berücksichtigt

wurden. Die Bewertung der Anwendbarkeit wurde im Rahmen einer Co-betreuten Masterarbeit von Kuppinger (2021) erarbeitet. Die korrekte Anwendung des Methodeninhaltes *Teileanzahl reduzieren* der Konstruktionsmethode bestand beispielsweise aus dem Ersetzen der Schweißnähte durch Biegungen (Abbildung 7.2, links Nr. 1) und dem zusätzlichen Entfernen der Stützstrebe (Abbildung 7.2, links Nr. 2), beispielhaft beschrieben in Tabelle 6.2.

Leistung

Die Konstruktionsergebnisse wurden bewertet, siehe Tabelle 5.3. Die notwendigen Kriterien für die Leistung waren die Funktionserfüllung und die Herstellbarkeit. Konzepte, die nicht die gewünschte Funktion erfüllten, wie auch nicht herstellbare Konzepte wurden mit dem Ziel ausgewertet, Erkenntnisse über Schwächen der Konstruktionsmethode zu gewinnen. Der Fertigungsaufwand der übrig gebliebenen Konzepte wurde in Euro gemessen und jeweils einer von drei Kategorien zugeordnet: niedrig, mittel und hoch. Der Fertigungsaufwand der erstellten Konzepte stellt im Rahmen der Studie die Leistung und somit den Nutzen der Konstruktionsmethode dar.

7.1.5 Datenanalyse

Die Datenanalyse gliederte sich in zwei Schritte, siehe auch Kapitel 6.1.2. Im ersten Schritt wurden die Datenaufbereitung, die grafische Darstellung und die Klassifizierung der Daten durchgeführt. Im zweiten Schritt erfolgte die Analyse der bestehenden Schwierigkeiten und ihrer Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode. In der quantitativen Datenanalyse wurde die Spearman-Korrelation (Cohen, 1992) verwendet, da nicht normalverteilte Daten vorlagen. Auf diese Weise sollten Abhängigkeiten ermittelt werden – insbesondere zwischen den einzelnen Metriken Aufmerksamkeit, Verständnis, Anwendung und Leistung.

Im Rahmen der Verwendung der Spearman-Korrelation wurde ein *p-Wert* von weniger als *0,05* als statistisch signifikant angesehen und die Effektstärke wurde berechnet. Eine positive lineare Korrelation bedeutet, dass eine hohe Ausprägung der einen Phase mit einer hohen Ausprägung der anderen einhergeht. Je höher also zum Beispiel die Lesetiefe einer Konstruktionsmethode ausgeprägt ist, desto höher ist auch das Verständnis der Konstruktionsinhalte ausgeprägt. Dagegen besagt eine negative Korrelation, dass ein hoher Wert der einen Phase mit einem tiefen Wert der anderen einhergeht. Je höher also zum Beispiel die Lesetiefe einer Konstruktionsmethode ist, desto niedriger ist das Verständnis der Konstruktionsinhalte.

7.2 Ergebnisse der ACAP-Untersuchungsmethode

Die Anwendung der ACAP-Untersuchungsmethode erfolgte in einer Laborstudie, deren Studienablauf in Kapitel 7.1 dargestellt worden ist. In den folgenden Abschnitten wird die Datenanalyse anhand der Konstruktionsmethode mit dem Ziel beschrieben, Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit und deren Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode zu identifizieren. Es folgt eine Beschreibung der Ergebnisse der ACAP-Untersuchungsmethode.

7.2.1 Ergebnisse zur Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit wird anhand der Lesetiefe gemessen. Diese zeigte insgesamt niedrige Werte (in ms/cm^2 : Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* $M=2,54$, $sd=2,27$, Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren* $M=2,17$, $sd=2,67$, Methodeninhalt *Flächentrennung* $M=4,99$, $sd=2,94$). Es ist also festzustellen, dass dem Methodeninhalt *Flächentrennung* die größte Aufmerksamkeit galt.

Abbildung 7.3 zeigt Bereiche der Konstruktionsmethode mit geringer Lesetiefe. Durch die ACAP-Untersuchungsmethode wurden Schwierigkeiten in sechs von acht textbasierten AOs und sieben von elf grafischen AOs identifiziert. Die Schwierigkeiten in den AOs auf der linken Seite von Abbildung 7.3 werden im Hinblick auf mögliche Ursachen weiter untersucht.

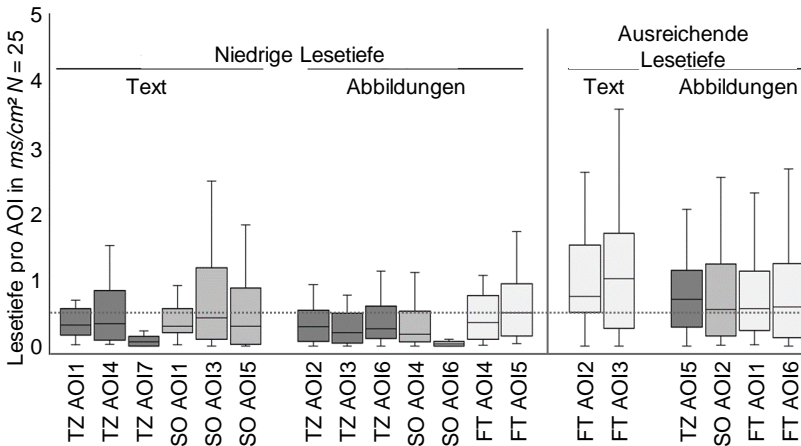


Abbildung 7.3: Lesetiefe für Text und Abbildungen der Methodeninhalte; links: AOIs mit niedriger Lesetiefe in textbasierten und grafischen Inhalten mit einem Median von weniger als 0,5 ms/cm²; rechts: ausreichende Aufmerksamkeit; Lesetiefe von 19 AOIs in ms/cm² bei N = 25; AOI: Bereich des Interesses; TZ: Teileanzahl reduzieren; SO: Schweißnaht optimieren; FT: Flächentrennung

7.2.2 Ergebnisse zum Verständnis

Das Verständnis wird anhand der Anzahl der richtig beantworteten Fragen gemessen. Durch die Fragestellung in den Fragebögen können Schwierigkeiten in nicht verstandenen Inhalten der Konstruktionsmethode identifiziert werden, siehe Abbildung 7.4. Die Teilnehmenden beantworteten drei Fragen mit Mehrfachauswahl im Antwort-Wahl-Verfahren.

Es ist festzustellen, dass das Verständnis der Methodeninhalte den Teilnehmenden einige Schwierigkeiten bereitete. Dabei wurden die Methodeninhalte *Teileanzahl reduzieren* und *Flächentrennung* besser verstanden als der Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren*. Beim Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* wurde die zweite Antwort (TZ A2) häufig falsch ausgewählt. Der Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren* verzeichnete die höchste Zahl an falsch ausgewählten Antworten (SO A1, 20; SO A3, 18). So wurden hier drei von vier Antworten (SO A1|A2|A3) zum Großteil falsch ausgewählt. Die Frage zum Methodeninhalt *Flächentrennung* beantworteten die Teilnehmenden zu gleichen Teilen falsch und richtig, wobei die zweite Antwort zu einem großen Teil richtig ausgewählt wurde.

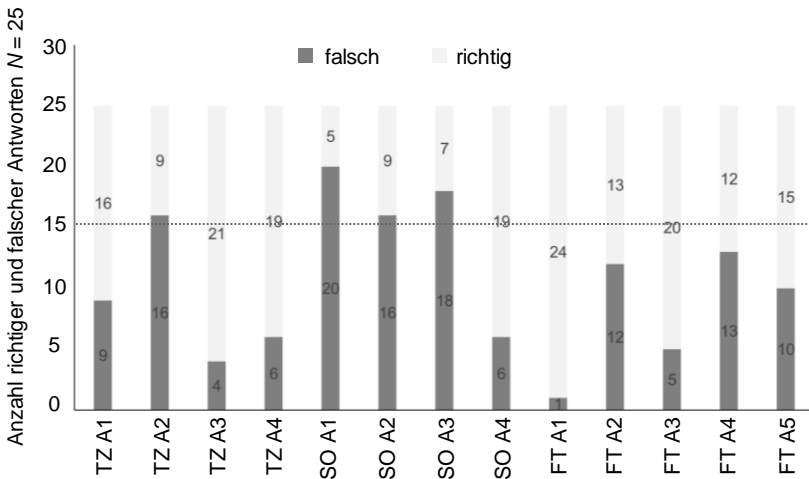


Abbildung 7.4: Verständnis der Teilnehmenden für Methodeninhalte auf Grundlage der quantitativen Metrik Anzahl an richtig beantworteten Fragen. Falsch ausgewählte Antworten weisen auf Schwierigkeiten hin; N = 25; TZ: *Teileanzahl* reduzieren; SO: *Schweißnaht optimieren*; FT: *Flächentrennung*; A: Antworten

7.2.3 Ergebnisse zur Anwendung

Die Korrektheit der Anwendung der Konstruktionsmethode wird anhand der Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten gemessen. Wie Abbildung 7.5 zeigt, bietet die ACAP-Untersuchungsmethode die Möglichkeit, Schwierigkeiten in der Anwendung der Methodenschritte zu identifizieren.

Dies war der Fall für jeweils zwei Methodenschritte in *Teileanzahl reduzieren* (TZ A1|A2), *Schweißnaht optimieren* (SO A1|A3) und *Flächentrennung* (FT A2|A3). Der Methodenschritt TZ A5 wurde nur von 13 Teilnehmenden angewendet. Der Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren* verzeichnete das höchste Maß an nicht korrekt angewendeten Methodenschritten (SO A3). Beim Methodeninhalt *Flächentrennung* hatten die Studienteilnehmenden Schwierigkeiten mit der korrekten Anwendung der Methodenschritte.

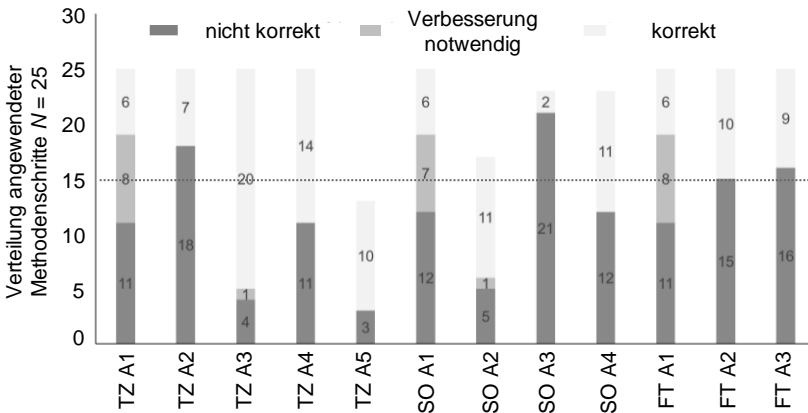


Abbildung 7.5: Korrekte Anwendung der Methodeninhalte mit der quantitativen Metrik Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten. Eine nicht korrekte Anwendung der Methodenschritte weist auf Schwierigkeiten in den Methodeninhalten hin; N = 25; TZ: Teileanzahl reduzieren; SO: Schweißnaht optimieren; FT: Flächentrennung; A: Anwendung der Methodenschritte

7.2.4 Ergebnisse zur Leistung

Die Leistung wird anhand der Konstruktionsergebnisse bewertet. Tabelle 7.1 zeigt die Konstruktionsergebnisse der Teilnehmenden: Sechs Konstruktionsergebnisse erfüllten die Funktion nicht, zwei Konstruktionsergebnisse waren für die Fertigung nicht geeignet. Vier Konstruktionsergebnisse beinhalteten funktionsfähige und herstellbare Konzepte mit niedrigem Fertigungsaufwand. Acht Konstruktionsergebnisse verursachten einen mittleren und fünf einen hohen Fertigungsaufwand.

Tabelle 7.1: Bewertung der Konstruktionsergebnisse von 25 Studienteilnehmenden

| Funktion | Herstellbarkeit | Fertigungsaufwand | | |
|---|-----------------|-------------------|--------|---------|
| | | hoch | mittel | niedrig |
| Nichterfüllung der Mindestanforderungen | | hoch | mittel | niedrig |
| 6 | 2 | 5 | 8 | 4 |

7.2.5 Ergebnisse zum Methodeninhalt Teileanzahl reduzieren

Die Ergebnisse zeigen:

- Der Methodeninhalt wurde zu großen Teilen nicht gelesen, aber verstanden.
Aufmerksamkeit: 6 von 7 AOs nicht gelesen
Verständnis: 2 von 3 Antworten richtig ausgewählt
- Das Verständnis und die Anwendung fielen hoch aus.
Anwendung: 4 von 5 Methodenschritten korrekt angewendet
- Die korrekte Anwendung der Methodenschritte führte zu einer hohen Leistung.
Leistung: positive lineare Korrelation zwischen Anwendung und Leistung vorhanden

Was die Auswirkung auf den Nutzen der Konstruktionsmethode betrifft, ist festzustellen, dass die Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte von *Teileanzahl reduzieren* signifikant mit der Leistung des Konstruktionsergebnisses korreliert und einem starken Effekt entspricht (Anwendung zur Leistung: $r_s = 0,61$, $p = 0,001$, $N = 25$), siehe Tabelle 7.2. In Tabelle 7.2 sind die drei Methodeninhalte und die jeweilige Korrelation zwischen der Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte und der Leistung dargestellt.

Tabelle 7.2: Signifikante Korrelation zwischen der Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte und der Leistung

| Spearman-Rho | | Methodenschritte: | | |
|--------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| | | Anzahl korrekte Anwendung | | |
| | | Teileanzahl reduzieren | Schweißnaht optimieren | Flächentrennung |
| | Korrelationskoeffizient r_s | 0,61 | 0,2 | 0,75 |
| Leistung | Signifikanz bei $p < 0,05$ | 0,001 | 0,34 | < 0,001 |
| | N | 25 | 25 | 25 |

7.2.6 Ergebnisse zum Methodeninhalt Schweißnaht optimieren

Die Ergebnisse zeigen:

- **Erkannte Schwierigkeit:** Der Methodeninhalt wurden nicht gelesen und auch nicht verstanden. Aufmerksamkeit: 5 von 6 AOIs nicht gelesen
Verständnis: 3 von 4 Antworten falsch ausgewählt
- Die Methodenschritte wurden trotz falschen Verständnisses korrekt angewendet.
Anwendung: 3 von 4 Methodenschritten korrekt angewendet
- **Erkannte Schwierigkeit:** Die korrekte Anwendung der Methodenschritte führte nicht zu einer höheren Leistung.
Leistung: keine Korrelation zwischen Anwendung und Leistung vorhanden

Die Korrelationsanalyse zeigt folgende Schwierigkeiten in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Anwendung und Leistung: Die Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte korrelierte nicht mit der Leistung. Bezüglich der Auswirkung dieser Schwierigkeit auf den Nutzen der Konstruktionsmethode ist festzustellen, dass die korrekte Anwendung der Methodenschritte des Methodeninhalts *Schweißnaht optimieren* keinen statistisch nachweisbaren Beitrag zur Leistung erbrachte (Anwendung zur Leistung: $r_s = 0,2$, $p < 0,34$, $N = 25$).

7.2.7 Ergebnisse zum Methodeninhalt Flächentrennung

Die Ergebnisse zeigen:

- Der Methodeninhalt wurde gelesen und verstanden; lediglich zwei Abbildungen FT AOI4 und FT AOI5 wurden als nicht gelesen bewertet.

Aufmerksamkeit: 4 von 6 AOIs gelesen

Verständnis: 4 von 4 Antworten richtig ausgewählt

- Erkannte Schwierigkeit: Dennoch wurden die Methodenschritte nicht korrekt angewendet.

Anwendung: 2 von 3 Methodenschritten nicht korrekt angewendet

- Die korrekte Anwendung der Methodenschritte führte trotzdem zu einer hohen Leistung.

Leistung: positive lineare Korrelation zwischen Anwendung und Leistung vorhanden

Was die Auswirkungen auf den Nutzen der Konstruktionsmethode betrifft, ist festzustellen, dass die Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte positiv mit der Leistung korrelierte, siehe Tabelle 7.2. Die Anzahl der korrekt angewendeten Methodenschritte von *Flächentrennung* korrelierte signifikant mit der Leistung des Konstruktionsergebnisses und entspricht einem starken Effekt (Anwendung zur Leistung: $r_s = 0,75$, $p < 0,001$, $N = 25$).

7.2.8 Fazit zu den Ergebnissen

Anhand der ACAP-Untersuchungsmethode konnte das Überlesen und Schwierigkeiten im Verständnis sowie in der Anwendung der Konstruktionsmethode erfasst und deren Auswirkungen auf den Nutzen nachvollzogen werden. Insgesamt konnten so in 13 von 19 AOIs, vier von 13 Inhalten und drei von zwölf Methodenschritten Schwierigkeiten identifiziert werden. Dazu seien folgende Beispiele genannt:

- Der Methodeninhalt *Teilanzahl reduzieren* wurde nicht gelesen. Die Inhalte der Methode wurden aber intuitiv richtig verstanden und korrekt angewendet. Die Auswirkung auf den Nutzen der Konstruktionsmethode durch die intuitiv korrekte Anwendung des Methodeninhaltes zeigt eine höhere Leistung.
- Der Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren* wurde nicht gelesen und falsch verstanden. Die Auswirkung auf den Nutzen der Konstruktionsmethode durch die intuitiv korrekte Anwendung des Methodeninhaltes zeigt keine höhere Leistung.
- Die Schwierigkeit in der Anwendbarkeit des Methodeninhaltes *Flächentrennung* lag darin, dass er gelesen, richtig verstanden, aber trotzdem nicht korrekt angewendet wurde. Bezüglich der Auswirkung auf den Nutzen der Konstruktionsmethode ist festzustellen, dass eine korrekte Anwendung des Methodeninhaltes mit einer höheren Leistung einhergeht.

Anhand der ACAP-Untersuchungsmethode war es somit möglich: 1) bestehende Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden zu identifizieren; 2) den Nutzen der Konstruktionsmethode auf Basis der Konstruktionsergebnisse zu ermitteln; 3) die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen zu erheben.

7.3 Diskussion

Dieses Kapitel gliedert sich in eine Diskussion zur Konstruktionsmethode und eine Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode.

7.3.1 Diskussion zur Konstruktionsmethode

Im Folgenden werden die Ursachen des Überlesens und der Schwierigkeiten im Verständnis sowie in der Anwendung der Konstruktionsmethode auf Basis der enthaltenen Texte und Grafiken diskutiert sowie mögliche Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode aufgezeigt.

Diskussion zum Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren*

Die Antwort 2 zur Frage im Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* wurde häufig falsch ausgewählt. Diese lautete: Was muss beachtet werden, wenn Schweißnähte durch Biegungen ersetzt werden? Die Ursache der falschen Beantwortung der Frage könnte in der nach dem Fragebogen vorgesehenen richtigen Antwort der *Herstellbarkeit* liegen. Die Teilnehmenden antworteten mit *Kantenlänge*. Diese Antwort weist auf eine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Methodeninhalten hin. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist die Verbesserung der Antwortmöglichkeit im Fragebogen für die nächste Studie.

Der Methodeninhalt *Teileanzahl reduzieren* wurde nicht gelesen, aber verstanden und korrekt angewendet. Die Ursache des Überlesens könnte damit erklärt werden, dass Vorwissen vorhanden war. Anhand der ACAP-Untersuchungsmethode kann so festgestellt werden, ob die Studienteilnehmenden mit bereits bekannten Vorgehensweisen arbeiten oder die Konstruktionsmethode den Konstruierenden neue Vorgehensweisen vermittelt. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode für die untersuchte Zielgruppe ist das Kürzen oder Streichen des entsprechenden Methodeninhaltes.

Die Schwierigkeit im Methodenschritt 2 lag in der korrekten Anwendung. Der Methodenschritt fordert die Teilnehmenden auf, Schweißnähte auf einer

Konzeptzeichnung einzuzeichnen. Die Ursache dieser vorhandenen Schwierigkeit könnte darin liegen, dass dieser notwendige Methodenschritt zwar auf dem Formblatt für die Konzeptzeichnung formuliert ist, jedoch die Anweisung auf dem Methodeninhalt fehlt. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist das Ergänzen der Anweisung im Methodeninhalt.

Es war festzustellen, dass eine korrekte Anwendung des Methodeninhaltes zu einer Leistungssteigerung führte. Die korrekte Anwendung des Methodeninhaltes war hoch, was damit erklärt werden kann, dass die Inhalte bereits bekannt waren und vermutlich leicht anzuwenden sind.

Diskussion zum Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren*

Die Schwierigkeit in diesem Methodeninhalt lag im Überlesen und somit im Verstehen. Die Ursache des Überlesens könnte darin liegen, dass der Methodeninhalt konkurrierende Inhalte umfasst und eine schlechte Darstellung aufweist. Die Teilnehmenden mussten aus dem visuell beschriebenen Inhalt *Schweißnaht optimieren Area of Interest 2* einen Transfer zur Frage leisten, da das Wort *Abwicklung* aus der Frage nicht textlich, sondern grafisch dargestellt ist. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist die Gewährleistung einer eindeutigen Beschreibung in Text und Grafik.

Der Methodenschritt des kraftflussgerechten Entfernens von Flächen in *Schweißnaht optimieren Area of Interest 6* wurde nicht gelesen und die Antwort 2 wurde nicht verstanden. Die Ursache des Überlesens könnte darin liegen, dass die Darstellung des Kraftflusses in der Grafik nicht eindeutig ist. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode besteht darin, die grafische Darstellung des Kraftflusses zu überarbeiten.

Methodeninhalt *Schweißnaht optimieren Area of Interest 5* wurde nicht gelesen und Antwort 3 wurde nicht verstanden. Der Methodeninhalt handelt von der Symmetrie eines Bauteils, die ebenfalls die Optimierung von Schweißnähten unterstützen kann. Die Ursache des Überlesens könnte darin liegen, dass die Grafik zur Vermittlung der Symmetrie nicht eindeutig gestaltet ist. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist eine Steigerung der Aufmerksamkeit auf die verbesserte Grafik und eine verständlichere Beschreibung der Symmetrie des Bauteils.

Die ACAP-Untersuchungsmethode deckte auf, dass der Methodeninhalt nicht gelesen und verstanden wurde, während die Methodenschritte trotzdem korrekt angewendet wurden. Die korrekte Anwendung des Methodeninhaltes führte zu keiner Leistungssteigerung. Die Ursache dieser Auswirkung könnte darin liegen,

dass die Optimierung von Schweißnähten nur eine geringe Bedeutung für die Reduzierung des Fertigungsaufwandes hat. Erst wenn eine Schweißnaht eliminiert wird, kann ein Fertigungsschritt ausbleiben, wodurch der Fertigungsaufwand deutlich reduziert wird (Boothroyd, 1994). Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode ist das Streichen des Methodeninhaltes, da die Bedeutung von *Schweißnaht optimieren* für die Reduktion des Fertigungsaufwandes gering ist. Dementsprechend sollte stattdessen ein Methodeninhalt zum Eliminieren von Schweißnähten konzipiert werden.

Diskussion zum Methodeninhalt *Flächentrennung*

Der Methodeninhalt *Flächentrennung* wurde gelesen und verstanden. Dementsprechend ist hier weder eine Verbesserung der Aufmerksamkeit noch eine Verbesserung der Verständlichkeit erforderlich.

Die ACAP-Untersuchungsmethode deckte die Schwierigkeit auf, dass zwei von drei Methodenschritten der *Flächentrennung* nicht korrekt angewendet wurden, FT A2 und FT A3. Die grafische Darstellung für die Vermittlung dieser Methodenschritte ist in zwei verschiedenen Grafiken, FT AOI4 und FT AOI5, zu finden. Die Ursache dieser Schwierigkeit könnte darin liegen, dass die grafische Darstellung für die Vermittlung dieser Methodenschritte nicht eindeutig ist und sich auf zwei verschiedene Grafiken, FT AOI4 und FT AOI5, verteilt. Eine Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung ist die Verbesserung der Vermittlung der Methodenschritte *Flächentrennung* durch Grafik und Text. Sinnvoll, um die Anwendung der Methodenschritte zu vereinfachen, könnten auch kleinere Teilschritte in Verbindung mit kleinen Übungsaufgaben sein.

7.3.2 Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode

Die Ergebnisse der ACAP-Untersuchungsmethode werden anhand der Datenerhebung und -analyse in Bezug auf die Metriken Lesetiefe, Anzahl an richtig beantworteten Fragen, Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten und Leistung evaluiert.

Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode in Bezug auf die Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit hinsichtlich der Konstruktionsmethode wird anhand der Lesetiefe gemessen. Diese wird in der Zeiteinheit *ms* bestimmt, wobei aus der Dauer des Lesens auf eine Fläche in *cm²* auf die Intensität und Tiefe der Aufmerksamkeit geschlossen wird. Die Lesetiefe betrug weniger als 3 ms/cm^2 . Die

Frage, ob dies ein geringer Wert ist, kann wegen fehlender Vergleichswerte für die vorliegende Konstruktionsmethode nicht abschließend beurteilt werden. Aus dem Stand der Forschung liegen nur die Vergleichswerte von Holsanova et al. (2006) und Holmqvist et al. (2011, S. 527) vor, die eine Lesetiefe von weniger als 5 ms/cm^2 auf einer Werbefläche gemessen haben, siehe Tabelle 6.1. Es fehlen damit Vergleichswerte aus der Anwendung von Konstruktionsmethoden. Sobald solche Vergleichswerte durch zusätzliche Untersuchungen vorliegen, können entsprechende *Ratio-to-Baseline*-Berechnungen nach Holmqvist et al. (2011, S. 528) durchgeführt werden.

Mit einer zusätzlichen Datenanalyse kann das wiederholte Lesen eines Methodeninhaltes ausgewertet werden. Die Analyse der Daten lässt so einen Rückschluss darauf zu, ob Teilnehmende zu bestimmten Inhalten immer wieder zurückgekehrt sind. Zudem könnte in einer weiteren Datenanalyse die Reihenfolge des gelesenen Inhaltes ausgewertet werden (Holmqvist et al., 2011, S. 528). Die zusätzliche Auswertung könnte in zukünftigen Forschungsarbeiten genutzt werden.

Eine Schwäche der Metrik Lesetiefe ist, dass sie nur Vergleiche innerhalb einer Konstruktionsmethode zulässt. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionsmethoden würde voraussetzen, dass die Gestaltung von Grafik und Text etwa hinsichtlich der Größe der Fläche und der Größe der Schrift identisch ist.

Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode in Bezug auf das Verständnis

Das Verständnis wurde anhand der Anzahl richtig verstandener Methodeninhalte gemessen. So sollte ermittelt werden, welche Inhalte der Konstruktionsmethode nicht verstanden wurden. Das Verständnis der Teilnehmenden lag im Durchschnitt bei mindestens zwei von vier Methodeninhalten. Eine Herausforderung kann in der Erstellung eines geeigneten Fragebogens liegen, da Fragen ungenau formuliert und Antworten nicht eindeutig gefasst werden. Nach dem Stand der Forschung muss bei der Entwicklung eindeutiger und einfacher Fragen die Möglichkeit zur Interpretation reduziert werden (Hussy et al., 2013, S. 76). Das Beantworten der Fragen sollte die Teilnehmenden nicht in eine Prüfungssituation versetzen. Die Laborumgebung sollte eine effektive Bearbeitung der Aufgabenstellung ermöglichen und arbeitsnah gestaltet sein.

Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode in Bezug auf die Anwendung

Die Korrektheit der Methodenanwendung wurde anhand der Anzahl korrekt angewandeter Methodenschritte gemessen. So sollte ermittelt werden, welche Methodenschritte der Konstruktionsmethode nicht korrekt angewendet wurden.

Eine Schwäche dieser Metrik ist die hierfür notwendige Definition eines Methodenschrittes. Diese ist abhängig von der Konstruktionsaufgabe. Je kleiner die Methodenschritte sind, umso präziser sind die Daten für die ACAP-Untersuchungsmethode. Die Forschenden sollten eine in Bezug auf die Forschungsfrage geeignete Anzahl an Methodenschritten festlegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die gewählten Methodenschritte möglichst einer realen Konstruktionssituation entsprechen sollten.

Die korrekt angewendeten Methodenschritte wurden in dieser Forschungsarbeit anhand der erstellten Dokumente und Videos bewertet. Das Ausfüllen des entsprechenden Bewertungsbogens ist zeitintensiv und enthält Interpretationen. Eine zunehmend automatisierte Datenanalyse kann hier Schwächen in der Bewertung reduzieren.

Zusätzlich zur Metrik Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte sind nach Gericke et al. (2017) zwei weitere Metriken denkbar. Diese betreffen die Art und Weise der Methodenanwendung sowie die Reihenfolge der Methodenschritte. Beide Metriken könnten in zukünftigen Forschungsarbeiten genutzt werden.

Diskussion zur ACAP-Untersuchungsmethode in Bezug auf die Leistung

Die Leistung wurde anhand des Fertigungsaufwandes der Konstruktionsergebnisse gemessen. So sollte ermittelt werden, welchen Nutzen die Konstruktionsmethode hat.

Die Leistung wurde in dieser Forschungsarbeit anhand der erstellten Dokumente bewertet. Mit Hilfe des Bewertungsbogens ist das Abschätzen der Fertigungskosten möglich, wobei diese Abschätzung eine Interpretation voraussetzt. Eine automatisierte Datenanalyse könnte hier die Bewertung verbessern.

Die Stärke der ACAP-Untersuchungsmethode liegt in der Kombination von Untersuchungsmethoden, wodurch Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit, also in Bezug auf die Aufmerksamkeit, das Verständnis, die Anwendung der Methodeninhalte sowie die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen identifiziert werden können. Weiterhin ermöglicht die ACAP-Untersuchungsmethode eine Ermittlung der Ursachen der gegebenen Schwierigkeiten sowie eine Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der betreffenden Konstruktionsmethode.

Eine Schwäche der ACAP-Untersuchungsmethode ist, dass sie nicht die Möglichkeit bietet, den Nutzen der Konstruktionsmethode in Abhängigkeit von einzelnen Methodeninhalten zu bewerten.

7.4 Fazit zur ACAP-Untersuchungsmethode

Mit der prozessbasierten ACAP-Untersuchungsmethode war es möglich, Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode und deren Auswirkungen auf den Nutzen zu identifizieren. Weiterhin konnten mögliche Ursachen eingegrenzt und Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode abgeleitet werden. Konkret ließen sich Schwächen und Verbesserungsmöglichkeiten der Konstruktionsmethode hinsichtlich der Aufmerksamkeit, des Verständnisses, der Methodenanwendung und der Leistung aufzeigen.

Die ACAP-Untersuchungsmethode wurde im Rahmen einer Laborstudie zur prozessbasierten Validierung einer Konstruktionsmethode eingesetzt. Darin sollten Studienteilnehmende eine Konstruktionsaufgabe zur Optimierung von Blechkonzepten lösen. Es wurden die Datenerhebungsmethoden Beobachtung, Befragung und Dokumentenanalyse eingesetzt. Mit Eye-Tracking, Fragebogen und Konzeptzeichnungen konnten die Metriken Lesetiefe, richtig verstandene Methodeninhalte, korrekt angewendete Methodenschritte und Fertigungsaufwand von Konzeptzeichnungen bewertet werden.

Die Ergebnisse der ACAP-Untersuchungsmethode wurden diskutiert und hinsichtlich ihrer Analysefähigkeit und Aussagekraft evaluiert. Die Diskussion zeigte Stärken und Weiterentwicklungspotenzial der ACAP-Untersuchungsmethode auf. Die Evaluation ergab, dass die gestellten Anforderungen aus dem Stand der Forschung und der Fallstudie erreicht wurden. Mit Hilfe der operationalisierten Metriken der ACAP-Untersuchungsmethode konnten Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode im Hinblick auf textbasierte und grafikbasierte Beschreibungen analysiert werden:

- Durch die Metriken der ACAP-Untersuchungsmethode konnten wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode gewonnen werden.
- Die ACAP-Untersuchungsmethode ermöglichte es, Methodenschritte zu identifizieren, die nicht korrekt angewendet wurden und den Anwendern möglicherweise schwergefallen sind.
- Ebenso konnte anhand der ACAP-Untersuchungsmethode identifiziert werden, welche Auswirkungen die korrekte Anwendung der einzelnen Methodenschritte auf die Leistung hatte.

Die Metrik der Lesetiefe sollte durch Einbeziehung einer *Ratio-to-Baseline*-Berechnung weiterentwickelt werden, da bisherige Vergleichswerte fehlen. Ebenso

sollte die Metrik der Anzahl richtig beantworteter Fragen hinsichtlich der Eindeutigkeit und Einfachheit der Fragen verbessert werden. Schließlich sollte die Metrik der korrekt angewendeten Methodenschritte hinsichtlich der Objektivität der Bewertung unter Einbeziehung der *Interrater-Reliabilität* verbessert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Forschungsarbeit zusammengefasst und wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben.

8.1 Zusammenfassung

In dieser Forschungsarbeit wurde eine Untersuchungsmethode für die prozessbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden entwickelt und evaluiert. Bei der prozessbasierten Validierung wird die ergebnisbasierte Validierung um eine Untersuchung der Anwendbarkeit erweitert. Dadurch werden Aussagen über den Nutzen der Konstruktionsmethode und zusätzlich über deren Anwendbarkeit ermöglicht. In diesem Zusammenhang besteht das Problem, dass bisherige Untersuchungsmethoden zur Methodvalidierung die Anwendbarkeit nicht untersuchen. Daraus ergab sich für diese Forschungsarbeit folgendes Ziel:

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Evaluation einer Untersuchungsmethode, die zusätzlich zum Nutzen auch Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden erfasst. Zudem soll die neu entwickelte Untersuchungsmethode dazu imstande sein, die Auswirkungen der erkannten Schwierigkeiten auf den Nutzen der untersuchten Konstruktionsmethode zu identifizieren. Durch ein solches Eingrenzen der Ursachen etwaiger Schwierigkeiten sollen dann Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode abgeleitet werden.

Dieses Ziel wurde durch die Beantwortung der zwei Forschungsfragen erreicht:

- Forschungsfrage 1: Wie kann die Validierung von Konstruktionsmethoden durch eine Untersuchungsmethode unterstützt werden?
- Forschungsfrage 2: Welche Erkenntnisse können mit der ACAP-Untersuchungsmethode in einer Laborstudie zur Validierung einer Konstruktionsmethode gewonnen werden?

Als Grundlage für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurde zunächst der Bedarf für eine prozessbasierte Untersuchungsmethode erhoben. Dazu wurden Konstruktionsmethoden zur blechgerechten Konstruktion nach dem bisherigen

ergebnisbasierten Vorgehen gemäß dem aktuellen Stand der Forschung validiert. Es wurde also eine Fallstudie durchgeführt, im Rahmen deren zwei Konstruktionsmethoden einander gegenübergestellt wurden, eine duale und eine restriktive. Dabei wurde deutlich, dass die für die Erstellung der Fallstudie verwendete Untersuchungsmethode der Dokumentenanalyse nicht dazu imstande war, zu analysieren, warum sich der Fertigungsaufwand der Konstruktionsergebnisse bei Verwendung der dualen Methode nicht signifikant von dem Fertigungsaufwand bei Verwendung der restriktiven Methode unterschied. Somit fehlten Daten für eine mögliche Verbesserung der untersuchten Konstruktionsmethoden. Es konnten lediglich vage Vermutungen hinsichtlich Aufmerksamkeit, Verständnis und Anwendung der Methodeninhalte formuliert werden.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurde eine neue Untersuchungsmethode entwickelt: die *Attention Comprehension Application Performance Analysis*, kurz ACAP-Untersuchungsmethode. Diese erweitert die ergebnisbasierte Validierung um eine Untersuchung der Anwendbarkeit der untersuchten Konstruktionsmethode. Konkret werden die folgenden Aspekte der Anwendbarkeit erfasst: Aufmerksamkeit, Verständnis, Anwendung und Leistung. Dazu werden die Datenerhebungsmethoden Beobachtung, Befragung und Dokumentenanalyse kombiniert eingesetzt. Auf diese Weise können Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit einer Konstruktionsmethode erkannt und mögliche Ursachen für diese eingegrenzt werden. Die ACAP-Untersuchungsmethode ist aufgrund ihrer festgelegten Struktur, ihrer operationalisierten Metriken sowie ihrer statistisch auswertbaren Ergebnisse über die in dieser Forschungsarbeit beschriebene Laborstudie hinaus grundsätzlich auf alle text- und grafikbasierten Konstruktionsmethoden anwendbar.

Im Rahmen der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wurde die ACAP-Untersuchungsmethode in einer Laborstudie zur prozessbasierten Validierung einer Konstruktionsmethode angewendet und evaluiert. Mit Hilfe von Eye-Tracking, Fragebögen sowie Konzeptzeichnungen konnten die Metriken Lesetiefe, Anzahl richtig beantworteter Fragen, Anzahl korrekt angewendeter Methodenschritte und Fertigungsaufwand objektiv erfasst werden. Durch die ACAP-Untersuchungsmethode konnten Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode und deren Auswirkungen auf den Nutzen identifiziert werden. Die Ursachen der identifizierten Schwierigkeiten wurden auf Basis der enthaltenen Texte und Grafiken diskutiert und es wurden mögliche Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der untersuchten Konstruktionsmethode aufgezeigt. Die Untersuchungsmethode wird in der zweiten deskriptiven Studie aus der Forschungsmethodik der *DRM* eingesetzt.

8.2 Ausblick

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte ACAP-Untersuchungsmethode bildet einen Ausgangspunkt für weitere Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden.

Hinsichtlich der Verbesserungsmöglichkeiten der ACAP-Untersuchungsmethode und weiterführende Themenbereiche sind folgende Punkte festzustellen:

1. Vergleich der Aufmerksamkeit in Bezug auf verschiedene Konstruktionsmethoden
2. Eindeutige Formulierungen im Verständnis
3. Objektive Bewertung der Anwendbarkeit
4. Varianten einer Konstruktionsmethode gezielt miteinander vergleichen
5. Beitrag zu einer Theorie der Konstruktionsmethodik

Vergleich der Aufmerksamkeit in Bezug auf verschiedene Konstruktionsmethoden

Die Lesetiefe ist aktuell abhängig vom Informationsgehalt und der Größe der Darstellung. Die Lesetiefe betrug weniger als 3 ms/cm². Ob es sich hierbei um einen niedrigen Wert handelt, kann aufgrund fehlender Vergleichswerte für die vorliegende Konstruktionsmethode nicht abschließend beurteilt werden. Beim derzeitigen Stand der Forschung liegen nur Vergleichswerte bezüglich Werbeflächen und Zeitschriften vor. Es fehlen also Vergleichswerte aus der Anwendung von Konstruktionsmethoden. Ein Vergleich der Lesetiefe verschiedener Konstruktionsmethoden könnte durch den Einsatz einer Berechnungsvorschrift ermöglicht werden. Hierfür kommt beispielsweise eine *Ratio-to-Baseline-Berechnung* in Betracht. Das Verfahren für diese Berechnung könnte wie folgt aussehen: Eine vollständige Lesung der Konstruktionsmethode sollte durchgeführt werden, und diese Aufzeichnung sollte als Basiswert verwendet werden. Wenn Teilnehmende eine Konstruktionsmethode 2,5 Sekunden lang lesen und wir zuvor eine volle Lesung von 20 Sekunden für den gesamten Inhalt der Konstruktionsmethode aufgezeichnet haben, dann entsprechen die 2,5 Sekunden einer Lesetiefe von 12,5%. Diese operationalisierte Definition ist besonders nützlich für Konstruktionsmethoden mit sehr gemischtem textlichem und grafischem Inhalt. Der Variablentyp ist das Verhältnis.

Eindeutige Formulierungen im Verständnis

Die Metrik der richtig verstandenen Methodeninhalte ist abhängig von den formulierten Fragen und Antworten. Eine Herausforderung liegt in der Erstellung eines geeigneten Fragebogens. Nach dem Stand der Forschung wird die Möglichkeit zur Interpretation der Fragen reduziert durch die Entwicklung eindeutiger und einfacher Fragen (Hussy et al., 2013, S. 76). Ungebräuchliche Begriffe, Fachbegriffe oder Fremdwörter sowie lange und verschachtelte Sätze sollten vermieden werden. Problematisch sind Fragen, die abstrakte und komplizierte Sachverhalte beinhalten und eine hohe Anforderung an die mentale und kognitive Leistungsfähigkeit der Befragten stellt. Des Weiteren sollten keine Verneinungen in den Fragen vorkommen und möglichst keine Fragen, die von allen Befragten in gleicher Weise beantwortet werden. Eine Möglichkeit bietet auch die Strategie des Einsatzes mehrerer Fragen für die Beantwortung und Beleuchtung eines interessierenden Sachverhaltes. Letztendlich ist ein einfacher und eindeutiger Fragebogen zu erstellen.

Objektive Bewertung der Anwendbarkeit

Die Metrik der korrekt angewendeten Methodenschritte sollte hinsichtlich der *Interrater-Reliabilität* verbessert werden, um die Objektivität der Bewertung zu erhöhen. Die *Interrater-Reliabilität* bezieht sich auf den Grad der Übereinstimmung zwischen den Beurteilungsergebnissen verschiedener Bewerter (Rater). Die *Interrater-Reliabilität* ist demnach hoch, wenn verschiedene Bewerter zu gleichen oder ähnlichen Bewertungen (Ratings) für dieselben Teilnehmenden kommen.

Varianten einer Konstruktionsmethode gezielt miteinander vergleichen

Mit Hilfe der ACAP-Untersuchungsmethode lassen sich iterativ weiterentwickelte Varianten einer Konstruktionsmethode gezielt miteinander vergleichen und für eine mögliche Weiterentwicklung bewerten. Hinsichtlich der Verbesserungsmöglichkeiten der Konstruktionsmethode ist festzustellen, dass das Überlesen sowie das falsche Verständnis von Methodeninhalten und die falsche Anwendung von Methodenschritten zu einer iterativen Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode führt. Je nach Schwierigkeit sollte die Attraktivität der Texte und Grafiken gesteigert, die Inhalte gestrichen, die weitere Vermittlung der Methodeninhalte nicht empfohlen, die Methodeninhalte in kleiner handhabbare Methodenschritte aufgeteilt sowie Grafiken und Texte eindeutig und leicht verständlich beschrieben werden. Durch eine solche Reduzierung der Schwierigkeiten sollte sich der Nutzen der Konstruktionsmethode verbessern lassen. Dies sollte in einer weiteren Studie überprüft werden.

Beitrag zu einer Theorie der Konstruktionsmethodik

Die Anwendung der ACAP-Untersuchungsmethode zur prozessbasierten Validierung von Konstruktionsmethoden kann einen Beitrag zu einer Theorie der Konstruktionsmethodik leisten. Dafür müssen Erkenntnisse aus der empirischen Validierung einer hohen Anzahl unterschiedlicher Konstruktionsmethoden gewonnen werden, um festzustellen, wie eine Konstruktionsmethode idealerweise aufgebaut sein sollte. Die durch die Datenerhebung gewonnenen Erkenntnisse sollten sich dabei auf Gemeinsamkeiten im Aufbau der Konstruktionsmethoden und ihrer notwendigen Elemente beziehen. In empirischen prozessbasierten Validierungsstudien zu Konstruktionsmethoden sollten einheitliche Untersuchungsmethoden wie die ACAP-Untersuchungsmethode verwendet werden, die zeigen, wie Konstruktionsmethoden gelesen, verstanden und angewendet werden und welche Auswirkungen sie auf die Konstruktionsergebnisse haben.

Literaturverzeichnis

- Ahmed, S. (2007). Empirical research in engineering practice. *Journal of Design Research*, 6(3), 359–380. <https://doi.org/10.1504/jdr.2007.016389>
- Albers, A., Bursac, N., Urbanec, J. & Lüdcke, R. (2014). Knowledge Management in Product Generation Development - an empirical study. In D. Krause, K. Paetzhold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Oktober 2014* (S. 13–24). Hamburg: TuTech-Verl.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Urbanec, J. & Ludcke, J. (2014). Situation-Appropriate Method Selection in Product Development Process – Empirical Study of Method Application. In B. Posner, H. Binz & D. Roth (Hrsg.), *DS 81: Proceedings of NordDesign 2014* (S. 550–559). Glasgow: The Design Society.
- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-Labs as Real-World Validation Environments for Design Methods. In D. Marjanovic, M. Storga, S. Skec, N. Bojčetić & N. Pavkovic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 13–24). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Arndt, L. (2019). *Entwicklung einer Assistenz in der Konstruktion Development of an Assistance in Design*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Banabic, D. (2000). Anisotropy of Sheet Metal. In D. Banabic (Hrsg.), *Formability of Metallic Materials. Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits* (Engineering Materials, Bd. 42, S. 119–172). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04013-3_4
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bloesch-Paidosh, A. & Shea, K. (2019). Design Heuristics for Additive Manufacturing Validated Through a User Study. *Journal of Mechanical Design*, 141(4), 41101. <https://doi.org/10.1115/1.4041051>

- Bojko, A. (2013). *Eye tracking the user experience. A practical guide to research*. New York: Rosenfeld Media.
- Booth, J. W., Alperovich, J., Chawla, P., Ma, J., Reid, T. N. & Ramani, K. (2017). The Design for Additive Manufacturing Worksheet. *Journal of Mechanical Design*, 139(10), 100904. <https://doi.org/10.1115/1.4037251>
- Boothroyd, G. (1994). Product Design for Manufacture and Assembly. *Computer-Aided Design*, 26(7), 505–520. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5)
- Buehlmeier, J. (2019). *Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems in der Konstruktion*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Bursac, N., Krause, A., Batora, M. & Ritzer, K. (2023). Live-Lab GSD – Generational Sheet Metal Development: a validation environment for methodological design support in sheet metal development. In A. Liu & S. Kara (Hrsg.), *33rd CIRP Design Conference 2023. CIRP Design 2023* (Bd. 119, S. 41–46). Oxford: Elsevier.
- Chiu, M. & Okudan, G. E. (2010). Evolution of Design for X Tools Applicable to Design Stages: A Literature Review. In ASME (Hrsg.), *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 15th Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference; 7th Symposium on International Design and Design Education* (6. Aufl., S. 171–182). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Cohen, J. (1992). Statistical Power Analysis. *Current Directions in Psychological Science*, 1(3), 98–101. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10768783>
- Corremans, J. A. (2011). Measuring the effectiveness of a design method to generate form alternatives: an experiment performed with freshmen students product development. *Journal of Engineering Design*, 22(4), 259–274. <https://doi.org/10.1080/09544820903312416>
- Crampton, E. B., Magleby, S. P. & Howell, L. L. (2017). Realizing Origami Mechanisms from Metal Sheets. In ASME (Hrsg.), *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 41st Mechanisms and Robotics*

- Conference* (5. Aufl., V05BT08A055). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Dinar, M., Shah, J. J., Cagan, J., Leifer, L., Linsey, J., Smith, S. M. et al. (2015). Empirical Studies of Designer Thinking: Past, Present, and Future. *Journal of Mechanical Design*, 137(2), 21101. <https://doi.org/10.1115/1.4029025>
- Doellken, M., Arndt, L., Buehlmeier, J. & Matthiesen, S. (2020). Restrictive and Opportunistic Method in Design for Manufacturing [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000127148>
- Doellken, M., Arndt, L., Nelius, T. & Matthiesen, S. (2021). Identifying an opportunistic method in design for manufacturing: an experimental study on successful approaches on the manufacturability and manufacturing effort of design concepts. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 720–725). Oxford: Elsevier.
- Doellken, M., Nelius, T. & Matthiesen, S. (Wiedereinreichung im Jahr 2023 am 14. Juli). Evaluation of ACAP Analysis Method for Process-Based Validation of Textual and Graphical Design Methods. *Journal of Engineering Design*.
- Doellken, M., Zapata, J., Nelius, T. & Matthiesen, S. (2021). Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: a study on eye movements in exploiting design guidelines. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 415–420). Oxford: Elsevier.
- Doellken, M., Zimmerer, C. & Matthiesen, S. (2020). Challenges Faced by Design Engineers when Considering Manufacturing in Design - An Interview Study. In University of Zagreb (Hrsg.), *Proceedings of the Design Society. DESIGN Conference 2020* (1. Aufl., S. 837–846). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- Duchowski, A. T. (2017). *Eye Tracking Methodology. Theory and Practice* (3. Aufl.). Springer Nature Switzerland AG 2017: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57883-5>
- Duehr, K., Grimminger, J., Rapp, S., Albers, A. & Bursac, N. (2022). Enabling Distributed Teams – A Process Model for Early and Continuous Method

- Validation. In University of Zagreb (Hrsg.), *Proceedings of the Design Society. DESIGN Conference 2022* (2. Aufl., S. 161–170). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- Duehr, K., Hirsch, M., Albers, A. & Bursac, N. (2020). A Methodology to Identify and Address Improvement Potentials in Communication Processes of Distributed Product Development – an Initial Approach. In University of Zagreb (Hrsg.), *Proceedings of the Design Society. DESIGN Conference 2020* (1. Aufl., S. 541–550). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (6. Aufl.). München Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag. <https://doi.org/10.3139/9783446449084>
- Eisenmann, M., Grauberger, P., Üreten, S., Krause, D. & Matthiesen, S. (2021). Design method validation – an investigation of the current practice in design research. *Journal of Engineering Design*, 12(2), 621–645. <https://doi.org/10.1080/09544828.2021.1950655>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>
- Frey, D. D. & Dym, C. L. (2006). Validation of design methods: lessons from medicine. *Research in Engineering Design*, 17(1), 45–57. <https://doi.org/10.1007/s00163-006-0016-4>
- Gericke, K., Eckert, C. & Stacey, M. (2017). What do We Need to Say About Design Method? In A. Maier, S. Skec, H. Kim, M. Kokkolaras, Oehmen, J. Fadel, G., F. Salustri et al. (Hrsg.), *DS 87-3 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)* (S. 101–110). Glasgow, UK: The Design Society.
- Gero, J. S. & Milovanovic, J. (2020). A framework for studying design thinking through measuring designers' minds, bodies and brains. *Design Science*, 6(e19), 1–40. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.15>
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2020). The Contact and Channel Approach – 20 Years of Application

- Experience in Product Engineering. *Journal of Engineering Design*, 31(5), 241–265. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1699035>
- Hagenah, H. (2003). Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen. In M. Geiger & K. Feldmann (Hrsg.), *Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie* (Bd. 141). Bamberg: Meisenbach Verlag.
- Hay, L., Cash, P. & McKilligan, S. (2020). The future of design cognition analysis. *Design Science*, 6, 1–26. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.20>
- Hoffmann, M., Geißler, U. & Geiger, M. (1992). Computer-aided generation of bending sequences for die-bending machines. *Journal of Materials Processing Technology*, 30, 1–12. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90035-Q](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90035-Q)
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, J. (2011). *Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures* (1. Aufl.). New York: Oxford University Press.
- Holsanova, J., Rahm, H. & Holmqvist, K. (2006). Entry points and reading paths on newspaper spreads: comparing a semiotic analysis with eye-tracking measurements. *Visual Communication*, 5(1), 65–93. <https://doi.org/10.1177/1470357206061005>
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9>
- Jansch, J. & Birkhofer, H. (2004). The gap between learning and applying design methods. In D. Marjanovic (Hrsg.), *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference* (S. 627–632). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- Jiménez, P. (2012). Survey on Model-Based Manipulation Planning of Deformable Objects. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2), 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.08.002>
- Klein, B. (2013). *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung* (10. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02272-3>

- Klocke, F. (2017). *Fertigungsverfahren. Umformen* (VDI-Buch, 6. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54714-4>
- Krahe, C., Kalaidov, M., Doellken, M., Gwosch, T., Kuhnle, A., Lanza, G. et al. (2021). AI-Based knowledge extraction for automatic design proposals using design-related patterns. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 397–402). Oxford: Elsevier.
- Kroll, E. & Shihmanter, A. (2011). Capturing the conceptual design process with concept-configuration-evaluation triplets. In S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlloone, T. J. Howard & W. Chen (Hrsg.), *DS 68-6: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design. Design Information and Knowledge* (6. Aufl., S. 76–85). Glasgow, UK: The Design Society.
- Kroll, E. & Weisbrod, G. (2020). Testing and evaluating the applicability and effectiveness of the new idea-configuration-evaluation (ICE) method of conceptual design. *Research in Engineering Design*, 31(1), 103–122. <https://doi.org/10.1007/s00163-019-00324-6>
- Kuppinger, A. (2021). *Untersuchung der Anwendung von Design for Manufacturing Methoden*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- La Trobe-Bateman, J. & Wild, D. (2003). Design for Manufacturing: Use of a Spreadsheet Model of Manufacturability to Optimize Product Design and Development. *Research in Engineering Design*, 14(2), 107–117. <https://doi.org/10.1007/s00163-003-0030-8>
- Langer, I., Schulz von Thun, F. & Tausch, R. (2019). *Sich verständlich ausdrücken* (11. Auflage). München: Ernst Reinhardt Verlag. <https://doi.org/10.2378/9783497611331>
- Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N. & Le Coq, M. (2015). Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study. *Journal of Mechanical Design*, 137(12). <https://doi.org/10.1115/1.4031589>
- Laverne, F., Segonds, F., D'Antonio, G. & Le Coq, M. (2017). Enriching Design with X through Tailored Additive Manufacturing Knowledge: A Methodological

- Proposal. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 279–288. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0314-7>
- Leu, D.-K. (1997). A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 66(1-3), 9–17. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02453-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02453-3)
- Lindemann, U. (2016). Impact of Design Research on Practitioners in Industry. In A. Chakrabarti & U. Lindemann (Hrsg.), *Impact of Design Research on Industrial Practice. Tools, Technology, and Training* (S. 223–232). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19449-3_14
- Lloyd, P. (2019). You make it and you try it out: Seeds of design discipline futures. *Design Studies*, 65, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.10.008>
- Lohmeyer, Q. & Meboldt, M. (2016). The Integration of Quantitative Biometric Measures and Experimental Design Research. In P. Cash, T. Stanković & M. Štorga (Hrsg.), *Experimental Design Research* (S. 97–112). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33781-4_6
- Lowe, A., McMahon, C. & Culley, S. (2004). Characterising the requirements of engineering information systems. *International Journal of Information Management*, 24(5), 401–422. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2004.06.008>
- Mann, H. B. & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. Verfügbar unter: www.jstor.org/stable/2236101
- Mathôt, S., Schreij, D. & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: an open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, 44(2), 314–324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13

- Mesa, J., Maury, H., Arrieta, R., Corredor, L. & Bris, J. (2018). A Novel Approach to Include Sustainability Concepts in Classical DFMA Methodology for Sheet Metal Enclosure Devices. *Research in Engineering Design*, 29(2), 227–244. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0265-4>
- Meyer, W. (1986). Distances between Boxes: Applications to Collision Detection and Clipping. In IEEE Council on Robotics and Automation (Hrsg.), *Proceedings 1986 - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (S. 597–602). Washington D.C.: IEEE Computer Society Press.
- Mussgnug, M., Sadowska, A., Moryson, R. & Meboldt, M. (2018). Target based analysis - A model to analyse usability tests based on mobile eye tracking recordings. In A. Maier, S. Škec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al. (Hrsg.), *DS 87-8 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)* (DS, 8. Aufl., S. 59–68). Glasgow, UK: The Design Society.
- Nowack, M. L. (1997). *Design Guideline Support for Manufacturability*. Dissertation. University of Cambridge, Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.14133>
- Olewnik, A. T. & Lewis, K. (2005). On Validating Engineering Design Decision Support Tools. *Concurrent Engineering*, 13(2), 111–122. <https://doi.org/10.1177/1063293X05053796>
- Olsen, A. & Matos, R. (2012). Identifying parameter values for an I-VT fixation filter suitable for handling data sampled with various sampling frequencies. In I. Howell (Hrsg.), *ETRA '12: Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (S. 317–320). New York: Association for Computing Machinery Press. <https://doi.org/10.1145/2168556.2168625>
- Pedersen, K., Emblemståg, J., Bailey, R., Allen, J. K. & Mistree, F. (2000). Validating Design Methods and Research: The Validation Square. In D. L. Thurston (Hrsg.), *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 12th International Conference on Design Theory and Methodology* (4. Aufl., S. 379–390). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Prabhu, R., Miller, S. R., Simpson, T. W. & Meisel, N. A. (2020a). Built to win? Exploring the role of competitive environments on students' creativity in design

for additive manufacturing tasks. *Journal of Engineering Design*, 31(11-12), 574–604. <https://doi.org/10.1080/09544828.2020.1851661>

Prabhu, R., Miller, S. R., Simpson, T. W. & Meisel, N. A. (2020b). But Will It Build? Assessing Student Engineering Designers' Use of Design for Additive Manufacturing Considerations in Design Outcomes. *Journal of Mechanical Design*, 142(9). <https://doi.org/10.1115/1.4046071>

Prabhu, R., Miller, S. R., Simpson, T. W. & Meisel, N. A. (2020c). Exploring the Effects of Additive Manufacturing Education on Students' Engineering Design Process and its Outcomes. *Journal of Mechanical Design*, 142(4). <https://doi.org/10.1115/1.4044324>

Qattawi, A. (2016). Optimizing Origami-Based Sheet Metal Parts Using Traversal Algorithms and Manufacturing Based Indices. In *Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing* (2. Aufl.). New York: The American Society of Mechanical Engineers.

Radin, B., Shpitalni, M. & Hartman, I. (1997). Two-Stage Algorithm for Determination of the Bending Sequence in Sheet Metal Products. *Journal of Mechanical Design*, 119(2), 259–266. <https://doi.org/10.1115/1.2826245>

Ramana, K. V. & Rao, P. V. M. (2005). Automated Manufacturability Evaluation System for Sheet Metal Components in Mass Production. *International Journal of Production Research*, 43(18), 3889–3913. <https://doi.org/10.1080/00207540500066853>

Rehman, S. & Guenov, M. D. (1998). A Methodology for Modelling Manufacturing Costs at Conceptual Design. *Computers & Industrial Engineering*, 35(3), 623–626. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00174-0](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00174-0)

Reimlinger, B., Lohmeyer, Q., Moryson, R. & Meboldt, M. (2019). A comparison of how novice and experienced design engineers benefit from design guidelines. *Design Studies*, 63, 204–223. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.04.004>

Robertson, B. F. & Radcliffe, D. F. (2009). Impact of CAD Tools on Creative Problem Solving in Engineering Design. *Computer-Aided Design*, 41(3), 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2008.06.007>

- Roth, K. (2000). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band I Konstruktionslehre* (3. Aufl.). Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Selvaraj, P., Radhakrishnan, P. & Adithan, M. (2009). An Integrated Approach to Design for Manufacturing and Assembly Based on Reduction of Product Development Time and Cost. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(1), 13–29. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1580-8>
- Shah, J. J., Smith, S. M. & Vargas-Hernandez, N. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies*, 24(2), 111–134. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(02\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00034-0)
- Siegert, K. (2015). *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68418-3>
- Takai, S. & Banga, K. (2014). Effects of Product Attributes in Case-Based Reasoning Methods for Cost Estimation and Cost Uncertainty Modeling. *Journal of Mechanical Design*, 136(5). <https://doi.org/10.1115/1.4026869>
- Toreini, P., Langner, M. & Maedche, A. (2020). Using Eye-Tracking for Visual Attention Feedback. In F. D. Davis, R. Riedl & J. Vom Brocke (Hrsg.), *Information Systems and Neuroscience. NeuroIS Retreat 2019* (Lecture Notes in Information Systems and Organisation, 1. Aufl., S. 261–270). Switzerland: Springer Nature.
- Van Vliet, H. W. & van Luttervelt, K. (2004). Development and Application of a Mixed Product/Process-Based DFM Methodology. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(3), 224–234. <https://doi.org/10.1080/09511920310001600868>
- Van Vliet, J. W., van Luttervelt, C. A. & Kals, H. J. J. (1999). A Requirement Analysis for DFM Design Support in a DFX Context. In H. Kals & F. van Houten (Hrsg.), *Integration of Process Knowledge into Design Support Systems. Proceedings of the 1999 CIRP International Design Seminars* (S. 269–278). Dordrecht: Springer Netherlands.
- VDI2221 Blatt1:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- Vin, L. J. de, Streppel, A. H. & Kals, H. J. J. (1996). The Accuracy Aspect in Set-Up Determination for Sheet Bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(3), 179–185.
<https://doi.org/10.1007/BF01351323>
- Xiao, A., Seepersad, C. C., Allen, J. K., Rosen, D. W. & Mistree, F. (2007). Design for Manufacturing: Application of Collaborative Multidisciplinary Decision-Making Methodology. *Engineering Optimization*, 39(4), 429–451.
<https://doi.org/10.1080/03052150701213104>
- Yang, S., Page, T. & Zhao, Y. F. (2019). Understanding the Role of Additive Manufacturing Knowledge in Stimulating Design Innovation for Novice Designers. *Journal of Mechanical Design*, 141(2).
<https://doi.org/10.1115/1.4041928>
- Zapata, J. (2020). *Implementing Innovative Gaze Analytic Methods in Design for Manufacturing: A Study on Eye Movements in Exploiting Design Guidelines*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zhang, L. (2021). *Gaze-Aware Feedback Laboratory for Engineering Assistance. Blickbasierte Empfehlungen im Labor zur Unterstützung von Konstrukteuren*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zhang, Y., Shan, H., Li, Y., Guo, J., Luo, Z. & Ma, C. Y. (2017). Joining Aluminum Alloy 5052 Sheets via Novel Hybrid Resistance Spot Clinching Process. *Materials & Design*, 118, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.017>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Forschungsarbeit am IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden:

- Arndt, L. (2019). *Entwicklung einer Assistenz in der Konstruktion Development of an Assistance in Design*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Buehlmeier, J. (2019). *Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems in der Konstruktion*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kuppinger, A. (2021). *Untersuchung der Anwendung von Design for Manufacturing Methoden*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zapata, J. (2020). *Implementing Innovative Gaze Analytic Methods in Design for Manufacturing: A Study on Eye Movements in Exploiting Design Guidelines*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zhang, L. (2021). *Gaze-Aware Feedback Laboratory for Engineering Assistance. Blickbasierte Empfehlungen im Labor zur Unterstützung von Konstrukteuren*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:

- Doellken, M., Arndt, L., Buehlmeier, J. & Matthiesen, S. (2020). Restrictive and Opportunistic Method in Design for Manufacturing [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000127148>
- Doellken, M., Arndt, L., Nelius, T. & Matthiesen, S. (2021). Identifying an opportunistic method in design for manufacturing: an experimental study on successful approaches on the manufacturability and manufacturing effort of design concepts. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 720–725). Oxford: Elsevier.
- Doellken, M., Nelius, T. & Matthiesen, S. (Wiedereinreichung im Jahr 2023 am 14. Juli). Evaluation of ACAP Analysis Method for Process-Based Validation of Textual and Graphical Design Methods. *Journal of Engineering Design*.
- Doellken, M., Nixdorf, B. & Matthiesen, S. (2021). Sustainability Analysing and Comparing Tool in Design for Manufacturing [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.35097/1490>

- Doellken, M., Zapata, J., Nelius, T. & Matthiesen, S. (2021). Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: a study on eye movements in exploiting design guidelines. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 415–420). Oxford: Elsevier.
- Doellken, M., Zimmerer, C. & Matthiesen, S. (2020). Challenges Faced by Design Engineers when Considering Manufacturing in Design - An Interview Study. In University of Zagreb (Hrsg.), *Proceedings of the Design Society. DESIGN Conference 2020* (1. Aufl., S. 837–846). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- Krahe, C., Kalaidov, M., Doellken, M., Gwosch, T., Kuhnle, A., Lanza, G. et al. (2021). AI-Based knowledge extraction for automatic design proposals using design-related patterns. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021. CIRP Design 2021* (Bd. 100, S. 397–402). Oxford: Elsevier.
- Matthiesen, S., Eisenmann, M. & Döllken, M. (2018). Das Systemverständnis reflektieren – Kritisches Hinterfragen als Einflussgröße in der Analyse. 29. DfX-Symposium 2018. In *DFX 2018: Proceedings of the 29th Symposium Design for X, 25-26 September 2018, Tutzing, Germany* (Bd. 29). The Design Society.
- Nelius, T., Eisenmann, M., Doellken, M., Hergl, M. & Matthiesen, S. (2019). Improving Decision Making by teaching Debiasing Approaches – motivating Engineering students with Reflection. In Y. Eriksson & K. Paetzold (Hrsg.), *Human Behaviour in Design. Proceedings of the 2nd SIG Conference: April 2019* (Bd. 2). Neubiberg: Institut für Technische Produktentwicklung, Universität der Bundeswehr München.
- Nelius, T., Doellken, M., Zimmerer, C. & Matthiesen, S. (2020). The impact of confirmation bias on reasoning and visual attention during analysis in engineering design: An eye tracking study. *Design Studies*, 71, 100963. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2020.100963>

Glossar

| Begriff | Definition |
|---|--|
| Duale Konstruktionsmethode | Duale Methoden umfassen restriktive und opportunistische Methoden, um die Vorteile beider zu maximieren. |
| Ergebnisbasierte Validierung | Die ergebnisbasierte Validierung von Konstruktionsmethoden wird am Ergebnis der Konstruktion bewertet. Mit dieser Art der Validierung kann die Aussage getroffen werden, dass die Konstruktionsmethode einen Nutzen erzielt hat, wenn eine statistisch signifikante Verbesserung der Konstruktionsergebnisse vorliegt. |
| Fixationen | Die Fixierung eines Objektes (Stimulus) und das nahezu Stillstehen des Auges beschreibt einen Zeitraum, der als Fixation bezeichnet wird. Eine Fixation dauert im Mittel zwischen 200–300 ms und gilt als die Zeitdauer, in der Informationen aufgenommen werden (Holmqvist et al., 2011). |
| Konstruktionsmethode | “Eine Spezifikation wie ein bestimmtes Ergebnis erreicht werden soll. Dies kann Angaben dazu enthalten, wie Informationen dargestellt werden sollen, welche Informationen als Input für die Methode verwendet werden sollen, welche Werkzeuge verwendet werden sollen, welche Aktionen auf welche Weise durchgeführt werden sollen, wie die Aufgabe zerlegt werden soll und wie die Aktionen in eine Reihenfolge gebracht werden sollen” (Gericke et al., 2017, S. 105). |
| Metrik | Metrik soll verstanden werden als die Operationalisierung einer Variablen. Eine Variable ist operationalisiert, wenn die Bedeutung am ehesten getroffen wurde in Anlehnung an Hussy et al. (2013, S. 40). |
| Opportunistische Konstruktionsmethoden | Opportunistische Konstruktionsmethoden hingegen konzentrieren sich auf die Möglichkeiten von |

Fertigungsprozessen und führen zu einer Verringerung des Fertigungsaufwandes durch die erfolgreiche Anwendung durch Konstruierende (Laverne et al., 2015). Der Zweck opportunistischer Methoden besteht in der Entwicklung von Konzepten, die für den Fertigungsprozess optimiert sind, und der Eliminierung der relevanten Kostentreiber.

Prozessbasierte Validierung

Die prozessbasierte Validierung erweitert die ergebnisbasierte Validierung um die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode. Schwierigkeiten der Konstruktionsmethode können analysiert werden, ob Inhalte nicht gelesen, nicht verstanden oder Methodenschritte nicht angewendet wurden.

Restriktive Konstruktionsmethoden

Restriktive Konstruktionsmethoden befassen sich mit den Einschränkungen von Fertigungsprozessen und bieten Methodeninhalte zur Verbesserung der Qualität und der Herstellbarkeit der Konstruktion (Laverne et al., 2015). Der Zweck restriktiver Methoden besteht im Anpassen bestehender Konzepte an den Fertigungsprozess.

Sakkaden

Die schnelle Bewegung des Auges dauert zwischen 30–80 ms und wird als Sakkade bezeichnet. Eine Sakkade liegt zwischen zwei Fixationen. Je nach Operationalisierung der Blickbewegung wird die Sakkade als wichtiger Teil der Informationsaufnahme genutzt oder nicht, da eine Sakkade immer einer Fixation folgt (Holmqvist et al., 2011).

Untersuchungsmethode

Untersuchungsmethoden werden in Bezug auf den wissenschaftlichen Ansatz in qualitative und quantitative Untersuchungsmethoden unterteilt. Es wird unterschieden zwischen Methoden zur Datenerhebung oder Datenanalyse (Hussy et al., 2013).

Validierung von technischen Produkten und Systemen

VDI 2221 Blatt 1:2019-11:
„[Die Validierung ist eine] Prüfung, inwieweit die Testresultate tatsächlich das darstellen, was durch den Test bestimmt werden soll.
Anmerkung: Auf technische Systeme übertragen, ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet

ist, bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier gehen die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Umgangssprachlich ist Validierung die Beantwortung der Frage: „Wird das richtige Produkt entwickelt?““

Anhang A1

In Kapitel 7.1.2 ist die Aufgabenstellung der Studie erklärt. In folgender Abbildung ist die Aufgabenstellung dargestellt, wie sie den Studienteilnehmenden gegeben wurde.

Aufgabenstellung:

Ihre Firma hat eine handelsübliche 2D-Laserschneidmaschine und Blechmaschinen von verschiedenen Blechen erworben. Es werden handelsübliche Werkzeuge, Stempel und Matrizen verwendet.

Im Zuge dieser Neuananschaffung sollen Sie neue Konzeptre ausarbeiten, sodass bestehende Bauteile kostengünstiger gefertigt werden können. Ein Beispiel ist der unten abgebildete 5-kelrige Winkel, der eine Last von 80 kg tragen soll. Der jährliche Stückzahl beträgt 1200. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf wirtschaftlichen Gestaltungsrichtlinien wie der Reduzierung von Arbeitsprozessen (aktuell 5) oder der Anzahl benötigter Teile (5) und Schweißnähte (10). Das Bohrmuster und der verwendete Werkstoff (Bausahl) sollen unverändert bleiben. Die Materialstärke kann angepasst werden.

Zusatzteil Schweiß
150 mm
20 mm
110 mm
20 mm

Zusatzteil Grundplatte
110 mm
75 mm
110 mm
20 mm
110 mm
20 mm

80 kg

Anhang A2

In Kapitel 7.1.4 ist die Metrik der Anzahl an korrekt angewendeten Methodenschritten erklärt. In folgender Tabelle ist der Bewertungsbogen für die Metrik dargestellt.

| Methoden- inhalte | Methodenschritte | Angewendet | Verbesserung notwendig | Nicht angewendet |
|-------------------------------|---|--|---|--|
| Teileanzahl reduzieren | Referenzbauteil Schweißkonstruktion abwickeln | Bauteil vollständig und korrekt in 2D dargestellt | Unvollständig, oder mit Fehlern in 2D dargestellt | Bauteil nicht oder falsch in 2D dargestellt |
| | Schweißnähte in Referenzbauteil markieren | Alle Schweiß- verbindungen sind markiert | Fast alle Schweiß- verbindungen sind markiert | Keine oder falsche Schweiß- verbindungen sind markiert |
| | Ersetze Schweiß- verbindungen durch Biegungen | Alle einfach ersetzbaren Schweiß- verbindungen ersetzt | Fast alle einfach ersetzbaren Schweißnähte ersetzt | Keine Schweiß- naht wurde ersetzt |
| | Sind weitere Teile angeschweißt, die nicht einfach ersetzbar sind? | Teil wurde optimiert | - | Optimierung beendet |
| | Schweißnähte beim Biegen zugänglich machen Schweißnähte an den Rand; Hinzufügen von Laschen | Unzugängliche Schweißnähte wurden ersetzt | - | Schweißnähte wurden nicht ersetzt |

Schweißnähte optimieren

| | | | |
|--|---|---|---|
| Referenzbauteil abwickeln | Bauteil vollständig und korrekt in 2D dargestellt | Unvollständig, oder mit Fehlern in 2D dargestellt | Bauteil nicht oder falsch in 2D dargestellt |
| Lange Kanten gebogen und kurze Kanten geschweißt | Kurze Kanten geschweißt und lange gebogen | - | Lange Kante geschweißt und kurze gebogen |
| Symmetrien im Bauteil belastungsgerecht aufgehoben | Symmetrie aufgehoben | - | Symmetrie blieb bestehen |
| Kürze die Schweißnaht | Optimierte Länge der Schweißnaht | - | Gleiche Länge der Schweißnaht |

Flächentrennung

| | | | |
|--|---|---|---|
| Referenzbauteil abwickeln | Bauteil vollständig und korrekt in 2D dargestellt | Unvollständig, oder mit Fehlern in 2D dargestellt | Bauteil nicht oder falsch in 2D dargestellt |
| Flächen auftrennen | Eine Wirkfläche wurde aufgetrennt | - | Keine Wirkfläche wurde getrennt |
| Getrennte Flächen neu verbinden, so dass Schweißnaht eingespart wird | Aufgetrennte Wirkflächen wurden neu verbunden | Aufgetrennte Wirkflächen werden nicht verbunden | Keine Wirkfläche neuwurde getrennt |