

Anne Ruckpaul

Synthese-getriebene Analyse technischer Systeme in der Produktentwicklung – Ein Beitrag zum Messen und Verstehen von Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz von Eye Tracking

Synthesis-driven analysis of technical systems in product development –
A contribution to measuring and understanding the analysis processes during designing by use of eye tracking

Band 105

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Anne Ruckpaul

**Synthese-getriebene Analyse technischer Systeme in
der Produktentwicklung –**

**Ein Beitrag zum Messen und Verstehen von
Analyseprozessen während der Konstruktion unter
Einsatz von Eye Tracking**

Synthesis-driven analysis of technical systems in
product development –

A contribution to measuring and understanding the
analysis processes during designing by use of eye
tracking

Band 105

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

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2017
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

**Synthese-getriebene Analyse technischer Systeme
in der Produktentwicklung –
Ein Beitrag zum Messen und Verstehen von
Analyseprozessen während der Konstruktion unter
Einsatz von Eye Tracking**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Anne Ruckpaul
aus Kirchheimbolanden

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2017
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Weber

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 Karlsruhe¹ 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

¹ Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 105

Konstruieren - das Erdenken technischer Produkte ist eine faszinierende und hochkreative Tätigkeit. Ziel ist es, Produkte so vorzudenken und produzierbar zu definieren, dass sie gewünschte Funktionen erfüllen.

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, Funktionen realisieren zu müssen, diese aber ausschließlich indirekt über die Definition der „Gestalt“ wie Form, Geometrie, Material und Zustandsgrößen beeinflussen zu können.

Der Zusammenhang zwischen Funktion und Gestalt muss beim Konstruieren verstanden und vorgedacht werden. Der Prozess des Verstehens und Vordenkens ist ein stark iterativer Prozess, bei dem sich Phasen der Analyse und der Synthese abwechseln. In einem Syntheseschritt wird eine Gestalt erschaffen, die die gewünschte Funktion ermöglichen soll. Der Konstrukteur prüft im nachfolgenden Analyseschritt inwiefern diese Gestalt die Funktion erfüllen kann. Dieser Analyseschritt hat nur einen einzigen Zweck: Den nächsten Syntheseschritt zu ermöglichen und so iterativ die nächste Gestaltvariante zu entwickeln. Wir bezeichnen diesen Analyseschritt, der die Synthese ermöglichen soll als „synthesegetriebene Analyse“.

Das Konstruieren mit Methoden zu unterstützen, ist seit vielen Jahren Ziel der Konstruktionsforschung. Sowohl die Akzeptanz dieser Methoden als auch die Durchdringung in den Unternehmen sind bis heute nicht befriedigend.

Gleichzeitig werden in den Unternehmen durch erfahrene Konstrukteure hervorragende Produkte entwickelt. Mit dem Zugewinn an Erfahrungen gelingt ihnen dies immer besser und schneller. Dabei werden im Laufe der Jahre oft unbewusst eigene Vorgehensweisen und -methoden entwickelt und angewandt.

Ziel der Forschung in der Karlsruher Schule für Produktentwicklung ist es, die bei erfahrenen Konstrukteuren implizit vorliegenden Vorgehensweisen und Methoden besser zu verstehen. Dazu setzen wir zusätzlich zu etablierten Erhebungsmethoden physiologische Messtechnik wie z.B. Eye Tracking (Blickdatenerfassung) ein, um Erkenntnis- und Denkprozesse beim Konstruieren zu erforschen und zu verstehen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können anschließend Methoden entwickelt werden, mit denen auch schwierigste Herausforderungen gelöst werden können, da sie auf den reichhaltigen Erfahrungen vieler erfahrener Konstrukteure aufbauen.

Die vorliegende Arbeit von Anne Ruckpaul widmet sich erstmalig der fundierten Untersuchung von Konstrukteuren mit Hilfe von Eye Tracking Technologie (Blickdatenerfassung). Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der sogenannten synthesegetriebenen Analyse, die einen besonderen Stellenwert in der Konstruktion einnimmt.

Dazu hat Frau Ruckpaul zunächst die grundsätzliche Anwendbarkeit der Eye Tracking Technologie in der empirischen Konstruktionsforschung nachgewiesen. Anschließend hat sie eine Vorstudie zur Untersuchung der wechselseitigen Beeinflussung von Eye Tracking mit den etablierten Erhebungsmethoden des Think-Aloud entwickelt und durchgeführt. Dabei hat sie grundlegende Erkenntnisse zur Durchführung empirischer Studien in der Konstruktionsforschung erarbeitet.

Auf Basis der Erkenntnisse der Vorarbeiten und Vorstudien werden von Frau Ruckpaul zwei weitere empirische Studien entwickelt und durchgeführt.

Hierzu wurde neben der Analyse technischer Zeichnungen zum Aufbau von Systemverständnis auch die Synthese-getriebene Analyse in den Studien untersucht. Eine reale Problemstellung aus der Industrie diente als Aufgabe, um die Vorgehensweisen von erfahrenen Konstrukteuren und angehenden Ingenieuren untersuchen zu können. Das Erkennen des vorliegenden Problems war hierbei der Schlüssel für eine erfolgreiche Problemlösung und die Synthese einer verbesserten Produktgestalt. Dazu mussten die Probanden die Gebundenheit an versagende Bauteile überwinden, um die Wechselwirkungen und Systemzusammenhänge erkennen zu können. Dieser Effekt wurde als örtliche Gebundenheit eingeführt.

Die Studien zeichnen sich dadurch aus, dass sie einerseits den Problemlösealltag des Konstrukteurs im Unternehmen sehr gut abbilden und andererseits mit Ingenieuren mit langjähriger Konstruktionserfahrung durchgeführt wurden.

Die durch die Forschungsarbeit von Frau Ruckpaul gewonnenen Erkenntnisse werden in nachfolgenden Forschungsarbeiten am IPEK in Methoden zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der „Synthesegetriebenen Analyse“ und der Überwindung „örtlicher Gebundenheit“ genutzt werden.

Kurzfassung

Während des Konstruktionsprozesses durchläuft der Ingenieur iterative Phasen der Analyse und der Synthese. Dabei übersetzt er Anforderungen und Funktionen in eine fertigungsgerechte Gestalt. Der Konstrukteur muss durchgehend Gestalt-Funktion-Zusammenhänge erfassen und vordenken. Vorgehensweisen von Konstrukteuren beim Verknüpfen von Funktion und Gestalt während der Analyse technischer Systeme und während der Entwicklung von Produktgenerationen werden in der vorliegenden Forschungsarbeit tiefer untersucht. Die Analyse der bestehenden Gestalt und die Ableitung von Funktionen sind bei der Produktgenerationsentwicklung als auch bei Neukonstruktionen essentiell für eine erfolgreiche Konstruktion. Um diesen Zusammenhang zu erforschen, wurden empirische Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie in Kombination mit der Think-Aloud Methode durchgeführt. Somit können das Blickverhalten zur Betrachtung der Gestalt und ein Teil der Gedanken zur Interpretation von Gestalt und Funktionen aufgenommen werden. Hierzu wurde zunächst die Anwendbarkeit von Eye Tracking getestet, Anforderungen an Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie aufgestellt und anschließend zwei Studienkonzepte zu Analyseprozessen von Konstrukteuren abgeleitet. Das eine Konzept fokussiert grundlegende Vorgehensweisen bei der Analyse von technischen Zeichnungen, die zum Aufbau von Systemverständnis benötigt werden. Das zweite Studienkonzept bildet die Synthese-getriebene Analyse aus einem realen Konstruktionsprozess in einer Laborumgebung ab und fokussiert die dabei auftretenden Analyseprozesse.

Für beide Studienkonzepte wurden Aufgaben, Ablaufpläne, Hilfsmittel und Parameter zur Auswertung erarbeitet und innerhalb zweier empirischer Studien mit angehenden und erfahrenen Ingenieuren umgesetzt. Daraus können erste Aussagen zu Analyseprozessen abgeleitet werden. Bei der Analyse von technischen Systemen zum Aufbau von Systemverständnis können tiefere Interpretationen des Systems nur dann stattfinden, wenn neben dem reinen Erkennen von Bauteilen auch deren geometrische und stoffliche Merkmale sowie Zustandsmerkmale erfasst und verarbeitet werden. Dazu gehörten auch die Anordnung zu und Wechselwirkungen mit benachbarten Systemkomponenten. Dies ist ebenfalls für die Synthese-getriebenen Analyse relevant. Das Erfassen von Gestaltmerkmalen mit hohem Informationsgehalt, wie Wirkflächen zwischen Bauteilen und dem Zusammenwirken der Systemkomponenten, ist maßgeblich für eine erfolgreiche Analyse und Synthese des technischen Systems. Es werden wichtige Erkenntnisse zu Analyseprozessen als auch zum Studienaufbau zusammengefasst und Vorschläge zur Erforschung von Analyseprozessen in weiteren empirischen Studien gegeben.

Abstract

Engineers analyze and synthesize technical systems executing iterative steps during the design process. They translate the requirements and functions into an embodiment design. In doing so, the designers need to pre-think and determine embodiment-function-relations. The thesis at hand researches the behavior and procedures of engineers while linking functions and embodiment design during the analysis of technical systems and during the development of new product generations. The analysis of an existing product structure and the interpretation of its functions are essential for the successful redesign of products. To research these correlations, empirical studies were conducted by applying the eye tracking technology in combination with the think-aloud method. Thus, the studies record the gaze path as well as a part of the verbalized thoughts of the subjects. Connections of the fixated embodiment design and interpretations of this design can be drawn. To this, the research work at hand tests the applicability of the eye tracking technology, develops requirements on the empirical studies using eye tracking and transfers them into two concepts of studies on analytic processes of engineering designers. One concept focusses on fundamental approaches while analyzing technical drawings, which are necessary for building a functional understanding of technical systems. The second concept transfers the synthesis-driven analysis from a real design process to a laboratory environment and concentrates on the analysis phases during the synthesis of a new product generation.

For both concepts the research work at hand develops exercises, storyboards, auxiliary materials and parameters for the data analysis. The studies were conducted with students and experienced engineers. First conclusions on the analytic processes can be drawn. While analyzing technical systems to create a functional understanding, subjects needed to identify the components and realize its geometrical and substantial properties as well. Only by doing so, the subjects were able to interpret the technical system in detail and realize interactions of adjacent components. The same is relevant for the synthesis-driven analysis. The determination of relevant characteristics on the embodiment design is essential for a successful analysis and synthesis of technical systems. These characteristics include as well working surfaces of adjacent components. A summary of important findings on analysis processes and on the study design is given and conclusions on further examinations of the analysis in empirical studies are discussed.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademische Mitarbeiterin des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen für die Förderung und Prägung meiner wissenschaftlichen Arbeit sowie meiner beruflichen Entwicklung. Durch kontinuierliche Diskussionen und wertvolle Anregungen entstanden immer wieder neue Perspektiven und Ideen, welche die vorliegende Forschungsarbeit maßgeblich beeinflusst haben. Für die mir gegebenen Gestaltungsmöglichkeiten und das entgegengebrachte Vertrauen danke ich ihm sehr.

Für die Übernahme des Korreferats und die damit verbundene Unterstützung möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber herzlich danken.

Mein Dank gilt außerdem Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers und allen Mitarbeitern des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Die Unterstützung durch das gesamte IPEK-Team und die tolle Arbeitsatmosphäre hat sehr zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen.

Weiter bedanke ich mich bei allen Studien-, Bachelor- und Masterarbeiter/innen sowie studentischen Hilfskräften, die ich betreuen durfte, für die vielen anregenden Diskussionen und die hilfreiche Unterstützung. Zudem möchte ich auch den zahlreichen Probanden für die Teilnahme an den durchgeführten Studien danken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, besonders meiner Mutter und auch meinen Brüdern, für die wichtige Stütze, den Halt und die Ermunterungen während der intensiven Promotionszeit.

Karlsruhe 2017

Anne Ruckpaul

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Fokus und Ziele der Arbeit	3
1.2	Struktur der Arbeit	3
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Der Konstruktionsprozess	5
2.1.1	Konstruktion als Problemlösungsprozess	5
2.1.2	Arten des Konstruierens	8
2.1.3	Methodische Unterstützung des Konstruktionsprozesses	9
2.1.4	Analyse- und Syntheseschritte während der Konstruktion	12
2.1.5	Zwischenfazit	14
2.2	Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Konstruktionsprozess	14
2.2.1	Definition der Funktion und der Gestalt	15
2.2.2	Methodische Unterstützung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	18
2.2.3	Zwischenfazit	21
2.3	Empirische Studien im Bereich der Konstruktionsforschung	22
2.3.1	Grundlagen der empirischen Forschung	22
2.3.2	Etablierte Erhebungsmethoden in der empirischen Forschung	27
2.3.3	Studien und Erkenntnisse der Konstruktionsforschung	30
2.3.4	Zwischenfazit	34
2.4	Konstruieren aus Sicht der Kognitiven Psychologie	34
2.4.1	Kognitionspsychologische Grundlagen	35
2.4.2	Funktionale Gebundenheit als Einfluss auf den Problemlösungsprozess	41
2.5	Eye Tracking Technologie	42
2.5.1	Grundlagen der Eye Tracking Technologie	43
2.5.2	Auswertung von Blickdaten	49
2.5.3	Einsatzbereiche der Eye Tracking Technologie	57
2.5.4	Zwischenfazit	64
2.6	Schlussfolgerung zum Stand der Forschung	65
3	Zielsetzung der Arbeit	66
3.1	Teilziel 1: Einsatz der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik	66
3.2	Teilziel 2: Untersuchungen von Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz der Eye Tracking Technologie	67
4	Forschungsdesign	69
4.1	Forschungsfragen	69
4.2	Forschungsvorgehen	70
4.3	Verwendete Eye Tracking Hardware und Software	73

4.3.1	Hardware	73
4.3.2	Software	75
5	Einsatz der Eye Tracking Technologie in der Konstruktionsforschung	77
5.1	Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie	78
5.1.1	Repräsentationsformen der betrachteten Objekte	78
5.1.2	Explorative Studie zu Auswertungsmöglichkeiten.....	79
5.1.3	Auswertungsmöglichkeiten.....	82
5.1.4	Fazit zu den Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie.....	87
5.2	Kombination von Eye Tracking mit etablierten Erhebungs-methoden der empirischen Forschung	88
5.2.1	Kombination von Eye Tracking und Think-Aloud	88
5.2.2	Fazit zur Kombination von Eye Tracking Technologie und Think-Aloud	100
5.2.3	Kombination von Eye Tracking und weiteren Erhebungsmethoden.....	101
5.3	Anforderungen an Eye Tracking Studien im Bereich der Konstruktionsforschung und Umsetzungsmöglichkeiten	102
5.3.1	Anforderungen an das Studiendesign und Umsetzungsmöglichkeiten	103
5.3.2	Störvariablen und Gegenmaßnahmen.....	109
5.3.3	Umsetzung der Anforderungen in Eye Tracking Studien	110
5.3.4	Planung und Ablauf der Studien.....	113
6	Studie „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“	115
6.1	Forschungsziel und Forschungsfragen	115
6.2	Aufgabenstellung und Erhebungsmethoden	116
6.2.1	Festlegung der Aufgabenstellung und der Materialien.....	117
6.2.2	Wahl der Erhebungsmethoden.....	119
6.2.3	Wahl der Probandengruppen	120
6.2.4	Festlegung des Ablaufplans	121
6.3	Festlegen der Parameter zur Quantifizierung.....	123
6.4	Durchführung der Studie und Aufbereitung der Daten	124
6.5	Auswertung und Interpretation der Daten	125
6.5.1	Die vier Phasen der Zeichnungsanalyse	125
6.5.2	Beispiel zur Zeichnungsanalyse durch Probanden	128
6.5.3	Breite und Tiefe der Analyse von Experten und Novizen.....	131
6.6	Diskussion der Studienergebnisse.....	134
6.6.1	Vorschläge zum Vorgehen bei einer Analyse zum Aufbau von Systemverständnis.....	135
7	Studie „Synthese-getriebenen Analyse“.....	137
7.1	Forschungsziel und Forschungsfragen	137
7.2	Aufgabenstellung und Erhebungsmethoden	138
7.2.1	Festlegung der Aufgabenstellung und der Materialien.....	139

7.2.2	Wahl der Erhebungsmethoden.....	146
7.2.3	Wahl der Probandengruppen	148
7.2.4	Festlegung des Ablaufplans	149
7.3	Festlegung der Parameter zur Quantifizierung.....	151
7.4	Durchführung der Studie und Aufbereitung der Daten	153
7.5	Auswertung und Interpretation der Daten	157
7.5.1	Qualitative Auswertung der Blickpfadvideos.....	157
7.5.2	Prüfung der Forschungshypothesen auf Signifikanz.....	162
7.5.3	Unterschiede in der Verwendung von Hilfsmitteln	169
7.6	Diskussion der Studienergebnisse und des Studienablaufs.....	170
7.6.1	Vorschläge zum Vorgehen bei einer Synthese-getriebenen Analyse.....	171
7.6.2	Einschränkungen der Ergebnisse.....	173
8	Erkenntnisse für weitere Untersuchungen unter Einsatz von Eye Tracking ..	174
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	177
9.1	Zusammenfassung	177
9.2	Ausblick.....	179
10	Literaturverzeichnis.....	181
11	Glossar	191
12	Anhang	195

Abkürzungsverzeichnis

CTA	Concurrent Think-Aloud
RTA	Retrospective Think-Aloud
AOI	Area of Interest
C&C ² -A	Contact&Channel-Ansatz
PE+K	Produktentwicklung und Konstruktion
EM	Entwicklungsmethodik

1 Einleitung

Die Produktentwicklung wird von einer Vielzahl von Methoden unterstützt. Die Unterstützung der Entwickler reicht von der sehr frühen Phase, wie der Profilfindung, bis zur Markteinführung.² Dabei ist die Akzeptanz und Anwendung der Methoden in der industriellen Praxis nicht immer gegeben. Methoden können nach JÄNSCH³ das Denken und Handeln von Produktentwicklern positiv beeinflussen und sie dabei unterstützen z.B. funktionale Fixierungen oder ungeeignete Vorgehensweisen zu überwinden. Dazu müssen sich die Methoden jedoch an die kognitiven Fähigkeiten von Produktentwicklern richten⁴. In der Produktentwicklung steht daher nach ALBERS ET AL.⁵ der Mensch mit seinen Handlungen im Zentrum der Methodenentwicklung. Die Methoden müssen an die Vorgehensweisen der Entwickler angepasst werden. Dazu ist jedoch Wissen über die Vorgehensweisen von Ingenieuren und Entwicklern notwendig.⁶ Die Beobachtung von Ingenieuren und deren Verhalten mittels empirischen Studien stellt nach ECKERT ET AL.⁷ den ersten Schritt der Methodenentwicklung dar.

Der Großteil von Entwicklungen neuer Produkte basiert nicht auf einer reinen Neukonstruktion. ALBERS ET AL. führt den Begriff der Produktgenerationsentwicklung ein, „die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist.“⁸ Dabei entstehen neue Produkte durch individuelle Variationen von Prinzip oder Gestalt oder auch einer Übernahmevariation. All diese Entwicklungen basieren auf einem Referenzprodukt. Ein tiefes Verständnis von Vorgänger- und Referenzprodukten ist notwendig, um hiervon Teilsysteme übernehmen sowie Prinzip oder Gestalt variieren zu können.⁹

Die Fähigkeit der Systemanalyse ist daher von hoher Wichtigkeit für den Konstruktionsprozess. Dies betonen auch HACKER¹⁰ und BIRKHOFFER¹¹. Intensive Analyseprozesse sind wesentlich für eine erfolgreiche Erarbeitung von Lösungen.

² vgl. bspw. Ehrlenspiel, 2009

³ Jänsch, 2006, S. 195

⁴ Jänsch, 2006, S. 195

⁵ Albers et al., 2011c

⁶ Ehrlenspiel, 2009, S. 14

⁷ Eckert et al., 2003a

⁸ Albers et al., 2015d

⁹ Albers et al., 2015d

¹⁰ Hacker, 2002

¹¹ Birkhofer, 1980a

Analyse- und Syntheseprozesse wechseln sich iterativ während des Konstruktionsprozesses ab.¹² Prozesse müssen von Ingenieuren und Konstrukteuren ausgeführt werden und erfordern eine hohe kognitive Leistung.¹³ Um den Konstrukteur bei seiner täglichen Arbeit stärker unterstützen zu können, müssen die Vorgehensweisen während der Analyse und Synthese in der Tiefe verstanden werden. Erfolgreiche Ingenieure mit langjähriger Konstruktionserfahrung greifen während der Konstruktion meist unbewusst auf diese Erfahrungen zurück.¹⁴ Neue Methoden müssen sich daher nach MATTHIESEN¹⁵ an den Gewohnheiten und Denkprozessen der Konstrukteure orientieren, um erfolgreich unterstützen zu können.

Die Entwicklung neuer Technologien zur Untersuchung des Menschverhaltens bietet die Möglichkeit Vorgehensweisen während des Entwicklungsprozesses sichtbar und auch messbar zu machen. Die Special Interest Group „Human Behavior in Design“ der Design Society treibt dieses Themengebiet stark voran. Neben etablierten Erhebungsmethoden wie Interviews, Beobachtungen, Diskurs-, Dokumentenanalyse und weitere Methoden werden Verfahren der Neurowissenschaften und der Verhaltensforschung zur Untersuchung der Vorgehensweisen von Ingenieuren genutzt.¹⁶ Dazu arbeiten Forscher aus verschiedenen Bereichen wie der Produktentwicklung und der Psychologie zusammen. Eine solche Zusammenarbeit wurde bereits durch die Forschungsarbeit von BADKE-SCHAUB UND FRANKENBERGER¹⁷ zur Untersuchung von Teamprozessen während der Produktentwicklung sehr erfolgreich eingeführt. Die Eye Tracking Technologie ist eine sehr vielversprechende Technologie, um Analyseprozesse während der Konstruktion tiefer zu untersuchen. Die Eye Tracking Technologie wird in vielen Forschungsfeldern zur Unterstützung von empirischen Untersuchungen genutzt.¹⁸ Die Aufnahme der Augenbewegungen in spezifischen Situationen kann Forscher unterstützen Prozesse und Vorgehensweisen genauer zu verstehen. Zur Untersuchung von Analysetätigkeiten während der Konstruktion können neue Blickwinkel auf Vorgehensweisen eröffnet werden. Der Einsatz der Blickdatenerfassung in Kombination mit etablierten Erhebungsmethoden in empirischen Studien verspricht detaillierte Aufnahme von Vorgehensweisen, die zur Weiterentwicklung von Analyse- und Konstruktionsmethoden beitragen.¹⁹

¹² Matthiesen, 2011b

¹³ Hacker, 2002

¹⁴ Matthiesen, 2011b

¹⁵ Matthiesen, 2016c

¹⁶ Proceedings of the HBiD, 2014

¹⁷ Badke-Schaub / Frankenberger, 2004

¹⁸ vgl. Duchowski, 2007b und Holmqvist et al., 2011

¹⁹ Matthiesen et al., 2013

1.1 Fokus und Ziele der Arbeit

Die vorliegende Doktorarbeit leistet einen Beitrag zum Messen und Verstehen von Analyseprozessen während der Konstruktion. Bisher liegen nur wenige Kenntnisse vor, wie Ingenieure detailliert Systeme analysieren, um daraus in iterierenden Schritten von Analyse- und Synthesephasen eine neue Gestaltausprägung eines bestehenden Produkts oder für die nächste Produktgeneration zu generieren. Das Ziel ist daher, den Analyseprozess sichtbar und messbar zu machen, um Erkenntnisse über erfolgreiche und weniger erfolgreiche Vorgehen ableiten zu können. Die Eye Tracking Technologie stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, diese Analyseprozesse in empirischen Studien messbar zu machen.

Um das Ziel zu erreichen, muss zunächst die Anwendbarkeit der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik untersucht werden. Dabei müssen auch Wechselwirkungen mit weiteren etablierten Erhebungsmethoden untersucht werden. Danach werden Anforderungen an empirische Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie erarbeitet. Diese werden in geeignete Studienkonzepte zur Untersuchung von Analyseprozessen umgesetzt.

Die beiden Konzepte werden in jeweils einer empirischen Studie umgesetzt. Über die Durchführung und Auswertung der Studien werden zum einen Aussagen und Vorschläge für erfolgreiche Analyseprozesse von angehenden und erfahrenen Ingenieuren erarbeitet und zum andern Erkenntnisse für weitere Untersuchungen unter Einsatz der Eye Tracking Technologie erlangt.

1.2 Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in neun Kapitel, welche im Folgenden kurz beschrieben werden. In Kapitel 2 werden die Grundlagen in den Bereichen der Konstruktionsmethodik, der empirischen Forschung und der Eye Tracking Technologie erläutert. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit abgeleitet und in Kapitel 4 das Forschungsdesign vorgestellt.

Kapitel 5 widmet sich dem Einsatz der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsforschung. Dazu werden Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, Kombinationen mit etablierten Erhebungsmethoden diskutiert und Anforderungen an empirische Studien unter Einsatz der Blickdatenerfassung abgeleitet.

Die folgenden beiden Kapitel stellen jeweils eine Studie zur Untersuchung von Analyseprozessen dar. In Kapitel 6 liegt der Fokus der Studie auf Analyseprozessen während des Aufbaus von Funktions- und Systemverständnis. Kapitel 7 widmet sich der Untersuchung von Synthese-getriebenen Analyseprozessen. In beiden Kapiteln werden der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung der Studien im Detail

4 Einleitung

beschrieben und die gewonnenen Aussagen über Analyseprozesse diskutiert. Aus den Erkenntnissen der Studien werden jeweils Vorschläge für erfolgreiche Analyseprozesse abgeleitet.

Kapitel 8 fasst Beobachtungen zu Studienaufbau, Durchführung und Auswertung der beiden durchgeführten Studien zusammen und leitet Erkenntnisse für weitere Untersuchungen der Analyseprozesse während der Konstruktion ab.

Abschließend werden die alle erzielten Ergebnisse der Arbeit in Kapitel 9 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiter Forschungsvorhaben gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Der Konstruktionsprozess

2.1.1 Konstruktion als Problemlösungsprozess

Das Konstruieren ist nach BOCK²⁰ ein „schöpferisches und lückenloses Vorausdenken eines technischen Gebildes, das den Forderungen des historisch bedingten Standes der technischen Entwicklung entspricht, und Schaffen aller zweckmäßigen Unterlagen für seine stoffliche Verwirklichung“. Dabei wird das Konstruieren eines technischen Systems in der Literatur oft mit einem Problemlösungsprozess verglichen. Ein Problem liegt vor, wenn zwischen der Ausgangssituation und der Endsituation eine Barriere liegt, die es zu überwinden gilt.²¹ Um ein Konstruktionsproblem lösen zu können, muss sich der Konstrukteur nach DÖRNER zunächst „Wissen über den Realitätsbereich, in dem das Problem zu lösen ist“²², aneignen. Dabei wirken viele verschiedene Faktoren auf den Konstruktionsprozess ein. Neben dem Konstruktionsproblem können die Faktoren in individuelle Einflüsse und äußere Einflüsse eingeteilt werden, welche mit dem Prozess wechselwirken (Abbildung 2-1).²³

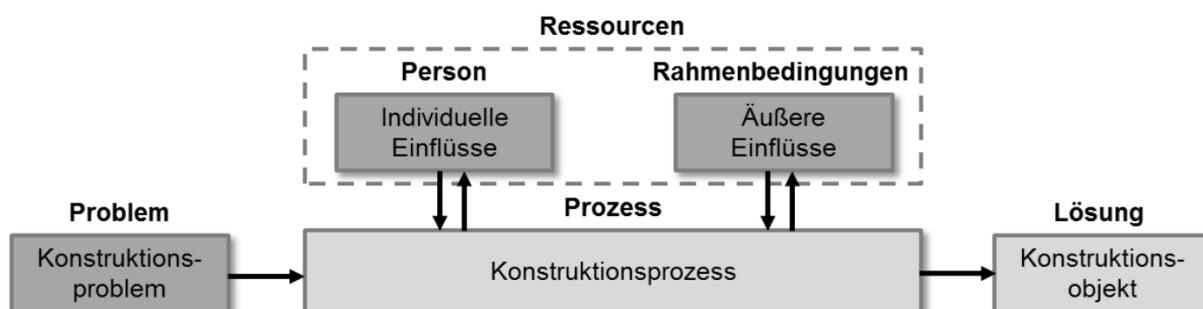


Abbildung 2-1: Einflüsse auf den Problemlösungsprozess (WIEDNER in Anlehnung an GÜNTHER²⁴)

ALBERS UND MEBOLDT²⁵ definieren ein Konstruktionsproblem als Abweichung des Ist-Zustands von dem Soll-Zustand und unterscheiden die Notsituation von der Planungssituation (siehe Abbildung 2-2). Der Problemlösungsprozess muss dabei an die jeweils vorliegende Situation angepasst werden.

²⁰ Bock, 1955

²¹ Dörner, 1979

²² Dörner, 1979, S. 26 f.

²³ Günther, 1998

²⁴ Wiedner, 2013 nach Günther, 1998

²⁵ Albers / Meboldt, 2006

Bei einer Notsituation weicht der Ist-Zustand durch ein bestimmtes Ereignis negativ vom Soll-Zustand ab. Innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne muss der ursprüngliche Ist-Zustand wiederhergestellt werden. Der Problemlösungsprozess muss daher auf Zeit optimiert werden. Dabei unterscheidet sich dieser Vorgang von dem Prozess bei einer vorliegenden Planungssituation. Hier wird die Qualität optimiert, da ein neuer Soll-Zustand definiert wird und der Ist-Zustand entsprechend angepasst werden muss.²⁶ EHRENSPIEL²⁷ bezeichnet dabei die Qualität einer Lösung als „Grad der Annäherung der Ist- an die Soll-Eigenschaften“.

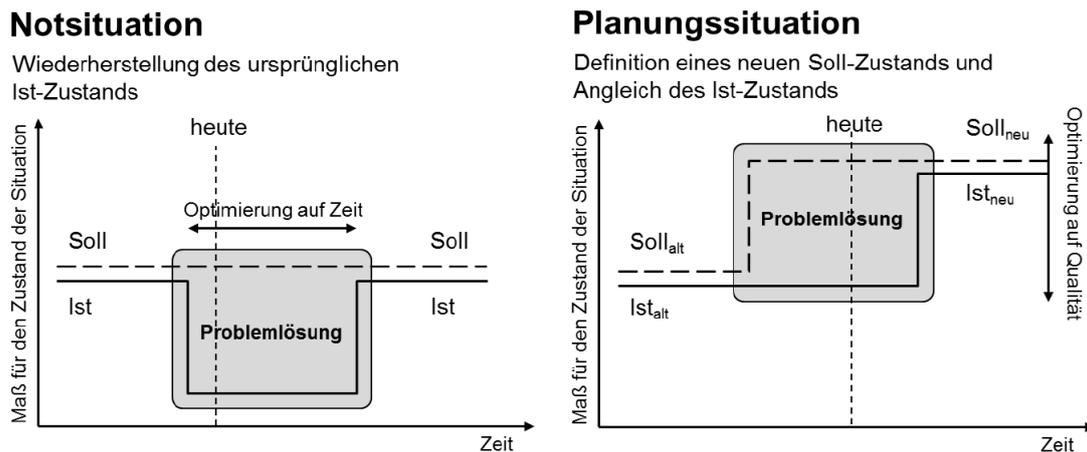


Abbildung 2-2: Not- und Planungssituation nach ALBERS UND MEBOLDT²⁸

Ein Konstruktionsproblem wird nach GÜNTHER²⁹ zusätzlich durch die Merkmale Abhängigkeiten, Komplexität, Intransparenz und Vielfalt charakterisiert. Die Zusammenhänge zwischen Funktion, Gestalt, Kosten und weiteren Faktoren muss erfasst werden. Der Konstrukteur muss Teilprobleme, die sich gegenseitig beeinflussen, oftmals parallel bearbeiten. Dabei sind Ziele, Randbedingungen und Anforderungen meist nicht vollständig bekannt und es müssen Annahmen unter Unterstützung von Berechnungen oder Simulationen getätigt werden, um Entscheidungen treffen zu können. Durch die Vielfalt von geforderten Zielen und Anforderungen können Zielkonflikte entstehen, welche nur durch das Eingehen von Kompromissen gelöst werden können.

Die individuellen Einflüsse werden durch den bearbeitenden Konstrukteur in den Prozess eingebracht. Jeder Konstrukteur bringt dabei unterschiedliche Ausprägungen der „Grundeigenschaften“ mit. Diese werden bestimmt durch

- das Wissen,

²⁶ Albers / Meboldt, 2006

²⁷ Ehrlenspiel, 2009, S. 247

²⁸ vgl. Albers / Meboldt, 2006

²⁹ Günther, 1998, S. 16

- die Fähigkeiten und die Fertigkeiten
- sowie die vorliegende Emotion und Motivation.³⁰

Das Wissen kann nach GÜNTHER³¹ in Sachwissen und Methodenwissen unterteilt werden. Es kann jeweils in expliziter oder impliziter Form vorliegen.³² Das explizite Wissen ist jederzeit abfragbar, während das implizite Wissen unbewusst vorliegt und nicht weiter vermittelt werden kann. Über das Sachwissen werden Fakten, Regeln sowie grundlegende Inhalte des Fachgebiets gespeichert. Dies reicht von der Kenntnis der Maschinenelemente bis hin zu Regeln für Berechnungen. Unter Methodenwissen versteht GÜNTHER das Wissen über Vorgehensweisen und den Konstruktionsprozess, welches zur Anwendung des Sachwissens notwendig ist.³³

Zu den Fähigkeiten und Fertigkeiten zählen die sehr wichtigen Analyse- und Synthesefähigkeiten.³⁴ Die Analyse wird zur Beurteilung bestehender technischer Systeme benötigt, während zur Generierung neuer Lösungen die Synthesefähigkeiten gefragt sind. In einer Studie der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) wurden die Anforderungen an den Beruf des Konstrukteurs in der Zukunft untersucht.³⁵ Nach Meinung von 46 befragten Professoren in der acatech-Studie gelten das Dimensionieren, das Modellieren, die Festlegung von Kosten und Toleranzen, das Optimieren, die Projektplanung, das Skizzieren und das Simulieren zu den wichtigsten Fertigkeiten. Dazu zählt unter anderem auch der Umgang mit unterstützender Software, wie z.B. CAD-Systemen.

Als äußere Einflüsse auf den Konstruktionsprozess fasst DYLLA³⁶ die folgenden Faktoren zusammen:

- Aufgabenstellung
- verfügbare Informationen
- verfügbare Arbeitsmittel
- Arbeitsumgebung,
- zur Verfügung stehende Zeit
- soziale und organisatorische Einbindung
- externe Entscheidungen

³⁰ Günther, 1998, S. 23 ff.

³¹ Günther, 1998, S. 23

³² Dörner, 1989

³³ Günther, 1998, S. 23 f.

³⁴ Pahl et al., 2006

³⁵ Albers et al., 2012

³⁶ Dylla, 1990, S. 28

Es besteht zwar kein kausaler Zusammenhang zwischen den äußeren Einflussgrößen und dem ablaufenden Konstruktionsprozess, sie müssen jedoch berücksichtigt werden.³⁷

2.1.2 Arten des Konstruierens

Nach der klassischen Konstruktionsmethodik werden Konstruktionen nach unterschiedlicher Bearbeitungstiefe in drei Konstruktionsarten unterteilt, die Neukonstruktion, die Anpassungskonstruktion und die Variantenkonstruktion.³⁸ Die drei Arten unterscheiden sich dabei in ihrem Informationsbedarf und der Planbarkeit.

- Während der *Neukonstruktion* werden neue Lösungsprinzipien erarbeitet oder bekannte Prinzipien neu kombiniert. Die Entwickler und Konstrukteure haben dabei Spielraum für Kreativität in der Konzeptphase, bevor Entwürfe generiert und ausgearbeitet werden.
- Bei der *Anpassungskonstruktion* wird auf einem bestehenden Konzept aufgebaut und neue Entwürfe werden generiert. Dabei wird die Gestalt mit Werkstoffen und Abmessungen an die geänderten Anforderungen angepasst. Bei komplexen Produkten können auch Neukonstruktionen einzelner Funktionsträger notwendig sein.
- Die *Variantenkonstruktion* zeichnet sich durch Änderungen der Abmessungen bei Kenntnis der ursprünglichen Gestalt und des Werkstoffs aus. Dies ist der Fall, wenn ein Produkt z.B. durch veränderte Kundenanforderungen oder neue Leistungsanforderungen, variiert werden muss. Der Neuheitsgrad ist hierbei gering.³⁹

Diese Einteilung ist jedoch in der Praxis nur selten anwendbar. ALBERS ET AL.⁴⁰ schlägt daher vor, sich von dieser Einteilung zu lösen und die Konstruktion aus Sicht der Produktgenerationsentwicklung zu betrachten. Hierbei sind Prinziplösungen meist bekannt und werden selten geändert. Es sollen „*jeweils individuell Anteile der Konstruktionsumfänge eingeordnet werden*“.⁴¹ Produkte werden sowohl durch Anpassung von Teilsystemen also auch durch die Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert. Die Aktivitäten der Produktgenerationsentwicklungen können in drei Variationsarten unterteilt werden:

- **Prinzipvariation:**
Durch Prinzipvariation werden Teilsysteme durch Adaption und Modifikation

³⁷ Dylla, 1990, S. 27

³⁸ Ehrlenspiel, 2009, S. 260 ff.

³⁹ Ehrlenspiel, 2009, S. 260 ff.

⁴⁰ Albers et al., 2015d

⁴¹ Albers et al., 2015d

von Lösungsprinzipien aus Produkten mit ähnlichen Funktionsweisen neuentwickelt. Dabei werden die Lösungsprinzipien in einem neuen Kontext eingesetzt.

- **Gestaltvariation:**
Für eine Gestaltvariation werden bekannte Lösungsprinzipien von Referenzprodukten übernommen und die funktionsbestimmenden Eigenschaften an die neuen Anforderungen z.B. an die Wettbewerbs- und Leistungsfähigkeit, variiert.
- **Übernahmevariation:**
Hierzu werden ausgearbeitete Lösungen von Referenzprodukten in die neue Produktgeneration übernommen und zur Systemintegration an die Schnittstellen angepasst.⁴²

Die Entwicklung von neuen Produktgenerationen kann damit durch die Anteile der Variationsarten für einzelne Funktionseinheiten oder Teilsysteme beschrieben werden. Dabei spricht ALBERS ET AL.⁴³ jeweils von „Neuentwicklungen“, die das Ergebnis einer Vielzahl von konstruktiver Anpassungen und Variationen von Lösungsprinzipien beinhalten und löst sich von dem Begriff der Neukonstruktion im Sinne der klassischen Definition. Damit wird wie bei anderen Autoren die Mehrheit der Produktentwicklungsprojekte betont, die auf bereits bekannten Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukten beruht.⁴⁴

Weiter kann in der Konstruktionsmethodik zwischen dem korrigierenden und generierenden Vorgehen unterschieden werden. Das korrigierende Vorgehen zielt dabei auf die Änderung eines Produkts mit möglichst geringem Aufwand. Das Funktionsrisiko ist damit meist gering, da in der Regel kaum neue Fehler und Mängel durch die vorwiegende Übernahmevariation der Teilsysteme auftreten. Dagegen werden beim generierenden Vorgehen oft mehrere neue Lösungen für die Entwicklung der Teilsysteme angestrebt, aus denen die beste Lösung ausgewählt werden kann. Der höhere Aufwand und das höhere Risiko werden für innovative Lösungen in Kauf genommen.⁴⁵

2.1.3 Methodische Unterstützung des Konstruktionsprozesses

Konstrukteure sind maßgeblich an der Entstehung neuer Produkte beteiligt. Methoden in der Produktentwicklung müssen sich daher am Menschen orientieren

⁴² Albers et al., 2015d

⁴³ Albers et al., 2015d

⁴⁴ vgl. Eckert et al., 2010 und Wiedner, 2013

⁴⁵ Ehrlenspiel, 2009, S. 267 f.

und seine Vorgehensweisen unterstützen.⁴⁶ Unter einer Konstruktionsmethode wird ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme verstanden. Sie haben sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie ergeben und wurden mit Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergänzt.⁴⁷

Nach EHRENSPIEL⁴⁸ entsteht die Konstruktionsmethodik aus zwei Strängen der wissenschaftlichen Betrachtung (Abbildung 2-3). Zum einen wird sie aus der Theorie der technischen Systeme bestimmt, die auf physikalischen sowie technologischen Grundlagen basiert. Zum anderen fließt auf Basis des Konstrukteurs als Mensch die Theorie der Konstruktionsprozesse in die Konstruktionsmethodik ein.

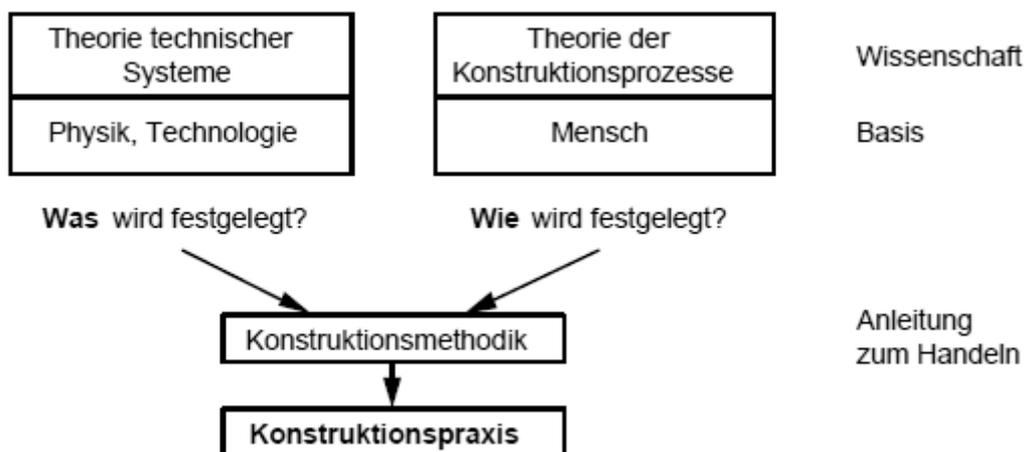


Abbildung 2-3: Der Zusammenhang zwischen der Theorie technischer Systeme und der Theorie der Konstruktionsprozesse⁴⁹

Die Theorie technischer Systeme ist durch ihre Basis der Physik und Technologie weniger strittig als die Theorie der Konstruktionsprozesse. Diese gründet auf den schwer beobachtbaren Denkprozessen der Menschen.⁵⁰

Der VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE hat seit 1986 eine „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ veröffentlicht, die bestehende Konstruktionsmethoden aus unterschiedlichen Branchen integriert. Eine generelle methodische Vorgehensweise für die Entwicklung und Konstruktion von Produkten aus unterschiedlichen Branchen wird in der VDI Richtlinie 2221 vorgeschlagen.⁵¹ Die Richtlinie besteht aus sieben Arbeitsabschnitten, die abhängig von der

⁴⁶ Ehrlenspiel, 2009

⁴⁷ Pahl et al., 2006

⁴⁸ Ehrlenspiel, 2009

⁴⁹ Ehrlenspiel, 2009, S. 17

⁵⁰ Ehrlenspiel, 2009, S. 17

⁵¹ Verein Deutscher Ingenieure, 1993

Aufgabenstellung nacheinander oder iterativ durchlaufen werden können (Abbildung 2-4). Zusätzlich hält sie auch die Arbeitsergebnisse der Abschnitte fest. Die Arbeitsabschnitte reichen dabei von der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung mit dem Ergebnis einer Anforderungsliste bis hin zur Ausarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben mit dem Ergebnis der Produktdokumentation.

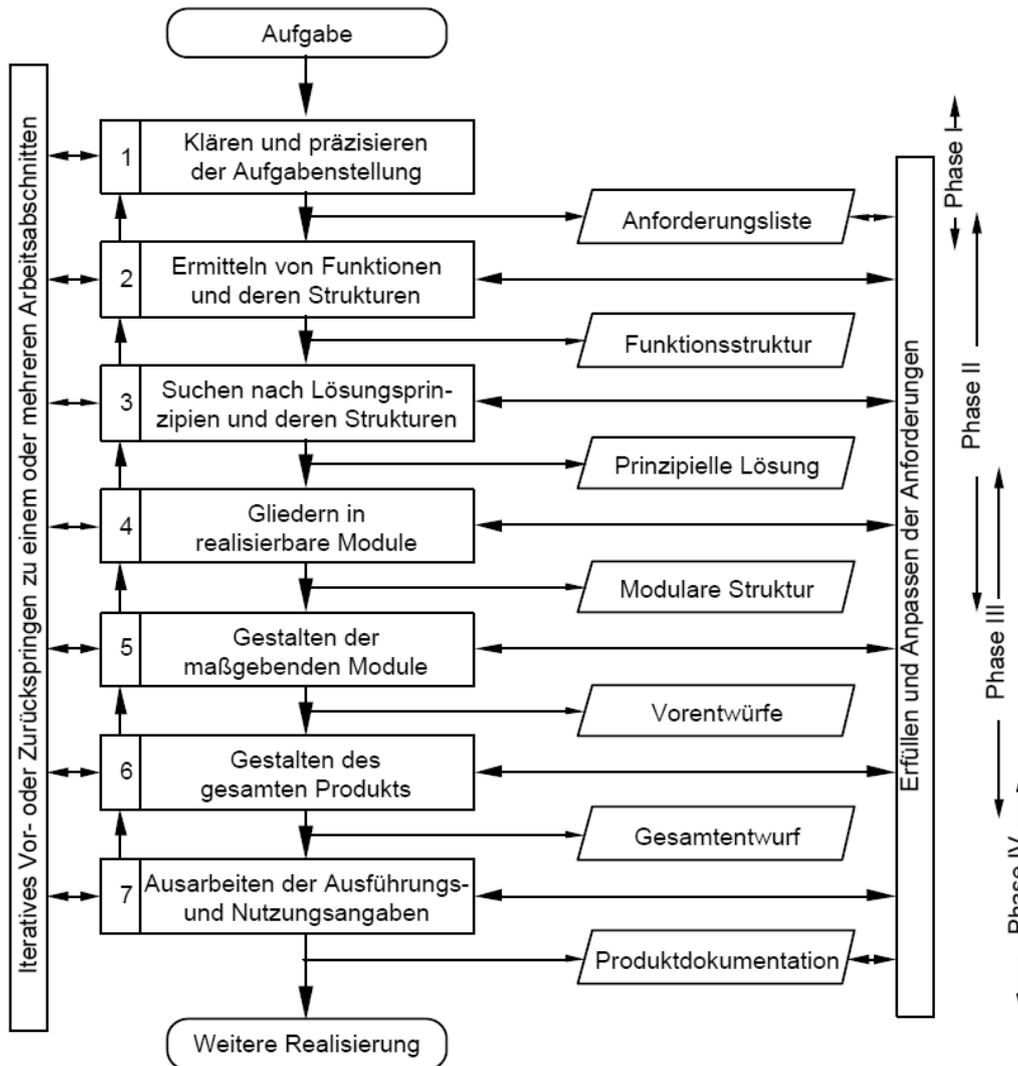


Abbildung 2-4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren⁵²

Dabei bildet die VDI 2221 eine Rahmenrichtlinie. Die beiden VDI-Richtlinien 2222⁵³ und 2223⁵⁴ vertiefen die Arbeitsabschnitte und bieten eine detailliertere Ausarbeitung der Vorgehensweisen. Die Richtlinie fokussiert die Generierung neuer Produkte und bietet daher vorwiegend Methoden zur Unterstützung der Synthesetätigkeiten. Die Analyse von Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukten wird nicht adressiert.

⁵² Verein Deutscher Ingenieure, 1993

⁵³ Verein Deutscher Ingenieure, 1997

⁵⁴ Verein Deutscher Ingenieure, 2004

PAHL ET AL.⁵⁵ unterteilen den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in vier Hauptphasen:

- dem Planen und Klären der Aufgabe,
- dem Konzipieren,
- dem Entwerfen und
- der Ausarbeitung.

Zu jeder Phase werden spezifische Methoden zur Unterstützung angeführt. Die Iterationen von Analyse und Synthese im Konstruktionsprozess werden nicht durchgängig berücksichtigt. Dabei wird die wichtige Rolle der Analyse als Mittel zur Informationsgewinnung durch die Untersuchung von Eigenschaften und Merkmalen einzelner Elemente und deren Verknüpfungen zwar erwähnt. Die Beachtung der Analyse bezieht sich dabei aber im Wesentlichen auf die Problem-, Struktur- und Schwachstellenanalyse.

2.1.4 Analyse- und Syntheseschritte während der Konstruktion

Der Produktentwicklungsprozess ist stark von iterativen Arbeitsschritten geprägt.⁵⁶ Iterationen finden bei jeglichen Arten des Konstruierens innerhalb des Konstruktionsprozesses statt. Dabei wechseln sich Analyse- und Synthesephasen ab. Die Schritte verlaufen ineinander verschachtelt ab und hängen untrennbar zusammen.⁵⁷ Währenddessen werden nach WEBER UND WERNER⁵⁸ kontinuierlich Produkteigenschaften bestimmt und festgelegt. Ausführliche Analysetätigkeiten sind nach HACKER⁵⁹, BIRKHOFFER⁶⁰ und weiteren Autoren ein wesentliches Merkmal für die erfolgreiche Entwicklung neuer Produkte. Während der Analyse werden wichtige Erkenntnisse für die Lösungsfindung erarbeitet.

Die Konstruktion wird aus denkpsychologischer Sicht als das Vorausdenken eines technischen Gebildes und eines Funktionszusammenhangs des technischen Systems verstanden.⁶¹ Dieses Vorausdenken ist ein komplexer Prozess und die Bildung von Zusammenhängen zwischen dem technischen Gebilde und der Funktion läuft iterativ ab⁶². Die Synthese neuer Teilsysteme und die Analyse der vorliegenden oder

⁵⁵ Pahl et al., 2006

⁵⁶ Meboldt et al., 2012

⁵⁷ Alink, 2010

⁵⁸ Weber / Werner, 2001b

⁵⁹ Hacker, 2002

⁶⁰ Birkhofer, 1980a

⁶¹ Hacker, 2002

⁶² Matthiesen, 2011b

vorgedachten Gestalt wechseln sich ab.⁶³ Während der Synthese wird eine intendierte Funktion in eine Gestalt übersetzt.⁶⁴ Um zu überprüfen, ob die Gestalt auch die vorgesehene Funktion erfüllt, muss diese wiederum analysiert werden (siehe Abbildung 2-5). Dieser iterative Prozess des Synthetisierens und Analysierens findet auf unterschiedlichen Ebenen der Gestaltausprägung statt.⁶⁵

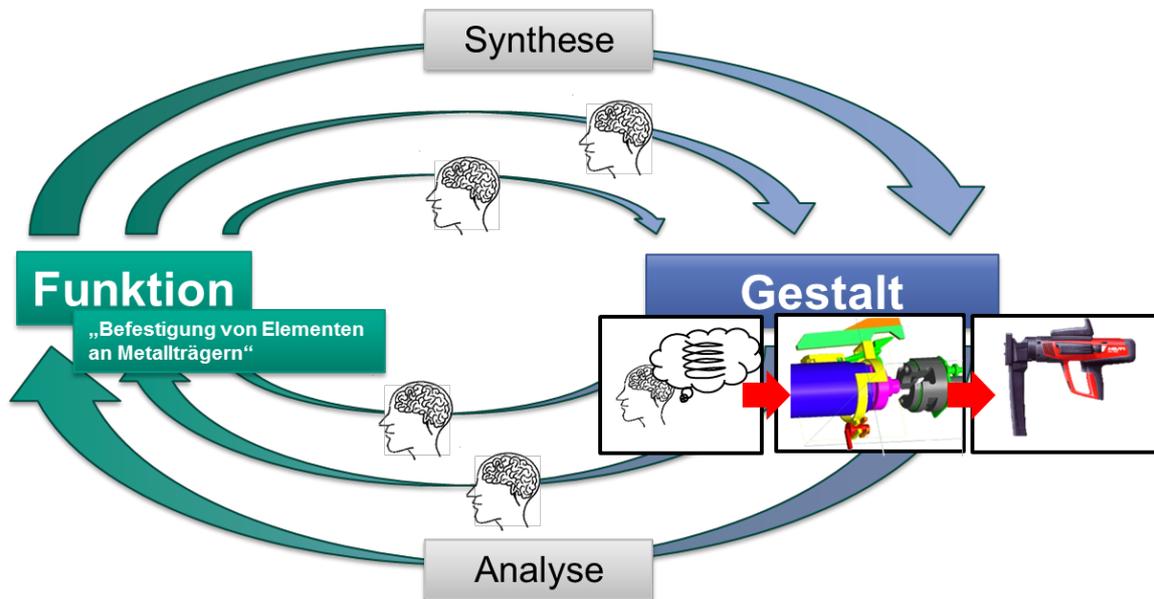


Abbildung 2-5: Iterative Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten auf unterschiedlichen Ebenen der Gestaltausprägungen⁶⁶

Nach MATTHIESEN⁶⁷ sind zur Übersetzung der Funktion in eine neue Gestalt jeweils Denkprozesse notwendig. Die Gestaltausprägungen können dabei eine erste Idee (Abbildung 2-5: die Umsetzung der Funktion durch ein Federelement) sein, aber auch einzelne fertigungsgerechte Bauteile, Prototypen oder das marktreife Endprodukt darstellen.

Die iterative Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten ist nach WEBER UND WERNER beendet, „wenn alle zur Herstellung des Produkts benötigten Merkmale definiert sind und wenn alle relevanten Eigenschaften erstens bestimmt werden können und zweitens den ursprünglich geforderten Produkteigenschaften hinreichend gut entsprechen.“⁶⁸ WEBER UND WERNER⁶⁹ betonen dazu, dass abhängig vom Fortschritt des Konstruktionsprozesses unterschiedliche Methoden und Werkzeuge für die

⁶³ Ehrlenspiel, 2009

⁶⁴ Hacker, 2002

⁶⁵ Matthiesen, 2011b und Lohmeyer, 2013

⁶⁶ Aus dem Vortrag zu Matthiesen, 2011b

⁶⁷ Matthiesen, 2011b und Matthiesen, 2016c

⁶⁸ Weber / Werner, 2001b

⁶⁹ Weber / Werner, 2001b

Analyse und Synthese angewandt werden. In den frühen Phasen der Konstruktion greifen Konstrukteure oft auf die Skizziertechnik zur Unterstützung der Denkvorgänge zurück. Im fortgeschrittenen Konstruktionsprozess kommen hingegen 3D-CAD-Werkzeuge zum Einsatz.⁷⁰

2.1.5 Zwischenfazit

Das Konstruieren kann als Problemlösungsprozess gesehen werden, welcher durch iterative Phasen der Analyse und Synthese von Konstrukteuren bearbeitet wird. Dabei bauen die Neuentwicklungen größtenteils auf Vorgängersystemen auf, in dem die Prinzipien oder die Gestalt von Teilsystemen variiert oder übernommen werden können. Eine erfolgreiche Analyse von bestehenden Konstruktionen ist dabei wichtig, um eine ausreichende Wissensbasis für die Synthese neuer Objekte zu schaffen. In der klassischen Konstruktionsmethodik wird die Analyse jedoch noch wenig adressiert.⁷¹ Dabei bedarf auch die Analysephase der methodischen Unterstützung. Es müssen die Zusammenhänge zwischen der vorliegenden Gestalt und deren Funktionen gebildet werden. Im Folgenden wird der Begriff der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge eingeführt und ein Überblick über die methodische Unterstützung gegeben.

2.2 Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Konstruktionsprozess

Konstruieren kann nach HACKER⁷² als das Vorausdenken von technischen Gebilden verstanden werden, die mit ihrer Gestalt und Struktur Funktionen realisieren müssen. Das Vorausdenken des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs ist ein komplexer Prozess und die Übersetzung von Funktionen in eine Gestalt läuft iterativ ab.⁷³ Während der Synthese wird eine intendierte Funktion in eine Gestalt übersetzt.⁷⁴ Um zu überprüfen, ob die Gestalt auch die vorgesehene Funktion erfüllt, muss diese wiederum analysiert werden. HACKER⁷⁵ stellt fest, dass durch „*Konzentration auf die Objekte, die die Funktion bestimmen*“, der Erfolg der Konstruktion entscheidend beeinflusst wird.

Die Funktion und die Qualität der Funktionserfüllung können nicht direkt beeinflusst werden, sondern nur indirekt durch Änderungen und Festlegung der Produktgestalt. Dabei befasst sich eine Vielzahl konstruktionswissenschaftlicher Arbeiten mit den

⁷⁰ Lindemann, 2009

⁷¹ Matthiesen, 2011b

⁷² Hacker, 2002

⁷³ Matthiesen, 2016c

⁷⁴ Hacker, 2002

⁷⁵ Hacker, 2002

Begriffen der Funktion und der Gestalt sowie deren kausale Zusammenhänge und ihrer Bedeutung.

2.2.1 Definition der Funktion und der Gestalt

Die Begriffe der Funktion und der Gestalt werden in der Konstruktionswissenschaft unterschiedlich verstanden, was zu einer Vielzahl unterschiedlicher Auffassungen von Autoren führt. Daher betrachtet dieses Kapitel zunächst die verschiedenen Bedeutungsvarianten, bevor die Begriffe für die vorliegende Forschungsarbeit definiert werden.

Vor allem der Funktionsbegriff weist unterschiedliche Bedeutungen auf. Funktionen sind ein fundamentaler Teil der meisten präskriptiven Konstruktionsmethoden. Sie sind jedoch schwer greifbar und werden unterschiedlich definiert. VERMAAS⁷⁶ weist darauf hin, dass eine beispielhafte Betrachtung von Forschungsarbeiten zum Thema Funktionen bereits ausreicht, um die Vielfalt der verschiedenen Auffassungen zu erfassen. Von ERDEN ET AL.⁷⁷ wurde beispielsweise in einer Studie eine Liste mit 18 konstruktionswissenschaftlichen Theorien, Methoden und Modellen erstellt, die alle den Funktionsbegriff unterschiedlich auffassen. ALINK⁷⁸ erklärt die große Variation mit den verschiedenen Perspektiven der Konstruktionswissenschaft und der Praxis auf die Entwicklung von Produkten. ECKERT ET AL. weisen in einer Studie die Variation des Funktionsverständnisses von Konstrukteuren nach, die alle die Funktionsweise desselben Produktes beschreiben sollten. Das individuelle Verständnis des Funktionsbegriffs hat dabei die Analysefähigkeit beeinflusst.

Die folgenden Beispiele verdeutlichen repräsentativ die Bedeutungsvielfalt von Funktionen. Nach der VDI Richtlinie 2221⁷⁹ ist eine Funktion „*eine Zustandsänderung von Stoff, Energie und Information*“ und wird lösungsneutral formuliert. Da die VDI Richtlinie aus dem Stand der Forschung entspringt, entstammt sie unter anderem von Arbeiten von PAHL ET AL.⁸⁰. Darin wird zwischen aufgabenspezifischen, allgemein anwendbaren und logischen Beschreibungen von Funktionen unterschieden. Für alle Beschreibungsarten wird auf den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen verwiesen. PAHL ET AL. definieren eine aufgabenspezifische Funktion als den „*gewollten Zusammenhang*“⁸¹ zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Da PAHL ET AL. Funktionen in den frühen Phasen der Konstruktion definieren, sollen diese abstrakt und lösungsneutral formuliert

⁷⁶ Vermaas, 2010

⁷⁷ Erden et al., 2008

⁷⁸ Alink, 2010

⁷⁹ Verein Deutscher Ingenieure, 1993

⁸⁰ Pahl et al., 2006

⁸¹ Pahl et al., 2006, S. 44

werden. Diese Art der Formulierung soll eine Einschränkung von Lösungs- und Umsetzungsmöglichkeiten verhindern. Beispiele für solche Funktionen sind „Wandeln“, „Leiten“ oder „Speichern“. MATTHIESEN⁸² greift die Definition der VDI Richtlinie auf, beschränkt sich aber nicht nur auf den gewollten Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Er erweitert den Funktionsbegriff, in dem er das Verhalten in seine Definition integriert. Zusätzlich verweist MATTHIESEN darauf, dass der Abstraktionsgrad der Funktionsformulierung abhängig von dem verfolgten Ziel gewählt werden kann.

Mit der rein produktzentrierten Sichtweise, die auf physikalischen Wirkzusammenhängen basiert, können jedoch z.B. die Interaktionen zwischen dem Menschen und dem Produkt nur schwer beschrieben werden. CHANDRASEKARAN UND JOSEPHSON⁸³ sowie BROWN UND BLESSING⁸⁴ ergänzen den Funktionsbegriff daher um die Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umwelt. ALBERS ET AL.⁸⁵ und ALINK⁸⁶ unterscheiden daher „zwischen Funktion als beabsichtigte Wirkung und Funktion als Beschreibung der Vorgänge im System“. Beide Bedeutungen können gleichberechtigt verwendet werden.

VERMAAS⁸⁷ greift die unterschiedlichen Auffassungen der vorhergenannten Autoren auf und fasst die Aussagen über den Funktionsbegriff auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zusammen:

- Beschreibungen des Zwecks bzw. der Absichten, die mit dem Produkt erreicht werden sollen,
- Beschreibungen des beabsichtigten Verhaltens eines Produkts in Relation zu seiner Umwelt
- Beschreibungen des tatsächlichen Verhaltens und der physikalischen Vorgänge, die eine Wirkung erzielen.⁸⁸

ALINK⁸⁹ leitet aus den drei Arten des Funktionsverständnisses die folgende Definition ab, die bereits von weiteren Autoren⁹⁰ genutzt wurde und auch in der vorliegenden Arbeit verwendet werden soll.

⁸² Matthiesen, 2002a, S. 46

⁸³ Brown / Blessing, 2005

⁸⁴ Chandrasekaran / Josephson, 2000

⁸⁵ Albers et al., 2008b

⁸⁶ Alink, 2010

⁸⁷ Vermaas, 2010

⁸⁸ Vermaas, 2010

⁸⁹ Alink, 2010

⁹⁰ vgl. Wintergerst, 2015

Definition des Begriffs „Funktion“ für die vorliegende Arbeit⁹¹:

Der Begriff der Funktion kann verschiedene Bedeutungen haben. Folgende Bedeutungen gelten für die vorliegende Arbeit: Die Funktion im Sinne des ...

- ... *Zwecks* beschreibt die Absichten des Produkt bzw. der Teilsysteme und beschreibt die Wirkung auf die Umgebung.
- ... *beabsichtigten Verhaltens* beschreibt die zu erwartende Reaktion eines Produkts auf Interaktionen mit der Umwelt und beschreibt in idealisierter Form die Zusammenhänge im Inneren des Systems.
- ... *tatsächlichen Verhaltens* beschreibt die in der Anwendung festgestellten und tatsächlich stattfindenden erwünschten oder unerwünschten Wirkungen.

Das Verhalten ergibt sich dabei aus der Gesamtheit der „*Wirkungen und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, den Teilsystemen und mit der Umgebung*“⁹² eines technischen Systems.

Für den Begriff der Gestalt besteht ebenfalls eine Vielfalt an Auffassungen, auch wenn sie nicht an die Bedeutungsvielfalt der Funktion heranreichen. In der Mechanik wird unter der Gestalt die Gesamtheit aller funktionsrelevanten Wirkorte verstanden, die durch ihre geometrischen und stofflichen Eigenschaften beschrieben werden.⁹³

EHRENSPIEL⁹⁴ sieht die Gestalt eines Produkts als die „*Gesamtheit seiner geometrisch beschreibbaren Merkmale einschließlich der Werkstoffart*“.

Für die vorliegende Arbeit wird jedoch die Definition von SPERLICH⁹⁵ übernommen. Er stellte fest, dass in der Literatur zur Konstruktionswissenschaft der Gestalt diejenigen Eigenschaften eines technischen Gebildes zugerechnet werden, die im Gestaltungsprozess festgelegt werden. Jedoch besteht bei den Verfassern eine Uneinheitlichkeit darüber, welche Aktivitäten zur Gestaltungsphase gehören. Aus diesem Grund fasst er alle Eigenschaften zusammen, die das technische Gebilde beschreiben und mit denen die Herstellung vollständig und eindeutig möglich ist.

⁹¹ vgl. Vorlesungsunterlagen zur „Maschinenkonstruktionslehre I“ am KIT, Stand WS 2016

⁹² Wintergerst, 2015

⁹³ Pahl et al., 2006

⁹⁴ Ehrlenspiel, 2009

⁹⁵ Sperlich, 1993

Definition des Begriffs „Gestalt“ für die vorliegende Arbeit:

Die Gestalt definiert sich aus der Gesamtheit der Eigenschaften, die ein technisches Gebilde beschreiben und die zur Herstellung des Gebildes notwendig sind. Dazu gehören

- *geometrische* Eigenschaften,
- *stoffliche* Eigenschaften und
- *Zustandseigenschaften* des technischen Gebildes.⁹⁶

Zu den geometrischen Eigenschaften gehören unter anderem Abmessungen, Abstände, Winkel, Lage und Art der Begrenzungsflächen und Oberflächenqualitäten. Weiter gehören aber auch stoffliche Eigenschaften wie die verwendeten Werkstoffe mit ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften zur Gestalt. Um ein technisches System eindeutig beschreiben zu können, sind auch Zustandseigenschaften notwendig. Darunter zählen unter anderem die Vorspannung, die Temperatur und die Magnetisierung von Komponenten.

2.2.2 Methodische Unterstützung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

In der klassischen Konstruktionsmethodik wird den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen noch wenig Beachtung geschenkt. Die VDI Richtlinie 2221⁹⁷ fordert zwar die Erarbeitung und Dokumentation einer Funktionsstruktur. Diese wird jedoch lösungsneutral gehalten und nur über die Ebene des Prinzips mit Gestaltmerkmalen verknüpft. Funktionale Zusammenhänge werden auch von PAHL ET AL.⁹⁸ analog zur VDI Richtlinie 2221⁹⁹ über die Erstellung einer Funktionsstruktur erfasst und zunächst lösungsneutral formuliert. Die Funktionsstruktur wird durch Erarbeitung von Wirkprinzipien in eine Wirkstruktur überführt, welche wiederum weiter konkretisiert wird bis zur Ausarbeitung einer konkreten Gestalt. Eine direkte Verknüpfung von Funktionen mit der konkreten Gestalt wird nicht behandelt. Die Analyse des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt wird nicht erwähnt. Diese könnte jedoch der Problem-, Struktur- und Schwachstellenanalyse dienen.

Dabei spielt die Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen eine große Rolle im Konstruktionsprozess. Das Ergebnis der Produktentwicklung ist meist die Dokumentation einer physischen Gestalt in Form von technischen Zeichnungen, Stücklisten, virtuellen Modellen oder realen Prototypen. Diese spezifizieren das System, seine Sub-Systeme und einzelne Komponenten, die miteinander interagieren, und Funktionen in einer gewünschten Qualität, in einer gewünschten

⁹⁶ Sperlich, 1993

⁹⁷ Verein Deutscher Ingenieure, 1993

⁹⁸ Pahl et al., 2006

⁹⁹ Verein Deutscher Ingenieure, 1993

Reihenfolge und innerhalb bestimmter Randbedingungen erfüllen.¹⁰⁰ Nach MATTHIESEN¹⁰¹ müssen Konstrukteure aber nicht nur den Umgang mit explizierten Hauptfunktionen beherrschen, sondern sich auch viele nicht explizierte Unterfunktionen des Systems mental vorstellen und in Beziehung zur Produktgestalt setzen können. Dabei werden die Funktionen selten dokumentiert. Falls in der Praxis überhaupt eine Dokumentation der Funktionen stattfindet, werden diese Funktionen nach MATTHIESEN¹⁰² oft nicht eindeutig formuliert und auch nicht mit der Gestalt verknüpft dokumentiert. Dies kann zu Problemen im Konstruktionsprozess und bei der Produktgenerationsentwicklung führen. Der Einfluss von Gestaltmerkmalen des Vorgängersystems, wie beispielsweise festgelegten Toleranzen, auf die Funktionserfüllung kann nicht nachvollzogen werden, was Entscheidungen zu Änderungen dieser Parameter für eine neue Produktgeneration erschwert.

Als Folge müssen die Konstrukteure während der iterativen Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten immer wieder neu Gestalt-Funktion-Zusammenhänge bilden und diese vorausdenken. Die wenigen Methoden, die bei der Verknüpfung von Gestalt und Funktion unterstützen, werden im Folgenden erläutert. Dazu zählen der Function-Behavior-Structure (FBS) Framework, das Characteristic-Properties-Modelling (CPM) und der Contact&Channel-Ansatz (C&C²-A).

Function-Behavior-Structure Framework

Das Function-Behavior-Structure (FBS) Modell von GERO UND KANNENGIESSER¹⁰³ betrachtet das Gestalten (engl. designing), worunter auch das Konstruieren zählt, als das Umsetzen von ein oder mehreren Funktionen (F) in eine Beschreibung der Struktur (S). Funktionen von Objekten werden über deren Zweck definiert, für den das Objekt gestaltet wurde. Das Verhalten (engl. behavior B) wird eingeführt, um beschreiben zu können, was das System erwartungsgemäß tut (behavior expected, Be), oder um das eigentliche Verhalten, welches von der erstellten Struktur (S) herrührt beschreiben zu können (Bs). Das Entwerfen wird als Transformation dieser Variablen definiert.

Das FBS-Modell wird weniger als Instrument für Konstrukteure oder Gestalter eingesetzt, sondern unterstützt die wissenschaftliche Arbeit. Daher wird das Modell vorwiegend für empirische Untersuchungen des Design-Prozesses genutzt.

Characteristics-Properties Modelling (CPM)

Der Ansatz des *Characteristics-Properties Modelling (CPM)* für die Produktmodellierung und des *Property-Driven Development (PDD)* für die

¹⁰⁰ Albers / Wintergerst, 2014

¹⁰¹ Matthiesen, 2011b

¹⁰² Matthiesen, 2011b

¹⁰³ Gero / Kannengiesser, 2002

Modellierung von Produktentwicklungsprozessen wurden im Jahr 2000 von WEBER UND WERNER¹⁰⁴ eingeführt. *CPM* basiert auf der Unterscheidung von Merkmalen (characteristics, C) und Eigenschaften (properties, P) eines Produktes und stellt diese in den Vordergrund der Produktentwicklung. Die Merkmale repräsentieren dabei die Gestalt des technischen Systems, welche die Formen, Abmessungen und Anordnung von Komponenten beinhaltet. Ebenso sind Werkstoffmerkmale und Oberflächenparameter enthalten. Nach Weber sind Merkmale diejenigen Parameter, die aktiv vom Produktentwickler geändert werden können. Eigenschaften können im Gegensatz dazu nicht direkt geändert und nur durch Variation der Merkmale beeinflusst werden. Die Eigenschaften erfassen das Verhalten des Produkts, wozu beispielsweise Funktionen, Sicherheitsaspekte und Fertigungsparameter wie Herstellkosten zählen.

Der *CPM/PDD*-Ansatz wurde entwickelt, um möglichst viele existierende Methoden und Modelle der Konstruktionsmethodik zu integrieren und ein Rahmenmodell hierfür zu bilden.¹⁰⁵ Dabei soll der Ansatz nicht nur auf Neukonstruktionen, sondern auch auf Anpassungskonstruktionen anwendbar und somit praxisnah sein.

Der Contact&Channel-Ansatz – C&C²-A

Um die Zusammenhänge von Funktionen und der physischen Gestalt beschreiben zu können, wurde von ALBERS UND MATTHIESEN¹⁰⁶ im Jahr 1999 in Ilmenau der *Contact&Channel-Ansatz (C&C²-A)* veröffentlicht. „Der Ansatz bringt die Funktion und die dafür relevante Gestalt zusammen. Er ist ein Denkwerkzeug, um den Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion Gestalt zu erkennen, zu verstehen und dadurch synthesefähig zu werden.“¹⁰⁷ Der *C&C²-Ansatz* basiert auf Arbeiten von RODENACKER¹⁰⁸, HUBKA¹⁰⁹ und weiteren Autoren, die sich mit funktionalen Interaktionen der Schnittstellen von Komponenten und deren Strukturen beschäftigten. Er greift die Begriffe der Wirkflächen und Wirkstrukturen auf und integriert sie in einem konsistenten Gesamtmodell, welches zur Modellbildung von technischen Systemen genutzt werden kann. MATTHIESEN UND ALBERS ET AL. entwickeln den *Contact&Channel-Ansatz* stetig weiter.¹¹⁰

Der *C&C²-Ansatz* unterstützt Entwickler und Konstrukteure während der Analyse und auch der Synthese. Er ermöglicht die Verknüpfung von abstrakten Funktionen mit der

¹⁰⁴ Weber / Werner, 2000a

¹⁰⁵ Weber, 2012

¹⁰⁶ Albers / Matthiesen, 1999

¹⁰⁷ nach Matthiesen

¹⁰⁸ Rodenacker, 1970

¹⁰⁹ Hubka, 1984

¹¹⁰ vgl. Albers et al., 2008a; Matthiesen / Ruckpaul, 2012; Albers / Wintergerst, 2014

konkreten Produktgestalt als Ort der Funktionserfüllung.¹¹¹ Der Ansatz schafft eine gemeinsame Modellvorstellung auf dessen Basis Modelle technischer Systeme erstellt werden können. Diese Modelle werden als *C&C²-Modelle* bezeichnet. Die Basis des Ansatzes bilden zum einen die Gestalt-Funktion-Elemente *Wirkflächenpaare (WFP)* und *Leitstützstrukturen (LSS)*, die der abstrakten Funktionsebene sowie der konkreten Gestaltebene zugewiesen werden können. Zum anderen sind einfache und eindeutige Regeln zur Modellbildung formuliert, die drei Grundhypothesen des *C&C²-A.* Über *Connectoren* können „die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung“ integriert werden.¹¹² Zur Erfüllung einer Funktion muss ein technisches System nach dem Ansatz zwingend in eine Umgebung eingebettet sein und mit dieser wechselwirken. Ein Bauteil allein erfüllt keine Funktion.¹¹³

Der Ansatz kann für Produktgenerationsentwicklungen in drei Bereichen eingesetzt werden:

- Zum Zweck der Analyse
- Zum Zweck der Synthese
- Zum Zweck der Dokumentation und Kommunikation

2.2.3 Zwischenfazit

Während der Konstruktion werden in den Analyse- und Syntheseschritten abwechselnd Funktionen anhand einer vorliegenden Gestalt abgeleitet und intendierte Funktionen über eine neu generierte Gestaltausprägung umgesetzt. Dabei müssen Konstrukteure dauernd Zusammenhänge zwischen der abstrakten Ebene der Funktionen und der konkreten Gestalt bilden. Die Bildung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge wird durch mehrere Modelle und Ansätze unterstützt. Dabei stellt der Contact&Channel-Ansatz von ALBERS und MATTHIESEN Elemente bereit, die der abstrakten Funktionsebenen sowie der konkreten Gestaltebene zugewiesen werden können. Es bleibt jedoch offen, wie die Konstrukteure diese Zusammenhänge in der Praxis bilden. Das folgende Kapitel beschäftigt sich daher mit empirischen Studien, die die Vorgehensweisen von Ingenieuren und Konstrukteuren näher untersuchen.

¹¹¹ Matthiesen, 2002a

¹¹² Matthiesen, 2002a; Albers / Wintergerst, 2014

¹¹³ Albers, 2010

2.3 Empirische Studien im Bereich der Konstruktionsforschung

Nach PAHL¹¹⁴ ist die mangelhafte Ausrichtung von Konstruktionsmethoden an die individuellen Verhaltensweisen des Menschen eines der Hauptprobleme mangelnder Akzeptanz im Hinblick auf diese Methoden. Um anwenderorientierte Methoden zur Unterstützung des Konstruktionsprozess entwickeln zu können, muss daher möglichst gut bekannt sein, welche Vorgehensweisen der Konstrukteur beim Konstruieren anwendet. Erfolgreiche Ingenieure mit langjähriger Konstruktionserfahrung greifen während der Konstruktion meist unbewusst auf ihre Erfahrungen mit erfolgreichen Vorgehensweisen zurück.¹¹⁵ Diese Vorgehensweisen und das Verhalten während der Konstruktion müssen zunächst erschlossen werden.¹¹⁶ Dies erfolgt zielführend durch die Durchführung und Auswertung von empirischen Studien. FRANKENBERGER¹¹⁷ sieht für die Ausrichtung dabei den Bedarf noch stärker auf die praxisrelevanten Randbedingungen für die Anwendung von Methoden einzugehen. Dazu müssen auch die Randbedingungen von empirischen Studien möglichst praxisnah und relevant gewählt werden.

2.3.1 Grundlagen der empirischen Forschung

Einer der verbreitetsten Ansätze im Bereich der Entwicklungsmethodik ist die *Design Research Methodology*, *DRM* abgekürzt, von BLESSING UND CHAKRABARTI¹¹⁸. DRM gibt einen Überblick über Forschungsmethoden und stellt konkrete methodische Unterstützung bereit. Dies findet beispielsweise in Form von Checklisten oder Methoden wie die Bildung von Referenzmodellen statt. Dazu wird eine vierstufige Vorgehensweise für Forschungsvorhaben vorgeschlagen, die nacheinander durchzuführen sind. Die vier Hauptstufen sind (1) die Klärung des Forschungsvorhabens, (2) eine erste deskriptive Studie, (3) eine präskriptive Studie und (4) eine zweite deskriptive Studie (Abbildung 2-6).

¹¹⁴ Pahl, 1994

¹¹⁵ Matthiesen, 2011b

¹¹⁶ Ehrlenspiel, 2009

¹¹⁷ Frankenberger, 1997

¹¹⁸ Blessing / Chakrabarti, 2009

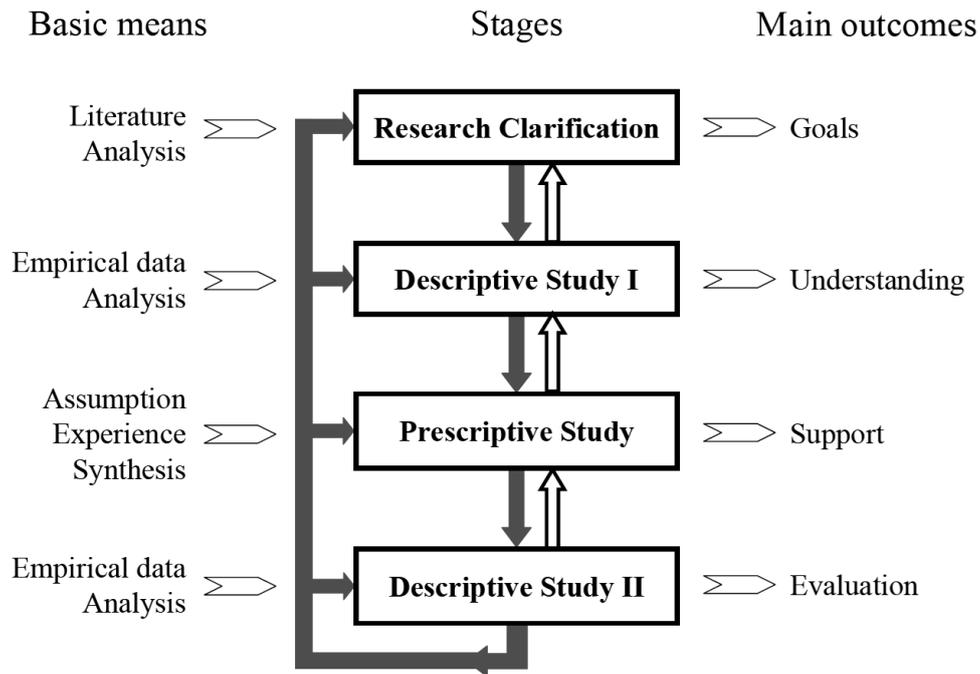


Abbildung 2-6: Die Haupthilfsmittel und Ergebnisse der vier Stufen des DRM Frameworks ¹¹⁹

Während der ersten Stufe wird das Forschungsvorhaben geklärt und realistische Ziele festgelegt. Dieser Schritt basiert auf einer ausführlichen Literaturrecherche. Es werden Ziele, der Forschungsgegenstand, die Forschungsfragen und -hypothesen sowie Erfolgskriterien für eine spätere Bewertung festgelegt. Auf dieser Basis wird im nächsten Schritt eine deskriptive Studie durchgeführt. Über die Analyse von empirischen Daten soll ein besseres Verständnis der vorliegenden Situation aufgebaut werden. Dazu sollen Einflussfaktoren auf die Erfolgskriterien ermittelt und deren Auswirkungen identifiziert werden. Die festgelegten Schlüsselfaktoren können in der nächsten Stufe, der präskriptiven Studie, adressiert werden. Über diese Studie werden eine methodische Unterstützung und Maßnahmen generiert, wie die Erfolgskriterien unter Berücksichtigung der Schlüsselfaktoren beeinflusst werden können. Hierzu werden neben den Erkenntnissen der ersten deskriptiven Studie auch Erfahrungen hinzugenommen und Annahmen getroffen. Um die Methoden und Maßnahmen evaluieren zu können, kann eine zweite deskriptive Studie durchgeführt werden. Diese untersucht, ob die Maßnahmen Wirkung zeigen und das Forschungsziel positiv beeinflussen. ¹²⁰

BLESSING UND CHAKRABARTI stellen auch klar, dass das Rahmenwerk aus Abbildung 2-6 nicht fest gegeben ist. Es müssen nicht bei jedem Forschungsvorhaben alle vier Stufen durchlaufen werden. Die Abbildung stellt auch keine Iterationen der Stufen

¹¹⁹ Blessing / Chakrabarti, 2009, S. 15

¹²⁰ Blessing / Chakrabarti, 2009, S. 14 ff.

dar, die oftmals während des Forschungsvorhabens stattfinden werden. Und es ist möglich mehrere Stufen teilweise parallel durchzuführen.

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich Kern mit der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der ersten deskriptiven Studie. Für die deskriptive Studie schlagen BLESSING UND CHAKRABARTI¹²¹ den folgenden Ablauf der Hauptschritte vor:

- Festlegen des Forschungsziels:
Es werden die Forschungsfragen und Hypothesen formuliert, welche zum Erreichen des Forschungsziels beantwortet werden müssen.
- Entwickeln eines Forschungsplans:
Im Forschungsplan werden neben den Forschungsfragen und Hypothesen auch Methoden zur Datenerfassung und zur Datenverarbeitung festgelegt. Auch die Datenauswertung und Interpretationsmodelle müssen bereits vor der Durchführung der Studie geklärt werden. Zum Test des Forschungsplans sollte eine Pilotstudie durchgeführt werden.
- Durchführen der empirischen Studie:
Nach der Aufnahme der Daten, werden diese z.B. durch Einsatz von Kodierungen oder Skalen aufbereitet. Danach folgt die Analyse und Interpretation der Daten und eine Prüfung auf Plausibilität, um fehlerhafte oder sich beeinflussende Datenströme aufdecken zu können.

Hypothesen und deren statistische Auswertung

Um Gesetzmäßigkeiten, beispielsweise im Verhalten von Menschen, zu erforschen, können aus Forschungsfragen Hypothesen aufgestellt werden, welche überprüft werden können. Eine Hypothese kann nach HUBER als „eine vermutete Antwort auf eine bestimmte Frage“ bezeichnet werden¹²². POSPESCHILL versteht die Hypothese als „eine Vorhersage über die Beziehung zwischen Variablen“¹²³. Um die Hypothese zu prüfen werden Wahrscheinlichkeiten berechnet und Vorhersagen formuliert, ob eine Hypothese als fälschlich oder wahr angenommen werden kann.

Hypothesen können auf unterschiedlichen Ebenen formuliert werden. Behauptungen mit semantischen Inhalten und abstrakten Variablen, werden theoretisch-inhaltliche Hypothesen genannt. Um die Thesen prüfen zu können, müssen sie nach HUSSY ET AL.¹²⁴ operationalisiert werden. Dies geschieht auf Basis von konkret messbaren und beobachtbaren Größen und gewährleistet die quantitative Prüfung der Hypothesen.

¹²¹ Blessing / Chakrabarti, 2009, S. 80 ff.

¹²² Huber, 2000, S. 29

¹²³ Pospeschill, 2006

¹²⁴ Hussy et al., 2013, S. 39 ff.

Durch die Operationalisierung der theoretisch-inhaltlichen Hypothesen entstehen die sogenannten empirisch-inhaltlichen Hypothesen.¹²⁵

Zur Auswertung der erhobenen Daten werden geeignete statistische Verfahren eingesetzt. Die Statistik ermöglicht in der Wissenschaft quantitative Informationen zu gewinnen und diese zu analysieren und zu interpretieren, um Aussagen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten treffen zu können.¹²⁶ Es kann zwischen der deskriptiven Statistik und der Inferenzstatistik unterschieden werden.

Die deskriptive Statistik dient der zusammenfassenden Darstellung und „Charakterisierung empirischer Daten in Form ihrer Verteilung, Lage und Streuung“¹²⁷. Sie wird zur Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts, der Standardabweichung und der Stichprobenvarianz genutzt. Die Inferenzstatistik, auch Prüfstatistik genannt, stellt Methoden zur Untersuchung von Stichproben zur Verfügung mit denen Aussagen über die Grundgesamtheit bzw. Population getroffen werden können, welche durch die Stichprobe repräsentiert wird. Eine dieser Methoden stellt der Hypothesentest zur Überprüfung der Signifikanz dar.

Für den Hypothesentest werden zwei gegensätzliche Hypothesen formuliert, die Nullhypothese H_0 und die Alternativhypothese H_1 . Die Nullhypothese stellt die Behauptung auf, dass sich in der Population kein Unterschied zeigt, während die Alternativhypothese von einem Unterschied ausgeht.¹²⁸ Die Hypothesen können einseitig oder zweiseitig getestet werden.

- Einseitiger Test: $H_0: \mu = \mu_0$ gegen $H_1: \mu \neq \mu_0$
- Beidseitiger Test: $H_0: \mu \geq \mu_0$ (oder $\mu \leq \mu_0$) gegen $H_1: \mu < \mu_0$ (oder $\mu > \mu_0$)

Ziel des Tests ist die Ablehnung der Nullhypothese auf Basis von erhobenen Daten. Da keiner Hypothese zweifelsfrei abgelehnt werden kann, werden Wahrscheinlichkeiten berechnet, die eine Art Fehlerrisiko für die getroffene Aussage angeben.¹²⁹ Diesen Wahrscheinlichkeitswert bezeichnet man als Signifikanzniveau α . Üblicherweise werden Ergebnisse mit Irrtumswahrscheinlichkeiten kleiner $\alpha = 0,05$ als signifikant bezeichnet.

Ein etablierter Hypothesentest zur Untersuchung von zwei unabhängigen Stichprobengrößen ist der t-Test. Er basiert auf der Annahme, dass die erhobenen Daten normalverteilt sind. Dabei wird die Differenz der Mittelwerte der beiden unabhängigen Stichproben in das Verhältnis zum Standardfehler der Differenz der

¹²⁵ Hussy et al., 2013, S. 39 ff.

¹²⁶ Pospeschill, 2006

¹²⁷ Pospeschill, 2006, S. 9

¹²⁸ Pospeschill, 2006, S. 151 ff.

¹²⁹ Pospeschill, 2006, S. 158 f.

Mittelwerte gesetzt. Darüber wird die Irrtumswahrscheinlichkeit berechnet und über den p-Wert angegeben. Der Test geht dabei von einer Varianzgleichheit der Stichproben aus. Diese wird durch den Levene-Test nachgewiesen. Bei Varianzgleichheit kann die Nullhypothese geprüft und bei dem entsprechenden Signifikanzniveau abgelehnt werden. Falls keine Varianzgleichheit vorliegt, wird die Alternativhypothese zur Prüfung genutzt. Eine Ablehnung der getesteten Hypothese kann für $p \leq \alpha$ vorliegt.¹³⁰

Für nominal-skalierte Merkmale kann der Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest angewandt werden. Dieser Test vergleicht die beobachteten Häufigkeiten mit den erwarteten Häufigkeiten und überprüft, ob die Variablen stochastisch unabhängig voneinander sind. Die Testgröße χ^2 ist ein Maß für die Abweichung zwischen den beiden Häufigkeiten. Die Unabhängigkeit besteht, wenn es keine konsistente und vorhersagbare Beziehung zwischen den beiden Stichproben gibt. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden, wenn $\chi^2 \geq c$ ist. Dabei ist c der „kritische Wert“, der in Abhängigkeit des Freiheitsgrads und des Signifikanzniveaus α aus Tabellen entnommen werden kann.¹³¹

Umgebungsbedingungen in empirischen Studien

Empirische Untersuchungen können in unterschiedlichen Umgebungen durchgeführt werden. Man unterscheidet dabei die zwei Extreme Felduntersuchung und Laboruntersuchung. Die Felduntersuchung steht für die Untersuchung im natürlichen Umfeld der Probanden, beispielsweise in firmeninternen Räumlichkeiten oder Meetings. Dabei wird eine hohe externe Validität gewährleistet. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse durch die natürlichen Untersuchungsbedingungen generalisierbar und deren Bedeutung unmittelbar verständlich sind. Im Gegensatz dazu wird in Laboruntersuchungen versucht alle Störgrößen zu kontrollieren, die die untersuchungsrelevanten Variablen beeinflussen können. Die Probanden werden dazu meist aus ihrer alltäglichen Umgebung herausgeholt, was zu einer geringen externen Validität führt. Die interne Validität, welche ein Maß für die kausal eindeutige Interpretation der Ergebnisse ist, ist in Laboruntersuchungen jedoch wesentlich höher als in Feldstudien. Störfaktoren können hier gezielt festgehalten werden. Meist werden in Studien jedoch Zwischenformen von Feld- und Laboruntersuchungen gewählt, die an den Untersuchungsgegenstand und das Forschungsdesign angepasst werden.¹³²

¹³⁰ Pospeschill, 2006, S. 205 ff.

¹³¹ Pospeschill, 2006, S. 391 ff.

¹³² Bortz / Döring, 2009, S. 53 ff.

2.3.2 Etablierte Erhebungsmethoden in der empirischen Forschung

Neben dem grundlegenden Aufbau und der Durchführung von empirischer Forschung nennen BLESSING UND CHAKRABARTI Erhebungsmethoden, welche in den beiden deskriptiven Studien eingesetzt werden können¹³³. Dazu zählen Beobachtungen, simultane Verbalisierungen zu welchen die Think-Aloud Methode zählt, Dokumenten- und Produktanalyse, Fragebögen sowie Interviews. Der Einsatz von physiologischen Messmethoden zur Untersuchung von Designern wird von BLESSING UND CHAKRABARTI nicht betrachtet. Der Einsatz dieser Messmethoden zur Ermittlung weiterer Erkenntnisse über das Verhalten von Entwicklern und Konstrukteuren wird jedoch aktuell stark durch Wissenschaftler, wie beispielsweise LOHMEYER UND MEBOLDT¹³⁴, vorangetrieben.

AHMED¹³⁵ gibt einen Überblick über Forschungs- und Erhebungsmethoden, die für empirische Studien zu Untersuchungen im industriellen Umfeld genutzt werden können. Dabei gliedert sie die Methoden nach den Arten von Informationen und Wissen, die mittels ihnen gewonnen werden können. Sie unterscheidet dabei externalisierte Informationen und personengebundenes Wissen. Das personengebundene Wissen kann weiter unterteilt werden in explizites, implizites und stilles Wissen¹³⁶. Explizites Wissen kann von Personen einfach erklärt werden und auf Basis der Erläuterungen externalisiert und zur Information werden. Implizites Wissen kann nicht von der ausführenden Person aber von außenstehenden beobachtenden Personen ausgesprochen werden. Dies betrifft beispielsweise Vorgehensweisen und Strategien bei der Problemlösung. Stilles Wissen (engl. tacit knowledge) bezeichnet in diesem Kontext nicht direkt verbalisierbares Wissen, welches jedoch eine große Rolle im Entwicklungsprozess spielt. Als Beispiel nennt AHMED das intuitive Gefühl von Ingenieuren für eine korrekte Anordnung und Gestaltung von Komponenten.

Zum Erfassen von stillem Wissen ist nach AHMED¹³⁷ eine Verbalisierung der Gedanken nach der Protokollanalyse von ERICSSON UND SIMON¹³⁸ notwendig. Die Nutzung von physiologischen Messungen wird in diesen Quellen noch nicht betrachtet. Implizites Wissen kann nach AHMED in gewissem Anteil auch durch eine Dokumentenanalyse oder Diskursanalyse aufgedeckt werden, jedoch sind die Möglichkeiten, implizites Wissen aus Schriftstücken und Protokollen zu extrahieren,

¹³³ Blessing / Chakrabarti, 2009

¹³⁴ Lohmeyer / Meboldt, 2016

¹³⁵ Ahmed, 2007

¹³⁶ Wallace et al., 2005

¹³⁷ Ahmed, 2007

¹³⁸ Ericsson / Simon, 1993

beschränkt. Daher ist auch hier die Verbalisierung der Gedanken von großer Bedeutung und wird im Folgenden näher erläutert.

Die Think-Aloud Methode

Mittels der Think-Aloud Methode werden die Versuchspersonen in empirischen Studien dazu aufgefordert, ihre Gedanken zu verbalisieren. Die Methode wurde bereits 1920 von WATSON¹³⁹ eingeführt. ERICSSON UND SIMON¹⁴⁰ haben das Verbalisieren der Gedanken zur Untersuchung von kognitiven Denkprozessen anwendbar gemacht. Dies erfolgte über die Einbindung in die Protokollanalyse. Danach werden die Verbalisierungen nach der Aufnahme transkribiert und mithilfe von Kodierungsschemen ausgewertet. Es gibt zwei verschiedene Methodenausrichtungen des Think-Alouds, das *Concurrent Think-Aloud (CTA)* und *Retrospective Think-Aloud (RTA)*. *Concurrent Think-Aloud*, simultanes lautes Denken, bedeutet, dass die Versuchsperson während der Bearbeitung der Aufgabe redet und dabei ihre Gedanken und Vorgehensweisen verbalisiert. Bei *Retrospective Think-Aloud* werden die Gedanken und weitere Kommentare erst nach der Bearbeitung der Aufgabe aufgenommen.

Zu dem Einfluss von *CTA* auf die Ausführung der Aufgaben und die Vorgehensweisen von Probanden werden in der Literatur unterschiedliche Aussagen getroffen. VAN SOMEREN ET AL.¹⁴¹ zeigen, dass das laute Denken das gesamte kognitive System des Menschen beansprucht und dadurch durchzuführende Aktionen verlangsamt. Neben der Verzögerung von Lernprozessen und der Ausführung von Aufgaben können auch die Augenbewegungen der Probanden verlangsamt werden. Nach DAVIES¹⁴² wird durch die Anwendung von *CTA* auch die Vorgehensweise der Versuchspersonen beeinflusst und die Personen ändern dabei die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung. Für die Untersuchung komplexer Aufgabenstellungen kann *CTA* jedoch notwendig werden, da im Gegensatz zu *RTA* eine Momentaufnahme der Gedanken erfolgen kann. RYAN UND HASLEGRAVE¹⁴³ haben in ihrer Untersuchung festgestellt, dass es über den Einsatz von *CTA* möglich ist, aufgabenbezogene Gedanken der Versuchspersonen aufzunehmen.

RTA kann in unterschiedlichen Weisen durchgeführt werden. Wenn der Proband und dessen Vorgehensweise während der Bearbeitung der Aufgaben per Video aufgenommen wurde, kann dieses Video als Stimulus für *RTA* genutzt werden. Neben der reinen Abfrage der Gedanken nach der Durchführung der Aufgabe, wird

¹³⁹ Watson, 1920

¹⁴⁰ Ericsson / Simon, 1993

¹⁴¹ Van Someren et al., 1994

¹⁴² Davies, 1995

¹⁴³ Ryan / Haslegrave, 2007

dem Probanden das aufgenommene Video vorgespielt und von diesem kommentiert. Diese Vorgehensweise wird *Video-cued Retrospective Think-Aloud* genannt. Hierzu kann auch ein Video der Augenbewegungen genutzt werden¹⁴⁴. Das retrospektive Kommentieren der Vorgehensweise (*RTA*) einer Versuchsperson wird in der Literatur ebenfalls unterschiedlich bewertet. VAN GOG ET AL.¹⁴⁵ stellt fest, dass mittels *Cued RTA* vorwiegend Kommentare zur Vorgehensweise und dem Lösungsansatz der Probanden erfasst werden können. KUUSELA UND PAUL¹⁴⁶ geben an, dass beim Einsatz von *CTA* mehr Information zur Vorgehensweise und Handlungen herausgelöst werden kann als beim Einsatz von *RTA*. Bei *RTA* stellten sie fest, dass jedoch mehr Kommentare zu Strategien und den Gründen der Handlungen formuliert werden.

Auch im Bereich *Human Behavior in Design* wurden die unterschiedlichen Auswirkungen von *CTA* und *RTA* bereits untersucht. GERO UND TANG¹⁴⁷ haben die transkribierten Protokolle der verbalisierten Gedanken einer Studie zu Gestaltungsprozessen im Detail untersucht. Dabei haben sie festgestellt, dass Protokolle des *CTA* vorteilhaft für die Aufnahme von funktionalen Aspekten während des Gestaltungsprozesses sind. Informationen über die erarbeiteten Lösungen und deren Bewertungen konnten besser mit Hilfe von *RTA* Protokollen erfasst werden. Um jedoch tiefergehende Informationen zu prozess-orientierten Aspekten aufnehmen zu können, folgern GERO UND TANG aus ihren Untersuchungen eine ähnlich gute Eignung von *CTA* und *RTA*.

Aus den unterschiedlichen Feststellungen zum Einsatz und den Ergebnissen der beiden Think-Aloud Methoden kann geschlossen werden, dass diese abhängig vom Anwendungsbereich sind und keine allgemeingültigen Aussagen und Empfehlungen zur Anwendung der Think-Aloud Methoden getroffen werden können. Die Beeinflussung der restlichen kognitiven Aktivitäten, wie beispielsweise das visuelle Verhalten sowie die Art und Inhalte der Verbalisierungen, müssen für jeden Einsatzbereich eigens getestet werden. Einigkeit herrscht aber über den Nutzen der Think-Aloud Methoden. Dass viele Informationen über die Vorgehensweisen, Lösungsansätze oder funktionale Aspekte damit gewonnen werden können, wird in allen zitierten Literaturquellen dieses Kapitels gezeigt. Diese Erkenntnisse bestätigen die Aussage von AHMED¹⁴⁸, dass Think-Aloud bzw. die Protokollanalyse zusätzliche Informationen zu implizitem und stillem Wissen zulässt, da noch tiefere Einblicke in die Vorgehensweisen und die Beweggründe dazu aufgenommen werden können.

¹⁴⁴ Die Aufnahme der Augenbewegung wird in Kapitel 2.5 im Detail erläutert.

¹⁴⁵ van Gog et al., 2005

¹⁴⁶ Kuusela / Paul, 2000

¹⁴⁷ Gero / Tang, 2001

¹⁴⁸ Ahmed, 2007

2.3.3 Studien und Erkenntnisse der Konstruktionsforschung

Im Bereich der Konstruktionsforschung wurde bereits eine Vielzahl von empirischen Studien mit unterschiedlichen Forschungszielen und in verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Da sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung und die Darstellung möglichst realitätsnaher Analyseprozesse unter konstanten Laborbedingungen beschäftigen wird¹⁴⁹, werden im Folgenden ausgewählte Arbeiten aufgezählt, die den Konstruktionsprozess innerhalb von Laborstudien umsetzen und sich mit der Analyse und/oder Synthese neuer technischer Systeme beschäftigen. Einen umfassenden Überblick über empirische Studien im Bereich der Entwicklungs- und Konstruktionsforschung über längere Entwicklungszeiträume zur Untersuchung in der Industrie von einzelnen Personen und auch Gruppen wird von WIEDNER¹⁵⁰ gegeben.

Um die Konstruktionsmethodik weiterentwickeln zu können und dem Konstrukteur geeignete Hilfsmittel während des Konstruktionsprozesses zu Verfügung zu stellen, starteten Lehrstühle aus dem Bereich des Maschinenbaus an der TU München und der TH Darmstadt und aus dem Bereich der Psychologie an der Universität Bamberg eine Forschungsk Kooperation. Ziel dieser Forschung war das Schaffen einer deskriptiven Theorie des Konstruktionsprozesses.¹⁵¹ Aus dieser Zusammenarbeit entstanden unter anderem die Arbeiten von DYLLA, FRICKE und GÜNTHER.

DYLLA untersuchte innerhalb dieser Forschung Merkmale von Konstrukteuren und deren Zusammenhang mit dem Konstruktionsprozess und den Ergebnissen. Er erstellte eine Laborstudie, um den Konstruktionsprozess unter relativ konstanten Randbedingungen abzubilden. Aufgabe der Versuchspersonen war es, eine Wandhalterung mit Schwenkmechanismus für eine Führung optischer Geräte zu konstruieren. Dabei handelte es sich um eine Neukonstruktion für die Randbedingungen wie Hauptabmessungen, Schwenkwinkel und Gewicht u.a. vorgegeben wurden. Zur Erhebung der Daten während des Experiments wurden Videoaufnahmen der Konstruktionstätigkeiten getätigt und die Think-Aloud Methode angewendet, um Denkprozesse aufnehmen zu können. Es nahmen sechs Versuchspersonen an diesem ersten Experiment teil. Darunter befanden sich Studenten, wissenschaftliche Mitarbeiter sowie Konstrukteure aus Industrieunternehmen. Ein Versuch dauerte je nach Proband 6-12 Stunden. Als Forschungsergebnis konnten die folgende Arbeitsschritte festgestellt werden: Anforderungen analysieren und formulieren, Lösungen suchen, Lösungen darstellen sowie Lösungen analysieren und beurteilen. Dabei konnte DYLLA einen sprunghaften

¹⁴⁹ siehe Kapitel 3 und folgende

¹⁵⁰ Wiedner, 2013

¹⁵¹ Dylla, 1990, S. 2

Ablauf dieser Konstruktionsphasen feststellen. Während der Analyse der Lösungen beschäftigten sich alle Probanden auffällig lang mit der Funktionsanalyse. Mit durchschnittlich 60 % der aufgewendeten Zeit wurden Funktionen während diesen Phasen stark fokussiert.¹⁵²

Ziel von FRICKE war ebenfalls die empirische Untersuchung von individuellen Konstruktionsprozessen, um Hilfestellungen für erfolgreiche Prozesse abzuleiten. Er nutzte dazu wie DYLLA die Neukonstruktion einer Wandhalterung als Aufgabenstellung. FRICKE variierte jedoch die Aufgabenstellung bezüglich Klarheit und Vollständigkeit um Merkmale von Konstrukteuren mit hohem Einfluss auf die Lösungsgüte zu untersuchen. Eine Gruppe von 20 Probanden erhielt eine präzise Beschreibung der Problemstellung, während 6 weitere Versuchspersonen mit einer unscharfen Aufgabenstellung arbeiten mussten. Die Probanden wurden nach variierenden Vorerfahrungen ausgewählt, sodass Konstrukteure mit mehrjähriger Erfahrung in der Industrie sowie methodisch ungeschulte Studierende an der Studie teilnahmen. Die Merkmale der Versuchspersonen wurden über Fragebögen erfasst. Als Erhebungsmethoden wählte FRICKE ebenfalls Videoaufnahmen und das „laute Denken“. Zu den Forschungserkenntnissen wurden Einflüsse auf die Lösungsgüte aus den Merkmalen der Versuchspersonen und den Vorgehensweisen identifiziert. Signifikante Einflüsse auf die Güte des Konstruktionsergebnisses haben hierbei ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen, gutes Sachwissen, mehrjährige Konstruktionserfahrung und eine hohe heuristische Kompetenz. Zeichnerische Fähigkeiten, Intelligenzquotient, methodische Vorbildung und die individuelle Motivation der Versuchspersonen hatten ebenfalls eine positive Tendenz auf die Lösungsgüte. Als Strategien konnte FRICKE die bereichsorientierte und stufenweise ablauforientierte Strategie unterscheiden. Dabei wendeten vorwiegend methodisch geschulte Probanden die ablauforientierte Strategie an, bei der die Probanden zunächst alle Problembereiche auf jeder Abstraktionsstufe bearbeiteten, bevor weiter konkretisiert wurde. Als Vorgehensstypen wurden flexibel-methodisches, unangemessen methodische und weitgehend unmethodische Vorgehensweisen identifiziert. Wobei die flexibel-methodische Vorgehensweisen im Durchschnitt zur besten Lösungsgüte führte.¹⁵³

Aufbauend auf die Arbeiten von DYLLA und FRICKE folgten empirische Untersuchungen von GÜNTHER. Dabei fokussierte diese Arbeit auf intuitive Vorgehensweisen die „P-Konstrukteure“. Diese Bezeichnung steht für praxiserfahrene Konstrukteure mit einer praktischen Ausbildung zum technischen Zeichner, Techniker oder Meister, die keine methodischen Schulungen erfahren

¹⁵² Dylla, 1990

¹⁵³ Fricke, 1993

haben. Dabei wurde ebenfalls die Neukonstruktion der Wandhalterung mit Schwenkmechanismus als Aufgabenstellung aufgegriffen. Als Versuchspersonen wurden neben den P-Konstrukteuren auch M-Konstrukteure (mit konstruktionsmethodischer Ausbildung) und H-Konstrukteure (mit Hochschulausbildung, jedoch ohne methodische Ausbildung) gewählt. Auch hier wurde die Think-Aloud Methode angewandt und Nachbefragungen nach Ende des Versuchs durchgeführt.

BENDER untersuchte die Auswirkungen einer konstruktionsmethodischen Ausbildung auf die Vorgehensweisen während des Konstruierens und auf den Konstruktionserfolg. Dazu führte er eine umfangreiche Studie mit 71 Studierenden durch, die unterschiedliche Stufen der konstruktionsmethodischen Ausbildung erfahren haben. Dabei unterscheidet BENDER zwischen keiner, „frischer“ und vertiefter Ausbildung im methodischen Konstruieren. Als Aufgabenstellung wurde die Konzipierung eines technischen Systems bis zum Vorentwurf gewählt. Da die Versuchspersonen teilweise an mehreren Versuchen teilnehmen mussten drei unterschiedliche Systeme gewählt werden, ein Gartenhäcksler, eine Glasmühle und ein Papiercutter. Die Dauer der Aufgabenbearbeitung betrug im Schnitt 3,5 Stunden. Zur Datenerhebung wurden Methoden für die Beobachtung der Anforderungsebene gewählt, d.h. es wurde vorwiegend eine Dokumentenanalyse durchgeführt. Hierzu wurden zur Dokumentation der Vorgehensweisen und des Arbeitsfortschritts der Versuchspersonen in 5-Minuten- bzw. 10-Minuten-Intervallen Fotos aufgenommen. Zusätzlich wurden Tätigkeitsprotokolle vom Beobachter erstellt. Eine Vertiefung der konstruktionsmethodischen Ausbildung in einem sechsmonatigen Konstruktionsprojekt hat sich bei den studentischen Versuchspersonen mit einem erhöhten Konstruktionserfolg in der Entwurfsphase geäußert. Auf das Vorgehen wirkte sich die vertiefte Ausbildung bereits in der Konzeptphase aus, sodass diese Probandengruppe mehr Basisoperationen des methodischen Vorgehens ausführte. Ein Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Vorgehen und dem Konstruktionserfolg in der Konzeptphase konnte kaum festgestellt werden. Eine methodische Vorgehensweise während der Lösungsbeurteilung und der Lösungsauswahl hatte jedoch eine höhere Qualität der Konzeptlösungen zur Folge. Auf Basis dieser Erkenntnisse schlägt BENDER die Verankerung der konstruktionsmethodischen Ausbildung über erfahrungsgelitetes Lernen und Reflexion konkreter Erfahrungen durch Anwendung der Methoden vor. Als einen der Kernpunkte konstruktionsmethodischer Ausbildung und zentraler Erfolgsfaktor nennt er die gründliche Analyse des Problems und der Anforderungen.¹⁵⁴

¹⁵⁴ Bender, 2004

Aufgrund der hohen Probandenzahl und der Dauer der Aufgabenbearbeitung konnte keine durchgängige Aufnahme des Konstruktionsprozesses und keine Verbalisierung und Aufzeichnung der Gedanken durchgeführt werden. Rückschlüsse auf detaillierte Vorgehensweisen, wie DYLLA sie ziehen konnte, sind daher leider nicht möglich.

Unterschiede im Vorgehen zwischen Experten und Novizen während des Problemlösungsprozesses wurden von CHI ET AL.¹⁵⁵ im Bereich der Physik festgestellt. Sie zeigen, dass wenig erfahrene Personen dazu tendieren, Probleme auf einer einfacheren Ebene zu betrachten als erfahrene. Dazu wurden eine Gruppe Novizen (Studierende ohne Abschluss) und eine Gruppe Experten (Doktoranden) in einem Experiment beauftragt, physikalische Probleme (z.B. Energie- oder Kraftprobleme) zu kategorisieren und die getroffene Einteilung zu begründen. Durch eine Clusteranalyse wurden Ähnlichkeiten in der Kategorisierung der Probleme gefunden. Nach CHI ET AL. ordneten die Studierenden die Probleme auf Basis einer Oberflächenstruktur, welche auf gezeigten Objekten, physikalischen Fachbegriffen oder Diagrammen der Problembeschreibung beruht. Die verbalen Begründungen der Novizen unterstützen diese These zur Kategorisierung. Die Experten teilten im Vergleich dazu die Probleme nicht nach Ähnlichkeiten von Schlagwörtern oder Objekten ein. Sie nutzten die beschriebenen physikalischen Prinzipien, um die Probleme über die Tiefenstruktur zu kategorisieren. Die beiden Gruppen unterschieden sich auch im Aufbau ihrer Problemschemata. Die Experten griffen auf prozedurales Wissen zurück, während die Novizen ihr vorhandenes deklaratives Wissen einbringen. Das prozedurale Wissen über abstrakte Lösungsmethoden lag bei den Studierenden kaum vor.

Zur genaueren Erforschung der Analyseprozesse untersuchte ECKERT ET AL.¹⁵⁶ in einer empirischen Studie die Vorgehensweisen von Ingenieuren bei der funktionalen Analyse einer Axialkolbenpumpe. Die Autorin der vorliegenden Arbeit war dabei maßgeblich an der Auswertung der Daten beteiligt. Der Fokus der Untersuchung lag auf dem Aufbau einer Funktionsstruktur anhand der gegebenen Gestalt. Dabei unterschieden sich die Analyseprozesse der Ingenieure sowie die aufgestellten Funktionsstrukturen voneinander. Dieselbe Gestalt wurde von mehreren Ingenieuren unterschiedlich, teilweise auch fehlerhaft gedeutet. Dies zeigt, dass die Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen nicht trivial ist und auf unterschiedliche Weisen durchgeführt werden kann.

¹⁵⁵ Chi et al., 1981

¹⁵⁶ Eckert et al., 2012c

2.3.4 Zwischenfazit

Über empirische Studien können Vorgehensweisen von Konstrukteuren und Entwicklern aufgenommen und verglichen werden. DRM¹⁵⁷ bietet eine wichtige Hilfestellung für die Einbindung in den Forschungskontext sowie für die Durchführung und Auswertung der Studien. Dabei werden etablierte Erhebungsmethoden für die Aufnahme von explizitem, implizitem und stillem Wissen eingeführt. Think-Aloud ist die vielversprechendsten Methoden, um stilles Wissen aufzudecken, welches einen großen Einfluss auf die Produktentwicklung und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf die Vorgehensweisen während der Analyse- und Syntheseschritte hat.

Durchgeführte Studien im Bereich der Konstruktionsmethodik fokussierten vorwiegend die personengebundenen Einflüsse¹⁵⁸ auf die Synthesephasen während des Konstruktionsprozess. Eine Beeinflussung der Analysefähigkeiten durch die individuellen Faktoren wurde noch nicht betrachtet. Um Aussagen darüber treffen zu können, warum dieselbe Gestalt von Ingenieuren in unterschiedliche Funktionen übersetzt werden¹⁵⁹, sollte neben den Denk- und Verarbeitungsprozessen auch das Blickverhalten untersucht werden. Vor allem bei der Analyse technischer Systeme wird ein Großteil der Informationen visuell aufgenommen. Die Aufnahme des Blickverhaltens von Konstrukteuren birgt daher ein hohes Potential Vorgehensweisen und stilles Wissen näher aufschließen zu können. Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln zunächst kognitionspsychologische Grundlagen erläutert und danach eine Einführung in die Aufnahme und Verarbeitung von Blickdaten mittels der Eye Tracking Technologie gegeben.

2.4 Konstruieren aus Sicht der Kognitiven Psychologie

Die Kognitionspsychologie beschäftigt sich mit informationsbearbeitenden Prozessen und Strukturen eines intelligenten Systems bzw. eines Menschen.¹⁶⁰ Die in diesem Kapitel vorgestellten Prozesse werden besonders während der Analyse von technischen Systemen durch Betrachtung einer Gestalt benötigt. Die Erkenntnisse aus der Kognitionspsychologie bilden die Grundlage für die Nutzung der Eye Tracking Technologie zur Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion.

¹⁵⁷ Blessing / Chakrabarti, 2009

¹⁵⁸ Siehe Kapitel 2.1.1

¹⁵⁹ Eckert et al., 2012c

¹⁶⁰ Anderson, 2007

2.4.1 Kognitionspsychologische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt wichtige Faktoren zur Informationsaufnahme und -verarbeitung vor, die im Konstruktionsprozess benötigt werden. Dazu zählen die visuelle Wahrnehmung, die visuelle Aufmerksamkeit und die Wissensrepräsentationen.

Visuelle Wahrnehmung

Als Wahrnehmung kann die Aufnahme von Informationen über Sensoren und die Verarbeitung der sensorischen Information durch Neuronen im Gehirn verstanden werden. Um visuelle Informationen zu verarbeiten, laufen neuronale Prozesse ab. Abbildung 2-7 zeigt schematisch den Aufbau des Auges. Licht fällt durch die Augenhornhaut (Cornea), das Kammerwasser und die Pupille ins Auge ein, durchquert die Linse und den Glaskörper und trifft auf der Rückseite des Auges auf der Netzhaut auf. Durch die Linse wird das Licht gebündelt und auf die Netzhaut fokussiert.

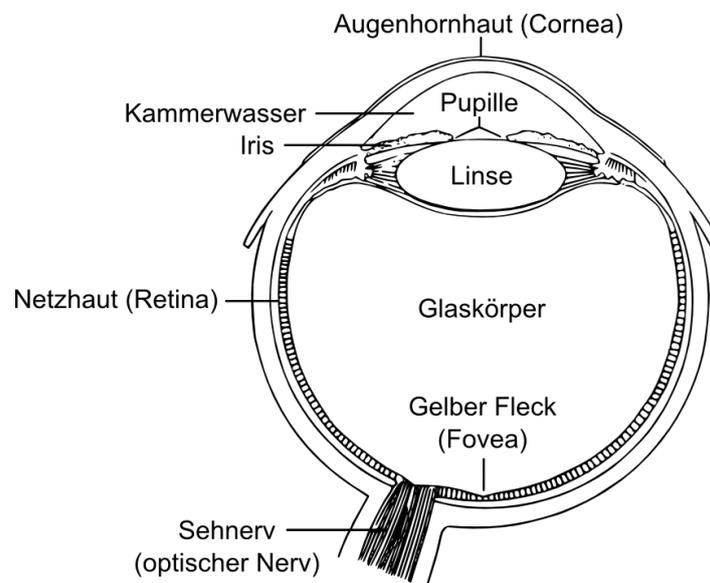


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des Auges¹⁶¹

Die Netzhaut enthält Photorezeptoren, welche das auftreffende Licht in neuronale Signale wandeln. Es können zwei Arten von Rezeptoren unterschieden werden: Zapfen und Stäbchen. Die Zapfen sind für das Sehen von Farben zuständig und haben eine hohe Auflösung und Schärfe. Die Stäbchen ermöglichen das Schwarz-Weiß-Sehen. Sie benötigen weniger Licht, haben jedoch eine geringere Auflösung. In einem kleinen Bereich der Netzhaut sind die Zapfen sehr dicht angeordnet und erlaubt daher die höchste Auflösung. Dieser Bereich wird Fovea oder Gelber Fleck genannt. Wenn ein Objekt durch eine Person fixiert wird, positionieren die Augenmuskeln das Auge, sodass das reflektierte Licht des Objekts auf die Fovea

¹⁶¹ vgl. Anderson, 2007, S. 50

fällt. Über das restliche visuelle Feld können ebenfalls Informationen, wenn auch in geringerer Auflösung, aufgenommen und Bewegungen erkannt werden.¹⁶²

Die erzeugten neuronale Signale werden über den Sehnerv weiter an das Gehirn geleitet und weiter verarbeitet. Die ablaufenden kognitiven Prozesse können als einzelne Schritte aufgefasst werden. JÄNSCH¹⁶³ hat diese Prozessschritte in einem Diagramm veranschaulicht (Abbildung 2-8). Nach der Aufnahme der sensorischen Information werden diese über Ganglienzellen enkodiert. Im visuellen Cortex, dem Bereich des Gehirns zur Erfassung visueller Informationen, werden die Informationen einer Mustererkennung unterzogen. Es werden zunächst durch die Kodierung der Information Balken und Kanten erkannt. Über Hinweisreize wie der Stereopsis¹⁶⁴, des Texturgradienten¹⁶⁵ oder der Bewegungsparallaxe¹⁶⁶ kann die Lage von Oberflächen im Raum zugeordnet werden. Die erkannten Oberflächen werden über Gestaltgesetze der Wahrnehmungsorganisation zu Objekten gegliedert.¹⁶⁷

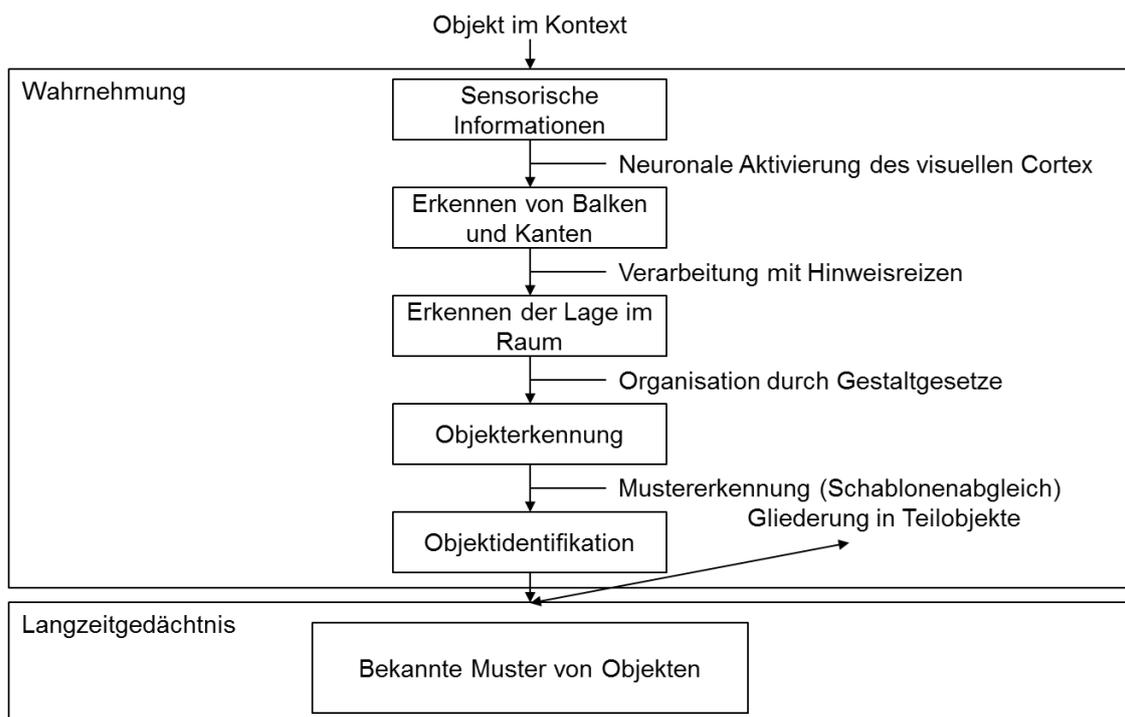


Abbildung 2-8: Der Wahrnehmungsprozess als Reihe von Einzelschritten nach JÄNSCH¹⁶⁸

¹⁶² Anderson, 2007, S. 50 f.

¹⁶³ Jänsch, 2006

¹⁶⁴ Räumliches Sehen durch die beidäugige Betrachtung von Objekten

¹⁶⁵ Bei gleichbleibendem Abstand von Elementen scheinen diese mit zunehmendem Abstand dichter gepackt zu sein.

¹⁶⁶ Vom Beobachter weiter entfernte Punkt scheinen sich langsamer über die Retina zu bewegen als nähere Punkte.

¹⁶⁷ Anderson, 2007, S. 52 ff.

¹⁶⁸ Jänsch, 2006, S. 58

Die Identifikation von Objekten geschieht über die Mustererkennung. Diese kann in verschiedenen Arten verstanden werden. Beim Schablonenabgleich wird versucht, das von der Netzhaut erfasste Bild des Objektes mit anderen gespeicherten Mustern, auch Schablonen genannt, zu vergleichen. Eine weitere Art der Mustererkennung ist die Merkmalsanalyse. Dabei wird das erkannte Objekt als Kombination von „elementaren Merkmalen“, z.B. horizontale oder vertikale Linien, und deren Beziehung zueinander angesehen. Die Merkmale können dann, ähnlich wie bei dem Schablonenabgleich, mit bekannten Mustern verglichen werden. Zur Mustererkennung von komplexeren Objekten kann das Modell der Objekterkennung genutzt werden. Objekte können dazu vereinfacht als Kombinationen grundlegender Komponenten oder Formen, wie z.B. Zylinder oder Kegel, verstanden werden. Die Teilkomponenten lassen sich in Kategorien klassifizieren und deren Konfiguration bestimmen. Das Objekt kann im Anschluss als Muster der zusammengesetzten Komponenten und deren Konfigurationen erkannt werden.¹⁶⁹

Objekte lassen sich durch die reine Mustererkennung nicht immer eindeutig identifizieren. Bei der Identifikation wird auch der Kontext genutzt. Beispielsweise können nicht alle Merkmale bei der Merkmalsanalyse erkannt werden. Hier kann der Kontext die fehlenden Merkmale ausgleichen. Von einer Top-down-Verarbeitung wird gesprochen, wenn die Wahrnehmung durch den Kontext oder das allgemeine Wissen gesteuert wird. Dabei wird das allgemeine Wissen, das auf einer hohen Ebene bestimmt wurde, auf der tieferen Wahrnehmungsebene interpretiert.¹⁷⁰

Die Wahrnehmung spielt im Konstruktionsprozess eine wichtige Rolle. Immer wieder müssen Objekte wahrgenommen und in ihrem Kontext identifiziert werden. Vor allem Analyseprozesse setzen die korrekte Wahrnehmung eines Objekts, z.B. einer technischen Zeichnung oder eines realen Systems, voraus. Dabei handelt es sich im Bereich der Konstruktion um vorwiegend komplexe Objekte, die erst durch den jeweiligen Kontext erkannt werden können. Nach ANDERSON¹⁷¹ ist der Output der Objekterkennung und -identifikation die erste bewusst zugängliche Stufe der Wahrnehmung. Ein großer Teil der visuellen Informationsverarbeitung ist bereits vor der bewussten Wahrnehmung abgeschlossen.

Um zu überprüfen wie und ob ein Objekt während der Analysephasen in der Konstruktion von dem Konstrukteur wahrgenommen wurde, muss versucht werden, die bewusste Wahrnehmung durch die Person externalisieren zu lassen. Als geeignetes Mittel kann hierzu beispielsweise die Think-Aloud Methode eingesetzt werden.

¹⁶⁹ Anderson, 2007, S. 61 ff.

¹⁷⁰ Anderson, 2007, S. 77 ff.

¹⁷¹ Anderson, 2007, S. 88

Visuelle Aufmerksamkeit

Der Mensch besitzt eine Vielzahl an Sensoren für die menschliche Wahrnehmung, deren aufgenommene Informationen gleichzeitig verarbeitet werden. Dabei kann der Mensch sich nicht immer auf alle Einflüsse von außen konzentrieren und diese im richtigen Kontext wahrnehmen. Engpässe im visuellen und auch auditiven System zwingen den Menschen dazu, die Aufmerksamkeit auf einen einzigen Sachverhalt über einen gewissen Zeitraum zu legen. Die Aufmerksamkeit kann als Zuteilung der verfügbaren kognitiven Ressourcen zu den laufenden Prozessen verstanden werden. Bei der visuellen Informationsverarbeitung können Objekte, die auf den Bereich der Fovea projiziert werden, mit einer hohen Auflösung und Schärfe wahrgenommen werden. Die Fovea deckt jedoch nur einen kleinen Bereich der Netzhaut ab. Das restliche visuelle Feld wird weniger scharf wahrgenommen. Durch das Fixieren von Punkten im visuellen Feld entscheidet der Mensch, welcher Bereich des Feldes den größten Teil der Verarbeitungsressourcen zugeteilt bekommt. Gleichzeitig wird auch darüber entschieden, welchen Bereichen des visuellen Feldes weniger Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Die visuelle Aufmerksamkeit muss jedoch nicht immer mit der Fixation des Blickes auf dem fovealen Bereich, dem Blickpunkt, übereinstimmen. Die Aufmerksamkeit kann gezielt in Bereiche außerhalb des fovealen Bereichs gelenkt werden. Für die Wahrnehmung komplexer visueller Szenen, z.B. ein Videoausschnitt, ist es jedoch notwendig die Aufmerksamkeit im visuellen Feld zu bewegen, um der relevanten Information zu folgen.¹⁷² Nach POSNER¹⁷³ ist für die gezielte Bewegung der Augen bei der visuellen Suche die Aufmerksamkeit außerhalb des fovealen Bereiches notwendig, um andere Bereiche überhaupt als interessant einordnen zu können und ihnen Aufmerksamkeit zu widmen.

Visuelle (oder auch auditive) Reize, denen der Mensch Aufmerksamkeit widmen will, werden auf Basis von physikalischen Merkmalen und ihrer Lokalisation ausgewählt. Wenn ein Objekt auffindig gemacht werden soll, wird die Aufmerksamkeit dem Suchprozess gewidmet. Besitzt ein Objekt einzigartige Merkmale, kann die Suche schnell abgeschlossen werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, müssen mehrere Merkmale verknüpft werden, um die Mustererkennung zur Identifikation des Objekts zu nutzen. Um diese Merkmale zu einem Muster kombinieren zu können, muss ihnen Aufmerksamkeit gewidmet werden.¹⁷⁴

¹⁷² Anderson, 2007, S. 91 ff.

¹⁷³ Posner, 1988, nach Anderson, 2007

¹⁷⁴ Anderson, 2007, S. 103 ff.

Ein Beispiel, wie die visuelle Aufmerksamkeit auf einem Stimulus¹⁷⁵ gelenkt werden kann, zeigt YARBUS¹⁷⁶. Er untersuchte die Bewegungen der Augen zur Wahrnehmung komplexer Objekte, in dem er Probanden ein Gemälde als Stimulus zeigte und dieses zu unterschiedlichen Aufgabestellungen betrachten ließ. Dabei wurden die Augenbewegungen zur Fokussierung der Fovea auf dem Stimulus über spezielle Kontaktlinsen¹⁷⁷ aufgenommen.¹⁷⁸ Während der visuellen Wahrnehmung fixierten die Probanden verschiedene Bereiche des Stimulus unterschiedlich oft und lang. Über Fragen zu dem Gemälde wurde die Aufmerksamkeit in Form der Augenbewegungen auf gewisse Bereiche gelenkt, von denen sich der Proband Informationen zur Beantwortung der Frage erhoffte. Auf die Frage nach dem Alter der dargestellten Personen reagierte der Proband beispielsweise mit einer Fokussierung der Gesichter. YARBUS schließt daraus, dass Bereiche, die nicht betrachtet wurden, zumindest aus Sicht des Betrachters keine relevanten Informationen für die Fragestellung enthalten.¹⁷⁹ Auf die Erkenntnisse der heutigen Kognitionsforschung bezogen wurden die visuellen Verarbeitungsressourcen über die Fokussierung der interessanten Bereiche zugeteilt. Über die Erfassung der Augenbewegungen kann daher auf mögliche Bereiche der visuellen Aufmerksamkeit geschlossen werden.

Wissensrepräsentationen

Nach der Wahrnehmung wird Information im kognitiven System weiter verarbeitet. Die Verarbeitung, Organisation und Nutzung der Informationen hängt dabei von der Repräsentationsart der Information im kognitiven System ab. Es wird in *wahrnehmungsbasierte* und *bedeutungsbezogene* Wissensrepräsentationen unterschieden. Informationen, welche wahrnehmungsbasiert repräsentiert werden, sind mit der Wahrnehmungserfahrung verknüpft. Bei der bedeutungsbezogenen Wahrnehmungsrepräsentation werden die wahrgenommenen Informationen abstrahiert und nach Bedeutungsgehalt kodiert.¹⁸⁰

Die Bildung von *mentalen Vorstellungen* von Objekten ist eine wichtige kognitive Fähigkeit von Menschen, um Vorhersagen ableiten zu können, wie sich Objekte darstellen werden. Bei der wahrnehmungsbasierten Wissensrepräsentation werden

¹⁷⁵ Ein Stimulus bezeichnet einen Reiz, welcher eine Reaktion auslöst. In dieser Arbeit wird der Stimulus als visueller Reiz verstanden, der eine visuelle Informationsverarbeitung auslöst.

¹⁷⁶ Yarus, 1967

¹⁷⁷ Die Kontaktlinsen, auch *search coils* genannt, enthalten metallische Spulen, deren Potential innerhalb eines magnetischen Felds gemessen wird (siehe Kapitel 2.5.1)

¹⁷⁸ Die Erfassung von Augenbewegungen wird auch Eye Tracking genannt und kann auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden. Kapitel 2.5 erläutert die Eye Tracking Technologie im Detail.

¹⁷⁹ Yarus, 1967, S. 171 ff.

¹⁸⁰ Anderson, 2007, S. 129 ff.

die mentalen Bilder gleichermaßen über dieselben neuronalen Strukturen verarbeitet wie die wahrgenommenen Informationen. Eine weitere wichtige Fähigkeit ist die mentale Rotation zum Abgleich zweier Repräsentationen des gleichen Objektes mit unterschiedlicher Ausrichtung. Dazu muss die Ausrichtung des mentalen Bilds für einen Vergleich zweier Abbildungen über eine Rotation variiert werden. Während der Rotation durchläuft das Bild dabei verschiedene Zwischenstufen, bis die Endstellung der Ausrichtung erreicht ist. Neben der mentalen Rotation ist es dem Menschen auch möglich, vorgestellte Objekte zu scannen oder einen Größenvergleich zwischen dem mentalen und dem vorliegenden Bild durchzuführen und deren Lage zueinander zu beurteilen. Verbale Beschreibungen können ebenfalls als mentale Bilder mit räumlichen Anordnungen im Gedächtnis repräsentiert werden.¹⁸¹

Bezogen auf den Konstruktionsprozess muss sich ein Konstrukteur während der Analyse und Synthese die Gestalt des Produktes mental vorstellen können, um diese vordenken zu können. Die Ausrichtung eines Objektes selbst und auch die Ausrichtung zu benachbarten Objekten mit ihren Wechselwirkungen kann sich der Konstrukteur mithilfe der kognitiven Verarbeitung des wahrnehmungsbasierten Wissens mental vorstellen.

Bei der bedeutungsbezogenen Wissensrepräsentation werden Informationen mit Bedeutungen versehen und gespeichert. Dabei neigt der Mensch dazu, bedeutungsbezogene Informationen eher im Gedächtnis zu behalten. Verbale Informationen werden vorwiegend über ihre Bedeutung verarbeitet. So bleibt von einer sprachlichen Mitteilung der Inhalt normalerweise im Gedächtnis, der genaue Wortlaut kann jedoch selten wiedergegeben werden. Visuell wahrgenommene Informationen können ebenfalls mit Bedeutungen verknüpft werden. Dazu werden wahrgenommene Informationen abstrahiert und in bedeutungsbezogenen Strukturen abgelegt, welche länger im Gedächtnis gespeichert werden können. Diese Repräsentationen werden auch *propositionale Repräsentationen*¹⁸² genannt. Die Proposition bezeichnet „die kleinste Wissenseinheit, die eine selbstständige Aussage bilden kann“¹⁸³ und als wahr oder falsch gekennzeichnet werden kann. Über diese Wissenseinheiten können die propositionalen Informationen in Netzwerken strukturiert werden.¹⁸⁴

Im Kontext der Konstruktion bedeutet dies, dass sich Konstrukteure bei der Betrachtung eines Systems eher dessen Funktionen merken können als dessen

¹⁸¹ Anderson, 2007, S. 133 ff.

¹⁸² Propositionale Repräsentationen sind das Äquivalent zu den mentalen Vorstellungen, welche als wahrnehmungsbasierte Repräsentationen gebildet werden.

¹⁸³ Anderson, 2007, S. 175

¹⁸⁴ Anderson, 2007, S. 165 ff.

exakte Gestalt. Dazu muss der Konstrukteur jedoch in der Lage sein Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu bilden.

2.4.2 Funktionale Gebundenheit als Einfluss auf den Problemlösungsprozess

Bei der Analyse von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen können Vorfixierungen wie die funktionale Gebundenheit den Erfolg der Analyse maßgeblich beeinflussen. Funktionale Gebundenheit bzw. funktionale Fixierung ist die „*Tendenz, Objekte in ihren üblichen Problemlösefunktionen zu repräsentieren, wodurch das Erkennen neuer Funktionen verhindert wird*“¹⁸⁵ und zählt damit zu einem wichtigen Einflussfaktor auf den Problemlösungsprozess. Sie wurde in den 30er Jahren von DUNCKER¹⁸⁶ und MAIER¹⁸⁷ näher untersucht. Beide beschäftigten sich mit produktivem Denken. DUNCKER untersuchte in Experimenten Lösungsprozesse bei praktisch-technischen und mathematischen Problemen. Er entdeckte dabei Einflüsse auf den Lösungsprozess und die Vorgehensweisen der Versuchspersonen.

Ein Einfluss auf Lösungsprozesse ist die heterogene funktionale Gebundenheit¹⁸⁸. Gegenstände werden mit einer bestimmten Funktion verknüpft. Die kann durch Vorerfahrungen der Fall sein oder durch Vorverwendung. Wenn nun der Gegenstand mit einer anderen, ungleichen Funktion zur Lösung des Problems verwendet werden muss, wird die funktionale Gebundenheit sichtbar, die eine Umzentrierung des Gegenstands auf die neue Funktion verhindern. In unterschiedlichen Experimenten wurden die Aufgaben bzw. die Gegenstände in zwei „ Fassungen“ den Versuchspersonen übergeben. In der Fassung ohne Verwendung (oV) wurde der Gegenstand ohne ersichtliche Funktion der Versuchsperson zur Verfügung gestellt. In der Fassung mit Verwendung (mV) wurde der Gegenstand in einer Funktion überreicht, was eine Neuzentrierung des Gegenstands nötig machte. In der „Schachtelaufgabe“, die von DUNCKER¹⁸⁹ gestellt wurde, sollten Kerzen in Augenhöhe an einer Tür angebracht werden. Den Versuchspersonen wurden dafür auf einem Tisch neben mehreren anderen Gegenständen Reißnägel und drei Pappschachteln zur Verfügung gestellt. Als Lösung des Problems können die Pappschachteln mit Hilfe der Reißnägel an der Tür befestigt werden, und somit als Plattform für die Kerzen genutzt werden. In der Fassung mV wurden die Schachteln mit Versuchsmaterialien gefüllt und dadurch bereits mit der Funktion „Behälter“ belegt. In der Fassung oV waren die Schachteln leer. Als Ergebnis mehrerer Experimente wurde bei nicht gebundenem Gegenstand (Fassung oV) in 100% der Fälle eine

¹⁸⁵ Anderson, 2007, S. 538

¹⁸⁶ Duncker, 1935

¹⁸⁷ Maier, 1931

¹⁸⁸ Duncker, 1935

¹⁸⁹ Duncker, 1935

Lösung gefunden, während bei gebundenem Gegenstand im Schnitt nur ca. 60 % der Probanden eine Lösung gefunden haben.

JÄNSCH¹⁹⁰ erkennt ebenfalls die Wichtigkeit der funktionalen Fixierung. Sie schlägt vor Hinweise zur deren Existenz in der Konstruktionsmethodik aufzunehmen, um damit ein Bewusstsein bei Entwicklern und Konstrukteuren für diesen Einflussfaktor zu schaffen.

2.5 Eye Tracking Technologie

Die Bedeutung der Eye Tracking Technologie oder auch Blickdatenerfassung ist in den letzten 20 Jahren enorm gestiegen. Immer mehr Nutzer aus der Wissenschaft und der Produktentwicklung verwenden die Blickdatenerfassung zur Unterstützung empirischer Untersuchungen¹⁹¹. Fortschritte in der Entwicklung der Technologie, sich verringernde Anschaffungskosten der Eye Tracking Systeme, die gleichzeitige Verbesserung der Genauigkeit der Systeme und deren immer einfacher werdende Bedienung begründen den Anstieg der Anwendung der Blickdatenerfassung¹⁹². Die Technologie wird nach DUCHOWSKI¹⁹³ heute in vielen Fachbereichen angewendet. Darunter zählen Neurowissenschaften, Psychologie, Arbeitswissenschaften, Marketing und Informatik zu den größten Anwendungsfeldern. Die Technologie ermöglicht es, die Augenbewegungen von Versuchspersonen aufzuzeichnen und diese Bewegungen und Blickpunkte, abhängig von dem gewählten System und Zweck der Untersuchung, der betrachteten Umgebung zuzuweisen. MATTHIESEN und MEBOLDT haben Eye Tracking in der Konstruktionsforschung eingeführt und etabliert. Sie haben gemeinsam mit BADKE-SCHAUB eine Special Interest Group in der „Design Society“ gebildet, um Forschern eine Plattform für den Wissensaustausch im Bereich „Human Behavior in Design“ zu bieten.¹⁹⁴

Laut DUCHOWSKI¹⁹⁵ kann Eye Tracking für diagnostische Zwecke sowie zur Interaktion mit anderen Systemen eingesetzt werden. Für diagnostische Zwecke werden Blickdaten von dem Eye Tracking System aufgezeichnet, um diese in einem nachfolgenden Schritt auswerten zu können. Die Technologie wird in der Grundlagenforschung, wie beispielsweise der Leseforschung (siehe RAYNER¹⁹⁶), als auch in Usability Studien angewendet, z.B. der Bewertung des Designs von

¹⁹⁰ Jänsch, 2006 S. 116

¹⁹¹ Holmqvist et al., 2011, S. 11

¹⁹² Duchowski, 2007b, Vorwort

¹⁹³ Duchowski, 2007b, S. 206

¹⁹⁴ Proceedings of the HBiD, 2014

¹⁹⁵ Duchowski, 2007b, S. 205

¹⁹⁶ Rayner, 1998

Kraftfahrzeugen nach WANG ET AL.¹⁹⁷. Bei Verwendung der Eye Tracking für Interaktionen wird die Technologie in Produkte verbaut, die direkt auf den Blickpunkt oder das Blickverhalten des Benutzers reagieren können. Im Folgenden werden jedoch nur Anwendungen für diagnostische Zwecke betrachtet, da für die Forschungsarbeit Eye Tracker ebenfalls nur für die Untersuchung der Analyseprozesse von Ingenieuren während der Konstruktion genutzt werden.

2.5.1 Grundlagen der Eye Tracking Technologie

Die ersten Eye Tracking Systeme wurden laut HOLMQVIST ET AL.¹⁹⁸ bereits in den 1890er Jahren entwickelt. Dabei wurden die Augenbewegungen meist mechanisch mittels eines über das Auge gelegten Rings gemessen¹⁹⁹. Eine andere Methode, die Stellung des Auges über die Reflexion einer externen Lichtquelle auf der Hornhaut aufzunehmen, wurde das erste Mal Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts von DODGE UND CLINE²⁰⁰ umgesetzt, um damit horizontale Augenbewegungen zu messen. Diese nicht invasive Methode wurde später zu einer der dominierenden Technologien zur Erfassung von Augenbewegungen.

Verschiedene Erfassungsmethoden

Die Messsysteme zur Messung von Augenbewegungen werden Eye Tracker genannt. Die Systeme können in zwei Arten von Aufnahmetechniken eingeteilt werden: Eye Tracker, welche die Position des Auges relativ zur Kopfposition messen, und Eye Tracker, welche die Augenposition in Verhältnis zur Umgebung messen und damit einen „*Point of Regard*“, den Blickpunkt in der Umgebung bzw. die Blickachse zur Umgebung, bestimmen können.²⁰¹

Nach DUCHOWSKI²⁰² existieren vier Kategorien von Erfassungsmethoden, um Augenbewegungen zu messen: Elektrookulographie (EOG), Sklerale Kontaktlinsen bzw. *search coils*, Photo- oder Videookulographie (POG/VOG) und video-basierte kombinierte Pupillen- und Hornhautreflexion.

Elektrookulographie (EOG) basiert auf der Messung der elektromagnetischen Schwankungen bei Bewegung der Dipole des Augapfels²⁰³. Die entstehenden Potentialschwankungen werden mittels Sensoren an der Hautoberfläche rund um die Augenhöhle detektiert²⁰⁴. EOG wird vorwiegend für die Aufnahme horizontaler

¹⁹⁷ Wang et al., 2011

¹⁹⁸ Holmqvist et al., 2011, S. 9

¹⁹⁹ Delabarre, 1898 nach Holmqvist et al., 2011, S. 9

²⁰⁰ Dodge / Cline, 1901 nach Holmqvist et al., 2011, S. 9

²⁰¹ Young / Sheena, 1975 nach Duchowski, 2007b, S. 51

²⁰² Duchowski, 2007b, S. 51

²⁰³ Holmqvist et al., 2011, S. 10

²⁰⁴ Duchowski, 2007b, S. 52

Augenbewegungen angewandt. Aufgrund von Drift ist die räumliche Genauigkeit der Elektrookulographie nicht hoch²⁰⁵.

Bei dem Einsatz von *skleralen Kontaktlinsen* werden Messsysteme auf einer Kontaktlinse befestigt und in das Auge eingesetzt. Am weitesten verbreitet sind hierbei Drahtspulen (*search coils*), die in den Kontaktlinsen eingelassen sind. Ein elektromagnetisches Feld wird über ein Gestell erzeugt, das die Versuchsperson über dem Kopf trägt. Dadurch kann die Augenbewegung über die induzierte Spannung in der Kontaktlinse bzw. in der eingebetteten Spule bestimmt werden. Die Kontaktlinsen-Methode hat eine sehr hohe Genauigkeit (ca. 5 – 10 Winkelsekunden über einen Bereich von ca. 5°). Die Methode ist jedoch intrusiv und die Kontaktlinsen müssen an die jeweilige Versuchsperson angepasst werden.²⁰⁶

Die *Photo- und Videookulographie (POG und VOG)* basiert auf der Messung von Augenmerkmalen, die sich während der Rotation und Translation des Auges verändern, und beinhaltet daher eine Vielfalt von Technologien je nach gemessenem Augenmerkmal. Hierzu kann beispielsweise die Form und Position des Limbus, dem Übergang von der Hornhaut zur Lederhaut, genutzt werden. Je nach Positionierung zu einer zum Auge hin feststehenden Kamera kann der Umriss des Limbus beispielsweise kreisförmig oder ellipsenförmig erscheinen.²⁰⁷

Video-basierte Eye Tracker mit kombinierter Pupillen-Hornhautreflexion gehören heute zu der dominierenden Technologie²⁰⁸. Die Augenbewegungen und der Blickpunkt werden hierbei über den Einsatz von Videokameras, welche ein oder beide Augen aufnehmen, und eine Infrarot-Beleuchtung bestimmt. Die Beleuchtung, die vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann, erzeugt messbare Reflexionen auf der Hornhaut und der Linse.

²⁰⁵ Holmqvist et al., 2011, S. 10

²⁰⁶ Duchowski, 2007b, S. 52 f.

²⁰⁷ Duchowski, 2007b, S. 53 f.

²⁰⁸ Holmqvist et al., 2011, S.9

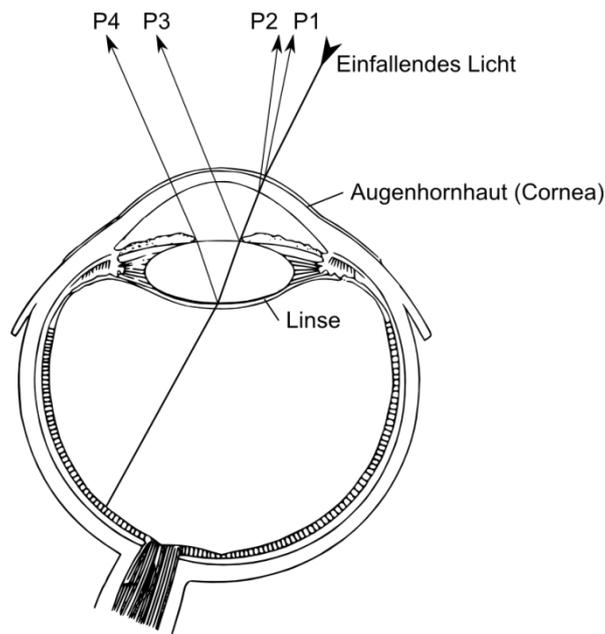


Abbildung 2-9: Purkinje Bilder durch Reflexionen des einfallenden Lichts auf der Hornhaut und der Linse

Aufgrund des Aufbaus des Auges wird einfallendes Licht an der Vorder- und Rückseite der Hornhaut sowie beim Eintritt in die Linse und aus dem Austritt der Linse reflektiert. Diese Reflexionen werden Purkinje Reflexionen oder Purkinje Bilder genannt (Abbildung 2-9, P1 bis P4). Die meisten Eye Tracker nutzen das erste Purkinje Bild (P1), die Reflexion an der Oberfläche der Hornhaut, zur Berechnung des Blickpunktes. Die Reflexion auf der Hornhaut wird dabei auf den Mittelpunkt der Pupille bezogen (Abbildung 2-10).²⁰⁹

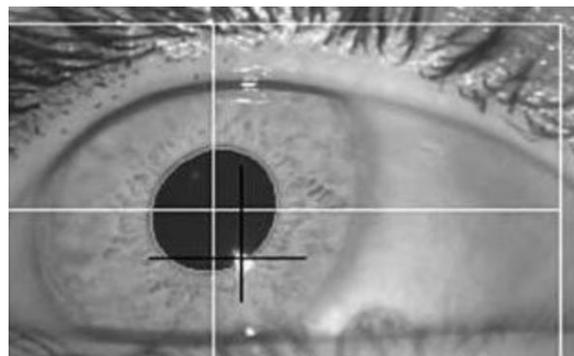


Abbildung 2-10: Aufnahme eines Eye Trackers mit kombinierter Pupillen-Hornhautreflexion, Identifikation der Pupillenmitte (weißes Kreuz) und des ersten Purkinje Bildes (schwarzes Kreuz)²¹⁰

Durch Rotation des Auges verschieben sich der Pupillenmittelpunkt und die Reflexion auf der Hornhaut zueinander. So können Augenbewegungen detektiert

²⁰⁹ Duchowski, 2007b, S. 54 ff.

²¹⁰ Holmqvist et al., 2011, S. 25

werden. Geringe translatorische Bewegungen des Auges zum Eye Tracker bzw. zur Lichtquelle, beispielsweise durch Kopfbewegungen, ergeben kaum eine Verschiebung der Purkinje Reflexion. Daher werden bei gleichbleibender Augenstellung keine Augenbewegungen gemessen. Geringe Kopfbewegungen können daher bei diesen Systemen zugelassen werden.²¹¹

Neben dem Vorteil der nicht-intrusiven Erfassungsmethode haben video-basierte Systeme mit kombinierter Pupillen-Hornhautreflexion die Möglichkeit den „*Point of Regard*“ zu messen, das heißt die aufgenommenen Augenbewegungen der betrachteten Umgebung zuzuordnen. Durch Kalibrierung des Systems können die Augenbewegungen auf eine Ebene senkrecht zur Blickrichtung projiziert werden, auf der geeignete Kalibrierpunkte aufgebracht wurden.²¹² Da für die vorliegende Forschungsarbeit Eye Tracker mit dieser Erfassungsmethode verwendet wurden, konzentriert sich die weitere Beschreibung der Systeme nur noch auf die Methode der video-basierten kombinierten Pupillen-Hornhautreflexion. Diese wird im Folgenden mit video-basiertem System oder video-basiertem Eye Tracker abgekürzt.

Einteilung der video-basierten Eye Tracking Systeme

HOLMQVIST ET AL.²¹³ unterteilt die video-basierten Eye Tracker für diagnostische Zwecke in drei Klassen: 1. Statische Eye Tracker, 2. „*head-mounted*“ Eye Tracker, welche am Kopf fixiert sind, 3. „*head tracker*“, welche zusätzlich die Kopfbewegungen im Raum aufnehmen.

Statische Eye Tracking Systeme sind fest installiert. Die Videokamera und die Infrarot-Beleuchtung haben dadurch einen definierten Abstand zu dem Stimulus. Der Stimulus ist der zu betrachtende Gegenstand, welcher der Versuchsperson bei statischen Eye Trackern meist über einen Bildschirm gezeigt wird, der in derselben Ebene des Eye Trackers liegen muss. Durch Aufnahme des Stimulus kann der „*Point of Regard*“ von den Systemen berechnet werden.

Die statischen Eye Tracker können in zwei weitere Unterklassen eingeteilt werden: „*tower-mounted*“ Eye Tracker und „*remote*“ Eye Tracker. Tower-mounted Systeme bieten den Versuchspersonen eine Stirn- und eine Kinnstütze. Sie schränken dadurch die Bewegungen des Kopfes ein und legt die Entfernung der Augen zum Stimulus fest. Diese Einschränkungen erlauben eine höhere Auflösung und Genauigkeit der Aufnahme. Die Aufnahmefrequenz von Tower-mounted Eye Tracker

²¹¹ Duchowski, 2007b, S. 56 f.

²¹² Duchowski, 2007b, S. 56

²¹³ Holmqvist et al., 2011, S. 51

oftmals bei mehr als 1000 Hz und sie können damit auch zur Untersuchung von Augenbewegungen in der Augenforschung genutzt werden.²¹⁴

Remote Systeme lassen geringe Kopfbewegungen der Versuchspersonen in einem gewissen Volumenbereich zu und benötigen daher keinen direkten Kontakt zum Probanden. Die Videokamera zur Aufnahme der Augen sowie die Infrarot-Beleuchtung sind ebenfalls statisch meist unterhalb des Stimulus angebracht. Da *Remote Eye Tracker* oft mit einer geringeren Frequenz (abhängig vom Hersteller bis ca. 500 Hz) die Augendaten aufnehmen und zusätzlich Kopfbewegungen der Versuchspersonen zulassen ist die Auflösung und die Genauigkeit der *Remote Systeme* geringer als die der Tower-mounted Systeme.²¹⁵

Head-mounted Eye Tracker werden, wie der Name andeutet, auf dem Kopf der Versuchsperson befestigt. Die Aufnahmeelemente wie Augenkamera und die Beleuchtung können an einem Helm befestigt oder in einer Brille integriert sein. Die Positionierung zwischen Kamera, Infrarot-Leuchten und den Augen darf sich während einer Aufnahme nicht ändern. Über eine weitere Kamera, die Szenenkamera, wird die Umgebung in Blickrichtung aufgezeichnet, so dass der aufgenommene Blickpfad über das Szenenvideo gelegt werden kann.²¹⁶

Head Tracker sind eine Erweiterung der *head-mounted Systeme* und kombinieren die Blickfassung mit der Aufnahme der Kopfbewegungen, beispielsweise über magnetische Kopfbänder. Dadurch ist es möglich, die Orientierung des Kopfes in einem Raum zu detektieren und darüber die Blickachse in einem Raum zu berechnen.²¹⁷ Die Analyse und Auswertung der Daten kann über die Referenz im Raum automatisiert durchgeführt werden, solange sich die Anordnungen von Gegenständen im Raum über den Aufnahmezeitpunkt nicht verändert.

Taxonomie und Modelle der Augenbewegungen

Alle Arten von Eye Trackern bestimmen über gemessene Spannungen oder mittels der Bildverarbeitung die Blickachse der Versuchsperson, welche die Augenbewegung abbildet. Diese Rohdaten können alleine betrachtet werden oder dem gezeigten Stimulus, z.B. einem Bild oder einem Video, überlagert werden²¹⁸. Aus den Rohdaten lassen sich zusätzlich okulomotorische Ereignisse der Augenbewegungen zuordnen. Als Hauptereignisse wird im Folgenden die Detektion von Fixationen und Sakkaden, welche auch *event detection* genannt wird, näher erläutert.

²¹⁴ Holmqvist et al., 2011, S. 51 ff.

²¹⁵ Holmqvist et al., 2011, S. 51 ff.

²¹⁶ Holmqvist et al., 2011, S. 54

²¹⁷ Holmqvist et al., 2011, S. 54 f.

²¹⁸ Holmqvist et al., 2011, S. 54

Fixationen bezeichnen Augenbewegungen, welche die Retina, genauer die Fovea, über einem stationären Objekt stabilisieren. Das Auge steht während einer Fixation nicht still, sondern führt kleinste Bewegungen aus, welche ein Tremor, Drift oder Mikrosakkaden sein können.²¹⁹ Es ist zu beachten, dass Fixationen aus der Sicht der Okulomotorik nicht direkt den Fixationen aus Sicht der Kognition, also eine Informationsaufnahme, entsprechen müssen. Dies bedeutet, dass nicht bei jeder Positionierung des Auges auf ein Objekt zwangsläufig auch Informationen aufgenommen und verarbeitet werden.²²⁰ Es kann jedoch auch Information aufgenommen werden, ohne dass eine Fixation direkt auf dem Objekt liegt. In der Leseforschung wurde von RAYNER²²¹ nachgewiesen, dass ein Wort bereits kognitiv verarbeitet werden kann, wenn es noch nicht direkt auf der Fovea fixiert wird. Diesen Zusammenhang gilt es bei der Auswertung und Interpretation der Blickdaten zu beachten.

Sakkaden sind schnelle Augenbewegungen zwischen zwei Fixationen. Diese Bewegungen sind die schnellsten Bewegungen, die vom menschlichen Körper ausgeführt werden können. Sie dauern in der Regel zwischen 30 und 80 ms. Es kann angenommen werden, dass während Sakkaden keine Informationen vom Menschen aufgenommen werden kann.²²²

Zur Detektion von Fixationen und Sakkaden aus den Rohdaten (*event detection*) werden Algorithmen verwendet, die aus der Blickposition (x und y in px), der Blickgeschwindigkeit (in °/s) und der Blickbeschleunigung (in °/s²) die Ereignisse rechnerisch bestimmen. Da es unterschiedliche Algorithmen und Wege der Detektion von Fixationen und Sakkaden gibt, kann keine allgemeingültige Definition angegeben werden. Fixationen werden vorwiegend über die räumliche Streuung oder die Blickgeschwindigkeit detektiert. Bei der Detektion von Fixationen nach räumlicher Ausbreitung müssen benachbarte Datenpunkte über eine minimale Dauer (zwischen 50 – 250 ms) innerhalb eines gewissen räumlichen Bereichs (zwischen ca. 0,5 und 2,0 °) positioniert sein, um als Fixation gewertet zu werden (siehe Abbildung 2-11, links). Bei Detektion nach Blickgeschwindigkeit werden Bewegungen mit Geschwindigkeiten unterhalb eines Schwellwertes (üblicherweise 10 – 50 °/s) identifiziert (siehe Abbildung 2-11, rechts). Die schnellen Augenbewegungen bei Sakkaden werden über die Blickgeschwindigkeit oder die Blickbeschleunigung detektiert. Dabei variieren die festgelegten Schwellwerte zwischen den Algorithmen

²¹⁹ Duchowski, 2007b, S. 46

²²⁰ Holmqvist et al., 2011, S. 150

²²¹ Rayner, 1998

²²² Holmqvist et al., 2011, S. 23

und liegen bei 30 – 100 °/s für die Geschwindigkeit bzw. bei 4000 – 8000 °/s² für die Beschleunigung.²²³

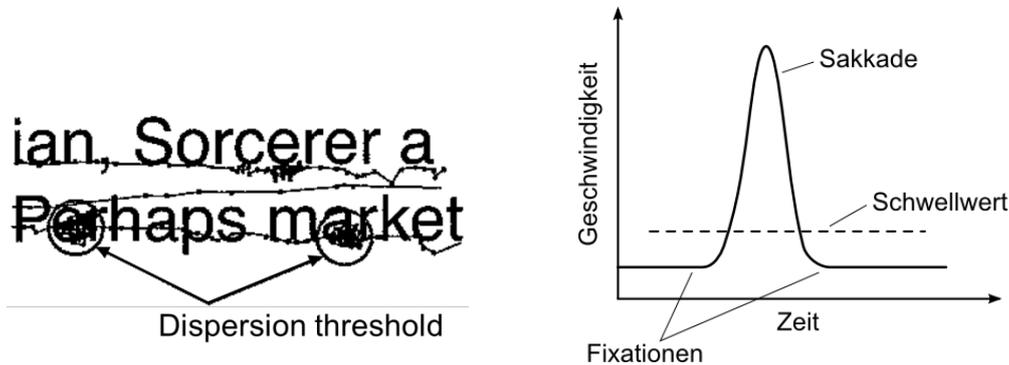


Abbildung 2-11: Detektion von Fixationen anhand der räumlichen Ausbreitung (links) oder anhand der Blickgeschwindigkeit (rechts)²²⁴

Weitere Ereignisse, wie Blinzeln oder „Smooth pursuit“, dem Folgen eines sich bewegenden Objekts, können ebenfalls über Algorithmen detektiert werden.

2.5.2 Auswertung von Blickdaten

Im Folgenden wird eine Auswahl von Mitteln und Hinweisen zur Auswertung der Eye Tracking Daten präsentiert. Die Auswahl richtet sich nach den hauptsächlich in der Forschung eingesetzten Mittel und Hinweisen, die für die vorliegende Forschungsarbeit eingesetzt wurden.

Areas of Interest (AOIs)

„Areas of Interest“ (AOIs), sind nach HOLMQVIST ET AL.²²⁵ ein Mittel zur Auswertung von Eye Tracking Daten. Dabei werden Bereiche auf einem Stimulus definiert, welche den Forscher interessieren und näher ausgewertet werden sollen. Es kann beispielsweise detektiert werden, wann und wie lange eine Versuchsperson den entsprechenden Bereich betrachtet hat und welche Eigenschaften das Blickverhalten in diesem eingegrenzten Bereich hat. Zusätzlich können „AOI hits“ (Datenpunkte oder Fixationen innerhalb einer AOI), „dwells“ (Verweilzeiten innerhalb einer AOI) oder „transitions“ (Übergänge zwischen AOIs) ausgewertet werden.

Bei der Festlegung der AOIs muss immer darauf geachtet werden, dass die Wahl der Bereiche zur Forschungshypothese passt. Falls diese sich ändert, müssen gegebenenfalls auch die gewählten AOIs angepasst werden. Umgekehrt kann eine Änderung der AOIs auch die Änderung der Hypothese zur Folge haben. Wenn AOIs erst während der Auswertung der Daten gesetzt werden, werden Post-hoc-

²²³ Holmqvist et al., 2011, S. 151 f.

²²⁴ Holmqvist et al., 2011, S. 152

²²⁵ Holmqvist et al., 2011, S. 187 ff.

Hypothesen gebildet.²²⁶ Um die Größe der AOIs richtig zu wählen, muss zum einen festgelegt werden, ob auf Basis der Rohdaten oder auf Basis der Fixationen und Sakkaden ausgewertet wird. Zum anderen müssen die Ungenauigkeiten der Aufnahme, wie Winkelabweichungen oder eine schlechte Kalibrierung berücksichtigt werden. Dazu müssen die aufgenommenen Daten bei Möglichkeit entsprechend nachbereitet und/oder die AOIs in ihrer Größe oder Position angepasst werden.²²⁷

Je nach Hypothese müssen unterschiedliche Daten bezogen auf die AOIs ausgewertet werden. Ein „*AOI hit*“ bezeichnet Blickpunkte, die innerhalb der Koordinaten einer AOI liegen. Diese Daten können der AOI für weitere Auswertungen zugeordnet werden. Bei einer Auswertung auf Basis von Fixationen und Sakkaden, kann die Anzahl der *AOI hits* der Ereignisse gezählt werden. Die *dwell time* einer AOI, kann genutzt werden, um auszuwerten, ob und wie lange ein Bereich des Stimulus angeschaut wurde. Er besitzt eine Dauer, einen Start- und Endzeitpunkt und eine Verteilung. Die Verweilzeit, „*dwell time*“, kann auch auf die gesamte Zeitspanne der Aufnahme bezogen werden oder in Relation mit Verweilzeiten auf anderen AOIs gesetzt werden.²²⁸

„*Transitions*“ bezeichnen Übergänge des Blicks von einer AOI zu einer anderen. *Transitions* können bei einem direkten Übergang von einer in die nächste AOI aus nur einer Sakkade bestehen. Sie können aber auch aus mehreren Sakkaden bestehen, wenn zwischen den beiden AOIs Fixationen in einem nicht durch AOIs abgedeckten Bereich vorkommen.²²⁹

Zur Repräsentation von AOI-basierten Daten können nach HOLMQVIST ET AL.²³⁰ unter anderem „*AOI strings*“ und „*transition matrices*“ genutzt werden. Um für die Auswertung des Blickverhaltens die Abfolgen von AOIs auszuwerten, können *AOI strings* gebildet werden. Dabei werden die betrachteten AOIs nach den Fixationsbasierten *AOI hits* oder nach *dwells* und deren Startzeitpunkten sortiert und aneinander gereiht. Für eine *transition matrix*, eine Übergangsmatrix, werden die definierten AOIs in einer Matrix eingetragen und die Anzahl der Übergänge zwischen den AOIs eingetragen. Damit kann beispielsweise detektiert werden, ob ein häufiger Abgleich zwischen zwei AOIs stattfindet. Dabei werden Sakkaden innerhalb einer AOI nicht berücksichtigt.

²²⁶ Holmqvist et al., 2011, S. 188

²²⁷ Holmqvist et al., 2011, S. 223 ff.

²²⁸ Holmqvist et al., 2011, S. 189 f.

²²⁹ Holmqvist et al., 2011, S. 190 f.

²³⁰ Holmqvist et al., 2011, S. 193 ff.

		<i>To</i>						
		LS	LF	RF	RS	I	E	O
<i>From</i>	Left Side (LS)	.	77	3	0	17	0	1
	Left Front (LF)	18	.	14	1	56	2	9
	Right Front (RF)	1	52	.	15	16	1	14
	Right Side (RS)	0	7	35	.	13	15	30
	Instruments (I)	3	54	2	1	.	4	37
	Engine (E)	0	9	0	3	27	.	61
	Other (O)	2	60	2	5	27	4	.

Abbildung 2-12: Übergangsmatrix zur Abbildung der Übergänge zwischen AOIs²³¹

Die Dichte der *Übergangsmatrix* kann ein Hinweis für das Vorgehen einer Versuchsperson sein. Nach GOLDBERG UND KOTVAL²³² ist eine geringe Dichte der Matrix ein Indikator für eine effiziente und direkte Suche, während eine Übergangsmatrix mit hoher Dichte eher für eine unstrukturierte Suche steht. Nach HOLMQVIST ET AL.²³³ kann es bei langen Folgen von AOIs jedoch auch sein, dass eine geringe Dichte für einen bevorzugten Pfad durch die AOIs stehen kann und andere Pfade von der Versuchsperson nicht beachtet wurden. Von der Dichte der *Übergangsmatrix* kann daher nicht allgemeingültig auf ein Verhalten der Versuchsperson geschlossen werden. Sie kann jedoch Hinweise auf das Verhalten geben, die über andere Mittel geprüft werden können.

Um die Abfolge von betrachteten AOIs über der Zeit darzustellen, können Diagramme mit Zeitachsen verwendet werden. Abbildung 2-13 zeigt auf der linken Seite ein AOI „*sequence chart*“. Das Diagramm bezieht sich auf die Blickdaten eines Probanden und auf fünf festgelegte AOIs. Die Abfolge und die Verweildauern innerhalb der AOIs können von dem *sequence chart* abgelesen werden. Um den Verlauf der AOIs von mehreren Probanden darstellen zu können, werden „*scarf plots*“ verwenden (Abbildung 2-13, rechts). Auf der y-Achse werden nicht mehr AOIs, sondern die Versuchspersonen aufgetragen. Die betrachteten AOIs werden für jeden Probanden in einer Linie aufgereiht und durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. So können die Muster unterschiedlicher Probanden visuell verglichen werden.²³⁴

²³¹ Holmqvist et al., 2011, S. 194

²³² Goldberg / Kotval, 1999

²³³ Holmqvist et al., 2011, S. 341

²³⁴ Holmqvist et al., 2011, S. 197

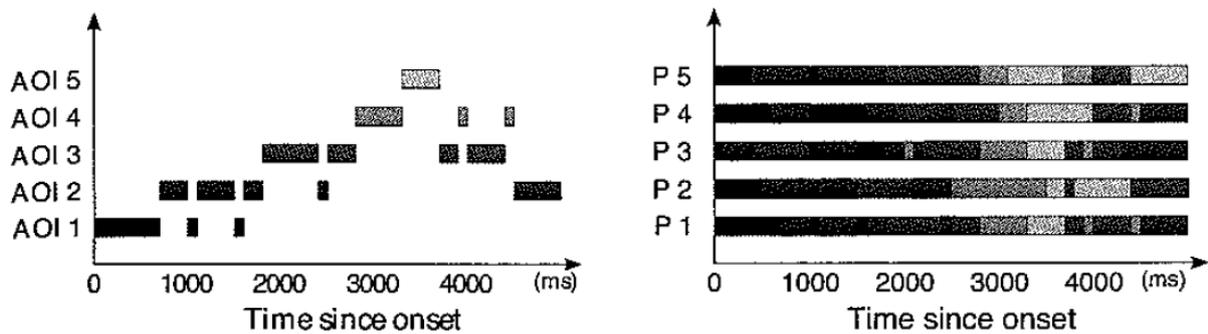


Abbildung 2-13: *Sequence chart* eines Probanden (links) und *Scarf plots* von fünf Probanden (rechts)²³⁵

AOIs werden meist als einzelne, statische Bereiche mit einer definierten Grenze festgelegt. Dabei gibt es jedoch nach HOLMQVIST ET AL.²³⁶ noch weitere Typen von AOIs, wie den „*Whitespace*“, Ebenen, dynamische AOIs, „*gridded AOIs*“ und weitere. Der *Whitespace* bezeichnet den Bereich des Stimulus, welcher nicht mit einer AOI bedeckt ist. Er kann auch in *Übergangsmatrizen* aufgenommen werden, falls er für die Forschungshypothese relevant ist. Ebenen können vor allem in der Kombination mit *Head Trackern* genutzt werden. So können AOIs im Raum definiert werden und eine Zuweisung der Blickdaten zu den Koordinaten der Ebenen stattfinden.

Bei der Verwendung von Videos oder Animationen als Stimulus können *dynamische AOIs* zur Auswertung verwendet werden. Die AOI kann dabei in der Software für jedes Videobild auf den gewünschten Bereich verschoben und angepasst werden. Bei dem Abspielen des Videos folgt somit die AOI dem im Video gezeigten Bereich. Dies ist hilfreich, wenn einer Vielzahl an Probanden dieselbe Videosequenz oder Animation als Stimulus vorgespielt wird.²³⁷

Gridded AOIs können genutzt werden, um eine Übersicht über das Blickverhalten von Versuchspersonen über den gesamten Stimulus zu erhalten²³⁸. Im Normalfall sollten AOIs passend zur Forschungsfrage definiert werden. GOLDBERG UND KOTVAL²³⁹ unterscheiden jedoch zwischen „*content-dependent*“ und „*content-independent*“ Analysen. Für *content-dependent* Analysen beziehen sich inhaltlich auf die Forschungshypothesen, während *Content-independent*“ Analysen keinen Bezug zum dargestellten Inhalt fokussieren. Für beide Formen der Analysen werden AOIs gitterförmig über den Stimulus gelegt, ohne auf interessante Bereiche zu achten.

²³⁵ Holmqvist et al., 2011, S. 197

²³⁶ Holmqvist et al., 2011, S. 206 ff.

²³⁷ Holmqvist et al., 2011 S. 209

²³⁸ Goldberg / Kotval, 1999

²³⁹ Goldberg / Kotval, 1999

Daher eignen sich *gridded AOIs* eher für Analysen ohne einen semantischen Kontext²⁴⁰.

Normalerweise werden AOIs so gewählt, dass diese sich nicht überlappen. Es lassen sich aber auch *überlappende AOIs* festlegen. Dabei muss beachtet werden, dass *AOI hits* und *transitions* für beide AOIs und somit doppelt gezählt werden. Viele statistische Tests haben zur Bedingung, dass die Daten unabhängig voneinander sein müssen, was bei überlappenden AOIs nicht mehr gegeben ist. Die Überlappung kann jedoch auch gezielt genutzt werden, um Sub-AOIs zu definieren und *AOI hits* zu der Sub-AOI und der Haupt-AOI zählen zu lassen.²⁴¹

Bei Blick-überlagerten Videos gestaltet sich die Zuweisung zu AOIs schwieriger und ist meist sehr zeitaufwendig. Diese Videos entstehen durch Verwendung von *Head-mounted Eye Tracking Systemen*, bei denen der aufgenommene Blickpfad dem Szenenvideo überlagert wird. Im Gegensatz zu sich wiederholenden Videosequenzen können hier dynamischen AOIs selten sinnvoll verwendet werden, da das Szenenvideo durch die individuellen Kopfbewegungen für jede Versuchsperson variiert.²⁴² Ohne die Verwendung von *Head Trackern* oder weiteren Referenzmesssystemen, wie Markern, ist meist nur eine manuelle Zuweisung von Datenpunkten oder Fixationen zu AOIs möglich.

Die Nutzung von AOIs kann die anwendungsbezogene Forschung mit Eye Tracking Systemen wesentlich erleichtern. Über *AOI hits*, *dwells* und *transitions* können viele Informationen über das Blickverhalten von Versuchspersonen herausgelöst werden. Die graphische Darstellung der zeitlichen Abfolgen über *Sequence charts* und *Scarf plots* schaffen dem Forscher einen schnellen Überblick.

Attention maps

Attention maps sind Repräsentationen von Eye Tracking Daten, welche auf der Verteilung von Blickdaten auf einem Stimulus beruhen. Sie spiegeln daher nicht zwingend die Aufmerksamkeit der Versuchsperson wieder, sondern präsentieren eine räumliche Verteilung der Blickdaten. Ein großer Vorteil dieser Repräsentationsart ist die schnelle Übersicht über die aufgenommenen Daten.²⁴³

Attention maps können auf Basis von *gridded AOIs* erstellt werden oder als *topologische Karte* auf Basis der Gaußschen Glockenkurve. Bei Verwendung von *gridded AOIs* können die Verweilzeiten der Gitterfelder genutzt werden, um diese auf die Gesamtverweilzeit auf dem Stimulus zu beziehen. Die Werte der Felder können

²⁴⁰ Holmqvist et al., 2011, S. 212

²⁴¹ Holmqvist et al., 2011, S. 221 ff.

²⁴² Holmqvist et al., 2011, S. 227 f.

²⁴³ Holmqvist et al., 2011, S. 231

beispielsweise auf eine Farbskala bezogen werden, um jedem Feld eine Farbe je nach Höhe des Wertes oder Intensität zuzuweisen. Neben den Verweilzeiten können über *gridded AOIs* auch weitere Werte ausgewertet werden, wie z.B. der Eintrittszeitpunkt in die Gitter-AOIs, welche der Zeitpunkt des ersten *AOI hits* ist.²⁴⁴

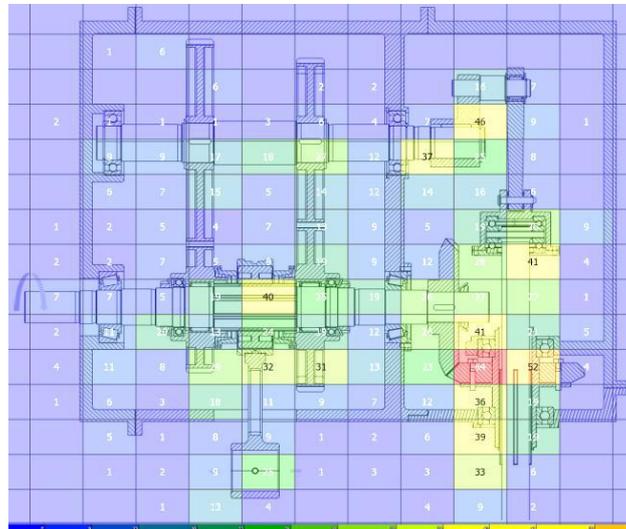


Abbildung 2-14: Getriebezeichnung mit *Heat map* auf Basis von *gridded AOIs* und der Verweilzeit²⁴⁵

Zur Erstellung von *topologischen Karten*, den *Gaußschen Attention maps*, werden Gauß-Kurven über Rohdaten oder Fixationen gelegt. Bei einer Ansammlung von Fixationen addieren sich die Werte entsprechend. Die Eigenschaften von *Gaußschen Attention maps*, können über vier Parameter variiert werden. Der erste Parameter stellt über die Verteilung der Farbgebung bzw. der Helligkeit die Höhe der Gauß-Kurve dar. Für *Heat maps* (siehe Abbildung 2-15) wird eine Farbverteilung zur Visualisierung der Verteilung gewählt, üblicherweise von Blau (geringe Verteilung) zu Rot (hohe Verteilung). In *Luminance maps* werden Bereiche mit geringer Blick-Verteilungsdichte dunkel, Bereiche mit hoher Dichte hell bzw. transparent dargestellt. Der zweite Parameter legt die Breite der Basis-Gauß-Kurve fest. Ein dritter Parameter bestimmt, ob die Dauer von Fixationen in die Verteilungsberechnung einbezogen wird. Die Verwendung von Rohdaten oder Fixationen wird über den vierten und letzten Parameter festgelegt.²⁴⁶

²⁴⁴ Holmqvist et al., 2011, S. 233

²⁴⁵ Matthiesen et al., 2013

²⁴⁶ Holmqvist et al., 2011, S. 233 ff.

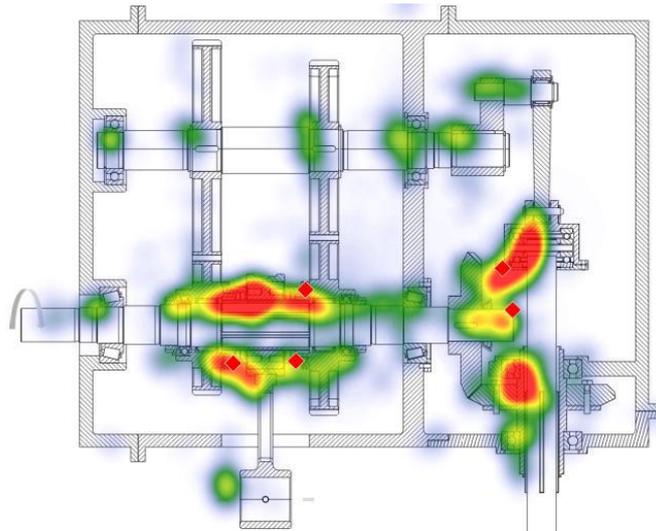


Abbildung 2-15: Getriebezeichnung mit einer überlagerten *Gaußschen Heat map* und Mausclicks (rote Rauten) ²⁴⁷

Die größten Vorteile und gleichzeitig die größte Gefahr der Fehlinterpretation von *Attention maps* liegt in deren einfacher Erstellung und dem schnellen Überblick über die Verteilung der Blickdaten ²⁴⁸. Durch Variation der Parameter, beispielsweise dem Weglassen oder Einbeziehen der Fixationsdauer, werden verschiedene Blickverteilungen berechnet. Diese können leicht fehlinterpretiert werden und müssen daher bei der Verwendung solcher Repräsentationsformen beachtet werden.

Scanpath

Der Begriff des *Scanpath* wurde von NOTON UND STARK ²⁴⁹ eingeführt und als fester Pfad einer spezifischen Versuchsperson und deren Blickmuster verstanden. Der heutige Gebrauch des Begriffs weicht jedoch hiervon ab und beschreibt die Bewegung des Auges eines Probanden im Raum. HOLMQVIST ET AL. definieren den *Scanpath* als „*route of oculomotor events through space within a certain timespan*“ ²⁵⁰. Es gibt unterschiedliche Arten und Definitionen für den *Scanpath*. Teilweise werden Fixationsdauern in die Repräsentation des Pfads aufgenommen, teilweise werden Fixationen aber ohne deren Dauer dargestellt. Für NOTON UND STARK ²⁵¹ besteht der *Scanpath* beispielsweise aus einer Abfolge von Sakkaden.

Der *Scanpath* wird üblicherweise dem Stimulus überlagert. Er kann entweder statisch für eine gewisse Zeitspanne angezeigt oder dynamisch eingeblendet werden, um den Verlauf der Augenbewegung nachzubilden. Dabei kann der Verlauf von Rohdaten oder der Verlauf von Fixationen und Sakkaden abgebildet werden. Der

²⁴⁷ Matthiesen et al., 2013

²⁴⁸ Holmqvist et al., 2011, S. 239

²⁴⁹ Noton / Stark, 1971 nach Holmqvist et al., 2011

²⁵⁰ Holmqvist et al., 2011, S. 254

²⁵¹ Noton / Stark, 1971 nach Holmqvist et al., 2011

Pfad der Rohdaten wird als Linie dargestellt. Bei dem fixationsbasierten Scanpath werden Fixationen als Kreise und Sakkaden als Verbindungslinien zwischen den Kreisen abgebildet. Bei Berücksichtigung der Fixationsdauern werden die Durchmesser der Kreise entsprechend der Dauer variiert (Abbildung 2-16).²⁵²

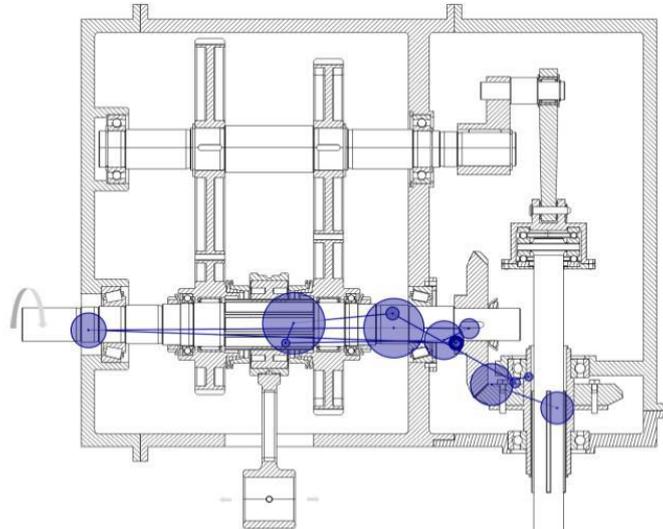


Abbildung 2-16: Getriebezeichnung mit einem überlagerten fixationsbasiertem Scanpath unter Einbezug der Fixationsdauer²⁵³

Der *Scanpath* kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Die Qualität der Daten kann über diese Repräsentation überprüft werden. Dazu zählt neben der Aufnahmegüte auch die Qualität des Algorithmus zur Detektion von Fixationen und Sakkaden. Über eine Gegenüberstellung eines *Scanpath* auf Basis von Rohdaten und eines fixationsbasierten Pfads kann schnell festgestellt werden, ob der Algorithmus Fixationen und Sakkaden korrekt detektiert. Falls eine Verschiebung der Blickdaten aufgrund von einem Drift der Daten oder einem Parallaxenfehler notwendig ist, kann über den *Scanpath* eine Korrektur des Offsets vorgenommen werden, um *Scanpath* und Stimulus relativ zueinander auszurichten. Weiter kann der *Scanpath* genutzt werden, um eine manuelle, meist qualitative Analyse der Blickdaten durchzuführen. Für die Repräsentation des Blicks im „*Cued retrospective Think-Aloud*“ kann der *Scanpath* ebenfalls eingesetzt werden.²⁵⁴

Parallaxenfehler

Bevor die Eye Tracking Daten nach der *event detection* ausgewertet werden können, sollte die Qualität der Blickdaten z.B. über den *Scanpath* geprüft werden. Je nach verwendetem System und Stimulus kann es nötig sein, eine Korrektur des Offsets

²⁵² Holmqvist et al., 2011, S. 254 f.

²⁵³ Matthiesen et al., 2013

²⁵⁴ Holmqvist et al., 2011, S. 256 f.

durchzuführen. Eine Korrektur kann vor allem bei *Head-mounted Eye Trackern* aufgrund von Parallaxenfehler notwendig sein²⁵⁵.

Bei *Head-mounted Eye Tracker* ist die Szenenkamera leicht versetzt von dem Auge platziert. Bei einer Überlagerung des berechneten Winkels der Blickachse mit dem Bild der Szenenkamera kann aufgrund des Versatzes zum Augenmittelpunkt ein Parallaxenfehler entstehen. Die Bestimmung des „*Point of Regard*“ ist, wie in Kapitel 2.5.1 erklärt, über eine Kalibrierung des Systems auf eine Ebene senkrecht zur Blickachse möglich. Dabei ist zu beachten, dass die Kalibrierebene in derselben Distanz zum Auge liegt wie der betrachtete Stimulus. Wird jedoch während der Aufnahme ein Gegenstand vor oder hinter der Kalibrierebene betrachtet, kommt es zu dem Parallaxenfehler (Abbildung 2-17).²⁵⁶ Dies kann nur über eine softwarebasierte Bearbeitung der Daten nach der Aufnahme kompensiert werden, beispielsweise über eine Offset-Korrektur des *Scanpath*.

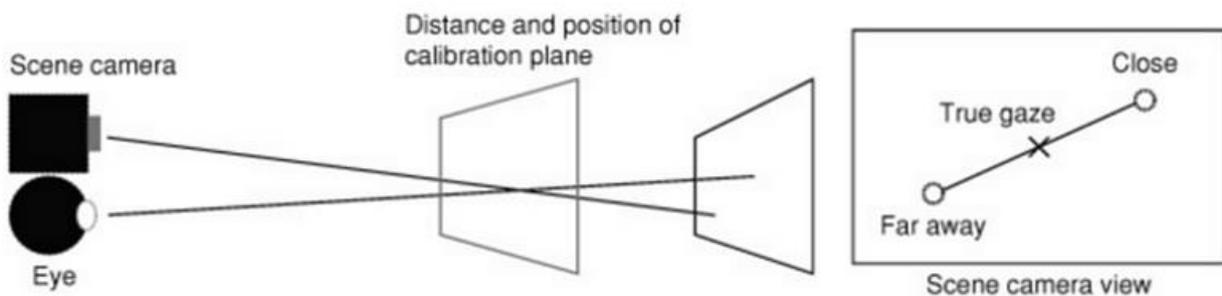


Abbildung 2-17: Parallaxenfehler bei *Head-mounted Eye Trackern*²⁵⁷

Der Parallaxenfehler tritt nicht bei statischen Eye Trackern auf, da die Kalibrierebene hier auch immer gleich der Betrachtungsebene ist.

2.5.3 Einsatzbereiche der Eye Tracking Technologie

Die Bandbreite von Eye Tracking Anwendungen ist groß und wächst weiter. Die Einsatzbereiche reichen nach DUCHOWSKI²⁵⁸ von den Neurowissenschaften und der Psychologie über Marketing und Werbung sowie der Informatik bis hin zum Einsatz in den Ingenieur- und Arbeitswissenschaften und der menschenzentrierten Forschung. Im Folgenden wird vorwiegend auf den Einsatz der Blickdatenerfassung im Bereich der Ingenieurwissenschaften eingegangen, jedoch soll auch ausgewählte Literatur aus nicht verwandten Bereichen erwähnt werden.

²⁵⁵ Holmqvist et al., 2011, S. 60

²⁵⁶ Holmqvist et al., 2011, S. 60 f.

²⁵⁷ Holmqvist et al., 2011, S. 61

²⁵⁸ Duchowski, 2002a

Eine der ersten und bekanntesten Anwendungen der Eye Tracking Technologie ist die visuelle Wahrnehmung während des Lesens²⁵⁹. RAYNER²⁶⁰ gibt einen Überblick über durchgeführte Studien und deren Erkenntnisse zur Untersuchung von Augenbewegungen im Bereich der Leseforschung, aber auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Wahrnehmung von Szenen. Viele dieser Erkenntnisse sind bereits in Forschungsaktivitäten aus anderen Fachbereichen eingeflossen. Beispielsweise wurde in der Leseforschung herausgefunden, dass konzeptionell schwierige Texte zu längeren Fixationsdauern und kürzeren Sakkadenlängen führt.

Im Bereich der Medizin wurden Experimente durchgeführt, welche eine Übertragung auf Ingenieurwissenschaften zulassen. LITCHFIELD ET AL.²⁶¹ hat mehrere Eye Tracking Experimente zur Suche von Lungenknoten auf Röntgenbildern durchgeführt. Dabei wurde das Suchverhalten von Novizen und Experten der Radiologie untersucht. Neben der reinen Aufnahme der Blickdaten im Experiment hat LITCHFIELD ET AL. auch bereits aufgenommene Blickpfade als Stimulus genutzt, um die Auswirkung des Suchverhaltens anderer Personen (Experte oder Novize) auf den Blickpfad der Probanden zu untersuchen. Dabei wurde festgestellt, dass Novizen bei der Suche nach Knoten in der Lunge besser abschneiden, wenn sie ein Blickpfadvideo einer anderen Person bei der Suche nach Lungenknoten gezeigt bekommen – unabhängig davon, ob die andere Person Novize oder Experte ist.²⁶²

Zur Untersuchung von Mensch-Maschine-Schnittstellen ist der Einsatz der Eye Tracking Technologie vor allem bei der Anwendung von komplexen Systemen hilfreich. Zur Untersuchung von Flugsimulatoren nutzte ANDERS²⁶³ Augen- und Kopfbewegungen, die mit Hilfe von *Head-Trackern* von Piloten bei der Bedienung des Simulators unter realistischen Flugbedingungen aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden Audio- und Videoprotokolle der Piloten im Simulator erstellt. Zur Auswertung der Blickdaten wurden AOIs über die Bedienungselemente des Cockpits gelegt. Bei der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die aufgezeichneten Augenbewegungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Piloten und zur Schulung angehender Piloten genutzt werden können.

Im Bereich der Konstruktionsforschung entwickelte HAHNE²⁶⁴ ein Prozessmodell zur Interpretation von technischen Zeichnungen und nutzte die Eye Tracking Technologie, um das aufgestellte Prozessmodell zu verifizieren. Er formulierte allgemeingültige Interpretationsprozesse, welche sich die Phasen Präparation,

²⁵⁹ Duchowski, 2007b

²⁶⁰ Rayner, 1998

²⁶¹ Litchfield et al., 2010

²⁶² Litchfield et al., 2010

²⁶³ Anders, 2001 nach Duchowski, 2007b

²⁶⁴ Hahne, 2012

Inkubation, Konzeption, Argumentation und Reflexion aufteilen. Die Präparation erfolgt vor der eigentlich Analyse und Interpretation der technischen Zeichnung. Dazu zählen unter anderem das Lesen der Aufgabenstellung und weitere Vorbereitungen für die Zeichnungsinterpretation. Während der Inkubationsphase verschafft sich der Betrachter einen Überblick über die Zeichnung und zieht erste Assoziationen zu bekannten Problemstellungen. Die Konzeptionsphase steht für die Analyse des Systems und die Entwicklung eines Problemlösungskonzepts durch den Betrachter. Die Einbettung des Konzepts in einen breiteren Kontext sowie eine detaillierte Analyse erfolgt in der Argumentationsphase. Hier werden Argumente für die Richtigkeit des Problemlösungskonzepts erarbeitet. Die Reflexionsphase schließt den Interpretationsprozess ab. Der Betrachter vergleicht die gewonnenen Interpretationsergebnisse mit der Motivation und der Aufgabenstellung. HAHNE erwartete einen Anstieg bzw. Abfall des Verarbeitungsaufwands in Abhängigkeit der Phasen seines Interpretationsprozessmodells (siehe Abbildung 2-18). Er erklärt, dass der Verarbeitungsaufwand negativ mit der Blickwechselgeschwindigkeit korreliert und nutzte daher die Eye Tracking Technologie für die Verifikation des Modells.

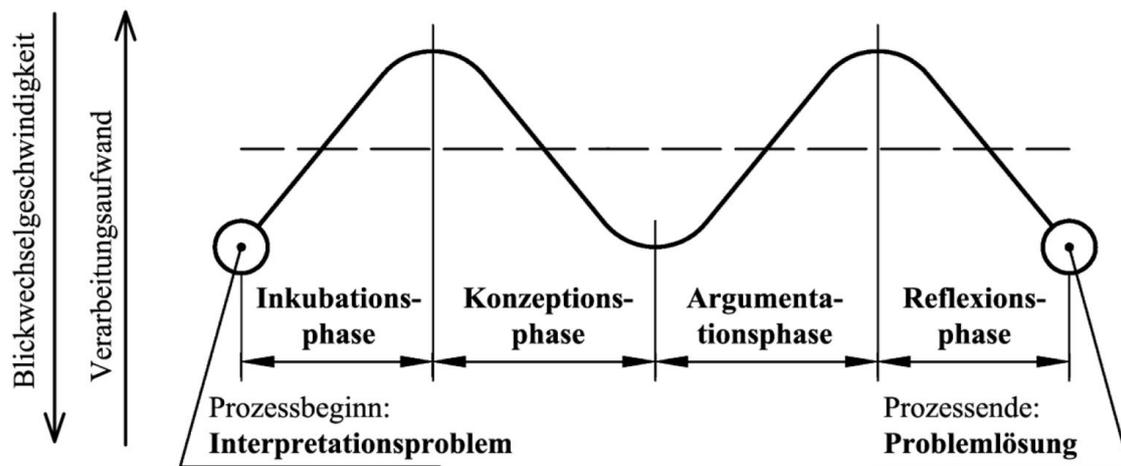


Abbildung 2-18: Qualitativer Verlauf des Aufwandes zur Informationsverarbeitung nach HAHNE²⁶⁵

HAHNE konnte die genauen Sequenzen von Inkubation, Konzeption, Argumentation und Reflexion nicht nachweisen. Er schließt jedoch aus seinen Untersuchungen die Existenz der unterschiedlichen Interpretationsphasen über die Aufnahme des Anstieg und Abfalls der Fixationsdauern von Versuchspersonen.

Die Special Interest Group „Human Behavior in Design“ der Design Society hat das Ziel das menschliche Verhalten von Entwicklern und Designern sowie von Anwendern im Bereich der Ingenieurwissenschaften genauer zu untersuchen, um

²⁶⁵ Hahne, 2012, S. 90

geeignete Entwicklungsmethoden ableiten zu können. Dabei wird auch der Transfer von Methoden aus der Verhaltens- und Kognitionsforschung in den Bereich der Ingenieurwissenschaften fokussiert. Der Einsatz physiologischer Messmethoden, unter anderem Eye Tracking, hat sich daher für Untersuchungen des Entwicklers und Anwenders vermehrt und wird in der Special Interest Group durch MEBOLDT, MATTHIESEN und BADKE-SCHAUB intensiv diskutiert.²⁶⁶ Zudem besteht eine Kooperation der Product Development Group pd|z der ETH Zürich mit dem IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), welche den Einsatz der Eye Tracking Technologie zur Untersuchung von Vorgehensweisen des Entwicklers sowie für Usability-Studien gemeinsam erforschen.²⁶⁷

LOHMEYER ET AL.²⁶⁸ unterscheidet vier Anwendungsfelder, in denen Eye Tracking Analysen im ingenieurwissenschaftlichen Bereich eingesetzt werden können: die Analyse von Produktrepräsentationen, die Analyse von Expertise in der Produktentwicklung, die Analyse von Kreativität im Gestaltungsprozess und die Analyse von Produktanwendungen. Dabei fokussieren die ersten drei Analysefelder die Augenbewegungen von Entwicklern, die Analyse von Produktanwendungen basiert auf der Aufnahme der Augenbewegungen von Anwendern. Dabei fokussieren LOHMEYER ET AL. vor allem das visuelle Verhalten von Entwicklern oder Anwendern.

Bei dem Vergleich von Novizen und Experten im Bereich der Produktentwicklung konnten Unterschiede an deren visuellem Verhalten festgestellt werden. Daher wurde eine Hypothese über fünf mögliche Strategien aufgestellt²⁶⁹: 1. die Überblick-Strategie, 2. die Ausrichtungsstrategie, 3. die Priorisierungsstrategie, 4. die Muster-Strategie und 5. die Internalisierungsstrategie. Diese Strategien sollen von erfahrenen Entwicklern bei der Analyse von technischen Schnittdarstellungen angewendet werden, um eine schnelle und akkurate Bewertung der Darstellung vornehmen zu können. LOHMEYER ET AL.²⁷⁰ hat bei der Untersuchung von visuellen Strategien zwei Grundtypen des Blickverhaltens im Blickpfad während der Analyse technischer Zeichnungen bestimmen können: „*Skimming*“ zum Verschaffen der Übersicht und „*Scrutinizing*“ zur detaillierten Betrachtung der Zeichnung. Dabei zeichnet sich *Skimming* über Fixationen mit kurzer Dauer und langen Sakkaden aus. Ausschnitte des Blickpfads während *Scrutinizing* fallen dagegen durch lange Fixationsdauern und kurzen Sakkaden auf.

²⁶⁶ Proceedings of the HBiD, 2014

²⁶⁷ vgl. Lohmeyer et al., 2014a; Lohmeyer et al., 2014c; Lohmeyer et al., 2013; Matthiesen et al., 2013

²⁶⁸ Lohmeyer et al., 2014a

²⁶⁹ Lohmeyer et al., 2013

²⁷⁰ Lohmeyer et al., 2014a

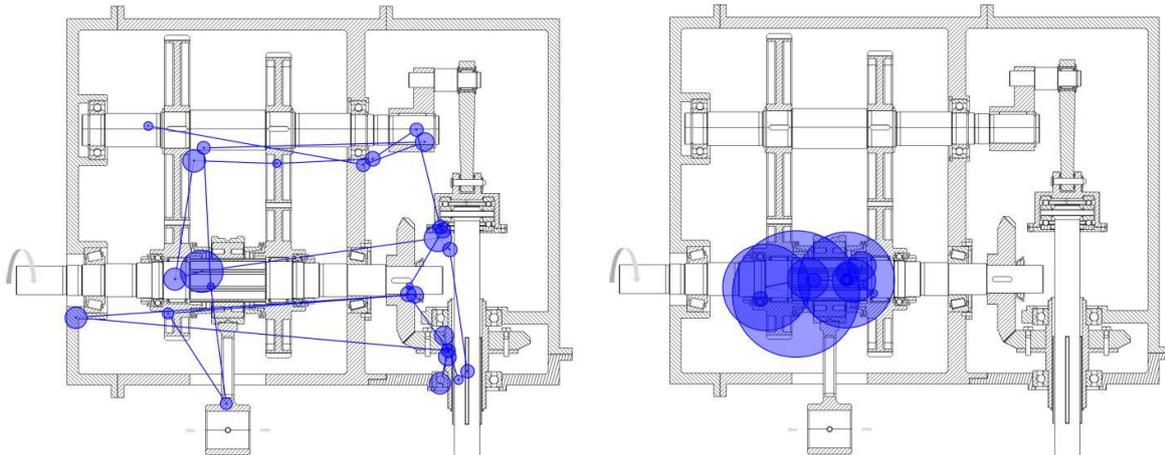


Abbildung 2-19: Grundtypen des Blickverhaltens während der Analyse einer technischen Zeichnung – *Skimming* (links) und *Scrutinizing* (rechts)²⁷¹

Auf die automatisierte Detektion von *Skimming*- und *Scrutinizing*-Phasen bei technischen Zeichnungen fokussiert sich LOHMEYER ET AL.²⁷². Hierzu wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Phasen bei Verwendung von *Remote Eye Trackern* automatisch detektieren kann. Die Detektion richtet sich nach der Vorgehensweise von drei Personen, die eigenständig den Blickpfad in *Skimming*- und *Scrutinizing*-Segmente eingeteilt haben. Die durch den Algorithmus detektierten Phasen des *Scrutinizing* haben sich weitestgehend mit den detektierten Phasen der Testpersonen gedeckt (Abbildung 2-20).

Der Algorithmus detektiert den Wechsel in eine *Scrutinizing*-Phase anhand von Fixationsdauer und Sakkadenlänge mehrerer aufeinander folgender Fixation-Sakkaden-Paare. Wenn die Fixationsdauer und Sakkadenlänge mehrerer Paare unterhalb der definierten Schwellwerte liegt, kann von *Scrutinizing* gesprochen werden, andernfalls von *Skimming*. Der automatische Detektion der Suchmuster ist vielversprechend für die Unterstützung der Untersuchung visueller Strategien. Eine Verwendung für *Head-mounted Eye Tracker* wäre sinnvoll und wird zurzeit untersucht.²⁷³

²⁷¹ Lohmeyer et al., 2014a

²⁷² Lohmeyer et al., 2014b

²⁷³ Lohmeyer et al., 2014b

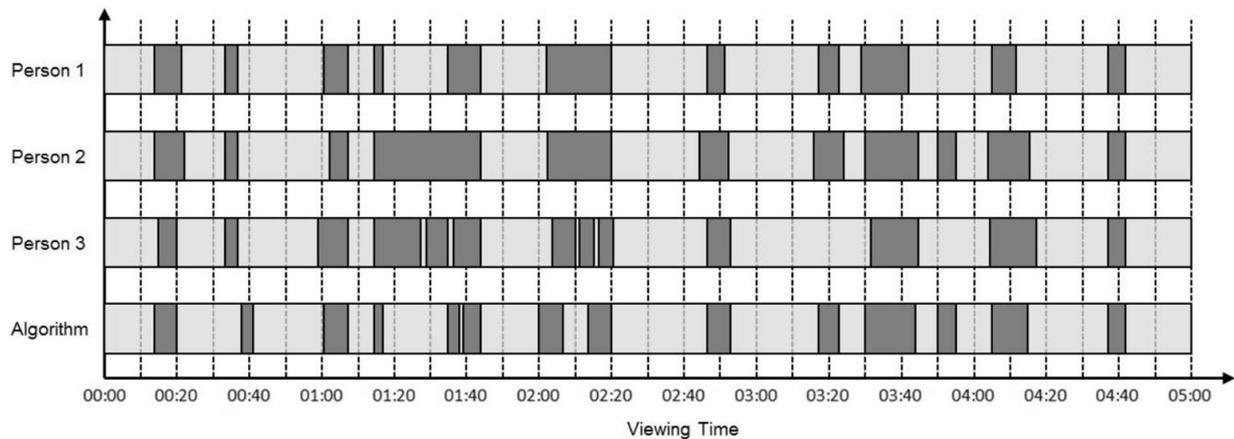


Abbildung 2-20: Phasen von *Skimming* (hell) und *Scrutinizing* (dunkel), unabhängig eingeschätzt von drei Personen und berechnet über den entwickelten Algorithmus²⁷⁴

Neben der Detektion von *Skimming* und *Scrutinizing* untersuchen LOHMEYER ET AL.²⁷⁵ die Beeinflussung des Blickpfads durch die Aufgabenstellung. Dabei beziehen sie sich auf die Untersuchungen von YARBUS²⁷⁶, der 1967 Untersuchung der Augenbewegungen und der Perzeption von Objekten mittels unterschiedlicher Erfassungsmethoden, unter anderem der Kontaktlinsen-Methode, durchführte. Dabei zeigte YARBUS den Versuchspersonen als komplexes Objekt ein Gemälde, welches er von den Probanden zuerst ohne Anweisungen betrachten ließ und danach Fragen zum Gemälde stellte, wie beispielsweise eine Frage nach dem Alter der abgebildeten Personen²⁷⁷. Er stellte fest, dass die Aufmerksamkeit von der Fragestellung geleitet wird und in unterschiedlichen Blickpfaden sichtbar wird. Diesen Zusammenhang haben LOHMEYER ET AL.²⁷⁸ auf die Betrachtung technischer Zeichnungen übertragen. Dabei wurde dieselbe technische Darstellung des Antriebs einer Standbohrmaschine mit Angabe unterschiedlicher Aufgabenstellungen mehreren Versuchspersonen gezeigt. Es zeigt sich ebenfalls eine Abhängigkeit des Blickpfades von der Aufgabenstellung und dies über alle 26 Testpersonen. Dazu wurden die Verweilzeiten der AOIs bei Stellung unterschiedlicher Aufgaben miteinander verglichen. Mit quantitativen Daten wurde dieser Zusammenhang auf Basis desselben Experiments von OGNJANOVIC ET AL.²⁷⁹ belegt. Dabei wurde festgestellt, dass die gegebene Aufgabenstellung einen signifikanten Einfluss auf die durchschnittliche Sakkadenlänge, jedoch nicht auf die durchschnittliche Fixationsdauer hatte. Die Verteilung der Fixationsdauern aller Probanden über die AOIs bzw. deren Verweilzeiten wurden ebenfalls durch die Aufgabenstellung

²⁷⁴ Lohmeyer et al., 2014b

²⁷⁵ Lohmeyer et al., 2014c, 2014c

²⁷⁶ Yarbus, 1967

²⁷⁷ Yarbus, 1967, S. 171 ff.

²⁷⁸ Lohmeyer et al., 2014c

²⁷⁹ Ognjanovic et al., 2014

signifikant beeinflusst²⁸⁰. Daher sollte bei der Erstellung von Eye Tracking Experimenten die Aufgabenstellung bewusst gewählt werden, um eine Beeinflussung des Blickpfades entweder gezielt ausnutzen zu können oder auch eine Beeinflussung zu vermeiden.

Zur Bewertung von Designs realer Produkte hat BADNI²⁸¹ zusätzlich zum Einsatz von *Head-Trackern*, welche bereits die simultane Erfassung von Kopf- und Augenbewegung ermöglichen, auch die Bewegung des Produktes detektiert. Dazu wurde das Produkt mit Markern ausgestattet, welche die Berechnung der Orientierung des Produkts im Verhältnis zur Orientierung des Kopfes ermöglichen. So kann der Blickpfad nicht nur auf die Orientierung des Kopfes im Raum bezogen werden, sondern auch direkt auf das Produkt und dessen Ausrichtung. Dazu wird der Blickpfad über ein 3D-Modell des Produktes gelegt. Dies ermöglicht das Drehen und Wenden eines Produktes während der Eye Tracking Aufnahme und gleichzeitig eine automatisierte Auswertung ohne manuelle Zuweisung der Fixationen des Blick-überlagerten Videos.

BOA ET AL.²⁸² untersuchte mittels Eye Tracking die Auswirkung unterschiedlicher Repräsentationsformen, wie z.B. Skizzen oder Fotos, auf die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen. Dabei zeigte er Probanden verschiedene Repräsentationsformen mehrerer Bauwerke, Automobile und elektrischer Anwendungen, welche von den Probanden bewertet wurden. Die Verteilung der Blickdaten auf den unterschiedlichen Repräsentationen desselben Produkts unterschieden sich teilweise. Dies lässt darauf schließen, dass die Art der Produktrepräsentation einen Einfluss auf die Aufmerksamkeit und die räumliche Verteilung der Augenbewegungen haben kann.²⁸³

BOA UND HICKS²⁸⁴ nutzen die Augenbewegungen als Indikator für kognitive Prozesse, um den Umgang mit Informationen während des Gestaltungsprozesses zu modellieren. Hierzu wurde ein prototypisches Modell gebildet, das aus den vier Handlungen Einarbeiten, Erkennen, Verstehen und Prüfen besteht. Zwei Probanden wurden zur Auswahl eines Lagers Informationsblätter über unterschiedliche Lagertypen mit allen wichtigen Informationen betreffend einer Lagerauswahl vorgelegt. Dabei konnten den ersten beiden Handlungen, Einarbeiten und Erkennen, unterschiedliche Muster des Blickpfades zugewiesen werden. Bei den nachfolgenden Handlungen konnten keine klaren Muster erkannt werden. Da der Versuch bisher nur

²⁸⁰ Ognjanovic et al., 2014

²⁸¹ Badni, 2012

²⁸² Boa et al., 2013

²⁸³ Boa et al., 2013

²⁸⁴ Boa / Hicks, 2014

mit 2 Probanden durchgeführt wurde, bleibt eine Schlussfolgerung zum Einsatz von Eye Tracking zur Modellierung des Umgangs mit Information offen.²⁸⁵

Um herauszufinden, wie die Qualität des Layouts von UML Diagrammen die kognitive Auslastung und das Verständnis der Probanden beeinflusst, nutzt MAIER ET AL.²⁸⁶ ebenfalls die Eye Tracking Technologie in einer Pilotstudie. Vier Versuchspersonen haben anhand von Diagrammen unterschiedlicher Art und Qualität Verständnisaufgaben bearbeitet. Danach wurden die Probanden zum Aufwand und zur Schwierigkeit der Aufgabenbearbeitung mit den gegebenen Diagrammen befragt. Dieser Einschätzungen der Probanden wurden durchschnittliche Fixationsdauer, Blinzelfrequenz und Pupillendurchmesser gegenübergestellt. Eine Abhängigkeit der Einschätzungen der Probanden von der kognitiven Auslastung anhand der Blickdaten (höhere durchschnittliche Fixationsdauer und größere Pupillendurchmesser) konnte qualitativ aus Tabellen ausgelesen werden. Die Probandengruppen muss jedoch erweitert werden, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

2.5.4 Zwischenfazit

Zur Aufnahme der Blickdaten kann zwischen verschiedenen Systemen gewählt werden, die jeweils eine Vielzahl an Auswertemöglichkeiten bereitstellen. Dabei hängt der Aufbereitungsaufwand der erfassten Blickdaten und die Auswertemöglichkeiten von der Art des verwendeten Eye Trackers und des präsentierten Stimulus ab. Die Systeme müssen daher bewusst für das jeweilige Forschungsziel ausgewählt werden. Dabei sind vor allem Remote Eye Tracker und Eye Tracking Brillen für den Einsatz in empirischen Studien zur Konstruktionsforschung geeignet. Durch die Nutzung von AOIs, Attention maps oder Scanpaths können erste Rückschlüsse auf die visuelle Aufmerksamkeit gezogen werden.

Durch den immer einfacheren Einsatz der Eye Tracking Technologie für Forscher nutent bereits mehrere Wissenschaftler im Bereich der Ingenieurwissenschaften die Blickdatenerfassung in empirischen Studien.²⁸⁷ In bisherigen Anwendungen von Eye Tracking wird meist nur das visuelle Verhalten des Entwicklers oder Anwenders betrachtet. Eine Abfrage der Wahrnehmung und kognitiven Verarbeitung der Informationen erfolgt bisher kaum. Dies wird nun intensiv in der Special Interest

²⁸⁵ Boa / Hicks, 2014

²⁸⁶ Maier et al., 2014

²⁸⁷ Proceedings of the HBiD, 2014

Group „Human Behavior in Design“ der Design Society, geleitet von MATTHIESEN, MEBOLDT und BADKE-SCHAUB, eingeführt.²⁸⁸

2.6 Schlussfolgerung zum Stand der Forschung

Der Prozess des Konstruierens kann auch als Problemlösungsprozess gesehen werden, welcher durch iterative Phasen der Analyse und Synthese von Konstrukteuren bearbeitet wird. Dabei bauen auch Neuentwicklungen fast immer auf Vorgängersystemen auf, indem die Prinzipien oder die Gestalt von Teilsystemen variiert oder übernommen werden. Eine erfolgreiche Analyse von bestehenden Konstruktionen ist dabei wichtig, um eine ausreichende Wissensbasis für die Synthese neuer Objekte zu schaffen. Auch müssen neue Gestaltversionen, die synthetisiert werden, stetig analysiert und mit den intendierten Funktionen abgeglichen werden.

Während der Analyse und Synthese in der Konstruktion ist die Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen von großer Bedeutung. Funktionen werden dabei in eine neue Gestalt übersetzt und eine Gestalt in Funktionen interpretiert. Die Phasen der Synthese werden durch die klassische Konstruktionsmethodik stark unterstützt. Individuelle Einflüsse aus dem Wissen, den Fähigkeiten und den Fertigkeiten der Konstrukteure auf das Konstruktionsergebnis wurden in mehreren empirischen Studien untersucht. Die Vorgehensweisen während der Analyse und die Einflüsse darauf bedürfen jedoch noch weiterer Klärung, um Ingenieure gezielt bei der Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen unterstützen zu können.

Um Entwickler während Analyseprozessen zu beobachten, können empirischen Studien mit gezielter Variation dieser individuellen Einflüsse durchgeführt werden. Als Erhebungsmethoden werden physiologische Messmethoden, wie die Eye Tracking Technologie, immer häufiger im Bereich der Produktentwicklung eingesetzt. Vor allem die Aufnahme des Blickverhaltens von Konstrukteuren birgt ein hohes Potential, um Aufschlüsse über die visuelle Aufmerksamkeit geben zu können. Über die Think-Aloud Methode ist es möglich, implizites und stilles Wissen aufzudecken und die Identifikation von Objekten durch die Konstrukteure zu externalisieren. Die Kombination beider Methoden zur Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion wurde bisher noch nicht angewandt. Damit kann jedoch voraussichtlich ein großer Mehrwert zum Verständnis der Analyseprozesse erreicht werden.

²⁸⁸ Proceedings of the HBiD, 2014

3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, Analyseprozesse von Ingenieuren während der Konstruktion sichtbar und messbar zu machen, um diese verstehen zu können und neue Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden ableiten zu können. Dabei ergeben sich zwei Teilziele der vorliegenden Forschungsarbeit:

1. Die Erarbeitung der Einsatzmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik
2. Die Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz der Eye Tracking Technologie

Um diese Ziele zu erreichen, wird zunächst die Anwendbarkeit der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik nachgewiesen. Weiter werden die Kombination der Eye Tracking Technologie mit etablierten Erhebungsmethoden kritisch bewertet und die Anforderungen an empirische Studien unter Einsatz der Technologie erarbeitet. Abschließend werden die Erkenntnisse in zwei Studien überführt, die Analyseprozesse von Ingenieuren abbilden. Die Studien werden durchgeführt und erste Erkenntnisse zu Vorgehensweisen von Ingenieuren während der Analyse technischer Systeme abgeleitet. Die beiden Teilziele werden in folgenden beiden Unterkapiteln näher erläutert.

3.1 Teilziel 1: Einsatz der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik

Zunächst wurde die Eye Tracking Technologie für Untersuchungen im Bereich der Konstruktionsmethodik zugänglich gemacht. Dazu gehören

- das Aufzeigen von neuen Möglichkeiten der Untersuchung von Analyseprozesse unter Einsatz der Eye Tracking Technologie,
- die Aufdeckung von technologiebedingten Einschränkungen bei der Aufnahme des Blickverhaltens,
- die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen etablierten Erhebungsmethoden und der Eye Tracking Technologie,
- die Erarbeitung von Anforderungen an Eye Tracking Studien und
- die Gestaltung eines geeigneten Studienaufbaus zur Untersuchung von Analyseprozessen unter Einsatz der Blickdatenerfassung.

Die Vorteile der Verwendung des Blickpfads und Möglichkeiten für Einsätze in empirischen Studien im Bereich der Konstruktionsmethodik werden aufgezeigt. Dazu werden auch Fehlanwendungen der Technologie und mögliche Fehlinterpretationen der Blickdaten kritisch betrachtet und bewertet.

Ein wichtiger Punkt sind die Wechselwirkungen mit etablierten Erhebungsmethoden in empirischen Studien. Die Blickdatenerfassung alleine kann nicht zu aussagekräftigen Ergebnissen über Analyseprozesse von Ingenieuren und Konstrukteuren führen. Hierzu wurde die Eye Tracking Technologie mit weiteren Erhebungsmethoden kombiniert eingesetzt. Die Kombination mit Think-Aloud Methoden²⁸⁹ in empirischen Studien verspricht einen großen Nutzen zur Untersuchung von Analyseprozessen. Die simultane Aufnahme von verbalisierten Gedanken und betrachteten Gestaltmerkmalen kann die Vorgehensweisen stark verdeutlichen. Die Beeinflussung der Blickdaten durch simultanes „lautes Denken“, der *Concurrent Think-Aloud Methode (CTA)*, wurde jedoch untersucht, um Störfaktoren auszuschließen. Auch der Nutzen der erzeugten Verbalisierungen durch die beiden Arten des Think-Alouds *Concurrent* oder *Retrospective Think-Aloud (CTA* oder *RTA)* in Kombination mit den aufgenommenen Blickdaten über Eye Tracking wurde aufgezeigt.

Um die Analyseprozesse während der Konstruktion innerhalb einer Eye Tracking Studie untersuchen zu können, wurde ein geeigneter Studienaufbau gewählt. Hier wurden die Anforderungen an empirische Studien bezüglich der Objektivität, der Validität, der Reliabilität und der empirischen Relevanz eingehalten. Es wurde erarbeitet, wie diese Anforderungen durch Einsatz der Eye Tracking Technologie in empirischen Studien unterstützt werden können und welche Punkte besonders beachtet werden müssen. Das erste Teilziel war es, aus diesen Anforderungen zwei Konzepte für Aufgabenstellungen in empirischen Studien zu erarbeiten. Diese wurden zur Untersuchung von Analysefähigkeiten und Analyseprozessen von Ingenieuren und Konstrukteuren eingesetzt.

3.2 Teilziel 2: Untersuchungen von Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz der Eye Tracking Technologie

Die vorliegende Arbeit erarbeitet erste Erkenntnisse zu Analyseprozessen in der Konstruktion und evaluiert die Studienkonzepte. Das zweite Teilziel war, eine Grundlage für weitere Untersuchungen im Bereich der Konstruktionsmethodik zu schaffen. Im Fokus steht dabei die Analyse von technischen Systemen.

²⁸⁹ Siehe Kapitel 2.3.2

Hierzu wurden zwei empirische Studien aufgebaut und mit Probanden unterschiedlicher Ausbildungs- und Erfahrungsstufen durchgeführt. Dazu mussten

- die zu bearbeitenden Aufgaben ausgearbeitet,
- Hilfsmittel angefertigt,
- Ablaufpläne festgelegt und
- Auswerteparameter zur Quantifizierung definiert werden.

Durch die Durchführung der Studien werden erste Aussagen zu Analyseprozessen während der Konstruktion getroffen. Zusätzlich werden die Konzepte kritisch diskutiert und Erkenntnisse für weitere Studien zur Untersuchung von Analyseprozessen abgeleitet.

4 Forschungsdesign

4.1 Forschungsfragen

Aus den vorher genannten Zielen der Arbeiten lassen sich die folgende Forschungsfragen ableiten. Diese wurden im Rahmen der Forschungsarbeit beantwortet, um die festgelegten Ziele zu erreichen. Die Forschungsfragen richten sich nach den beiden Teilzielen aus Kapitel 3: Der Einsatz der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik (Forschungsfrage 1) und die Durchführung von Untersuchungen zu Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz der Blickdatenerfassung (Forschungsfrage 2 und 3).

Forschungsfrage 1

Wie kann Eye Tracking zur Untersuchung der Analyseprozesse technischer Systeme in der Produktentwicklung genutzt werden?

Forschungsfrage 1.1

Welche Möglichkeiten der Aufnahme und Auswertung bieten unterschiedliche Eye Tracking Systeme zur Untersuchung der Analyseprozesse technischer Systeme?

Forschungsfrage 1.2

Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen der Aufnahme des Blickpfads und andere Erhebungsmethoden mit dem Zweck der Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion?

Forschungsfrage 1.3

Welche Anforderungen werden an empirische Studien zur Untersuchung von Analyseprozessen unter Einsatz der Eye Tracking Technologie gestellt und wie können diese umgesetzt und erfüllt werden?

Forschungsfrage 2

Wie können Eye Tracking Studien zur Untersuchung von Vorgehensweisen während der Analyse umgesetzt werden und welche Erkenntnisse zu Analyseprozessen lassen sich daraus ableiten?

Forschungsfrage 2.1

Wie kann eine Laborstudie zu grundsätzlichen Analyseprozessen unter möglichst festen Randbedingungen umgesetzt werden und welche Erkenntnisse lassen sich daraus ableiten?

Forschungsfrage 2.2

Wie kann eine Laborstudie zu realistischen Problemlösungsprozessen aus der Konstruktionspraxis und einer hohen empirischen Relevanz umgesetzt werden und welche Erkenntnisse lassen sich daraus ableiten?

Forschungsfrage 2.3

Welche Unterschiede lassen sich in den Analyseprozessen lassen sich zwischen Probandengruppen unterschiedlicher Erfahrungsstufen identifizieren?

Forschungsfrage 2.4

Welche Vorgehensweisen und weitere Faktoren begünstigen die Analyse technischer Systeme?

Forschungsfrage 3

Welche Erkenntnisse lassen sich für die Durchführung weiterer Studien zur Untersuchung von Analyseprozessen in der Konstruktion ableiten?

4.2 Forschungsvorgehen

Um das Ziel der Arbeit zu erreichen, einen Beitrag zum Messen und Verstehen von Analyseprozessen während der Konstruktion zu leisten, werden die vorgestellten Forschungsfragen mit dem folgenden Vorgehen beantwortet. Abbildung 4-1 visualisiert das Vorgehensmodell der Forschungsarbeit.

Zunächst wird der Einsatz der Eye Tracking Technologie zur Untersuchung von Konstruktionsprozessen genauer betrachtet. Dabei stehen die Vorgehensweisen des Menschen während der Analyse technischer Systeme im Fokus der Untersuchung. Zur Untersuchung dieser Vorgehensweisen sollen empirische Studien durchgeführt werden, während derer auch der Blickpfad mittels Eye Tracking aufgenommen werden soll. Die Auswahl eines Eye Tracking Systems hängt dabei von dem Zweck der Untersuchung, von dem Aufbau der Studie und der gewählten Aufgabenstellung ab. Anforderungen an einen Studienaufbau und sich ergebende Einschränkungen durch die verwendete Technologie werden hierzu in einem ersten Schritt betrachtet.

Da rein aus der Aufnahme der Blickpfade, wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, noch keine ausreichenden Aussagen über die Vorgehensweisen von Ingenieuren getroffen werden kann, soll die Eye Tracking Technologie mit weiteren etablierten Erhebungsmethoden kombiniert werden. Hierzu werden die Wechselwirkungen von der Blickdatenerfassung mit anderen Erhebungsmethoden, wie z.B. der Think-Aloud Methode, betrachtet, um mögliche wechselseitige Beeinflussungen berücksichtigen zu können.

Anschließend werden die Anforderungen an empirische Studien auf die speziellen Begebenheiten für Studien zur Untersuchung von Analyseprozessen unter Einsatz der Eye Tracking Technologie übertragen. Die Erfassung der Blickdaten kann wesentlich zur Gewährleistung der Objektivität, Validität und Reliabilität beitragen.²⁹⁰ Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Umsetzung der genannten Punkte und der Gewährleistung einer hohen empirischen Relevanz, der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität, in einem Zielkonflikt stehen. Eine hohe empirische Relevanz bedingt oft die Einschränkung der Objektivität, Validität und Reliabilität. Um diesem Zielkonflikt entgegen treten zu können, werden zwei Studienkonzepte mit unterschiedlichen Fokussen erarbeitet.

Untersuchungen zum Einsatz der Eye Tracking Technologie in empirischen Studien zu Analyseprozessen		
Anwendung der Eye Tracking Technologie zur Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion	Wechselwirkungen der Blickdatenerfassung mit anderen Erhebungsmethoden	Anforderung an empirische Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie zur Untersuchung von Analyseprozessen
Empirische Studien zu Analyseprozessen in der Produktentwicklung		
Untersuchung von Analyseprozessen zum Aufbau von Funktions- und Systemverständnis	Untersuchung von Synthese-getriebenen Analyseprozessen	
Ableiten von Erkenntnissen für weitere Untersuchungen von Analyseprozessen während der Konstruktion		

Abbildung 4-1: Vorgehensmodell der Forschungsarbeit

Um die Analyseprozesse von Ingenieuren während der Konstruktion zu untersuchen, werden die beiden erarbeiteten Konzepte in empirischen Studien durchgeführt. Über die erste Studie werden die Analyseprozesse erfasst, die ein Ingenieur durchführt, um sich ein grundlegendes Verständnis des Systems und dessen Funktionen zu erarbeiten. Sie verzichtet mit Absicht auf eine hohe empirische Relevanz und zielt auf Unterschiede in der Wahrnehmung und Interpretation technischer Systeme zwischen Ingenieuren verschiedener Erfahrungsstufen ab. Die zweite Studie befasst sich mit der Untersuchung von Analyseprozessen während der Synthese eines technischen Systems, der Synthese-getriebenen Analyse, und bildet eine reale Aufgabenstellung aus einem industriellen Produktentwicklungsprozess ab. Aus diesen Untersuchungen werden Unterschiede im Blickverhalten und in der

²⁹⁰ Die Begriffe Objektivität, Validität und Reliabilität sowie der Beitrag der Eye Tracking Technologie zur Einhaltung dieser wird in Kapitel 5.3 ausführlich erläutert.

Problemanalyse von Ingenieuren mit unterschiedlichen Erfahrungsstufen bestimmt, die sich begünstigend auf den Erfolg der Synthese auswirken. Dabei werden den Ingenieuren bewusst kein Modelle und keine Methode zur Analyse oder Synthese vorgegeben, um eine freie und intuitive Bearbeitung der Aufgabenstellung zuzulassen. Auf Basis beider Studien und der daraus gewonnenen Ergebnisse werden Erkenntnisse für die weitere Untersuchung von Analyseprozessen während der Konstruktion abgeleitet.

Abbildung 4-2 gibt noch einmal eine Übersicht der durchgeführten Studien und verknüpft sie mit den Forschungsfragen, die durch die Durchführung und Auswertung beantwortet werden sollen. Als erstes wird eine explorative Studie zur Klärung der Forschungsfrage 1.1, durchgeführt. Dabei werden die Möglichkeiten der Aufnahme und Auswertung bei Verwendung unterschiedlicher Eye Tracking Systeme und Repräsentationsformen zur Untersuchung der Analyseprozesse erforscht. Die Vorgehensweisen von Ingenieuren werden in dieser Exploration noch nicht untersucht. Die Studie wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

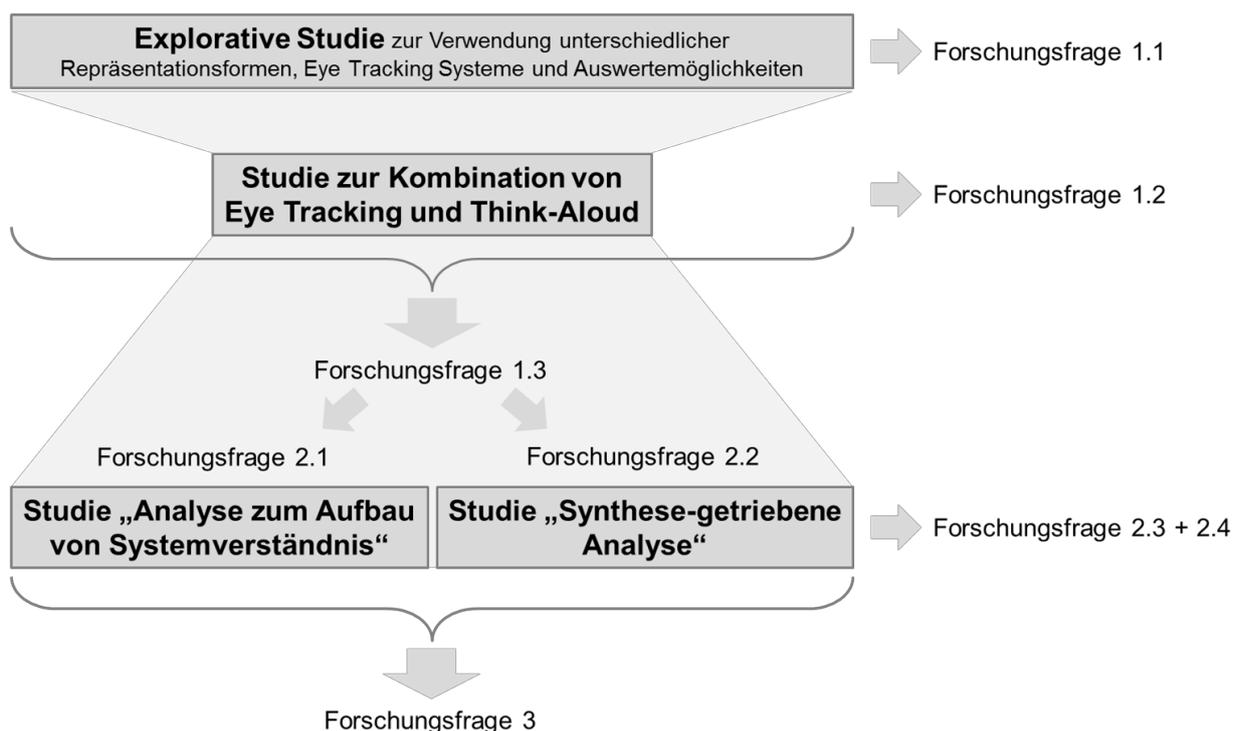


Abbildung 4-2: Übersicht der durchgeführten Studien und Bezug zur Beantwortung der Forschungsfragen

Die Studie zur Kombination von Eye Tracking und Think-Aloud in Kapitel 5.2 beantwortet die Forschungsfrage 1.2, welche Wechselwirkungen zwischen der Aufnahme des Blickpfads und anderen Erhebungsmethoden bestehen. Auch hier stehen noch nicht die Analyseprozesse im Fokus der Untersuchung. Auf Basis der Erkenntnisse beider Studien werden Anforderungen an empirische Studien zur

Untersuchung von Analyseprozessen unter Einsatz der Eye Tracking Technologie formuliert und Forschungsfrage 1.3 beantwortet.

Die Anforderungen werden in zwei Studienkonzepten mit unterschiedlichen Ausrichtungen umgesetzt (Forschungsfragen 2.1 und 2.2). Beide Studien finden unter Laborbedingungen statt. Die Studie „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“ wird in Kapitel 6 erläutert und fokussiert unter möglichst festen Randbedingungen die grundsätzlichen Analyseprozesse. Die Studie „Synthesegetriebene Analyse“ (Kapitel 7) bildet einen realistischen Problemlösungsprozess aus der Konstruktionspraxis ab und zeichnet sich durch eine hohe empirische Relevanz aus. Beide Studien dienen zur Beantwortung der Forschungsfragen 2.3 und 2.4, indem Probanden unterschiedlicher Erfahrungsstufen daran teilnehmen. Abschließend werden basierend auf den erworbenen Erfahrungen bei der Durchführung und Auswertung aller Studien Erkenntnisse für weitere Studien zur Untersuchung von Analyseprozessen in der Konstruktion abgeleitet (Kapitel 8).

Für die Auswertung der beiden Studien „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“ und „Synthesegetriebene Analyse“ werden jeweils spezifische, inhaltliche Forschungsfragen und –hypothesen formuliert, die zur Datenauswertung der Studien dienen und die jeweils auf die Beantwortung der übergeordneten Forschungsfragen aus diesem Kapitel abzielen.

4.3 Verwendete Eye Tracking Hardware und Software

Für Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden Eye Tracking Geräte des „Karlsruhe Design and Decision Laboratory“ (KD²-Lab) des Karlsruher Instituts für Technologie verwendet. Das DFG-geförderte KD²-Lab ermöglicht durch seine Ausstattung Untersuchungen von Mensch-Maschine-Interaktionen, Innovationen in der Gruppe, Verhandlungen, Partizipation, Lernprozessen sowie Stress bei Studierenden. Neben Aufnahmen des Blickpfads über Eye Tracking Geräte erlaubt die Ausstattung unter anderem EEG-, EKG-, EMG-Messungen sowie Messungen des Hautleitwerts.

Die zur Verfügung stehenden Geräte für die Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit waren Eye Tracker der Firma SensoMotoric Instruments (SMI). Dabei konnte ein *Remote Eye Tracker* sowie Eye Tracking Brillen für die Studien genutzt werden.

4.3.1 Hardware

Das statische *Remote System* mit der Modellbezeichnung RED250 lässt die binokulare Messung des Blickpfads mit einer Aufnahmefrequenz von 250 Hz zu. Die Aufnahmeeinheit mit integrierten Infrarotleuchten und Augenkameras ist unterhalb

eines Bildschirms montiert, um die aufgenommenen Blickdaten über das gezeigte Monitorbild zu legen. Zusätzlich können synchron zur Blickerfassung über eine Web-Kamera die Bewegungen des Probanden sowie ein Audio-Signal aufgezeichnet werden, um beispielsweise die laut ausgesprochenen Gedanken aufzunehmen. Abbildung 4-3 zeigt den Aufbau des *Remote Systems*. Der Kopf des Probanden muss nicht fixiert werden, da leichte Kopfbewegungen in einem Bereich von 40 x 20 cm bei einem Abstand von 70 cm zum Gerät von dem System ausgeglichen werden können (siehe Kapitel 2.5.1). Die Erfassung der Blickdaten von Brillenträgern ist bei richtiger Positionierung der Versuchsperson ebenfalls möglich. Dabei muss auf die Vermeidung von Reflexionen der Infrarotbeleuchtung auf der Oberfläche des Brillenglases geachtet werden.

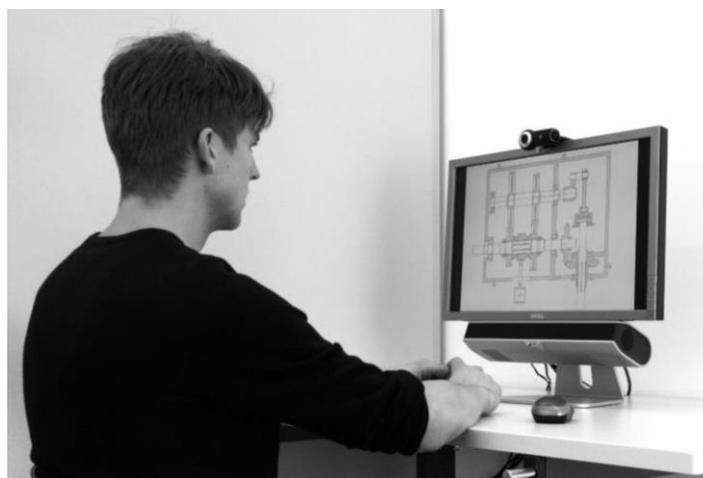


Abbildung 4-3: Versuchsperson vor dem *Remote Eye Tracker RED250* der Firma SMI²⁹¹

Zur Präsentation des Stimulus steht ein Monitor mit 22-Zoll Bildschirmdiagonalen (1680 x 1050 Pixel) zur Verfügung. Die Genauigkeit der Blickpunkterfassung ist mit 0,4 ° angegeben. Die Aufnahmeeinheit wird über die Software *iView X* der Firma SMI gesteuert. Zur Kalibrierung des *Remote Systems* wurde für alle durchgeführten Versuche eine 5-Punkt Kalibrierung vor der Aufnahme gewählt. Zur richtigen Positionierung der Versuchsperson zur Aufnahmeeinheit konnte ein höhenverstellbarer Tisch am IPEK genutzt werden.

Als kopfgebundenes System standen die Eye Tracking Glasses 1.0 von SMI zur Verfügung. Die Brille ermöglicht die binokulare Erfassung der Augenbewegung. Im Rahmen der Brille sind jeweils 6 Infrarotleuchten und eine Augenkamera verbaut. Die Szenenkamera ist in der Mitte angebracht, um das Blickfeld der Versuchsperson aufzuzeichnen.

²⁹¹ Matthiesen et al., 2013



Abbildung 4-4: Eye Tracking Glasses 1.0 der Firma SMI²⁹²

Die Eye Tracking Brille kann über eine USB-Schnittstelle mit dem Aufnahmegerät verbunden werden. Die Aufnahme wird bei Brillen mit der Software *iView ETG* der Firma SMI gesteuert. Die Brille wird über ein Band am Kopf der Versuchsperson fixiert, um ein Verrutschen zu vermeiden. Aufgrund des Aufbaus der Brille und der Schnittstelle per USB beträgt die Aufnahmefrequenz nur 30 Hz. Mit dieser Aufnahmefrequenz ist es möglich, Fixationen und Sakkaden zu detektieren, jedoch ist es nicht mehr möglich, Aussagen über hochfrequente Augenbewegungen, wie beispielsweise ein Augentremor, zu treffen. Die Detektion von Fixationen und Sakkaden mit niedrigeren Frequenzen sind für die durchgeführten Studien ausreichend. Zur Kalibrierung der Versuche mit Eye Tracking Brillen wurde jeweils eine Drei-Punkt-Kalibrierung vor der Aufnahme gewählt.

4.3.2 Software

Zur Durchführung und Auswertung der Eye Tracking Aufnahmen stand jeweils die Software der Firma SMI²⁹³ zur Verfügung. Die Steuerung der Blickdatenerfassung wird, wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, über die Software *iView X* bzw. *iView ETG* ermöglicht. Für die Erstellung und Auswertung des Versuch-Ablaufs mit dem *Remote System RED 250* wird die Software *Experiment Suite 360 ° Professional* verwendet. Diese enthält die Komponenten *Experiment Center*, welches die Erstellung der Versuche unterstützt, und *BeGaze* als Auswertesoftware. Die Auswertung von Daten der Eye Tracking Brillen wird ebenfalls mit *BeGaze* durchgeführt. Die Erstellung der Versuche und die Auswertung der Eye Tracking Daten werden in den folgenden Kapiteln detaillierter erläutert.

Die *BeGaze* Software ermöglicht beim Laden der Daten die Detektion von Sakkaden und Fixationen, was von *BeGaze* „*event detection*“ genannt wird. Zusätzlich werden Lidschläge von der Software erkannt. Für die Aufnahmen der durchgeführten Versuche wurden die Standard-Einstellungen der Software zur Detektion von Fixationen und Sakkaden verwendet. Dabei unterscheidet die Software zwischen

²⁹² SensoMotoric Instruments

²⁹³ Vgl. Kapitel 2.5.1

einer „*Low speed event detection*“ und einer „*High speed event detection*“. Die Wahl der *event detection* hängt von der Aufnahmefrequenz der Aufnahmeeinheit ab. Für Aufnahmen mit einer Aufnahmefrequenz unterhalb 200 Hz wird die *Low speed event detection* verwendet. Dabei werden Fixationen als primäres Ereignis²⁹⁴ mit Hilfe der räumlichen Ausbreitung innerhalb einer minimalen Zeitdauer detektiert (Tabelle 4-1). Dies trifft für alle Aufnahmen mit der Eye Tracking Brille zu, die mit einer Frequenz von 30 Hz die Blickdaten aufzeichnet.²⁹⁵

Tabelle 4-1: *Low speed event detection* mit der Software BeGaze²⁹⁶

Aufnahme-frequenz	Primäres Ereignis	Algorithmus basierend auf	Einstellungen
< 200 Hz	Fixation	Räumliche Ausbreitung	Min. Fixationsdauer = 80 ms Max. räumliche Ausbreitung = 100 px

Wenn die Aufnahme mit einer Frequenz über 200 Hz aufgenommen wird, wird entsprechend die *High speed event detection* angewandt. Für Aufnahmen mit dem *Remote System* RED250 trifft dies zu. Dabei werden als primäre Ereignisse Sakkaden über die Blickgeschwindigkeit detektiert. Die minimale Sakkadendauer wird dabei automatisch vom Algorithmus abhängig von den Blickdaten festgelegt (Tabelle 4-2). Zusätzlich zur Überschreitung eines festgelegten Schwellwerts der Spitzengeschwindigkeit muss der Höchstpunkt der Blickgeschwindigkeit in einem Intervall zwischen 20 % und 80 % der berechneten Sakkadenlänge liegen. Nur dann wird der Blickdatenausschnitt als Sakkade gewertet.

Tabelle 4-2: *High speed event detection* mit der Software BeGaze²⁹⁷

Aufnahme-frequenz	Primäres Ereignis	Algorithmus basierend auf	Einstellungen
≥ 200 Hz	Sakkade	Blick-geschwindigkeit	Min. Sakkadendauer = Automatisch ²⁹⁸ Schwellwert der Sakkadengeschwindigkeit = 40 °/s Min. Fixationsdauer = 50 ms
			<i>Bereich der Spitzengeschwindigkeit</i> Start: 20 % der Sakkadenlänge Ende: 80 % der Sakkadenlänge

²⁹⁴ Vgl. Kapitel 2.5.1, Abbildung 2-11

²⁹⁵ SensoMotoric Instruments GmbH, 2012

²⁹⁶ SensoMotoric Instruments GmbH, 2012, S. 55

²⁹⁷ SensoMotoric Instruments GmbH, 2012, S. 55

²⁹⁸ Automatische Anpassung der minimalen Sakkadendauer an den Probanden durch die Software

5 Einsatz der Eye Tracking Technologie in der Konstruktionsforschung

Als erster Schritt des Forschungsvorhabens wurde zunächst die Anwendbarkeit der Eye Tracking Technologie für Untersuchungen der Vorgehensweisen von Konstrukteuren in empirischen Studien getestet.²⁹⁹ Hierbei wurden folgende Punkte betrachtet:

- Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie in der Konstruktionsmethodik:
In theoretischen Betrachtungen und explorativen Untersuchungen wird untersucht, welches Eye Tracking System für welche Art von Untersuchung und welche Aufgabenstellung gewählt werden sollte. Der Fokus liegt auf der gezielten Untersuchung der Vorgehensweisen von Konstrukteuren während der Analyse technischer Systeme. Die Auswertung der aufgenommenen Daten wird teilweise von der Wahl des Eye Trackers beeinflusst. Daher werden die verschiedenen Möglichkeiten der Datenauswertung zur Untersuchung der Vorgehensweisen aufgezeigt.
- Kombination der Eye Tracking Technologie mit weiteren Erhebungsmethoden:
Die reine Aufnahme des Blickpfads lässt kaum Aussagen über die Analyseprozesse und Vorgehensweisen von Konstrukteuren zu. Daher wird die Eye Tracking Technologie in explorativen Studien mit weiteren Erhebungsmethoden kombiniert, um weitere Hinweise auf diese Prozesse aufzunehmen. Die gegenseitige Beeinflussung der Methoden muss zunächst überprüft werden.
- Anforderungen an Eye Tracking Studien im Bereich der Konstruktionsforschung und Umsetzungsmöglichkeiten:
Die Anforderungen an empirische Studien in Bezug auf Objektivität, Validität, Reliabilität und weiteren Merkmalen werden auf Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie übertragen und Umsetzungsmöglichkeiten erläutert. Anhand der Anforderungen werden zwei zielführende Studienkonzepte präsentiert.

²⁹⁹ Siehe Forschungsfrage 1 in Kapitel 4.1

5.1 Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie

In diesem Kapitel werden die Wahl des Eye Trackers sowie die sich daraus ergebenden Möglichkeiten der Datenauswertung erläutert. Es werden *Remote Eye Tracker* und Eye Tracking Brillen als *head-mounted Eye Tracker* unterschieden. Dieses Kapitel beantwortet die Frage, wie der Blickpfad zur Untersuchung der Analyseprozesse technischer Systeme genutzt werden kann.³⁰⁰ Die Inhalte des Kapitels beziehen sich auf die Veröffentlichung von MATTHIESEN ET AL.³⁰¹ und werden im Folgenden näher erläutert.

5.1.1 Repräsentationsformen der betrachteten Objekte

Im Laufe des Entwicklungsprozesses wird das Objektsystem stetig mit unterschiedlichen Modellen und Repräsentationen des entwickelten Produkts erweitert und geschärft. Während des Konstruktionsprozesses entstehen Gestaltrepräsentationen, welche die gegebenen Anforderungen erfüllen sollen. Die Gestaltrepräsentationen können in Form von 2D-Modellen, wie Skizzen, technische Zeichnungen und Zusammenbauzeichnungen, oder in Form von 3D-Modellen von Funktionsprototypen bis hin zu auskonstruierten Baugruppen oder dem Gesamtprodukt reichen. Die 2D/3D-Modelle können virtuell oder physisch vorliegen.

In einer explorativen Studie wurde die Anwendungsmöglichkeit der Eye Tracking Technologie im Bereich der Konstruktionsmethodik mit drei Arten von Repräsentationsformen der Gestalt getestet, die eine hohe Relevanz im Produktentwicklungsprozess haben:

- 2D-Schnittdarstellung,
- 3D-CAD-Modell,
- Physisches Modell einer Baugruppe.

2D-Schnittdarstellungen spielen als Repräsentationsform in der Produktentwicklung eine große Rolle und werden als abteilungs- sowie oft auch unternehmensübergreifende Visualisierung technischer Informationen genutzt, beispielsweise zwischen der Entwicklungsabteilung und der Produktion bzw. der Qualitätssicherung. 3D-CAD-Modelle sind heute eine der wichtigsten Repräsentationen der Produktgestalt und werden während des gesamten Produktentwicklungsprozesses genutzt. An physischen Modellen (z.B. Prototypen, das gefertigte Produkt oder Teilsysteme davon) können Funktionsweisen demonstriert oder getestet werden.³⁰²

³⁰⁰ Siehe Forschungsfrage 1.1 in Kapitel 4.1

³⁰¹ Matthiesen et al., 2013

³⁰² Matthiesen et al., 2013

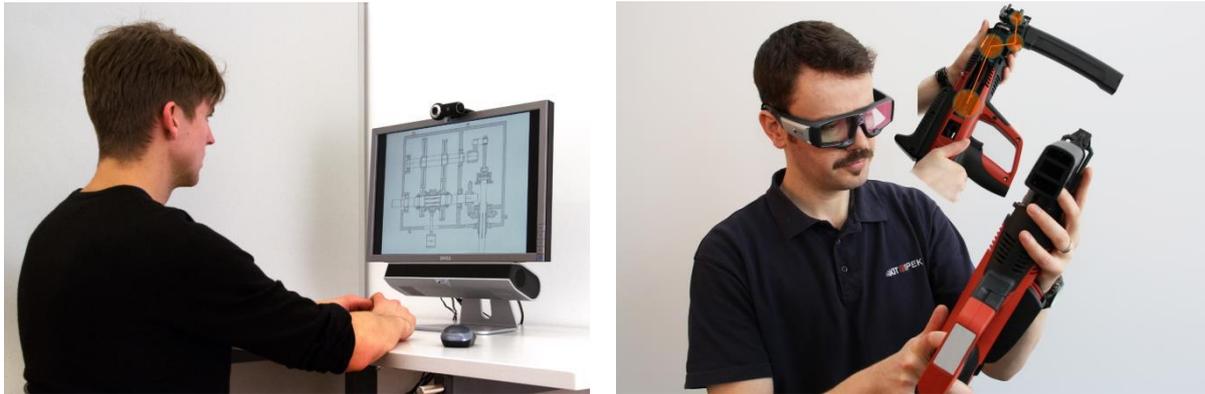


Abbildung 5-1: Verwendung eines *Remote Eye Trackers*³⁰³ (links) und einer Eye Tracking Brille (rechts)

Für die Exploration wurden die Blickbewegungen der Probanden mittels eines *Remote Eye Trackers* RED250 der Firma SMI und einer Eye Tracking Brille der Firma SMI aufgenommen³⁰⁴. Dabei diente das *Remote System* zur Darstellung der virtuell vorliegenden Repräsentationen (die 2D-Schnittdarstellung als pdf-Datei und das 3D-CAD-Modell), da hier nur der Bereich des Bildschirms von Interesse ist. Die 2D-Schnittdarstellung wurde als statisches Bild dem Probanden präsentiert. Das 3D-CAD-Modell wurde im CAD-Programm geöffnet, in welchem der Proband eigenständig navigieren, Baugruppen ein- oder ausblenden sowie Schnitte einfügen konnte. Um mit dem physischen Modell interagieren zu können, dient für diese Aufnahmen die Eye Tracking Brille.

5.1.2 Explorative Studie zu Auswertungsmöglichkeiten

Um die Möglichkeiten der Auswertung abhängig von den Repräsentationsformen und dem gewählten Eye Tracker erfassen zu können, wurde eine explorative Studie (siehe Abbildung 4-2) mit jeweils ein bis drei Probanden pro Repräsentationsform durchgeführt. Die niedrige Anzahl der Probanden ist daraus begründet, dass sich der Zweck der Studie nicht auf Vorgehensweisen der Probanden bezieht, sondern rein auf die Möglichkeiten der Datenauswertung, welche für alle Probanden gleich bleibt und nur von der gewählten Repräsentationsform sowie dem gewählten Eye Tracking System abhängt. Für alle Versuche lautet die Aufforderung an die Probanden, die Funktionsweise des dargestellten Systems zu untersuchen.

Als 2D-Schnittdarstellung wurde eine einfache Getriebezeichnung gewählt (Abbildung 5-2). Nach der richtigen Positionierung der Versuchsperson vor dem *Remote Eye Tracker* und der Kalibrierung des Systems, analysierte die Person das

³⁰³ Matthiesen et al., 2013

³⁰⁴ siehe Kapitel 4.3.1

dargestellte System auf dessen Funktionsweise. Während der Aufnahme veränderte sich die Darstellung nicht, sodass ein statischer Stimulus vorliegt. Das *Remote System* kann daher die aufgenommenen Blickdaten über ein statisches Bild legen.

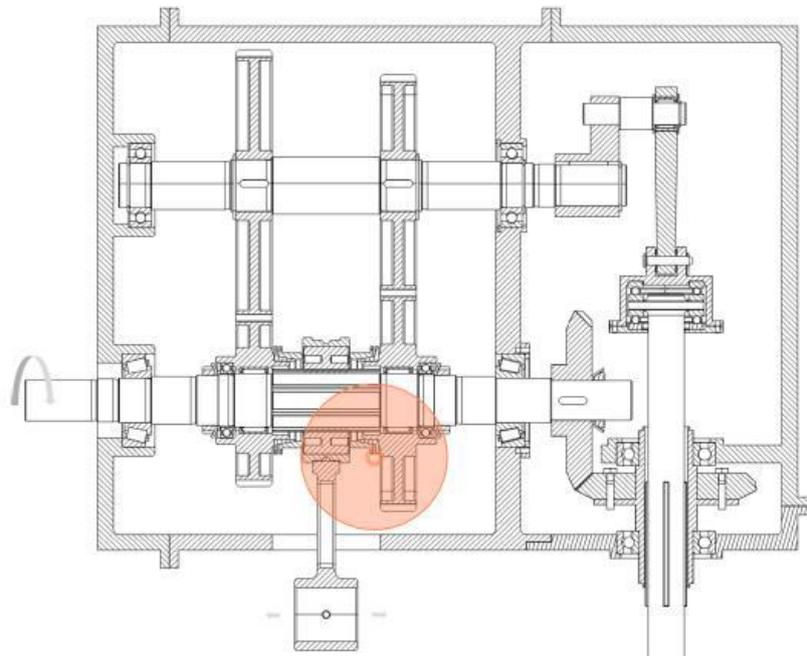


Abbildung 5-2: 2D-Schnittdarstellung mit eingezeichnetem Blickpunkt als orangener Kreis³⁰⁵

Als 3D-CAD-Modell diente ein vereinfachtes Modell einer Standbohrmaschine (Abbildung 5-3). Auch für diesen Versuch wurde der Proband zuerst vor dem *Remote System* positioniert sowie das System auf die Versuchsperson kalibriert. Man forderte den Teilnehmer auf, die Funktion des dargestellten Systems zu analysieren. Im Gegensatz zur Analyse der 2D-Schnittdarstellung konnte der Proband im CAD-Programm navigieren, eine Querschnittsdarstellung anlegen, Baugruppen ein- oder ausblenden sowie auf Teilsysteme zoomen. Dabei ändert sich die auf dem Bildschirm gezeigte Ansicht über die Zeit, was zu einem dynamischen Stimulus führt. Das *Remote System* überlagert die Blickbewegungen über das simultan aufgenommene Bildschirm-Video. Eine Darstellung des *scanpath*, wie in Abbildung 5-3 zu sehen, ist nur sinnvoll für statische Video-Sequenzen. Bei sich bewegenden Sequenzen ist es sinnvoll nur den aktuellen Blickpunkt einzublenden.

³⁰⁵ Matthiesen et al., 2013

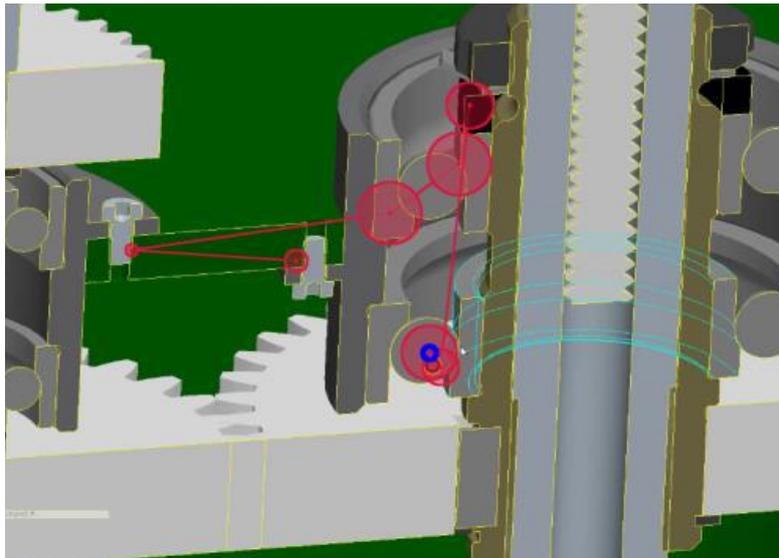


Abbildung 5-3: 3D-CAD-Modell mit einem überlagerten Scanpath in rot³⁰⁶

Bei der Analyse der Funktionsweise anhand eines physischen Modells können Eye Tracking Brillen angewandt werden. Ein *Remote System* ist hier nicht anwendbar, da das physische Modell von den Probanden in die Hand genommen und manipuliert werden kann. Über die eingebaute Szenenkamera werden die Bewegungen im Blickfeld des Probanden aufgenommen. Durch die ständigen Kopfbewegungen des Probanden liegt auch hier ein dynamischer Stimulus vor. Der Blickpunkt wird über das Szenenbild gelegt. Eine Darstellung des Scanpath ist hier nicht sinnvoll, da kaum statische Video-Sequenzen vorliegen. Abbildung 5-4 zeigt daher ein einzelnes Bild des Szenenvideos mit dem überlagerten Blickpunkt (heller Kreis) zum selben Zeitpunkt.

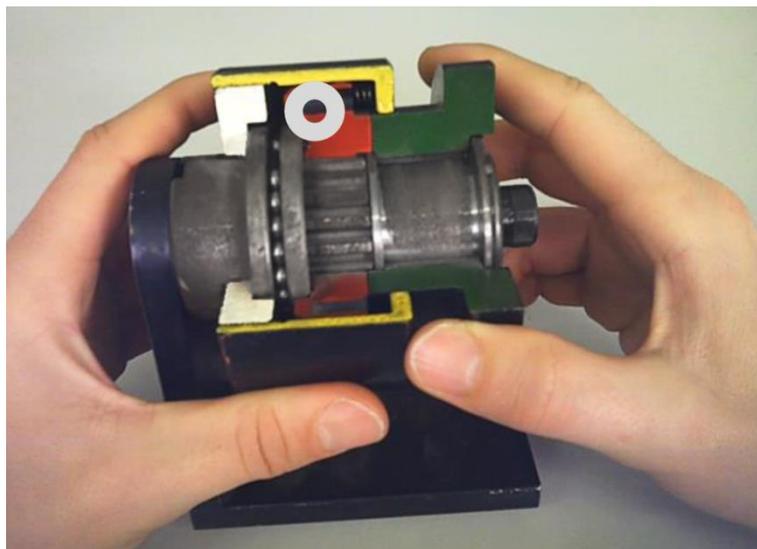


Abbildung 5-4: Physisches Demonstrationsmodell einer Kupplung mit dem Blickpunkt markiert als heller Kreis³⁰⁷

³⁰⁶ Matthiesen et al., 2013

5.1.3 Auswertungsmöglichkeiten

Nach der Aufnahme der Blickbewegungen und des Stimulus können die Eye Tracking Daten ausgewertet werden. Die Auswertung der Daten hängt stark von der Art des Stimulus ab und kann nach MATTHIESEN ET AL.³⁰⁸ wie folgend beschrieben eingeteilt werden. Es kann zwischen statischen und dynamischen Stimuli unterschieden werden. Bei statischen Stimuli ändert sich das betrachtete Objekt während der Aufnahme nicht. Dies ist der Fall bei der Betrachtung der 2D-Schnittdarstellung über das *Remote System*. Dynamische Stimuli können unterteilt werden in sich wiederholende dynamische und in individuelle dynamische Stimuli. Ein wiederholbarer dynamischer Stimulus zeigt allen Probanden einer Studie dieselbe Sequenz, während der individuelle dynamische Stimulus für jeden Probanden einzigartig ist. Dies ist der Fall bei Aufnahmen mit Eye Tracking Brillen, da jede Versuchsperson individuelle Kopfbewegungen durchführt. Zusätzlich interagiert der Proband bei der Funktionsanalyse anhand eines physischen Modells individuell mit den Bauteilen. Auch bei Aufnahmen mit dem *Remote System* kommt es zu einem individuellen dynamischen Stimulus bei der Verwendung des 3D-CAD-Modells, da jeder Proband im CAD-Programm navigieren und das 3D-CAD-Modell manipulieren kann. Ein wiederholbar dynamischer Stimulus könnte beispielsweise ein Montagevideo sein, das mehreren Probanden zur Betrachtung vorgespielt wird. Diese Art von Stimulus ist jedoch weniger relevant für die Untersuchung der Vorgehensweisen und Prozesse während der Analyse technischer Systeme und wird daher in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet.

Datenauswertung bei statischen Stimuli

Die Datenauswertung kann bei statischen und dynamischen Stimuli auf verschiedenen Ebenen stattfinden, wie in Abbildung 5-5 dargestellt.

Zunächst soll die Auswertung der Daten bei Verwendung statischer Stimuli erläutert werden. In dem ersten Schritt direkt nach der Aufnahme (*Level 1* in Abbildung 5-5) ist es möglich, die Rohdaten für die Datenauswertung zu nutzen. Dazu geben die Eye Tracking Systeme nur die aufgenommenen Blickpunkte und deren Koordinaten über dem betrachteten Bildschirm aus. Dabei kann entweder nur der aktuelle Rohdaten-Blickpunkt als Punkt oder es können auch die vorangegangenen Blickpunkte als Linie über dem Stimulus angezeigt werden. Dies ist hilfreich für einen ersten Eindruck der aufgenommenen Daten und lässt eine qualitative Auswertung des Blickverlaufs zu.

³⁰⁷ Matthiesen et al., 2013

³⁰⁸ Matthiesen et al., 2013

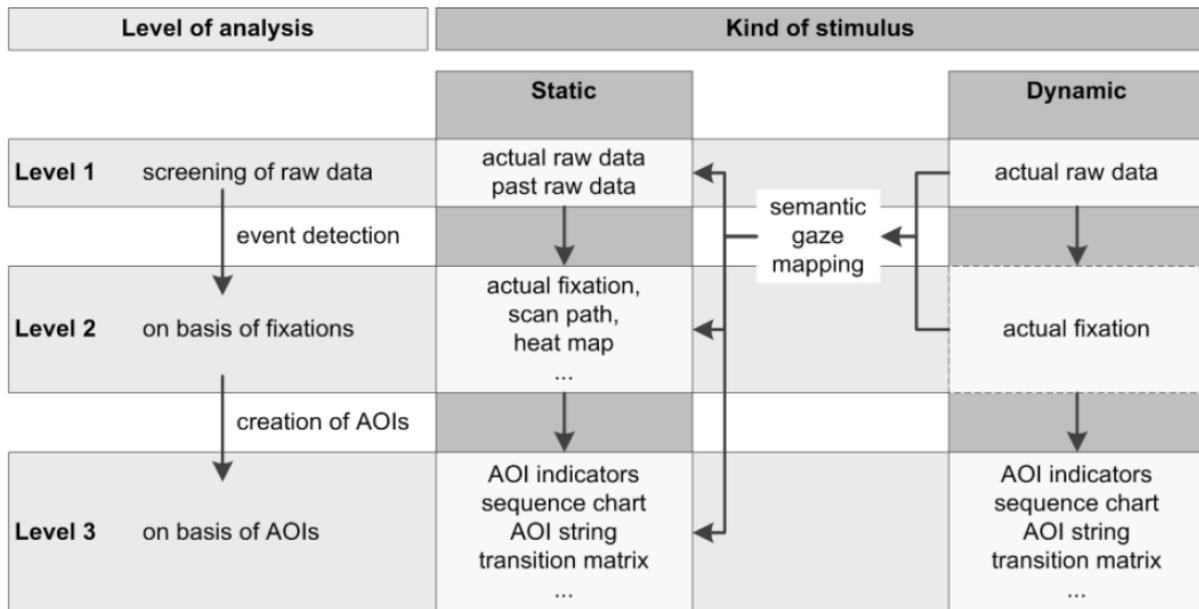


Abbildung 5-5: Nachbereitung der Blickdaten auf mehreren Ebenen zu statistisch auswertbaren Daten³⁰⁹

Level 2 stellt die Datenanalyse auf Basis von Ereignissen der Augenbewegungen, wie Fixationen und Sakkaden dar. Aus den Rohdaten werden Fixationen und Sakkaden über die Algorithmen der *event detection*³¹⁰ berechnet. Diese „gefilterten Daten“ können als *scanpath*³¹¹ in einem Video angezeigt werden. Der *scanpath* kann zur qualitativen Analyse und Visualisierung des Blickpfads genutzt werden. Bei statischen Stimuli eignet sich die Visualisierung der vorausgegangenen Sekunden (üblicherweise 3-5 Sekunden, jedoch abhängig vom Stimulus) des *scanpath*, um Vorgehensweisen und Blickmuster der Probanden bei der Analyse technischer Systeme zu erkennen. Zusätzlich können die *scanpaths* von mehreren Probanden gleichzeitig abgespielt werden, um die Vorgehensweisen zu vergleichen. Falls diese jedoch stark voneinander abweichen, führt dies schnell zu einer unübersichtlichen Darstellung.

Weiter können für statische Stimuli auf dieser Datenbasis *Attention maps*, wie *Heat maps* oder *Luminance maps* erstellt werden³¹². Diese geben einen schnellen Überblick über Bereiche, die sehr lange bzw. sehr wenig betrachtet wurden, und können somit auf Schlüsselstellen in den Repräsentationen hinweisen. Für die Erstellung von *Attention maps* können die Blickdaten mehrerer Probanden ausgewertet werden. In der explorativen Studie konnten für die Analyse eines technischen Systems anhand einer 2D-Schnittdarstellung erste Hinweise zum

³⁰⁹ Matthiesen et al., 2013

³¹⁰ Für Einstellungen der *event detection* der genutzten Geräte siehe Kapitel 4.3.2; für allgemeine Informationen zur *event detection* siehe Kapitel 2.5.1

³¹¹ Siehe Kapitel 2.5.2

³¹² Siehe Kapitel 2.5.2

visuellen Verhalten der Probanden mittels einer *Heat maps* festgestellt werden. Die Probanden haben hierbei bei rotationssymmetrischen Bauteilen vorwiegend nur eine Seite von der Symmetrielinie aus betrachtet.³¹³ Fixationen werden bei der *event detection* mit einem Start- und Endzeitpunkt sowie der Dauer und den Koordinaten belegt. Für Sakkaden wird zusätzlich die Geschwindigkeit berechnet. Diese Daten können genutzt werden, um beispielsweise mit einem *Skimming/Scrutinizing-Algorithmus*³¹⁴ auf das Blickverhalten der Probanden zu schließen. Weiter können der Verlauf von Fixationsdauern und Sakkadenlängen oder -geschwindigkeiten über einen Versuch aufgezeichnet und zur Einteilung von Analysephasen genutzt werden³¹⁵.

Als letzte Ebene der Auswertung, *Level 3*, können Areas of Interest (AOIs)³¹⁶ definiert und auf deren Basis weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Die AOIs können automatisch als *gridded AOIs* oder manuell als 2D-Formen generiert werden. Jede Fixation wird anhand ihrer Koordinaten den erstellten AOIs zugeordnet. Für die Untersuchung von Analyseprozessen können AOIs in Form von Bauteilen, Baugruppen oder Orte der Wirkung (beispielsweise der Eingriff eines Zahnradpaars) definiert werden. Die Wahl der AOIs hängt stark von dem Zweck der Untersuchung und den gestellten Hypothesen ab. Bei statischen Stimuli können AOIs direkt auf der Ansicht des Stimulus definiert werden. Wenn eine Überlappung der AOIs durch die Auswertesoftware zulässig ist, können bei rotationssymmetrischen Baugruppen beide Darstellungsseiten als eine AOI definiert werden. In Abbildung 5-6 wird dies für Lager 1 auf Welle 2 angewendet. Die AOI Lager 1 umfasst das gesamte Lager, die Welle 2 übergreifend. Die AOI Welle 2 überlappt die AOI Lager 1, damit Fixationen der Welle zugeordnet werden.

³¹³ Matthiesen et al., 2013

³¹⁴ vgl. Lohmeyer et al., 2014b, siehe Kapitel 2.5.3

³¹⁵ vgl. Hahne, 2012

³¹⁶ Siehe Kapitel 2.5.2

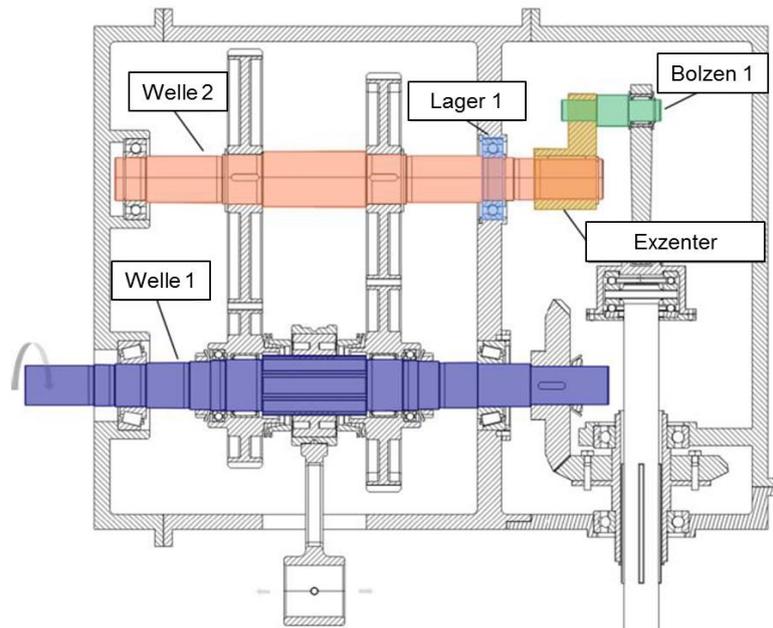


Abbildung 5-6: Manuell generierte AOIs auf einer 2D-Schnittdarstellung³¹⁷

Für jede AOI können verschiedene Indikatoren bestimmt werden: der Zeitpunkt der ersten Fixation innerhalb der AOI (*entry time*), die *dwell time* (Verweilzeit innerhalb einer AOI), die Anzahl der Fixationen innerhalb einer AOI, die Anzahl der Wiedereintritte in die AOI und weitere.³¹⁸ Dadurch können weitere Aussagen über Schlüsselstellen in der Repräsentation des technischen Systems abgeleitet werden. Um die Vorgehensweisen der Probanden und den zeitlichen Verlauf der Blickbewegungen untersuchen zu können, kann der zeitliche Verlauf des Blickpfads über AOIs mittels *sequence charts* (für einen Probanden) oder *scarf plots* (für mehrere Probanden) dargestellt werden (siehe Abbildung 2-13). In den Diagrammen werden über die Zeitachse die Dauer und die Reihenfolge der Fixationen innerhalb der AOIs aufgetragen. So können Muster visualisiert werden, die bei der Analyse von technischen Systemen angewendet werden. Neben der graphischen Darstellung von *sequence charts*, kann die Abfolge der AOIs in einem String ebenfalls Muster der Analyse technischer System anhand von 2D-Schnittdarstellungen aufzeigen und für einen quantitativen Vergleich der Vorgehensweisen mehrerer Probanden genutzt werden. Die Übergangsmatrix bietet eine weitere Möglichkeit der Auflösung von Vorgehensweisen. Häufige Wechsel zwischen zwei oder mehreren Komponenten, beispielsweise zum Abgleich einer Lageranordnung, können darüber ausgewertet werden.

³¹⁷ vgl. Matthiesen et al., 2013

³¹⁸ vgl. Holmqvist et al., 2011

Datenauswertung bei dynamischen Stimuli

Bei Verwendung von dynamischen Stimuli können die Daten auf ähnliche Weise wie bei der Verwendung statischer Stimuli ausgewertet werden, jedoch müssen die Daten für eine Auswertung auf Basis von Fixationen (Level 2) und auf Basis von AOIs (Level 3) aufbereitet werden (siehe Abbildung 5-5).

Auf Basis der Rohdaten (Level 1) kann bei dynamischen Stimuli der aktuelle Blickpunkt dem Video der Szenenkamera überlagert werden, um einen ersten qualitativen Eindruck der Vorgehensweisen beim Analysieren technischer Systeme zu bekommen. Die Anzeige vorausgegangener Blickpunkte ist bei dynamischen Stimuli im Gegensatz zu statischen Stimuli irrelevant, da sich der Stimulus im Zeitverlauf ändert und die Position der Blickpunkte nur in Relation zu den Bildschirmkoordinaten ausgegeben wird.

Für Aufnahmen mit dynamischen Stimuli kann ebenfalls eine *event detection* durchgeführt werden, um Fixationen und Sakkaden aus den Rohdaten zu berechnen³¹⁹. Die berechneten Daten können wie bei statischen Stimuli zur quantitativen Datenauswertung genutzt werden. Eine Visualisierung der stationären Fixationen über dem dynamischen Szenenvideo ist jedoch nicht sinnvoll. Aus diesem Grund ist die Visualisierung der Blickdaten mittels *scanpath* und *heat maps* für die Auswertung nicht anwendbar. Um diese Auswertemethoden zugänglich zu machen, müssen die Fixationen einem statischen Stimulus in Form einer Referenzansicht zugewiesen werden. Dieser Vorgang ist jedoch abhängig von der verwendeten Eye Tracking Hardware und Software. Bei den verwendeten Produkten der Firma SMI³²⁰ wird dieser Vorgang *semantic gaze mapping* genannt.

Die Referenzansicht muss unter Berücksichtigung des verwendeten Stimulus und des Zwecks der Untersuchung festgelegt werden. Dabei kann sich ein Standbild des Stimulus oder eine Aufzählung von Komponenten oder Baugruppen anbieten und muss alle relevanten Gegenstände des Stimulus abdecken. Bei der Durchführung des *semantic gaze mapping* wird aus dem relevanten Zeitbereich der Aufnahme jede Fixation einzeln der Referenzansicht zugewiesen (Abbildung 5-7, Mitte). Somit wird aus dem dynamischen Stimulus ein statischer Stimulus. Auf dieser Basis können wiederum die Visualisierung der Blickdaten in *Heat maps* und – abhängig von der Wahl der Referenzansicht – auch *scanpaths* genutzt werden (Level 2).

Für Datenauswertung auf Level 3 können nun AOIs der Referenzansicht zugewiesen und damit alle Möglichkeiten der Datenauswertung wie bei Verwendung statischer Stimuli genutzt werden (Abbildung 5-7, rechts). Es muss jedoch beachtet werden,

³¹⁹ Siehe Kapitel 2.5.1

³²⁰ SensoMotoric Systems, siehe Kapitel 4.3

dass die manuelle Zuweisung der Fixationen zu einer Referenzansicht eine mögliche Fehlerquelle darstellt. Trotzdem ermöglicht das *semantic gaze mapping* die Auswertung von Blickdaten auf dynamischen Stimuli auf den beiden Ebenen 2 und 3 und somit eine tiefere Datenanalyse.

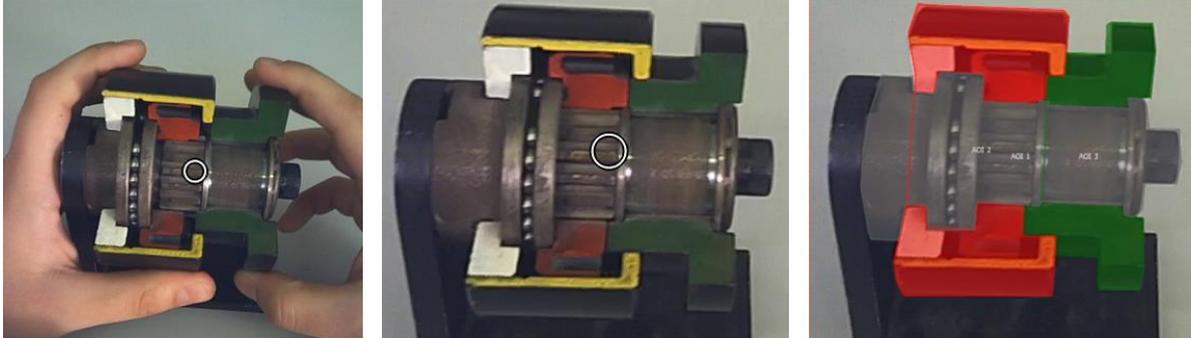


Abbildung 5-7: Markierung des Rohdatenpunkts im Szenenvideo (links), Zuweisung der Fixation auf die Referenzansicht (Mitte) und Definition von AOs (rechts)³²¹

Die Analyse der Blickdaten ohne *semantic gaze mapping* auf Level 3 ist nur bei dynamischen Stimuli mit sich wiederholenden Sequenzen sinnvoll. Hierzu können AOs auf dem dynamischen Stimulus definiert werden und über den zeitlichen Verlauf an die Form des relevanten Elements im Szenenvideo angepasst werden. Die Auswertemöglichkeiten auf Basis von AOs (Indikatoren, *sequence charts*, Übergangsmatrizen und weitere) können ebenfalls angewendet werden.

5.1.4 Fazit zu den Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie

Die Untersuchung von Vorgehensweisen während der Analyse technischer Systeme kann mit der Eye Tracking Technologie hilfreich unterstützt werden. Die Vorgehensweisen von Ingenieuren können auf verschiedenen Ebenen untersucht werden. Eine qualitative oder quantitative Datenauswertung ist unabhängig von der Verwendung unterschiedlicher Eye Tracking Systeme (*Remote System* oder Eye Tracking Brille) und unabhängig von dem entstehenden Stimulus möglich. Der Aufwand der Datenauswertung hängt jedoch stark vom verwendeten Stimulus (statisch oder dynamisch) ab. Es kann untersucht werden, ob Probanden Schlüsselstellen der Repräsentationen technischer Systeme betrachtet haben, und es können zeitliche Verläufe der Analyseprozesse ausgewertet werden. Eine qualitative sowie quantitative Auswertung der Vorgehensweisen von Probanden ist somit bei allen Anwendungsfeldern möglich.

³²¹ Matthiesen et al., 2013

5.2 Kombination von Eye Tracking mit etablierten Erhebungsmethoden der empirischen Forschung

Die Blickdatenerfassung kann Untersuchungen zu Vorgehensweisen von Ingenieuren bei der Konstruktion unterstützen. Der Blickpunkt gibt Aufschluss darüber, welche Gestaltmerkmale des technischen Systems durch Versuchspersonen betrachtet werden, während sie versuchen, die Funktion des Systems zu analysieren. Aus der Aufnahme des Blickpunkts alleine lässt sich jedoch nicht schlussfolgern, ob die fokussierten Informationen von der Versuchsperson wirklich aufgenommen und verarbeitet wurden. Daher wurde in empirischen Studien die Eye Tracking Technologie mit weiteren Methoden kombiniert, um deren Wechselwirkungen zu detektieren und diese entsprechend berücksichtigen oder vermeiden zu können³²². Von großem Vorteil ist hierbei die Aufnahme der Gedanken über die Think-Aloud Methode, welche für die Untersuchungen in dieser Arbeit eingesetzt werden soll.

5.2.1 Kombination von Eye Tracking und Think-Aloud

Der Einsatz der Think-Aloud Methode ist weit verbreitet zur Aufnahme von kognitiven Prozessen und zur Erfassung von implizitem und stillem Wissen³²³. Die Verbalisierung der Gedanken der Versuchspersonen ist wichtig, um Einblicke in die Analyseprozesse zu erhalten und Fehlinterpretationen zu vermeiden. Gerade bei Studien zur Untersuchung von Vorgehensweisen während der Analyse technischer Systeme ist es wichtig, neben der Eye Tracking Technologie auch die Think-Aloud Methode anzuwenden. So können Fehlinterpretationen der Blickdaten vermieden werden. Das Auftreten des Starrrens, wenn ein Proband zwar einen Punkt auf dem Stimulus fixiert, jedoch keine Information währenddessen aufnimmt oder über einen anderen Sachverhalt nachdenkt, kann erst durch Kombination von Eye Tracking und Think-Aloud erfasst werden.

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, kann es bei Einsatz der Think-Aloud Methode zur Beeinflussung weiterer kognitiver Fähigkeiten, wie der visuellen Wahrnehmung, kommen. Bei Einsatz von *Concurrent Think-Aloud (CTA)* kann es daher zur Verlangsamung oder Störung der Blickbewegungen kommen.³²⁴ Zusätzlich wurden in der Literatur unterschiedliche Aussagen über die erzeugten Inhalte der verbalisierten Gedanken durch *CTA* und *Retrospective Think-Aloud (RTA)* gefunden.³²⁵ Welche inhaltlichen Aussagen durch Probanden in Studien zur

³²² Siehe Forschungsfrage 1.2 in Kapitel 4.1

³²³ Siehe Kapitel 2.3.2

³²⁴ Van Someren et al., 1994

³²⁵ Davies, 1995; Kuusela / Paul, 2000; Ryan / Haslegrave, 2007; van Gog et al., 2005

Untersuchung von Vorgehensweisen während der Analyse technischer Systeme entstehen, ist noch nicht bekannt. Aus diesen Gründen ist es notwendig, zunächst die Beeinflussungen und Wechselwirkungen zwischen der Blickdatenerfassung mittels Eye Tracking und der Think-Aloud Methode über eine empirische Studie aufzudecken. Die Studie wurde im Rahmen der von der Autorin betreuten Abschlussarbeit von B.Sc. Thomas FÜRSTENHÖFER³²⁶ durchgeführt und die Ergebnisse der Studie wurden in RUCKPAUL ET AL.³²⁷ veröffentlicht. Das Forschungsziel der Studie ist die Beantwortung der beiden folgenden Forschungsfragen:

1. Beeinflusst *Concurrent Think-Aloud (CTA)* das Blickverhalten der Probanden?
2. Erzeugen die beiden Arten von Think-Aloud, *CTA* oder *RTA*, die gleichen Inhalte der verbalisierten Gedanken?

Falls eine Beeinflussung des Blickverhaltens durch *CTA* erfolgt, muss dies in Studien unbedingt als Störvariable berücksichtigt werden und gegebenenfalls auf *CTA* verzichtet werden. Je nach Studienzweck und den benötigten Informationen aus den verbalisierten Gedanken kann nach dem Beantworten der zweiten Forschungsfrage die geeignete Think-Aloud Methode ausgewählt werden.

Um die Beeinflussung der Think-Aloud Methode auf die Blickbewegungen von Versuchspersonen zu erforschen, wird Think-Aloud systematisch mit Eye Tracking Aufnahmen kombiniert. Als unabhängige Variable gilt die Think-Aloud Methode, die als *CTA* oder *RTA* ausgeführt werden kann. Abhängige Variablen sind zum einen die Blickdaten, repräsentativ dafür stehen Fixationsdauer und Sakkadenlänge, und zum anderen die Inhalte der verbalisierten Gedanken. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Vorstudie zur Untersuchung der wechselseitigen Beeinflussung von Eye Tracking und Think-Aloud

Zum Test des Aufbaus, der Aufgabenstellung und zur Detektion möglicher Störvariablen wurde zunächst eine Vorstudie durchgeführt. An der Teststudie haben vier Probanden mit unterschiedlichen Erfahrungen im Bereich der Konstruktion teilgenommen. Alle Probanden haben nacheinander beide Think-Aloud Methoden angewandt. Dazu wurden den Personen zwei verschiedene 2D-Schnittdarstellungen von technischen Systemen vorgelegt, bei deren Analyse jeweils einmal *CTA* und einmal *RTA* angewendet wurde. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Funktionsweisen der Systeme zu analysieren. Zur Durchführung von *CTA* wurden die Probanden aufgefordert, ihre Gedanken simultan während der Analyse des

³²⁶ Fürstenhöfer, 2013 (betreute Abschlussarbeit)

³²⁷ Ruckpaul et al., 2015b

technischen Systems auszusprechen. Als *RTA*-Methode wurde *gaze video cued RTA* genutzt, indem die Probanden im Nachgang der Analyse das aufgenommene Blickpfadvideo in Form eines *scanpath* betrachteten und hierzu ihre Gedanken verbalisierten. Die Reihenfolge von *CTA* und *RTA* wurde variiert. Vor Anwendung von *CTA* fand jeweils eine Einweisung in die Methode statt. Dazu rechnen die Probanden unter anderem eine schwierige Rechenaufgabe laut vor und verbalisieren alle gedanklichen Zwischenschritte³²⁸. Zusätzlich wurden alle Probanden nach der Durchführung zum Studienaufbau befragt.

Aus der Vorstudie ergaben sich hilfreiche Verbesserungen des Studienaufbaus für die darauffolgende Hauptstudie. Die Verwendung von zwei verschiedenen 2D-Schnittdarstellungen als Stimuli hat sich als Störfaktor herausgestellt. Da das Blickverhalten von dem betrachteten Stimulus und der zu bearbeitenden Aufgabenstellung abhängt, wurden auch die Blickdaten durch die beiden Zeichnungen unterschiedlich beeinflusst. Die Blickdaten (Fixationsdauer und Sakkadenlänge) eines einzelnen Probanden für *CTA* und *RTA* konnten nicht miteinander verglichen werden. Des Weiteren variiert der zeitliche Abstand zwischen der Betrachtung der beiden Schnittdarstellungen abhängig von der Reihenfolge der Think-Aloud Methoden. Das Laden des Blickpfades in der Auswertesoftware BeGaze zur Durchführung von *gaze video cued RTA* war zeitaufwendig. So entstand eine längere Pause zwischen den beiden Aufgabenteilen bei der Reihenfolge *RTA* → *CTA* als bei Reihenfolge *CTA* → *RTA*. Daher wurde die Entscheidung getroffen, für die folgende Studie die weniger komplexe Systemdarstellung zu nutzen und jeden Probanden nur eine Think-Aloud Methode durchführen zu lassen.

Durchführung der Studie zur Untersuchung der wechselseitigen Beeinflussung von Eye Tracking und Think-Aloud

Um die Think-Aloud Methoden zu variieren, wurden die Probanden für die Hauptstudie in zwei Gruppen eingeteilt, die jeweils eine der beiden Think-Aloud Methoden anwendeten. Die Teilnehmer der *CTA*-Gruppe wurden aufgefordert, ihre Gedanken simultan während der Analyse des technischen Systems auszusprechen. Probanden der *RTA*-Gruppen (*gaze video cued RTA*) bekamen während der Analyse des technischen Systems keine Anweisungen bezüglich lauten Denkens. Ihnen wurde im Nachgang der Analyse das aufgenommene Blickpfadvideo in Form eines *scanpath* vorgespielt und sie sollten hierzu ihre Gedanken retrospektiv verbalisieren. Die Audioaufnahme erfolgte während des gesamten Versuchs, sodass auch eventuelle Äußerungen der Probanden während der Analyse des technischen Systems ausgewertet werden konnten. Um die Beeinflussung des *CTA* auf das Blickverhalten zu untersuchen, wurden die aufgenommenen Blickdaten der *CTA*-

³²⁸ Ericsson / Simon, 1993, S. 240 f. und S. 376 f.

Gruppe mit den Blickdaten der *RTA*-Gruppe während Analysephase verglichen, welche kein Think-Aloud während der Analyse durchgeführten.

Als Repräsentation des technischen Systems wurde den Probanden eine 2D-Schnittdarstellung eines Getriebes vorgelegt (Abbildung 5-8). Die 2D-Schnittdarstellung als statischer Stimulus hat den Vorteil, eine Datenauswertung mit geringem Aufwand zu ermöglichen³²⁹. Gleichzeitig konnte die Aufnahme mit dem *Remote Eye Tracker RED250* der Firma SMI³³⁰ durchgeführt werden. Er bietet eine ausreichende Aufnahmefrequenz mit 250 Hz, um die aufgenommenen Blickdaten im Detail vergleichen zu können. Allen Probanden wurde dieselbe Darstellung zur Analyse präsentiert, um die Aufgabenstellung konstant zu halten und keine Störvariable zu erzeugen. Um die Probanden zu einer tieferen Analyse des Getriebes zu bewegen, wurde ein funktionaler Fehler eingebaut. Einem Getriebe kann im Normalfall die Hauptfunktion zugewiesen: Energie in Form von Drehzahl und Drehmoment von dem Getriebeeingang zu dem Getriebeausgang leiten und wandeln. In diesem Fall wurde eines der Getriebezahnräder auf der Welle gelagert (rote Markierung in Abbildung 5-8). Eine Übertragung der Energie war daher nicht möglich und das Getriebe konnte seine Hauptfunktion nicht erfüllen.

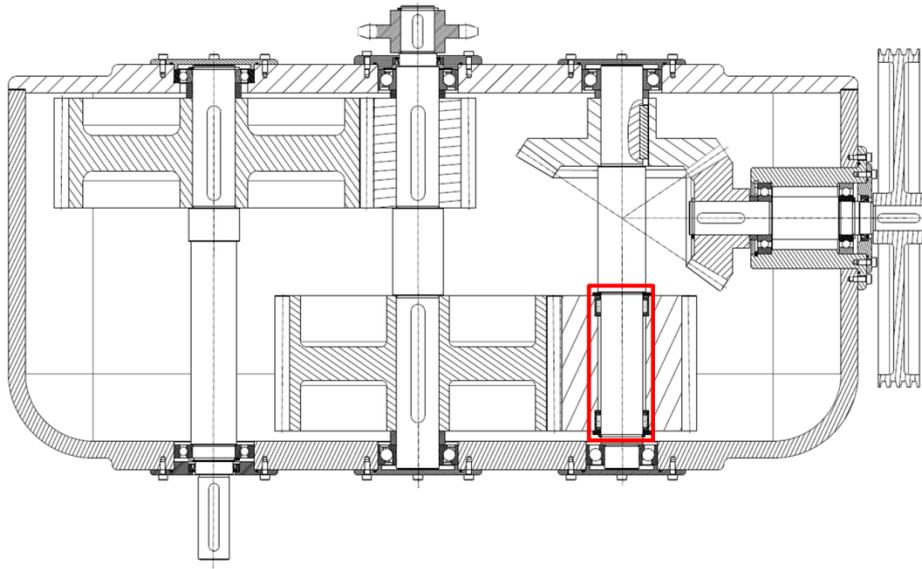


Abbildung 5-8: 2D-Schnittdarstellung eines Getriebes mit eingebautem Fehler (rote Markierung)³³¹

Die Aufgabe der Probanden lautete zu entscheiden, ob das technische System wie dargestellt funktioniert. Die Aufgabe war in Anlehnung an den Freigabeprozess von technischen Zeichnungen vor der Übergabe in die Fertigung im industriellen Umfeld

³²⁹ Siehe Kapitel 5.1.3

³³⁰ Für technische Daten der Hardware siehe Kapitel 4.3.1

³³¹ Ruckpaul et al., 2015b

gewählt worden. Fehler bezüglich der Schmierung, Dichtung und Montage wurden ausgeschlossen, um den Probanden die Möglichkeit zu geben, sich auf die Hauptfunktion zu konzentrieren. Zusätzlich wurden sie dazu aufgefordert, den Fehler mit einem Mausklick zu markieren, falls dieser gefunden wurde. Die Probanden sollten dem Versuchsleiter mitteilen, wann sie die Analyse beendet haben.

Als Versuchspersonen wurden 15 Studierende des Maschinenbaus am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im 4. bis 8. Semester ausgewählt. Damit kann ein vergleichbarer Wissensstand zur Analyse technischer Systeme gewährleistet werden. 4 Studierende haben das 4. Semester, 9 Studierende das 6. Semester und 2 Studierende das 8. Semester abgeschlossen. Die Zuteilung der Probanden zu den beiden Think-Aloud Gruppen, *CTA* und *RTA*, erfolgte randomisiert. Die beiden Studierenden mit abgeschlossenem 8. Semester wurden jedoch aufgrund des größeren Wissensstands bewusst auf die beiden Gruppen aufgeteilt. Der *CTA*-Gruppe wurden 8 Personen zugeteilt, während die *RTA*-Gruppe aus 7 Teilnehmern bestand. Zur Anonymisierung der Daten erhielt jeder Proband eine Nummer (P01 bis P15). Die Blickdaten beider Gruppen wurden während der Analyse des technischen Systems aufgenommen. Zum Abschluss des Versuchs füllte jeder Proband einen Fragebogen zur Durchführung und Wahrnehmung der jeweiligen Think-Aloud Methode aus.

Auswertung und Ergebnisse zur wechselseitigen Beeinflussung von Eye Tracking und Think-Aloud hinsichtlich der Blickdaten

Alle aufgenommenen Datensätze (Blickdaten, verbale Protokolle und ausgefüllte Fragebögen) wurden zur Beantwortung der Forschungsfragen ausgewertet. Zur Auswertung wurden nur Daten mit einer ausreichenden Tracking-Rate der Blickdatenerfassung und einer verständlichen Audioqualität zugelassen. Aufgrund von Problemen beim Eye Tracking und fehlerhaften Audioaufnahmen mussten die Probanden P02 und P10 für die *RTA*-Gruppe und P12 und P14 für die *CTA*-Gruppe von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Um den Einfluss von *CTA* auf die Blickdaten zu bestimmen, wurden die Fixationsdauern und Sakkadenlängen der Probanden miteinander verglichen. Dazu wurden die Häufigkeitsverteilung der Fixationsdauern bzw. der Sakkadenlängen für jede Think-Aloud Gruppe erstellt und die Mittelwerte verglichen. Die Signifikanz der Abweichungen der Mittelwerte wurde unter Annahme einer Normalverteilung mittels eines unabhängigen T-Tests bestimmt.

Der Vergleich der Fixationsdauern von beiden Think-Aloud Gruppen stützt sich auf die Aussagen von VAN SOMEREN ET AL.³³². Sie stellen fest, dass kognitive Prozesse

³³² Van Someren et al., 1994

verlangsamt werden, wenn gleichzeitig Think-Aloud (*CTA*) angewandt wird. Zu diesen Prozessen gehört auch die visuelle Aufnahme von Informationen. Eine Verlangsamung dieser Informationsaufnahme bedeutet, dass diese Probanden längere Fixationsdauern aufweisen, um die Merkmale des technischen Systems visuell aufzunehmen. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass die Blickdaten von Teilnehmern der *CTA*-Gruppe eine längere mittlere Fixationsdauer aufweisen als die Blickdaten der *RTA*-Probanden, die während der Bearbeitung der Aufgabe nicht angehalten wurden laut zu denken.

Um die Verteilung der Fixationsdauern von beiden Think-Aloud Gruppen zu vergleichen, wurden die Fixationen in Pakete von jeweils 50 ms zusammengefasst und gezählt. Dadurch ergibt sich eine relative Häufigkeitsverteilung der Fixationen über die Fixationsdauer, welche in Abbildung 5-9 dargestellt ist. Alle Fixationen mit einer Dauer länger als 1500 ms werden in einem Paket zusammengefasst. Dadurch entsteht ein Anstieg beider Kurven (*CTA* und *RTA*) für Fixationsdauern oberhalb dieses Werts. Beide Häufigkeitsverteilungen weisen denselben Verlauf auf und haben ihr Maximum bei Fixationen zwischen 200 – 250 ms.

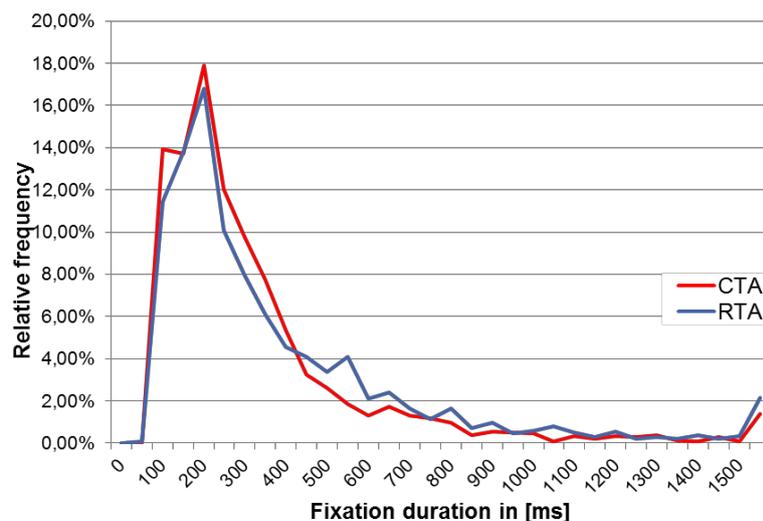


Abbildung 5-9: Relative Häufigkeitsverteilung der Fixationsdauern aller Probanden³³³

Um diese Hypothese überprüfen zu können, wurden die Mittelwerte der Fixationsdauern aller Probanden sowie die mittlere Fixationsdauer und die Standardabweichung der beiden Probandengruppen berechnet (Tabelle 5-1). Die mittlere Fixationsdauer der *CTA*-Gruppe beträgt 314,3 ms während die Fixationen der *RTA*-Gruppe im Mittel 369,6 ms dauern. Somit ist die Hypothese für diese Untersuchung bereits widerlegt.

³³³ Ruckpaul et al., 2015b

Tabelle 5-1: Verteilung der Fixationsdauern³³⁴

Think-Aloud Methode	Mittelwert [ms]	Standardabweichung [ms]
CTA	314,3	88,4
RTA	369,6	74,2

Eine Überlastung und Verlangsamung der kognitiven Prozesse bei *CTA*-Probanden durch simultanes Verbalisieren der Gedanken und Bearbeiten der Aufgabenstellung, wie von VAN SOMEREN ET AL.³³⁵ dargelegt, konnte in dieser Studie nicht beobachtet werden.

Ein Unterschied in der mittleren Länge der Sakkaden kann ebenfalls Aufschlüsse über die kognitive Auslastung der Probanden und über die Beeinflussung des *Concurrent Think-Aloud* auf die Vorgehensweisen geben. Nach LOHMEYER ET AL.³³⁶ zeichnen sich *Scrutinizing*-Phasen, zur detaillierten Analyse von Sachverhalten, mit vorwiegend kurzen Sakkadenlängen aus. Bei einer Beeinflussung bzw. Verlangsamung der kognitiven Prozesse durch *CTA* könnte dies zum einen bedeuten, dass *CTA* im Mittel zu längeren *Scrutinizing*-Phasen führt. Zum anderen könnte die kognitive Überlastung zu weniger detaillierten und strukturierten Analysephasen und somit zu längeren Sakkaden führen. Daher wurde die ungerichtete Hypothese aufgestellt, dass sich die mittlere Sakkadenlänge für Probanden der *CTA*-Gruppen von der mittleren Sakkadenlänge der *RTA*-Probanden unterscheidet.

Die Sakkadenlängen werden durch die Auswertesoftware BeGaze in Pixel (px) berechnet. Zur Erstellung einer Häufigkeitsverteilung der Sakkadenlängen für die jeweiligen Think-Aloud Gruppen werden die Sakkaden in Pakete von jeweils 20 px zusammengefasst und gezählt. Die Verteilung der Fixationen ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Bei beiden Think-Aloud Gruppen treten Sakkaden von 60 – 80 px Länge am häufigsten auf.

Entsprechend der Auswertung der Fixationsdauern werden auch für den Vergleich der Sakkadenlängen jeweils die Mittelwerte der beiden Think-Aloud Gruppen berechnet (Tabelle 5-2 und Abbildung 5-10). Die mittlere Sakkadenlänge der *CTA*-Probanden beträgt 195,2 px mit einer Standardabweichung von 70,5 px. Die mittlere Sakkadenlänge der *RTA*-Gruppe ist mit 166,3 px kürzer und weist mit 29,6 px eine geringere Standardabweichung als die der *CTA*-Gruppe auf. Prüft man diese

³³⁴ Ruckpaul et al., 2015b

³³⁵ Van Someren et al., 1994

³³⁶ Lohmeyer et al., 2014a

Abweichung über einen zweiseitigen t-Test auf Signifikanz, ergibt sich ein p-Wert von 0,175. Die Sakkadenlängen der beiden Think-Aloud Gruppen unterscheiden sich daher nicht signifikant voneinander. Die Sakkaden der *CTA*-Gruppe sind jedoch bei den Probanden dieser Studie länger als die Sakkaden der *RTA*-Probanden. Dies könnte auf weniger intensive *Scrutinizing*-Phasen deuten.

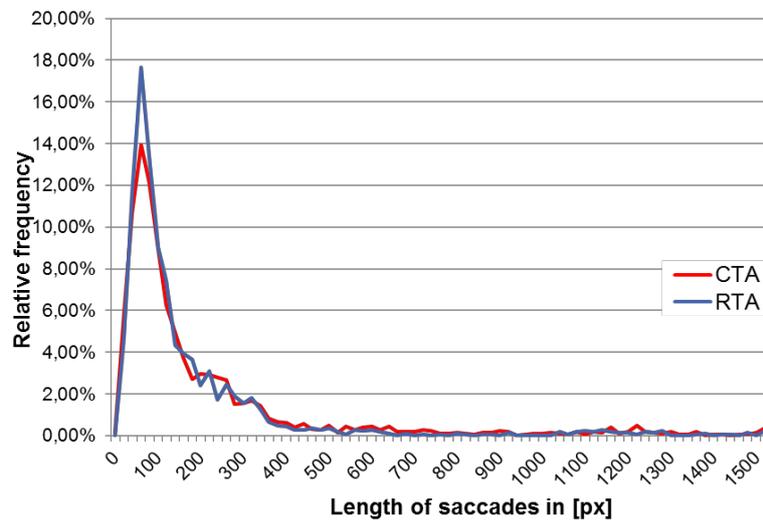


Abbildung 5-10: Relative Häufigkeitsverteilung der Sakkadenlängen aller Probanden³³⁷

Tabelle 5-2: Ergebnisse des unabhängigen t-Tests zur Sakkadenlänge³³⁸

Think-Aloud Methode	Mittelwert [px]	Standardabweichung [px]	Varianz	p-Wert
CTA	195,2	70,5	4975,7	0,175
RTA	166,3	29,6	877,5	

Auswertung und Ergebnisse zur wechselseitigen Beeinflussung von Eye Tracking und Think-Aloud hinsichtlich der Verbalisierungen

Die Anzahl der gesprochenen Wörter pro Minute während den Verbalisierungen unterschied sich zwischen den Probanden stark. Dies ist bei beiden Think-Aloud Gruppen der Fall. Aus diesem Grund lag kein signifikanter Unterschied zwischen der Anzahl der gesprochenen Wörter von beiden Probandengruppen vor. In der Studie sprachen Probanden der *RTA*-Gruppe jedoch mit 75 Wörtern pro Minute eine etwas höhere Wort-Rate als Probanden der *CTA*-Gruppe mit ca. 58 Wörtern pro Minute.

Um die Verbalisierungen nach deren Inhalten auswerten zu können, wurde zunächst ein Kodierungsschema erstellt. Das Kodierungsschema soll nach HOLMQVIST ET AL.³³⁹

³³⁷ Ruckpaul et al., 2015b

³³⁸ Ruckpaul et al., 2015b

passend zu der Aufgabenstellung und der Forschungsfrage bzw. Hypothese erstellt werden. RYAN UND HASLEGRAVE³⁴⁰ stellten fest, dass *CTA* zur Aufnahme von aufgabenbezogenen Gedanken geeignet ist. Da es sich bei der Aufgabe um die Analyse eines technischen Systems handelt, wurden daher vorwiegend Verbalisierungen zu Funktionen und zur Gestalt des technischen Systems erwartet. VAN GOG ET AL.³⁴¹ erklärte, dass die Methode des *cued RTA* besonders Informationen über Arbeitsschritte und das Vorgehen der Probanden hervorruft. Daher wurden bei dem angewandten *gaze video cued RTA* vorwiegend Verbalisierungen der Probanden zur eigenen Vorgehensweise und dem Analyseprozess erwartet. Für die vorliegende Aufgabenstellung, der Analyse einer 2D-Schnittdarstellung eines technischen Systems, wurden die Verbalisierungen daher mit den folgenden Kategorien kodiert:

- Kommentare zur Funktion – Kraftfluss, Momente und Bewegungen; z.B. *„Hier wird das Moment auf die andere Welle übertragen.“*
- Kommentare zur Gestalt – Benennung von Komponenten oder Beschreibungen des Systems; z.B. *„Hier ist ein weiteres Kegelradpaar.“*
- Kommentare zur Vorgehensweise; z.B. *„Danach habe ich kontrolliert, ob da ein Fehler irgendwo außerhalb des Systems sein könnte, wie ein Montagefehler.“*
- Fragen während der Aufnahme; z.B. *„Kann die Kraft hier übertragen werden?“*
- Kommentare des Versuchsleiters; z.B. *„Bitte weiter reden!“*

Kommentare zu Funktionen und zur Gestalt können Aufschlüsse über die ablaufenden Analyseprozesse und die Analysefähigkeiten der Probanden geben. Informationen zur Gestalt sind wichtig, um zu wissen, ob der Proband die Gestalt nicht nur betrachtet hat, sondern auch die Information hierüber aufgenommen hat. Kommentare zu Funktionen geben darüber Aufschluss, ob der Proband die betrachtete Gestalt funktional richtig interpretiert und in welcher Tiefe das System analysiert wird. Individuelle Vorgehensweisen und die Begründungen dazu können über Kommentare zum Vorgehen aufgenommen werden. Weiter wurden Fragen und Unklarheiten von den Probanden während der Aufnahme gestellt und Kommentare des Versuchsleiters getätigt, vorwiegend Aufforderungen zum lauten Denken. Die Verbalisierungen werden in Aussageeinheiten aufgeteilt und den Kodierungen zugeordnet. Falls eine Aussage inhaltlich zu mehr als einer Kodierung passt, wird diese beiden Kategorien zugeordnet. Um die Verteilung der Verbalisierungen für *CTA* und *RTA* vergleichen zu können, wird für jede Think-Aloud Gruppe der

³³⁹ Holmqvist et al., 2011, S. 100 und S. 290 ff.

³⁴⁰ Ryan / Haslegrave, 2007

³⁴¹ van Gog et al., 2005

prozentuale Anteil der Verbalisierungen jeder Kodierung auf die Gesamtanzahl der Aussagen berechnet. Von Probanden der *RTA*-Gruppe wurden nur Aussagen während der retrospektiven Aufnahme gewertet. Abbildung 5-11 stellt die Verteilung der Verbalisierungen über das Kodierungsschema für *CTA* und *RTA* in einem Boxplot-Diagramm³⁴² dar. Dabei sind große Unterschiede in der Häufigkeit der Kommentare unterschiedlicher Kodierungen für *CTA* und *RTA* zu erkennen.

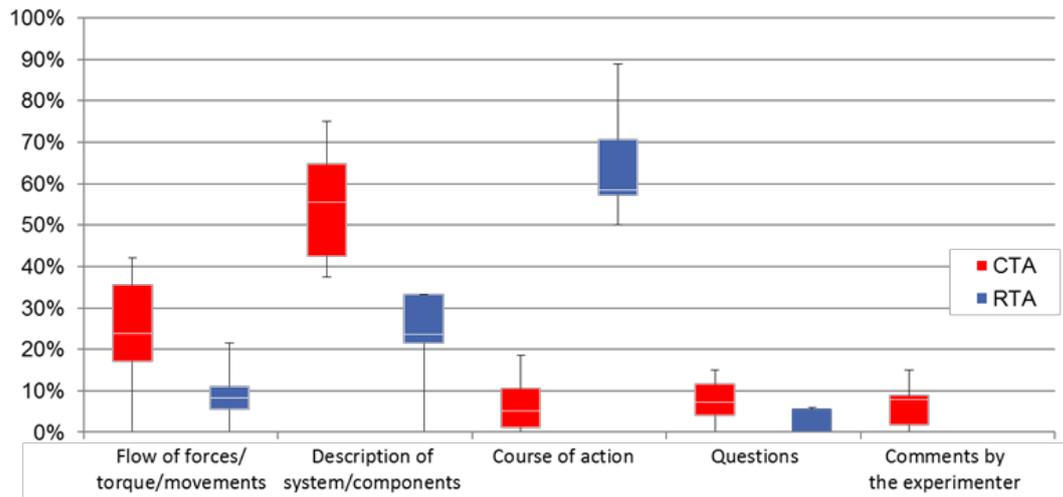


Abbildung 5-11: Verteilung der Think-Aloud Inhalte über das Kodierungsschema³⁴³

Die meisten Aussagen wurden zu den ersten drei Kodierungen getätigt. Es wurden nur wenige Fragen von beiden Think-Aloud Gruppen gestellt und wenige Kommentare des Versuchsleiters wurden nur während des *Concurrent Think-Aloud* getätigt. Bereits im Boxplot-Diagramm lassen sich große Unterschiede zwischen den verbalisierten Inhalten von *CTA* und *RTA* ablesen. Um diese Unterschiede zwischen *CTA* und *RTA* der Kommentare zu Funktionen, Gestalt und Vorgehensweisen auf Signifikanz zu überprüfen, wurde jeweils ein unabhängiger einseitiger t-Test mit den jeweiligen Daten durchgeführt (Tabelle 5-3). Mit einem p-Wert von 0,0375 ist der Anteil der Kommentare zu Funktionen bei *CTA* signifikant höher als bei der Durchführung von *RTA*. Zusätzlich erzeugte *CTA* auch einen sehr signifikant höheren Anteil an Verbalisierungen zu Gestaltmerkmalen (55 %) im Vergleich zu *RTA* (22,2 %). Wie erwartet und von VAN GOG ET AL.³⁴⁴ berichtet, wurden während *gaze video cued RTA* hochsignifikant mehr Aussagen zur eigenen Vorgehensweise verbalisiert.

³⁴² Dargestellt werden der Median (mittlere Linie), die mittleren 50% der Werte bzw. der Interquartilbereich (Boxen) und die Ausreißer (Linien) einer Verteilung

³⁴³ Ruckpaul et al., 2015b

³⁴⁴ van Gog et al., 2005

Tabelle 5-3: Ergebnisse der unabhängigen einseitigen T-Test zu Verbalisierungen³⁴⁵

Think-Aloud Methode		Kommentare zur Funktion [%]	Kommentare zur Gestalt [%]	Kommentare zur Vorgehensweise [%]
CTA	Mittelwert	24,12	55,0	7,0
	Standard-abweichung	15,6	15,03	7,56
	Varianz	243,4	226,0	57,2
RTA	Mittelwert	9,2	22,2	65,0
	Standard-abweichung	7,73	13,52	15,41
	Varianz	59,7	182,7	237,5
p-Wert		0,0375	0,002	0,000

Diese Ergebnisse zu den Inhalten der Verbalisierungen ermöglichen eine geeignete Wahl der Think-Aloud Methode zu einer geplanten Fragestellung der Studie. Für Studien, welche die Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen während der Analyse technischer Systeme fokussieren, ist *Concurrent Think-Aloud* vorzuziehen. Dabei kann eher erkannt werden, ob ein Proband eine betrachtete Gestalt visuell wahrgenommen hat und ob diese Gestalt von dem Probanden funktional richtig interpretiert wurde als bei der Anwendung von *RTA*. Um unterschiedliche Arbeitsschritte und das Vorgehen von Ingenieuren bei der Analyse technischer Systeme zu untersuchen, bietet sich die Durchführung des *gaze video cued Retrospective Think-Aloud* an. Über das Vorspielen des eigenen Blickpfads werden die Probanden angetrieben, das eigene Vorgehen zu reflektieren und zu erläutern.

Auswertung des Fragebogens zur Beeinflussung der Vorgehensweisen durch Think-Aloud

Zum Abschluss jedes Versuchs wurden die Teilnehmer zu dem persönlichen Empfinden in Bezug auf die angewandte Think-Aloud Methode und zur Beeinflussung der eigenen Vorgehensweise befragt. Die Fragen für die *CTA*- und *RTA*-Gruppen haben sich dabei unterschieden. Probanden der *CTA*-Gruppen bekamen folgende Fragen gestellt:

- „Wie wohl haben Sie sich dabei gefühlt laut zu denken?“
- „Wie stark hat das Reden Ihr Vorgehen beeinflusst?“

³⁴⁵ Ruckpaul et al., 2015b

Probanden, welche *gaze video cued RTA* durchführten, wurden folgende Punkte gefragt:

- „Wie wohl haben Sie sich dabei gefühlt, Ihren Blickpfad zu kommentieren?“
- „Wie gut konnten Sie sich dabei an Ihr Vorgehen erinnern?“

Abbildung 5-12 zeigt eine Übersicht der Antworten zu den jeweils ersten Fragen beider Think-Aloud Gruppen nach dem Empfinden während der Anwendung von *CTA* bzw. *RTA*. Die Fragen konnten in vier Schritten zwischen „angenehm“ und „unangenehm“ beantwortet werden. So wurde eine Entscheidung in positiver oder negativer Richtung von den Probanden erzwungen. Jeweils die Hälfte der Probanden empfand das laute Denken positiv bzw. negativ. Nur ein Studierender bezeichnete *CTA* als sehr unangenehm. Die Verteilung der Antworten für das Empfinden während des *gaze video cued RTA* war vergleichbar. Da die *RTA*-Gruppe jedoch aus einer ungerade Anzahl von Probanden bestand, überwiegen die Antworten auf der negativen Seite. Aber auch hier empfand nur ein Proband das Kommentieren des eigenen Blickpfads als unangenehm. Die starke Variation der Ergebnisse ist auf die subjektive Präferenzen der Probanden zurückzuführen. So kann es in Versuchen beim Einsatz von *CTA* sowie *RTA* dazu kommen, dass einzelne Probanden aufgrund des unangenehmen Empfindens nur wenige Gedanken verbalisieren.

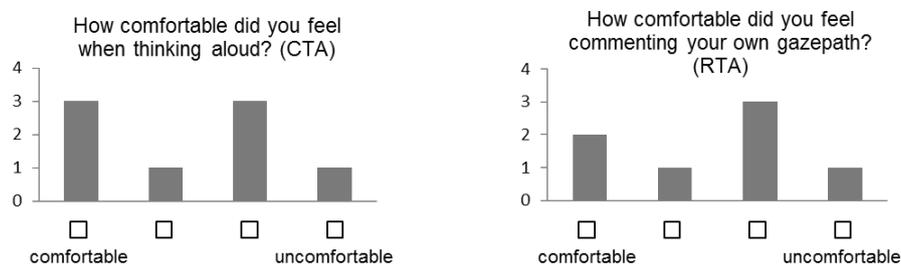


Abbildung 5-12: Fragen nach dem persönlichen Empfinden während der Anwendung von *CTA* (links) bzw. *RTA* (rechts)³⁴⁶

Die zweite Frage der *CTA*-Gruppe bezog sich auf die Beeinflussung der Vorgehensweise bei gleichzeitigem Bearbeiten der Aufgabenstellung und lautem Denken. Abbildung 5-13 (links) zeigt, dass *CTA* nach Meinung aller Teilnehmer die Vorgehensweisen beeinflusste. Keiner der Probanden fühlte sich jedoch stark beeinflusst. Probanden der *RTA*-Gruppe wurden zu ihrem Erinnerungsvermögen an die eigenen Vorgehensweisen befragt (Abbildung 5-13, rechts). Da das *gaze video cued RTA* nur wenige Minuten nach der Bearbeitung der Aufgabenstellung durchgeführt wurde, konnten sich alle Versuchspersonen gut an das eigene Vorgehen erinnern und dieses kommentieren.

³⁴⁶ Ruckpaul et al., 2015b

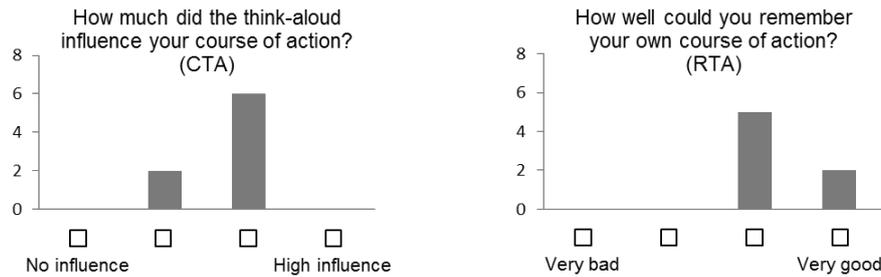


Abbildung 5-13: Fragen nach dem Einfluss von *CTA* auf das eigene Vorgehen (links) bzw. nach dem Erinnerungsvermögen an das eigene Vorgehen während *RTA* (rechts)³⁴⁷

Nach den Ergebnissen des Fragebogens stellt sich *RTA* ebenfalls als sehr gute Wahl für Studien zu Vorgehensweisen von Ingenieuren heraus. Die durchgeführte Studie umfasste jedoch eine recht kurze Aufgabenstellung, deren Bearbeitung maximal 2,5 Minuten dauerte. Bei einer längeren Bearbeitungszeit und längerer Pause zwischen der Bearbeitung der Aufgabe und der Durchführung von *RTA* kann es zu Erinnerungslücken kommen. Der Ansatz des *gaze video cued RTA* kann das Erinnerungsvermögen durch Vorspielen des eigenen Blickpfades jedoch unterstützen.

5.2.2 Fazit zur Kombination von Eye Tracking Technologie und Think-Aloud

Um Analyseprozesse von Ingenieuren gezielt unterstützen zu können, müssen deren Verhalten und Vorgehen untersucht werden. Eye Tracking bringt die Informationen, worauf der Ingenieur während der Systemanalyse schaut. Weitere Informationen werden benötigt, um auf die Wahrnehmung und die Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen schließen zu können. Think-Aloud kann hierbei unterstützen. Dabei ist die Wahl der Think-Aloud Methode abhängig von dem Zweck der Untersuchung zu wählen und eine eventuelle Beeinflussung des Verhaltens zu berücksichtigen.

Zunächst wurde die Beeinflussung der Eye Tracking Aufnahmen durch *Concurrent Think-Aloud (CTA)* untersucht. Dabei muss zwischen der Beeinflussung der Blickdaten und der Beeinflussung von Handlungsabläufen unterschieden werden. Auf die erfassten Blickdaten wurde keine Beeinflussung im Vergleich zu Aufnahmen ohne simultane Verbalisierung der Gedanken festgestellt. Es fand keine Verlangsamung des Blickverhaltens der Teilnehmer statt. Es ist jedoch möglich, dass sich bei Anwendung von *CTA* die Handlungsabläufe ändern (Abbildung 5-13). Dabei lässt sich nicht feststellen, ob diese Beeinflussung positiv oder negativ ausfällt. Daher ist diese Methode für Studien mit Fokus auf Handlungsabläufe weniger gut geeignet.

³⁴⁷ Ruckpaul et al., 2015b

Danach wurden die Inhalte der Verbalisierungen betrachtet, um Unterschiede oder Ähnlichkeiten aufzudecken. *CTA* und *RTA* ergaben unterschiedliche Inhalte der Verbalisierungen (Abbildung 5-11). Bei Einsatz von *CTA* formulierten die Versuchsteilnehmer viele Gedanken auf Funktions- und Gestaltenebene. Die Inhalte der *RTA*-Kommentare bezogen sich vorwiegend auf Handlungsabläufe und Prozessabfolgen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass *CTA* für Untersuchung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen die geeignete Think-Aloud Methode darstellt. Im Gegensatz dazu ist *RTA* für Untersuchung von Handlungsabläufen zu bevorzugen. Beide Think-Aloud Methoden ermöglichen die Erzeugung von zusätzlichen Informationen zur Wahrnehmung und Verarbeitung der Aufgabenstellungen neben dem aufgenommenen Blickpfad.

5.2.3 Kombination von Eye Tracking und weiteren Erhebungsmethoden

Weitere hilfreiche Erhebungsmethoden zur Kombination mit der Blickdatenerfassung in empirischen Studien stellen Interviews und Fragebögen sowie Beobachtungen durch Einsatz von externen Videokameras dar. Alle drei Werkzeuge können erhobene Eye Tracking Daten zielführend erweitern und stützen.

Externe Videokameras

Aus den ersten explorativen Studien zu den Anwendungsmöglichkeiten der Eye Tracking Technologie in der Konstruktionsmethodik hat sich bereits ergeben, dass die Aufnahme des Sichtfeldes bei der Nutzung von physischen Modellen nicht immer ausreichend ist. Über die Szenenkamera der Eye Tracking Brille können Bewegungen des Probanden außerhalb des Sichtfelds und die Körperhaltungen nicht aufgezeichnet werden. Daher bietet sich die Kombination der Eye Tracking Aufnahme mit der Videoaufnahme der Außensicht an. Die beiden Aufnahmen beeinflussen sich nicht gegenseitig und können daher ohne weitere Untersuchung ergänzend genutzt werden.

Auch bei Aufnahmen mit *Remote Systemen* ist die Verwendung einer externen Videokamera sinnvoll. Hierzu kann eine auf dem Monitor installierte Videokamera genutzt werden, um die Mimik und Gestik von Probanden aufzunehmen. Leicht anzubringende Web-Kameras gewähren bei geringem Aufwand für die Anbringung einen großen Nutzen. Hiermit können beispielsweise Erklärungen für den Ausfall der Blickdatenerfassung während der Aufnahme gefunden werden. Geschlossene Augen, eine geneigte Kopfhaltung oder Handbewegungen zwischen Augen und der Trackingeinheit können zu Fehlstellen in der Aufnahme der Blickdaten führen. Diese Ereignisse können durch die Verwendung einer externen Videokamera auch zu einem späteren Zeitpunkt nachvollzogen und gewertet werden.³⁴⁸

³⁴⁸ Holmqvist et al., 2011

Interviews und Fragebögen

Über Interviews und Fragebögen werden Probandenmerkmalen aufgenommen als auch inhaltliche Fragen zur Bearbeitung der Aufgabenstellung gestellt. Dies ist vor allem bei der Untersuchung der Analyseprozesse von Ingenieuren eine wichtige Kontrollmaßnahme.

Abhängig von der Art der zu erfassenden Probandenmerkmale kann es ratsam sein, die Daten erst im Nachgang des Versuchs zu erfassen. Wenn die Frage nach den Angaben auf den Zweck der nachfolgenden Studie hinweist, könnte es zur Beeinflussung des Verhaltens der Versuchspersonen kommen. Eine Frage nach der methodischen Ausbildung im Vorfeld des Versuchs kann zu einem erzwungenen methodischen Vorgehen eines Probanden führen.

Da alleine die Betrachtung des Blickpfads und die aufgenommenen Verbalisierungen nicht immer eindeutig darauf schließen lassen, ob eine Versuchsperson durch Analyse des technischen Systems das Problem richtig erkannt hat, empfiehlt es sich im Nachgang des Versuchs innerhalb eines semi-strukturierten Interviews Fragen zu wichtigen Punkten der Problemerkennung zu stellen. Hierbei kann detailliert erfragt werden, ob wichtige Gestalt-Funktion-Zusammenhänge richtig erkannt und interpretiert wurden. Bei simultaner Beobachtung des Blickpunkts an der Eye Tracking Aufnahmeeinheit durch den Versuchsleiter können zusätzlich gezielt Fragen zu Besonderheiten im Blickpfad gestellt werden. Auch „stille“ Phasen des Think-Aloud, in denen der Proband keine Gedanken verbalisiert, können gegebenenfalls durch retrospektive Kommentare aufgefüllt werden. So kann die gezielte Kombination der Interviews mit dem simultan betrachteten Blickpfad Fehlinterpretationen bei der Auswertung der Versuche vermeiden.

5.3 Anforderungen an Eye Tracking Studien im Bereich der Konstruktionsforschung und Umsetzungsmöglichkeiten

Der Aufbau von empirischen Studien ist ein sensibler Arbeitsschritt, welcher maßgeblich den Erfolg der Untersuchung und den Wert der Ergebnisse bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass die Gütekriterien für empirische Untersuchungen³⁴⁹ möglichst gut erfüllt werden und eine objektive und valide Auswertung gewährleistet ist.

Feld- und Laboruntersuchungen unterscheiden sich zwar im Aufbau, jedoch sollten sie sich beide an den Gütekriterien für empirische Untersuchungen orientieren. Die Erfüllung der Kriterien ist nicht immer in vollem Maße möglich. Felduntersuchungen zeichnen sich durch eine hohe externe Validität, aber oftmals geringe interne

³⁴⁹ siehe Kapitel 5.3.1

Validität aus. Demgegenüber haben Laboruntersuchungen meist eine hohe interne Validität aufgrund der möglichen Kontrolle von Störgrößen, jedoch sinkt dabei die externe Validität.³⁵⁰ Für die vorliegende Forschungsarbeit wurden zwei Studien „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“ und „Synthese-getriebene Analyse“ mit unterschiedlichem Aufbau durchgeführt, jedoch beide in einer Laborumgebung (siehe Abbildung 4-2). Das Ziel beider Studien ist die Untersuchung von Vorgehensweisen bei der Analyse technischer Systeme durch Ingenieure unterschiedlicher Erfahrungsstufen. Als Erhebungsmethoden wurde die Think-Aloud Methode mit der Blickdatenerfassung kombiniert, um die Vorgehensweisen unterschiedlicher Probanden miteinander vergleichen zu können. Ziel beider Studien ist:

- Valide Ergebnisse zu liefern, die auf die Vorgehensweisen der Analyse technischer Systeme im Arbeitsalltag übertragen werden können.

Hierzu müssen folgende Unterziele erreicht werden:

- Vorgehensweisen von einer größeren Anzahl von Probanden unter vergleichbaren Bedingungen untersuchen,
- Die relevanten Daten zur Auswertung bestimmen, um den Auswertungsaufwand so gering wie möglich zu halten,
- Standardisierte und objektive Auswertung bieten,
- Den zeitlichen Aufwand für die Versuchsteilnehmer in einem Rahmen halten, der eine hohe Konzentrationsfähigkeit über die gesamte Versuchszeit ermöglicht.

5.3.1 Anforderungen an das Studiendesign und Umsetzungsmöglichkeiten

Um verlässliche Ergebnisse über eine empirische Studie zu erzielen, müssen mehrere Anforderungen an das Studiendesign erfüllt sein. BENDER³⁵¹ schlägt hierzu vor, sich auf die Anforderungen zur Erstellung von psychologischen Tests von LIENERT UND RAATZ³⁵² und die Testgütekriterien von BORTZ UND DÖRING³⁵³ zu beziehen. Die Anforderungen an das empirische Untersuchungen umfassen nach BENDER³⁵⁴ folgende Punkte:

- Objektivität
- Reliabilität

³⁵⁰ siehe Kapitel 2.3.1

³⁵¹ Bender, 2004, S. 117 ff.

³⁵² Lienert / Raatz, 1998, S. 7 ff.

³⁵³ Bortz / Döring, 2009, S. 195 ff.

³⁵⁴ Bender, 2004, S. 117 ff.

- Validität
- Kosten/Nutzen
- Empirische Relevanz

BENDER³⁵⁵ überträgt diese Anforderungen auf die in seiner Forschungsarbeit durchgeführte Studie im Bereich der Konstruktionsmethodik. Neben den Gütekriterien an das Forschungsdesign sollten auch die Kriterien einer guten Testaufgabe beachtet werden. Diese umfassen nach LIENERT UND RAATZ³⁵⁶ auch die Trennschärfe und die Schwierigkeit einer Aufgabe. Diese beiden Kriterien bedingen sich gegenseitig und beeinflussen die Validität.

Im Folgenden werden die obengenannten Kriterien kurz erläutert und jeweils Maßnahmen und Möglichkeiten der Umsetzung in den durchgeführten Studien genannt.

Objektivität

Eine Untersuchung kann als objektiv beschrieben werden, wenn die Durchführung und die Auswertung der Untersuchung sowie die Interpretation der Untersuchungsergebnisse unabhängig von der Versuchsleitung bzw. der auswertenden Person ist³⁵⁷. Um eine hohe Objektivität bei Untersuchungen zum Analyseverhalten von Ingenieuren unter Einsatz der Eye Tracking Technologie und der Think-Aloud Methode gewährleisten zu können, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Um eine Durchführung unabhängig von der Versuchsleitung zu gewährleisten, muss ein detailliertes Versuchsprotokoll erstellt werden. Es beschreibt den genauen Ablauf aller Phasen des Versuchs, um Abweichungen davon zu vermeiden. Das Versuchsprotokoll wird in Vorversuchen getestet und gegebenenfalls angepasst. Falls mehrere Versuchsleiter die Versuche begleiten, müssen diese die ersten Versuche gemeinsam durchführen, um eine objektive Durchführung der Versuche zu gewährleisten.
- Die Aufgabenstellung muss selbsterklärend sein, damit möglichst keine Rückfragen der Teilnehmer entstehen. Bei Rückfragen besteht die Gefahr, dass unterschiedliche Erklärungen der Versuchsleitung während der Untersuchung getätigt werden. Die Aufgabenstellung sollte ebenfalls in Vorversuchen getestet und die Verständlichkeit der Aufgabe über Interviews mit den Testprobanden überprüft werden.

³⁵⁵ Bender, 2004, S. 117 ff.

³⁵⁶ Lienert / Raatz, 1998, S. 29 ff.

³⁵⁷ Bortz / Döring, 2009, S. 195

- Aus den aufgestellten theoretisch-inhaltlichen Hypothesen müssen empirisch-inhaltliche Hypothesen gebildet werden. Zur Festlegung der auszuwertenden Kriterien und der zu messenden Merkmale können Vorversuche genutzt werden. Dazu können zum einen AOIs passend zu den aufgestellten Hypothesen für die Auswertung der Blickdaten festgelegt werden (siehe Kapitel 2.5.2). Die Zuweisung der Blickdaten aus den Versuchen zu den AOIs muss dabei eindeutig definiert sein. Zum anderen müssen die Kodierungsschemen zur Auswertung der Think-Aloud Daten definiert und unmissverständlich erläutert werden. Durch diese Maßnahmen kann die Objektivität der Auswertung und daraus folgend die Objektivität der Interpretation erhöht werden.

All diese Punkte sind vor allem wichtig, wenn die Durchführung und die Auswertung der Versuche von unterschiedlichen Personen geleitet werden.

Reliabilität

Nach BORTZ UND DÖRING gibt die Reliabilität die Zuverlässigkeit und „den Grad der Genauigkeit, mit dem das geprüfte Merkmal gemessen wird“³⁵⁸ an. Die Ergebnisse einer Untersuchung, welche vollkommen reliabel sind, wurden folglich fehlerfrei gemessen. Diese Situation trifft jedoch in der Realität nicht zu, da immer Fehlereinflüsse wie Störungen, Missverständnisse oder Müdigkeit der Probanden auftreten können. Die Untersuchung und Aufgabe muss so gestaltet sein, dass nicht rein das aktuelle Verhalten oder Empfinden der Probanden (z.B. Nervosität) erfasst wird, sondern das durchgehende Verhalten und Vorgehen aufgenommen wird (Retestreliabilität). Zusätzlich sollte die parallele Durchführung von zwei vergleichbaren Untersuchungen zu den gleichen Ergebnissen führen (Paralleltestreliabilität).³⁵⁹

Der Nachweis und Berechnung der Reliabilität einer Untersuchung kann im Bereich der Konstruktionsmethodik nur schwer erbracht werden, da streng vergleichbare Konstruktionsaufgaben kaum zu erstellen sind. Einige Punkte müssen aber vor allem bei der Erfassung von fehleranfälligen Daten wie den Augenbewegungen in Untersuchungen beachtet werden:

- Müdigkeit der Probanden sollte ausgeschlossen werden. Daher sollten die Versuche möglichst am Vormittag oder frühen Nachmittag durchgeführt werden. Dies ist vor allem bei berufstätigen Personen zu beachten, da die Müdigkeit über den Tagesverlauf im Berufsalltag zunimmt. Dies kann zur Beeinflussung der Leistungsfähigkeit sowie des Blickverhaltens führen.

³⁵⁸ Bortz / Döring, 2009, S. 196

³⁵⁹ Bortz / Döring, 2009, S. 196 f.

- Die Teilnehmer müssen auf den Einsatz der Eye Tracking Technologie vorbereitet werden, so dass keine Vorbehalte gegen die Technologie entstehen. Die Nervosität der Probanden kann zu einem unnatürlichen Blickverhalten führen. Eine kurze Erklärung der Eye Tracking Technologie und die Durchführung einer Testaufgabe haben sich hierbei als hilfreich herausgestellt.
- Auch die Durchführung von *Concurrent Think-Aloud (CTA)* muss mit den Probanden geübt werden³⁶⁰, da die ungeübte Durchführung von *CTA* zu einem unnatürlichen Verhalten führen kann. Hierzu ist ebenfalls eine Testaufgabe hilfreich, um *CTA* mit den Probanden zu üben und eventuell die Nervosität abzubauen.
- Die Aufgabenstellung sollte zwar den Studien- bzw. Berufsalltag abbilden, jedoch nicht direkt mit dem aktuellen Aufgabenbereich des Studien- oder Berufsalltags von einzelnen Probanden übereinstimmen. Sie könnten dabei wesentliche Vorkenntnisse über die Aufgabenstellung besitzen, was ihnen die Bearbeitung der Aufgabe im Vergleich zu Probanden ohne Vorkenntnisse erleichtert und somit ein Störfaktor darstellt.
- Das Ende des Versuchs muss klar definiert sein und den Testpersonen auch bekannt gemacht werden. Dazu kann das zu erreichende Ergebnis (Geschwindigkeitstest) oder die Bearbeitungslänge (Leistungstest) vorgegeben werden³⁶¹.

Validität

Die Validität wird auch als Gültigkeit einer Untersuchung bezeichnet. Sie gibt an, wie gut eine Untersuchung die Merkmale misst und vorhersagt, welche tatsächlich untersucht werden sollen. Dazu gehört auch, dass die Untersuchungsergebnisse eindeutig dem Einfluss der unabhängigen Variablen zugeordnet werden können.³⁶²

- Die Aufgabe der Untersuchung sollte eine konstruktionsmethodische Fragestellung umfassen, welche auch relevant für die Analyse technischer Systeme im Berufsumfeld ist. Z.B. die Freigabe einer 2D-Schnittdarstellung, die standardmäßig vor der Weitergabe in die Produktion erfolgt.
- Die Aufgabenstellung muss unmissverständlich beschrieben sein, damit diese nicht unterschiedlich ausgelegt werden kann und zu Fehlinterpretationen führt.

³⁶⁰ Siehe Kapitel 5.2.1

³⁶¹ Bender, 2004, S. 127 f.

³⁶² Lienert / Raatz, 1998, S. 10 f.

Kosten/Nutzen

Kosten/Nutzen beschreibt das Verhältnis von Aufwand der Datenerhebung und auch der Datenauswertung zum Nutzen der erhobenen und interpretierten Daten. BENDER³⁶³ hebt besonders die Planung der Datenerhebung und –auswertung hervor, „welche Daten mit welchen Methoden und in welchem Umfang erhoben und auf welche Weise diese dann weiter verarbeitet werden sollen.“³⁶⁴

- Die theoretisch-inhaltlichen Hypothesen müssen in der Planungsphase der Studie in empirisch-inhaltlichen Hypothesen operationalisiert werden, um eine gezielte Datenauswertung gewährleisten zu können. Zur Überprüfung der Operationalisierung können erhobene Daten aus Vorversuchen genutzt werden.
- Bei der Festlegung der Eye Tracking Technologie muss der Aufwand zur Auswertung der erfassten Blickdaten im Verhältnis zu dem Nutzen der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Technologie (*Remote System* oder *head-mounted System*) und der damit verbundene Auswerteaufwand³⁶⁵ hängt dabei von dem Ziel der Studie und dem dadurch gewählten Studiendesign ab.
- Der Zeitaufwand für die Probanden ist als Kostenfaktor zu berücksichtigen. Je nach Zweck der Studie steigt der Nutzen durch die Beteiligung von Ingenieuren mit Berufserfahrung. Der Zeitaufwand von Ingenieuren im aktiven Berufsleben muss dabei in einem vertretbaren Rahmen bleiben, da sie von ihrem Unternehmen für die Zeit des Versuchs freigestellt werden müssen.³⁶⁶

Über diese Forschungsarbeit gilt es auch herauszuarbeiten, wie ein günstiges Kosten/Nutzen-Verhältnis erarbeitet werden kann, da die Eye Tracking Technologie bisher in nur wenigen Studien mit wenigen Probanden angewandt wurde. Im Folgenden wird auch betrachtet, wie eine Studie vorbereitet werden muss, damit das Kosten/Nutzen Verhältnis möglichst gering ausfällt z.B. durch Nutzung von überlagerten AOs.

Das Verhältnis von Kosten, in Form von Zeitaufwänden bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung, und dem erzielten Nutzen wird in den durchgeführten Studien genauer ermittelt und zum Abschluss dieser Forschungsarbeit kritisch diskutiert.

³⁶³ Bender, 2004, S. 119

³⁶⁴ Bender, 2004, S. 119

³⁶⁵ Der Auswerteaufwand unterscheidet sich zwischen statischem und dynamischem Stimuli, da bei dynamischen Stimuli meist ein zusätzlicher Schritt der Datenverarbeitung (semantic gaze mapping) notwendig ist, siehe Kapitel 5.1.3

³⁶⁶ In beiden durchgeführten Studien, beschrieben in Kapitel 6 und 7, wurden die teilnehmenden Ingenieure für den Zeitraum der Versuchsdurchführung (insgesamt 1,5 Stunden) von ihrem Unternehmen freigestellt.

Empirische Relevanz

Unter der empirischen Relevanz versteht BENDER³⁶⁷ die externe Validität, welche ein Gütekriterium für die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ist. Durch natürliche Umgebungsbedingungen können die Erkenntnisse auf die Realität übertragen werden. Eine hohe empirische Relevanz kann durch die Durchführung von Felduntersuchungen erreicht werden. Diese zeichnen sich jedoch gewöhnlich durch eine geringere interne Validität aus, welche aus einem höheren Anteil an Störeinflüssen resultiert (siehe Kapitel 2.3.1). Laboruntersuchungen, welche versuchen, alle Störgroßen zu kontrollieren, weisen oft geringe empirische Relevanz auf (siehe Kapitel 2.3.1). Dies wird jedoch in strengen Laboruntersuchungen bewusst in Kauf genommen, um beispielsweise eine höhere Anzahl an Probanden zu erfassen oder Vergleiche aufstellen zu können.

BENDER³⁶⁸ schlägt für die Steigerung der empirischen Relevanz in Laborstudien vor eine reale Situation innerhalb der Studie abzubilden. So können auch im Labor generalisierbare Erkenntnisse erzielt werden. Die Aufgabenstellung muss sich dazu an dem Zweck der Studie orientieren. Dies gilt auch für die Wahl der Probanden, welche aus der richtigen Zielgruppe ausgewählt werden müssen.

- Zur Abbildung einer realen Aufgabenstellung soll sich die von den Probanden zu bearbeitende Aufgabenstellung im Bereich der Produktgenerationsentwicklung³⁶⁹ bewegen und die Analyse von technischen Systemen beinhalten.
- Durch das Engagement von berufserfahrenen Ingenieuren als Probanden neben Studierenden, die wegen der guten Verfügbarkeit oftmals in empirischen Studien eingebunden werden, kann die externe Validität zusätzlich gesteigert werden.

Schwierigkeit der Untersuchungsaufgabe

Ein wichtiges Gütekriterium für eine Untersuchungsaufgabe ist die Schwierigkeit. Ein Test sollte immer eine mittlere Schwierigkeit aufweisen. Dabei können einzelne Aufgaben eine höhere oder niedrigere Schwierigkeit aufweisen.³⁷⁰ Im Bereich der Konstruktionsmethodik kann oftmals aufgrund langer Bearbeitungszeiten von Problemstellungen nur eine Aufgabe während eines Versuchs gestellt werden. Dabei sollte diese Aufgabe von Novizen sowie Experten gelöst werden können.

³⁶⁷ Bender, 2004, S. 118 f.

³⁶⁸ Bender, 2004, S. 119

³⁶⁹ Albers et al., 2015d

³⁷⁰ Lienert / Raatz, 1998, S. 30 f.

- Bei Untersuchungen der Analyseprozesse im Bereich der Konstruktion muss eine Aufgabe so ausgelegt werden, dass diese nicht trivial ist. Die Problemstellung muss so anspruchsvoll gewählt werden, dass das Problem nicht direkt erkennbar ist und sich die erzielten Ergebnisse der Testpersonen voneinander folglich unterscheiden können.
- Auf der anderen Seite darf eine zu hohe Schwierigkeit weniger erfahrene Ingenieure nicht von der Bearbeitung der Aufgabe nicht abhalten. Unterschiedliche Interpretationen von Gestalt und Funktionen während der Analyse werden erwartet und sind erwünscht. Es muss jedoch für alle Probanden möglich sein, eine Analyse des technischen Systems vorzunehmen.

5.3.2 Störvariablen und Gegenmaßnahmen

Der Vorteil von Laboruntersuchungen in Vergleich zu Felduntersuchungen ist die Möglichkeit, untersuchungsbedingte Störvariablen kontrollieren zu können. So kann die interne Validität der Untersuchung erhöht werden.³⁷¹ Aber auch in Laboruntersuchungen ist es in der Realität kaum möglich, alle Störungen auszuschließen. BORTZ UND DÖRING³⁷² unterscheiden personengebundene und untersuchungsgebundene Störvariablen. Die personengebundenen Störvariablen treten auf, wenn sich Probanden zweier Stichproben nicht nur bezüglich der unabhängigen sondern auch bezüglich der abhängigen Variablen unterscheiden. Störvariablen dieser Art können am besten durch Randomisierung kontrolliert werden³⁷³. Dies ist sehr gut möglich, wenn sich alle Probanden bereits am Ort der Untersuchung aufhalten. Für eine breit angelegte Querschnittsstudie sollten im Bereich der Konstruktionsmethodik die Vorgehensweisen von Studierenden sowie Entwicklungsingenieuren und Konstrukteuren mit unterschiedlichem Erfahrungsstand untersucht werden. Dabei bilden sich natürliche Gruppen aufgrund der Arbeitsstandorte. Studierende und Mitarbeiter der Universitäten können randomisiert untersucht werden, wobei Ingenieure im aktiven Berufsleben meist nur während Firmenbesuchen an der Studie teilnehmen können. Zusätzlich werden die personengebundenen Daten aller Probanden über Fragebögen registriert.

Zur Vermeidung von untersuchungsgebundenen Störvariablen müssen möglichst alle äußeren Rahmenbedingungen der Untersuchungen konstant gehalten werden. Bei jedem Versuch sollten die gleichen Materialien zur Verfügung gestellt und derselbe Versuchsablauf eingehalten werden. Eine konstante und angenehme Beleuchtung des Versuchsraums ist vorzusehen. Eine zu helle oder zu dunkle Umgebung sowie

³⁷¹ Bortz / Döring, 2009, S. 57

³⁷² Bortz / Döring, 2009, S. 524 ff.

³⁷³ Bortz / Döring, 2009, S. 524 ff.

wechselnde Lichtbedingungen könnten das Blickverhalten der Testpersonen beeinflussen.

Die Anzahl der anwesenden Personen sollte konstant und möglichst niedrig gehalten werden. Die Probanden könnten sich durch die Beobachtung von mehreren Versuchsleitern gestört fühlen und dadurch ihr Verhalten ändern.

Bei Studien zu Handlungsabfolgen kann die Durchführung von *Concurrent Think-Aloud (CTA)* eine Störvariable darstellen. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht die Handlungsabfolgen, sondern die Analyseprozesse und -fähigkeiten der Probanden untersucht werden sollen, ist *CTA* nicht als Störquelle anzusehen.³⁷⁴

Eine weitere Störgröße kann das Alter der Teilnehmer darstellen. Da Probanden mit geringen Erfahrungen in der Entwicklung und Konstruktion im Regelfall jünger sind als Probanden mit langjährigen Erfahrungen in diesem Bereich, kann das Alter einen ungewollten Effekt auf die zu messende Variable erzielen.

Die Konzentrationsfähigkeit kann unterschiedlich schnell abnehmen und kann bei der Auswertung der Daten zur negativen Auslegung der Analysefähigkeiten führen. Daher ist darauf zu achten, dass die Bearbeitungsdauer der Aufgabenstellung möglichst innerhalb der Konzentrationsdauer aller Testpersonen liegt.

Auch die Durchführung von Versuchen zu einer späten Tageszeit kann sich auf die Konzentrationsfähigkeit der Probanden und somit auch auf deren Leistung im Versuch auswirken. Dieser Effekt lässt sich durch die Durchführung der Versuche zur jeweils gleichen Tageszeit verringern, jedoch ist dies in der Praxis nicht immer umsetzbar. Falls es zum Konzentrationsabfall einzelner Personen kommen sollte, muss dies unbedingt vermerkt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die unterschiedliche Verwendung von vorhandenen Materialien zur Präsentation der Aufgabe und des technischen Systems kann das Vorgehen oder das Ergebnis der Aufgabenbearbeitung beeinflussen. Diese Störvariable kann durch den Verzicht auf Auswahlmöglichkeiten zwischen mehreren Materialien für die Bearbeitung der Aufgabenstellung minimiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass alle Probanden mit den Präsentationsformen der Arbeitsmaterialien vertraut sind. Falls dies nicht der Fall ist, könnte eine neue Störvariable daraus entstehen.

5.3.3 Umsetzung der Anforderungen in Eye Tracking Studien

Die Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität beeinflussen sich wechselseitig und sollten bei allen empirischen Studien beachtet werden. Der Einsatz der Eye Tracking Technologie und der Think-Aloud Methode ermöglichen die Steigerung der Objektivität, indem die zu beobachtenden Merkmale mit Kodierungen

³⁷⁴ Siehe Kapitel 5.2.1 und 5.2.2

versehen werden. Passend zu den zu überprüfenden empirisch-inhaltlichen Hypothesen können die Blickdaten zur statistischen Auswertung z.B. *Areas of Interests (AOIs)* zugeordnet werden, während die Verbalisierungen des Think-Alouds zu eindeutig definierten Kodierungsschemen zugewiesen werden. Für eine hohe Reliabilität muss darauf geachtet werden, dass die Erhebungsmethoden nahezu fehlerfrei die zu messenden Merkmale erfassen. Eine gute Vorbereitung und Einstimmung der Versuchspersonen auf die Erfassung ihrer Augenbewegungen und der ausgesprochenen Gedanken ist hierfür essentiell. Vor allem bei der Nutzung der Eye Tracking Technologie muss darauf geachtet werden, dass geeignete Merkmale zur Erreichung einer hohen Validität erfasst und ausgewertet werden. Um eine hohe empirische Relevanz in Laborstudien zu erreichen, muss die Aufgabenstellung ein möglichst reales Problem abbilden, welches in der Arbeitswelt von Ingenieuren im Bereich der Konstruktion vorkommt. Je näher die Aufgabenstellung sich jedoch an der Realität orientiert, desto mehr Störeinflüsse auf die Vorgehensweisen und Ergebnisse ergeben sich. Reale Problemstellungen im industriellen Umfeld von Ingenieuren sind oft offen und es gibt nicht „die eine richtige Lösung“, welche bewertet werden kann.

Die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Befähigung zum Einsatz der Eye Tracking Technologie für Studien im Bereich der Konstruktionsmethodik und das Ableiten von ersten Erkenntnissen zur Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden. Der Bereich der Konstruktionsmethoden wird hierbei auf die Analyse technischer Systeme eingegrenzt, da hier der Einsatz der Eye Tracking Technologie einen großen Mehrwert für die Steigerung der Güte der Untersuchungen sowie der Erkenntnisse über das Analyseverhalten von Ingenieuren bringt. Um diese Analyseprozesse zu untersuchen, wurden die oben aufgeführten Anforderungen in zwei empirischen Untersuchungen umgesetzt. Beide Studien wurden in einer Laborumgebung durchgeführt. Diese gewährleisteten die Kontrolle von Störeinflüssen und die Untersuchung einer größeren Anzahl an Probanden im Vergleich zur Felduntersuchung. Der Einsatz der Eye Tracking Technologie und die Auswertung der erhobenen Daten wird in Laboruntersuchungen erleichtert.

Da auch Laboruntersuchungen unterschiedliche Ausprägungen haben können, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeiten zwei Studienkonzepte mit unterschiedlichem Zweck der Analysetätigkeit und unterschiedlicher empirischer Relevanz identifiziert (siehe Abbildung 4-2):

1. *Analyse zum Aufbau von Systemverständnis* (Kapitel 6)

Eine klassische Laborstudie zum Vergleich der grundlegenden Analyseprozesse von Ingenieuren unterschiedlicher Erfahrungsstufen mit einer geringen Anzahl an Störvariablen

2. *Synthese-getriebene Analyse* (Kapitel 7)

Eine Kombination aus Feld- und Laborstudie mit der Bearbeitung einer realen Problemlösungsaufgabe aus dem täglichen Umfeld der Konstruktion innerhalb einer kontrollierten Laborumgebung, um die Analysetätigkeiten während des Problemlösungsprozesses zu untersuchen.

Analyse zum Aufbau von Systemverständnis

Die Analyse von technischen Zeichnungen ist ein bereits angewendetes Vorgehen, um die Analyseprozesse während der Konstruktion zu untersuchen. Diese Studie fokussiert den Vergleich grundlegender Analyseprozesse von Ingenieuren unterschiedlicher Erfahrungsstufen unter Laborbedingungen. Dazu soll von Probanden eine technische Zeichnung analysiert werden, um ein Systemverständnis aufzubauen. Für den Einsatz der Eye Tracking Technologie unter Laborbedingungen eignen sich dazu besonders 2D Schnittdarstellungen von technischen Systemen. Die Zeichnungen können als statische Stimuli mit stationären *Remote Eye Tracker* verwendet werden, was den Aufwand für die Datenaufbereitung und Datenauswertung gering hält. Geringe Störvariablen werden durch die Verwendung der stationären Eye Tracker und der Präsentation einer 2D-Schnittdarstellung als statischen Stimulus erreicht.

Der Arbeitsaufwand bei der Analyse einer 2D-Schnittdarstellung ist abhängig von der Komplexität des technischen Systems. Eine 2D-Schnittdarstellung zeichnet sich aber im Vergleich zu 3D-CAD- oder physischen Modellen meist durch eine geringe Bearbeitungsdauer aus. Eine Erklärung des Kontexts ist in der Regel nicht notwendig. Die Aufgabenstellung kann frei formuliert sein oder fragt gezielt nach Merkmalen oder Eigenschaften des technischen Systems. Aufgrund der relativ kurzen Bearbeitungsdauer der Studie kann daher eine große Anzahl von Probanden an Studien zur Zeichnungsanalyse teilnehmen.

Synthese-getriebene Analyse

Der Produktentwicklungsprozess zeichnet sich durch eine Vielzahl von iterativen Analyse- und Syntheseschritten aus. Dabei ist das Ziel stets die Generierung eines neuen Produkts. Die Synthese kann aber nur auf einer bestehenden Wissensbasis aufbauen und ist ohne eine vorhergehende Analyse des Systems nicht möglich. Jede Tätigkeit während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses ist jedoch direkt oder indirekt an die Synthese einer neuen Gestalt gekoppelt. Dabei wird auch die Analyse im Produktentwicklungsprozess von der Synthese getrieben und wird aus diesem Grund im Folgenden „*Synthese-getriebene Analyse*“ genannt³⁷⁵.

³⁷⁵ Ruckpaul et al., 2014a

Die Synthese-getriebene Analyse unterscheidet sich in mehreren Punkten von der Analyse zum Aufbau von Systemverständnis. Im realen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess besteht die Aufgabenstellung oftmals aus einer Problembeschreibung und einer Auflistung von Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt. Die detaillierte Analyse des Problems und eventuell vorliegender Vorgängerprodukte ist meist nicht explizit in der Aufgabenstellung enthalten. Ingenieure müssen die Analyse eigens initiiert durchführen. Aus diesem Grund soll auch die Aufgabenstellung der Studie eine Problemlösungsaufgabe darstellen, bei welcher die Analyse des technischen Systems notwendig für die erfolgreiche Lösung und Synthese eines neuen Produkts ist. Die Analyse wird jedoch nicht direkt in der Aufgabenstellung erwähnt. Die Versuchsperson muss eigenständig erkennen, dass die Analyse des Systems und des vorliegenden Problems notwendig ist, um erfolgreiche Lösungsvorschläge erarbeiten zu können.

Dazu werden den Probanden möglichst alle Materialien zur Verfügung gestellt, welche auch im täglichen Berufsumfeld vorliegen und sie bei der Analyse sowie Synthese unterstützen. Neben 2D-Schnittdarstellungen können dies auch 3D-CAD-Modelle, physische Modelle oder weitere Arten von Aufzeichnungen sein. Dabei lässt sich das Blickverhalten mittels *head-mounted Eye Tracker*, wie den Eye Tracking Brillen, aufnehmen. Diese bringen einen höheren Aufwand zur Datenaufbereitung mit sich, ermöglichen aber ein freies Vorgehen der Probanden bei der Analyse und Synthese des technischen Systems. Um den Probanden die Bearbeitung der Aufgabe zu ermöglichen, muss der Kontext der Aufgabe erläutert werden. Dabei erhöht sich die Versuchsdauer im Vergleich zu Versuchen zur Analyse technischer Zeichnungen zum Aufbau von Systemverständnis. Dieses Studienkonzept beinhaltet daher im Vergleich zur Zeichnungsanalyse eine höhere empirische Relevanz durch die reale Aufgabenstellung. Dies birgt jedoch weitere Störvariablen, wie z.B. die höhere Anzahl der Materialien, eine längere Dauer des Versuchs sowie einen höheren Aufwand zur Datenaufbereitung.

Beide erläuterten Studienkonzepte wurden in der vorliegenden Forschungsarbeit umgesetzt und mit angehenden sowie erfahrenen Ingenieuren durchgeführt und sind in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.

5.3.4 Planung und Ablauf der Studien

Die beiden in den folgenden Kapiteln beschriebenen Studien wurden angelehnt an das von BLESSING UND CHAKRABARTI³⁷⁶ vorgeschlagene Vorgehen für die erste deskriptive Studie nach der *Design Research Methodology* geplant, durchgeführt und

³⁷⁶ Blessing / Chakrabarti, 2009

ausgewertet. Abbildung 5-14 zeigt das angepasste Vorgehen für die innerhalb dieser Forschungsarbeit durchgeführten Studien.

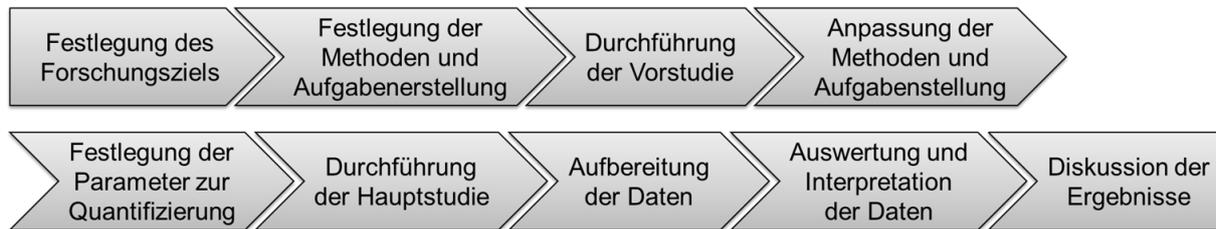


Abbildung 5-14: Vorgehen zur Planung, Durchführung und Auswertung der Studien³⁷⁷

Die Festlegung des Forschungsziels zu Beginn beinhaltet dabei die Formulierung von Forschungsfragen, welche die aufgenommenen Daten beantworten sollen, sowie die Festlegung von Hypothesen, welche sich aus dem Stand der Forschung ergeben haben und überprüft werden sollen. Die Festlegung der Methoden und die Aufgabenerstellung beinhalten auch die Entscheidungen, welche Eye Tracking Systeme verwendet, welche Think-Aloud Methoden angewandt und welche Materialien den Probanden zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich wird ein detaillierter Ablaufplan erstellt, nach dem die Versuche durchgeführt werden, und es werden geeignete Probandengruppen bestimmt. Die Aufgabenstellung, der Methodeneinsatz und der Ablaufplan werden in einer Vorstudie getestet und auf die Erfüllung der obengenannten Anforderungen an eine erfolgreiche Studie³⁷⁸ untersucht. Falls sich Probleme oder Verbesserungsmöglichkeiten ergeben, werden die entsprechenden Punkte nachgebessert. Da die Eye Tracking Technologie bisher nur bei wenigen Studien angewandt wurde und das Blickverhalten der Probanden abhängig von der Aufgabenstellung ist, werden die Parameter zur Quantifizierung von Forschungsfragen und Hypothesen auf Basis der Vorstudie und nach Kenntnis des voraussichtlichen Blickdatenverlaufs festgelegt. Die weiteren Schritte zur Durchführung und Auswertung der Studie sowie die Diskussion der Ergebnisse richten sich nach dem Vorgehen von BLESSING UND CHAKRABARTI³⁷⁹. Dabei ist zu beachten, dass die Aufbereitung der Think-Aloud und Eye Tracking Daten zu einem hohen Arbeitsaufwand führen.

³⁷⁷ Eigene Darstellung des angepassten Vorgehens nach Blessing / Chakrabarti, 2009

³⁷⁸ siehe Kapitel 5.3.1

³⁷⁹ Blessing / Chakrabarti, 2009

6 Studie „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“

Die in dem vorliegenden Kapitel beschriebene Untersuchung hat den Zweck, die grundlegenden Analyseprozesse von Ingenieuren beim Aufbau von Systemverständnis aufzudecken. Dazu wurde eine Laborstudie durchgeführt, in der angehende Ingenieure und Ingenieure mit Berufserfahrung in einer kontrollierten Umgebung während der Analyse eines technischen Systems anhand von technischen Zeichnungen beobachtet wurden. Ihre Gedanken verbalisierten sie mittels *Concurrent Think-Aloud (CTA)* und ihr Blickverhalten wurde mittels der Eye Tracking Technologie aufgezeichnet. Die Studie sollte die Vorgehensweisen möglichst vieler Versuchspersonen aufzeichnen. Dazu war eine kurze Bearbeitungszeit durch die Probanden und eine effiziente Auswertung der Daten notwendig. Die Durchführung geschah in Zusammenarbeit mit dem Masterarbeiter M.Sc. Thomas NELIUS³⁸⁰ und wichtige Erkenntnisse der Studie wurden von RUCKPAUL ET AL.³⁸¹ veröffentlicht.

6.1 Forschungsziel und Forschungsfragen

Um die grundlegenden Analyseprozesse von angehenden und erfahrenden Ingenieuren vergleichen zu können, wird eine empirische Studie in einer Laborumgebung durchgeführt. Die empirische Relevanz bzw. externe Validität wird in dieser Studie gezielt gering gehalten, um nur wenige Störfaktoren einfließen zu lassen und eine hohe interne Validität zu erreichen.³⁸² Der Fokus der Studie liegt in der Beantwortung von grundlegenden Fragen zur Informationsverarbeitung der von den Probanden wahrgenommenen Informationen während der Analyse einer technischen Zusammenbauzeichnung.

Die qualitative Forschungsfrage baut auf HAHNES³⁸³ Untersuchung zur Interpretation technischer Zeichnungen durch technische Zeichner und Ingenieure auf. Es soll überprüft werden, ob HAHNES Prozessmodell der Interpretation von technischen Zeichnungen auch in dieser Studie bei einer Analyse zum Aufbau von Systemverständnis nachgewiesen werden kann. Dazu werden die Interpretationsphasen und der Verlauf der Fixationsdauern überprüft.

³⁸⁰ Nelius, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

³⁸¹ Ruckpaul et al., 2015c

³⁸² Siehe Kapitel 2.3.1

³⁸³ Hahne, 2012

Forschungsfrage zur Analyse zum Aufbau von Systemverständnis

Kann der Prozess der Analyse einer technischen Zeichnung zum Aufbau von Systemverständnis in Phasen eingeteilt werden und können diese Phasen über den Verlauf der Blickdaten nachgewiesen werden?

Eine Forschungshypothese dieser Studie ergibt sich aus früheren Erkenntnissen zu Unterschieden in der Informationsverarbeitung zwischen Experten und Novizen im Bereich der Physik von CHI ET AL.³⁸⁴. Hier haben Novizen dazu tendiert auf einer oberflächlichen Ebene physikalische Probleme zu betrachten und rein deklaratives Wissen in die Problemlösung einzubringen. Aufgrund ihrer Erfahrungen haben Experten auch prozedurales Wissen anwenden können und betrachteten die Problemstellungen in der Tiefe. Dies führt zu folgender Forschungshypothese:

Forschungshypothese zur Analyse zum Aufbau von Systemverständnis

Während der Analyse technischer Zeichnungen verarbeiten erfahrene Ingenieure die wahrgenommenen Informationen vertiefter als Studierende und bauen ein tieferes Systemverständnis auf. Die angehenden Ingenieure analysieren das technische System oberflächlicher.

Die Forschungsfrage zur Analyse zum Aufbau von Systemverständnis dient der Beantwortung der Forschungsfragen 2.4 aus Kapitel 4.1 nach Faktoren zur Begünstigung der Analyse von technischen Systemen. Die Forschungshypothese fokussiert mit dem Vergleich von Probandengruppen unterschiedlicher Erfahrungsstufen die Beantwortung der Forschungsfrage 2.3.

Um die Forschungsfrage und -hypothese zu beantworten, muss eine geeignete Aufgabenstellung zur Analyse von technischen Zeichnungen und geeignete Forschungsmethoden zur Aufnahme der Analyseprozesse gewählt werden.

6.2 Aufgabenstellung und Erhebungsmethoden

In einer Laborstudie mit Laboraufgabenstellung sind die grundlegenden Unterschiede des Verhaltens von Ingenieuren mit wenig und viel Erfahrung im Bereich der Entwicklung und Konstruktion während der Analyse technischer Systeme zu untersuchen. Dabei wurde den Probanden eine offene Aufgabe gestellt, welche die Tiefe der Analyse jedem Versuchsteilnehmer selbst überlässt. Die Aufgabenstellung orientierte sich mit Absicht nicht an Aufgabenstellungen in der Realität, sondern diente der einfacheren Vergleichbarkeit der Analyseprozesse und -fähigkeiten im Versuch und sorgt damit für eine höhere interne Validität. Ziel war die Feststellung grundlegender Unterschiede in der Wahrnehmung von angehenden und erfahrenen Ingenieuren.

³⁸⁴ Chi et al., 1981

6.2.1 Festlegung der Aufgabenstellung und der Materialien

Das Analysieren von technischen Systemen in unterschiedlichen Darstellungsarten ist eine wichtige Fähigkeit von Ingenieuren. In der Konstruktion werden neben 3D-CAD Modellen technischer Systeme auch weiterhin abgeleitete 2D-Darstellungen der Systeme in Unternehmen, z.B. zur Freigabe an die Produktion, genutzt. Sie stellen wichtige Informationsträger dar. Um die grundsätzlichen Analyseprozesse und -fähigkeiten von Ingenieuren zu untersuchen, wurden die Darstellungen zweier mechanischer Getriebe als Analysegegenstände ausgewählt und jeder Versuchsperson präsentiert. Zur Steigerung der Validität wurde das verwendete Material auf eine 2D-Schnittdarstellung beschränkt. Da vorausgesetzt werden kann, dass alle Probanden 2D-Schnittdarstellungen lesen und interpretieren können, werden keine Probanden benachteiligt.

Die erste Schnittdarstellung (Abbildung 6-1) zeigt ein Getriebe mit einer Kegelrad- und einer Stirnradstufe. Die Lagerung der drei Getriebewellen erfolgt durch unterschiedliche Lagerarten. Das Gehäuse ist als Gussgehäuse ausgelegt. Es ist weder der Eingang noch der Ausgang des Getriebes gekennzeichnet, was der Interpretation der Probanden überlassen wurde.

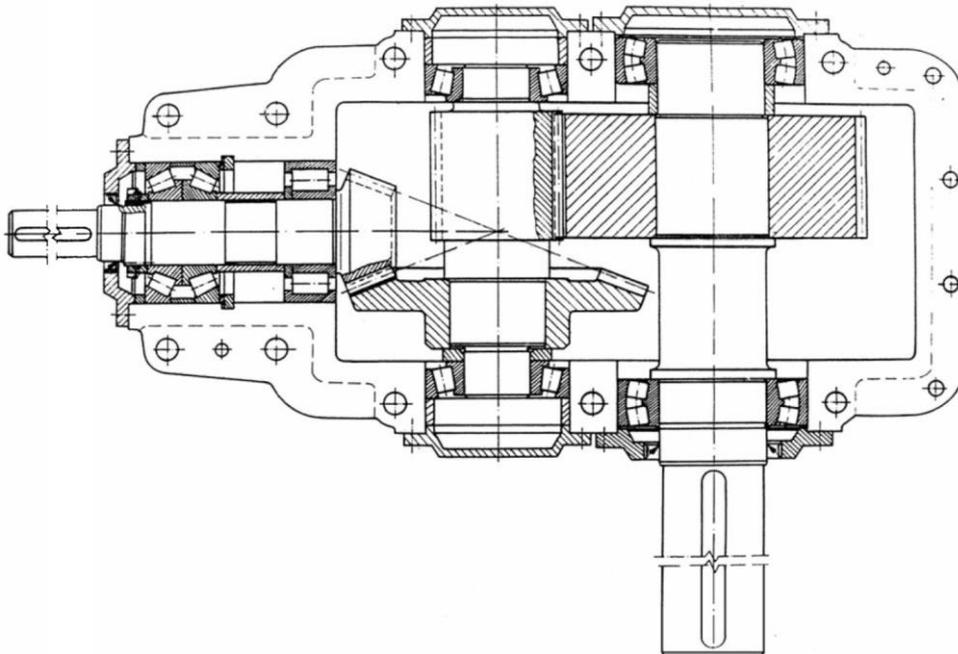


Abbildung 6-1: Kegelrad-Stirnradgetriebe³⁸⁵

Die zweite Getriebedarstellung (Abbildung 6-2) wurde einer Patentschrift einer Antriebsstrang-Vorrichtung³⁸⁶ entnommen und zeigt ebenfalls ein Getriebe mit einer Kegelrad- und einer Stirnradstufe. Zur Lagerung der Getriebewellen sind

³⁸⁵ Steinhilper / Sauer, 2012, S. 562

³⁸⁶ Yamamoto, 2009

Rillenkugellager vorgesehen. Es wurde ebenfalls nicht angegeben, welche Getriebewelle als Eingangswelle fungiert.

Die Aufgabe der Versuchspersonen lautete: „Beschreiben Sie, was Sie wahrnehmen. Geben Sie Bescheid, wenn Sie die Zeichnung verstanden haben.“ Die Aufgabenstellung wurde damit bewusst offen gehalten, um Unterschiede im Aufbau des Verständnisses und in der Tiefe und Breite der Zeichnungsanalyse aufzudecken. Den Probanden wurde keine Zeitvorgabe zur Bearbeitung der Aufgaben gegeben. Sowie die Versuchspersonen das System nach ihrer eigenen Einschätzung verstanden hat, blendet der Versuchsleiter die 2D-Schnittdarstellung aus. Die maximale Betrachtungszeit wurde auf 180 Sekunden beschränkt, nach welcher die Darstellung automatisch ausgeblendet wurde.

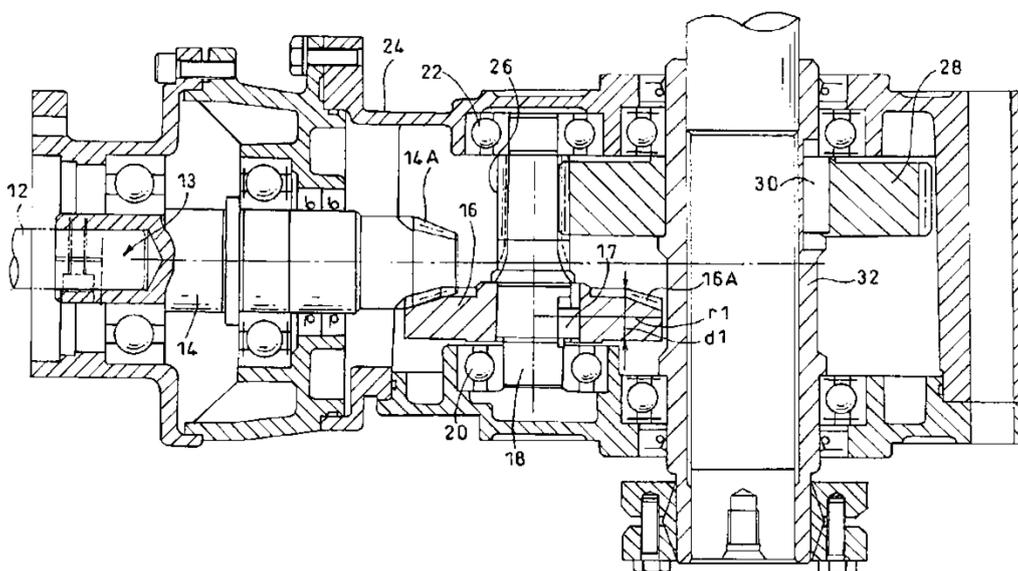


Abbildung 6-2: Antriebsstrang-Vorrichtung mit einem Kegelrad³⁸⁷

Um neben der Verbalisierung des Think-Aloud zusätzlich erfassen zu können, ob weitere Informationen wahrgenommen und interpretiert wurden, stellte der Versuchsleiter jedem Probanden nach der Ausblendung der 2D-Schnittdarstellungen Fragen zu den technischen Systemen. Die Fragen gehen auf die Wahl der verbauten Komponenten, die Fertigung, die Montage oder Punkte zur Funktionserfüllung ein.

Fragen zur ersten technischen Zeichnung (Abbildung 6-1):

- „Wo wurden welche Lagertypen verbaut?“
- Welche Dichtungen wurden verwendet?“
- Wie wird das Getriebe montiert? (Bei Unklarheiten: Haben Sie eine Gehäuseteilung gesehen?)³⁸⁸

³⁸⁷ Yamamoto, 2009, Fig. 6

Fragen zur zweiten technischen Zeichnung (Abbildung 6-2):

- „Wie sind die Zahnräder auf der Welle befestigt?
- Wie wird das Gehäuse gefertigt?
- Wenn die linke Welle angetrieben wird, wie hoch ist die Übersetzung?
- Auf der rechten Welle ist am unteren Ende ein Konus-Spannelement verbaut. Was ist dessen Funktion?“³⁸⁹

Die Antworten der Probanden wurde aufgezeichnet, um diese in einem späteren Schritt auswerten zu können. Nach der Beantwortung der Fragen wurden den Probanden noch weitere Aufgaben im Rahmen der Masterarbeit von Thomas NELIUS³⁹⁰ gestellt, welche jedoch in dieser Forschungsarbeit nicht weiter besprochen werden. Weitere Materialien neben den 2D-Schnittdarstellungen wurden für diese Studie nicht benötigt, was die Validität der Studie begünstigt.

6.2.2 Wahl der Erhebungsmethoden

Für die Aufnahme der Blickpfade wurde der *Remote Eye Tracker* RED250 der Firma SMI³⁹¹ verwendet. Auf dem 22-Zoll Bildschirm können 2D-Schnittdarstellung von technischen Systemen gut sichtbar angezeigt werden. Leichte Kopfbewegungen der Probanden werden dabei zugelassen und beeinträchtigen die Genauigkeit der Blickdatenerfassung kaum. Durch Verwendung des *Remote Systems* in Kombination mit einem statischen Stimulus, welches eine 2D-Schnittdarstellung darstellt, ist eine statistische Auswertung der Blickdaten ohne den Zwischenschritt der Fixationszuweisung möglich. Dies hält den Aufwand zur Datenaufbereitung niedrig und ist bei der großen Anzahl von Probanden von Vorteil, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis gering zu halten.

Zur Durchführung der Versuche wurde die Software *Experiment Center* der Firma SMI³⁹² verwendet. Über die Software wurde der Versuchsaufbau implementiert. Nach der Kalibrierung des Eye Tracking Systems wurden Folien mit dem Begrüßungstext, den Aufgabenstellungen sowie die 2D-Schnittdarstellungen eingefügt, so dass diese allen Probanden in gleicher Form präsentiert. Dies trägt zu einer höheren Objektivität³⁹³ bei. Die 2D-Schnittdarstellungen wurden mit einem Zeitlimit von 180 Sekunden versehen, sodass diese bei längerer Betrachtung automatisch

³⁸⁸ vgl. Nelius, 2014, S. 100 (betreute Abschlussarbeit)

³⁸⁹ vgl. Nelius, 2014, S. 100 (betreute Abschlussarbeit)

³⁹⁰ Nelius, 2014, (betreute Abschlussarbeit)

³⁹¹ Siehe Kapitel 4.3

³⁹² Siehe Kapitel 4.3.2

³⁹³ Siehe Kapitel 5.3.1, Anforderungen zur Erhöhung der Objektivität

ausgeblendet werden. Alle weiteren Folien wurden nach Absprache mit den Versuchspersonen fortgeführt.

Zusätzlich zum *Remote Eye Tracker* wurde eine Videokamera am Monitor installiert. Diese nimmt die Gestik und Mimik der Probanden auf, um eventuelle Ausfälle der Blickdatenerfassung genauer untersuchen zu können. Das Kippen des Kopfes oder das Zusammenkneifen der Augen kann zu Leerstellen in der Blickerfassung führen. Über das integrierte Mikrofon der Videokamera wurden die Aussagen der Versuchsperson sowie des Versuchsleiters aufgenommen.

Um die grundlegenden Analysefähigkeiten bei der Betrachtung der 2D-Schnittdarstellung von angehenden und erfahrenen Ingenieuren zu untersuchen, wurde *Concurrent Think-Aloud (CTA)* als weitere Erhebungsmethode eingesetzt. Wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt wurde, bietet sich diese Think-Aloud Methode am besten für die Untersuchung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen an, welche bei der Analyse von technischen Systemen gebildet werden müssen. Die verbalisierten Gedanken der Probanden wurden über die angeschlossene Webcam aufgenommen und im Nachgang der Aufnahmen transkribiert und einem Kodierungsschema zugewiesen.

Um das Verbalisieren der Gedanken mit den Versuchspersonen zu üben, wurde ihnen zu Beginn des Versuchs eine Zeichnung eines Hafens mit einer hohen Dichte an Information (Wimmelbild, siehe Abbildung 12-1 in Anhang A) gezeigt und hierzu ebenfalls die Aufgabe gestellt: „Beschreiben Sie, was Sie wahrnehmen“. Probanden, die keine oder nur wenige Gedanken verbalisierten, wurden von dem Versuchsleiter auf die richtige Durchführung von Think-Aloud hingewiesen. Diese Übung wurde ebenfalls in der Software *Experiment Center* in den Versuchsaufbau integriert. Die präsentierten Folien aus dem *Experiment Center* können in Anhang A eingesehen werden.

Zur Aufnahme der Probandenmerkmale wurde ein Fragebogen erstellt, der Fragen zur Länge der Berufserfahrung, zur Ausbildung oder zum Stand des Studiums stellt und das Alter der Probanden erfasst.

6.2.3 Wahl der Probandengruppen

Um die grundsätzlichen Analyseprozesse von angehenden und erfahrenen Ingenieuren untersuchen zu können, wurden Personen mit unterschiedlichen Erfahrungsständen zur Teilnahme an der Studie eingeladen:

- 7 Studierende des Maschinenbaus im 4. Semester am KIT
- 4 Studierende des Maschinenbaus im 6. Semester am KIT

- 14 wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK - Instituts für Produktentwicklung am KIT mit bis zu 5 Jahren Berufserfahrung
- 2 wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK mit langjähriger Berufserfahrung (14 bzw. 38 Jahren)
- 7 Entwicklungsingenieure/Konstrukteure mit Tätigkeit und Berufserfahrung (5 bis 35 Jahre) in der Industrie

Als angehende Ingenieure wurden Studierende des Maschinenbaus im 4. bis 6. Semester am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ausgewählt und als Probandengruppe zusammengefasst. Diese Probandengruppe hat während der ersten Semester die Grundlagen der Maschinenkonstruktionslehre durchlaufen. Sie kennen alle verbauten Getriebeelemente und haben selbst Getriebe innerhalb der Lehrveranstaltung „Maschinenkonstruktionslehre I-IV“ konstruiert. Vertiefte Anwendungen in der Konstruktion und eine methodische Ausbildung in der Produktentwicklung folgen erst in höheren Semestern und können somit ausgeschlossen werden. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter des IPEK und die Ingenieure aus der Industrie wurden für diese Studie zur Probandengruppe der erfahrenen Ingenieure zusammengefasst. Zur Anonymisierung der Daten erhält jeder Proband eine Nummer (ZA01 bis ZA35).³⁹⁴ Proband Z28 hat den Versuch nicht angetreten.

6.2.4 Festlegung des Ablaufplans

Zur Steigerung der Objektivität in der Studie wurde ein detailliertes Versuchsprotokoll angefertigt, nach welchen alle Versuche durchgeführt wurden. Das Protokoll enthält alle Schritte des Versuchsablaufs, von der Begrüßung bis zum Abschluss. Abbildung 6-3 zeigt einen Ausschnitt aus dem verwendeten Versuchsprotokoll.

Nach der Begrüßung durch den Versuchsleiter, erklärte der Leiter dem Probanden den Ablauf des Versuchs. Anschließend wurde der Proband mit der Eye Tracking Technologie bekannt gemacht und in der richtigen Position vor dem *Remote Eye Tracker* positioniert. Zusätzlich kontrollierte der Versuchsleiter vor Start der Aufnahme die Funktion der Videokamera. Nach dem Start des Versuchs über die Software *Experiment Center* wurde automatisch die Kalibrierung des Eye Tracking Systems gestartet. Hierzu gab der Versuchsleiter Anweisungen zu Kopfhaltung während der Kalibrierung und während des Versuchs. Zur ersten Folie erfolgte noch eine kurze Erklärung, dass die Aufgabenstellung immer erst dann fortgeführt wird, wenn der Proband dies signalisiert. Die *Concurrent Think-Aloud* Methode wurde den

³⁹⁴ ZA kürzt hierbei „Zeichnungsanalyse“ ab, um die Probandennummerierung der beiden durchgeführten Studien klar voneinander zu trennen. Die Probanden der Studie zur Synthesegetriebenen Analyse werden in Kapitel 7 mit SgA abgekürzt.

Probanden erklärt und zunächst die Zeichnung des Hafens zur Übung des Think-Aloud gezeigt (siehe Abbildung 12-1 in Anhang A). Danach folgten die beiden 2D-Darstellungen der Getriebe (Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2) mit jeweils einer Wiederholung der Aufgabenstellung. Weitere Anmerkungen zur Aufgabenstellung wurden durch die Beschreibungen auf den gezeigten Folien nicht benötigt.

1. Proband begrüßen
Kurz erklären wie das Experiment abläuft
 - mehrere Aufgaben in 2 Blöcken
 - Die Aufgabenstellung wird Ihnen immer angezeigt. Zur Aufgabenstellung können Sie jederzeit Fragen stellen.
 - während der Bearbeitung wird der Blickpfad aufgenommen
 - Bild und Ton durch die Videokamera
2. Proband soll vor dem Remote-System Platz nehmen
 - Abstand einstellen
 - Höhe einstellen
 - Videokamera kontrollieren und Aufnahme starten
3. Kalibrierung des Remotesystems
Hinweis dass der Kopf während des Experiments ruhig gehalten werden soll
4. Start des Experiments
Wenn Sie die Aufgabenstellung gelesen und verstanden haben, geben Sie kurz Bescheid, dann blende ich die nächste Folie ein.
 - A. **Abbildungen beschreiben**
Bei Nachfragen, wahrnehmen:
Wir wenden die sogenannte Think-Aloud Methode an, dabei sprechen Sie bitte alle ihre Gedanken aus.
Wenn Sie die Zeichnung verstanden haben, geben Sie Bescheid, dann blende ich die Folie aus.
 1. Zeichnung Fragen:
 - Wo wurden welche Lagertypen verbaut?
 - Welche Dichtungen wurden verwendet?

Abbildung 6-3: Ausschnitt des detaillierten Ablaufplans zur Durchführung der Studie³⁹⁵

Das Versuchsprotokoll enthält auch die Fragen, die nach der Analyse der technischen Systeme von den Probanden beantwortet wurden. Abschließend erinnert das Protokoll an das Ausfüllen des Fragebogens zur Aufnahme der Probandenmerkmale und an die Unterzeichnung einer Einverständniserklärung durch die Probanden, welche damit die Veröffentlichung der aufgenommenen Daten und Ergebnissen in anonymisierter Form für Forschungszwecke erlauben.

³⁹⁵ Nelius, 2014, S. 100 (betreute Abschlussarbeit)

6.3 Festlegen der Parameter zur Quantifizierung

Die Vorstudie mit Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern zeigte, dass die Aufgabenstellung für die Beantwortung der Forschungsfragen und -hypothesen geeignet und der Schwierigkeitsgrad angemessen ist. Zur Quantifizierung der Forschungsfrage und -hypothese wurden jeweils die zu messenden Parameter (bzw. die abhängige Variablen bei Hypothesen) festgelegt.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage der Analyse zum Aufbau von Systemverständnis, ob der Analyseprozess in Phasen eingeteilt werden kann, werden die Fixationsdauern der Probanden über die Dauer der Aufgabenbearbeitung aufgetragen. Dieses Vorgehen schlägt HAHNE³⁹⁶ vor. Der Verlauf der Fixationsdauern wird unter Einbeziehung der Think-Aloud Verbalisierungen qualitativ ausgewertet und mit den Phasen des Zeichnungsinterpretationsmodells von HAHNE abgeglichen.

Die Forschungshypothese zur Studie der Analyse zum Aufbau von Systemverständnis sagt aus, dass Experten – in dieser Studie Ingenieure mit Berufserfahrung – vertiefter Informationen aufnehmen als Novizen (Studierende des 4. bzw. 6. Semesters Maschinenbau am KIT) und Novizen technische Systeme oberflächlicher analysieren³⁹⁷. Dabei werden zwei Richtungen der Analyse betrachtet, die Breite und die Tiefe. Die Breite bezeichnet dabei die Dauer des Analyseprozesses. Die Tiefe steht für die Ebenen der Interpretation von Informationen während der Analyse des technischen Systems.

Da die Probanden selbstständig entscheiden konnten, wann sie das System als verstanden bezeichneten, wird zur Quantifizierung der Breite die Analysedauer pro 2D-Schnittdarstellung genutzt. Zusätzlich wird die Anzahl der richtig beantworteten Fragen zu den technischen Systemen ausgewertet. Als Parameter der Tiefe werden die Think-Aloud Daten bezüglich unterschiedlicher Interpretationsebenen kodiert und ausgewertet. Auch die mittlere Fixationsdauer pro Proband wird zum Vergleich herangezogen, da eine höhere kognitive Beanspruchung zu längeren Fixationsdauern führen kann³⁹⁸.

Als Kodierungsschema der Verbalisierungen durch *Concurrent Think-Aloud* werden folgende Kategorien hinsichtlich der Oberflächen- und Tiefenstruktur nach CHI ET AL.³⁹⁹ definiert:⁴⁰⁰

³⁹⁶ Hahne, 2012, S. 87 ff.

³⁹⁷ nach Chi et al., 1981, siehe Kapitel 6.1

³⁹⁸ Duchowski, 2007b, S. 173

³⁹⁹ Chi et al., 1981

⁴⁰⁰ vgl. Ruckpaul et al., 2015c

- Komponenten (Oberflächenstruktur)
 - Nennung von Komponenten ohne Verknüpfung mit anderen Komponenten (z.B. „Zahnrad“, „Welle“, „Radialwellendichtring“)
 - Details des dargestellten Systems (z.B. „Gussgehäuse“, „Zylinderrollenlager mit Bund“)
 - Lagebeschreibungen (z.B. „die Welle oben rechts“)
- Funktionen (Tiefenstruktur)
 - Funktionen als Zweckbeschreibung (z.B. „der Deckel dichtet das Gehäuse“)
 - Beschreibungen des Kraft- oder Momentenflusses (z.B. „die Welle überträgt das Moment zum Zahnrad“)
 - Interaktionen (z.B. „dieses Teil ist nicht auf der Welle fixiert, also kann es sich bewegen“)
- Weitere Interpretationen der Gestalt im Kontext des Gesamtsystems (Tiefenstruktur)
 - Abstraktionen (z.B. „Trennung der Funktionen“, „Keileffekt“)
 - Evaluationen und Integration von Wissen, welches mit der Gestalt verknüpft ist (z.B. „massive Lager“, „da können hohe Kräfte übertragen werden“)
 - Montage (z.B. „um das Getriebe zu montieren...“)
- Nicht dargestellte Elemente
 - Nicht dargestellte Komponenten (z.B. „Da sollte eine Dichtung sein“)
 - Nicht dargestellte Funktionen (z.B. „es ist nicht möglich den Gang zu wechseln“)
- Fehler
 - Falsch bezeichnete Komponenten
 - Fehlinterpretation von Funktionen

6.4 Durchführung der Studie und Aufbereitung der Daten

Die Versuche wurden durch zwei Versuchsleiter durchgeführt. Die Versuche der Probandengruppe der Studierenden und der Mitarbeiter des IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT wurden von demselben Versuchsleiter durchgeführt. Die Versuche der Entwicklungsingenieure und Konstrukteure aus der Industrie wurden durch eine zweite Versuchsleiterin durchgeführt. Zusätzlich zur Übergabe und Diskussion des Ablaufplans nahm die zweite Versuchsleiterin an einem der durchgeführten Versuche mit einem wissenschaftlichen Mitarbeiter des IPEK teil.

Neben der Versuchsleitung änderte sich auch der Raum, in dem die Versuche durchgeführt wurden. Die Versuche mit Studierenden und Mitarbeitern am KIT wurde alle in einem freien Büroraum am KIT durchgeführt. Die weiteren Versuche wurden in zwei Besprechungsräumen im Unternehmen der Ingenieure und Konstrukteure durchgeführt. Der Aufbau der Systeme wurde beibehalten und der Versuchsleiter saß jeweils neben den Probanden und außerhalb deren Sichtfelds.

Nach Abschluss der Studie wurden zunächst die Aufnahmen der Blickdaten und der Audioaufnahme kontrolliert. Da es sich bei der Aufgabenstellung um statische Stimuli gehandelt hat, müssen die aufgenommenen Blickdaten nicht in einem zusätzlichen Schritt aufbereitet werden⁴⁰¹. Die event detection zur Ermittlung der Fixationen und Sakkaden wird von der Auswertesoftware BeGaze der Firma SMI automatisch durchgeführt⁴⁰². Die Audioaufnahmen des Think-Aloud wurden transkribiert und in Sinneinheiten eingeteilt. Die Sinneinheiten beinhalteten einzelne Wörter, Teilstücke von Sätzen oder ganze Sätze sein. Die Einheiten wurden anschließend dem Kodierungsschema zugewiesen. Verbalisierungen, die keiner Kategorie zugewiesen werden konnten (z.B. Kommentare der Versuchsleitung), wurden nicht kodiert.

6.5 Auswertung und Interpretation der Daten

6.5.1 Die vier Phasen der Zeichnungsanalyse

Um Phasen der Analyseprozesse während der Interpretation von technischen Zeichnungen und dem Aufbau von Systemverständnis zu erkennen, wurden die Scanpath Videos inklusive der Audioaufnahmen aller Probanden betrachtet und qualitativ ausgewertet. Dabei ist eine generelle Vorgehensweise während der Zeichnungsanalyse bei fast allen Probanden aufgetreten. Dabei lassen sich vier Phasen unterscheiden:⁴⁰³

1. Identifizieren

Während der ersten Sekunden erkannten die Probanden, welche Art von System ihnen vorliegt. Diese Phase wurde oft mit einem Kommentar begleitet, z.B. „Ah, ein Getriebe“. Dabei betrachteten die Probanden während dieses kurzen Zeitraums nur einen kleinen Teil des Systems. Es lässt sich daraus schließen, dass auch Informationen im peripheren Sichtfeld während dieser Phase wahrgenommen werden.

2. Überblicken

Nach der Identifikation des Systems, verschafften sich die Versuchspersonen

⁴⁰¹ siehe Kapitel 5.1.3

⁴⁰² siehe Kapitel 4.3.2

⁴⁰³ Ruckpaul et al., 2015c

einen Überblick über die Zeichnung. Dabei stellten Sie fest, wie viele Wellen und Übersetzungsstufen im technischen System verbaut wurden.

3. *Analysieren*

Während dieser Phase begann die Analyse der Komponenten, welche zur Hauptfunktion des Getriebes beitragen. Dazu zählte die Lagerung der Wellen und die Übertragung und Übersetzung von Moment und Drehzahl durch die Zahnradpaarungen. Dabei folgten nicht alle Probanden dem Kraft- oder Momentenfluss. Diese Phase zeichnete sich durch hohe Fixationsdauern aus, die teilweise unterbrochen werden, um einzelne Komponenten zu suchen oder sich in der Schnittdarstellung zu orientieren.

4. *Überprüfen*

Während der letzten Phase der Zeichnungsanalyse überprüften die Versuchspersonen noch einmal die Zeichnung auf deren Hauptfunktion. Dabei suchten einige Probanden auch nach Nebenfunktionen oder speziellen Merkmalen des technischen Systems. Dazu gehörten z.B. die Gestaltung des Gehäuses oder das Schmierungs- und Dichtungskonzept. Die vierte Phase der Überprüfung konnte jedoch nicht bei allen Probanden festgestellt werden.

Die ersten beiden Phasen der Zeichnungsanalyse Identifizieren und Überblicken entsprechen dabei der Inkubationsphase von HAHNE⁴⁰⁴. Beide Phasen sind jeweils von kurzer Dauer, lassen sich aber durch die Think-Aloud Aufnahmen sehr gut unterscheiden. Analysieren und Überprüfen enthalten jeweils die Phasen Konzeption und Argumentation von HAHNE. Über die Think-Aloud Aufnahmen kann festgestellt werden, dass sich die Konzeption und Argumentation iterativ abwechselten. Aus diesem Grund wurden für das Phasenmodell zur Analyse technischer Zeichnungen in dieser Forschungsarbeit die Phase „Analysieren“ zur Analyse von Hauptfunktionen und die Phase „Überprüfen“ zur Überprüfung der Zeichnung nach weiteren Nebenfunktionen definiert, welche vorwiegend nacheinander ausgeführt wurden.

Um den Verlauf der Phasen überprüfen zu können, wurden wie oben genannt die Dauer der Fixationen über den Verlauf der Zeichnungsanalyse aufgetragen. Abbildung 6-4 zeigt exemplarisch zwei Verläufe der Fixationsdauern über die Betrachtung eines technischen Systems, links von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter des IPEK und auf der rechten Seite von einem Studierenden am KIT. Um die Fixationsdaten (in blau dargestellt) zu glätten wurde jeweils ein Polynom 6. Grades genutzt, welches den Wechsel der Phasen von hohen und niedrigen Fixationsdauern nach HAHNE am besten widerspiegelt.

⁴⁰⁴ Hahne, 2012, S. 49 ff.

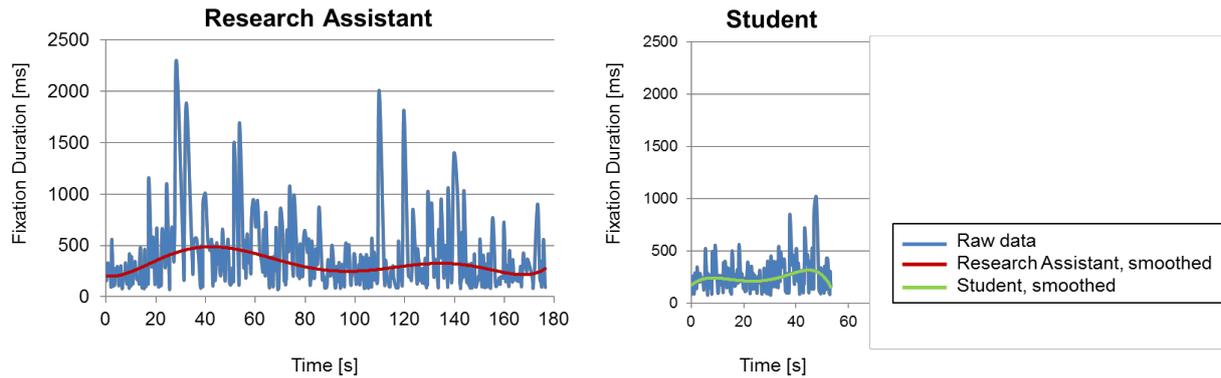


Abbildung 6-4: Verlauf der Fixationsdauern eines wissenschaftlichen Mitarbeiters (Proband ZA16, links) und eines Studierenden (Proband ZA09, rechts)⁴⁰⁵

Beim Vergleich der beiden Graphiken kann festgestellt werden, dass die Fixationsdauern des wissenschaftlichen Mitarbeiters im Mittel höher waren als die Fixationsdauern des Studenten. Zusätzlich ist die Abweichung der geglätteten Fixationsdauer (Polynom 6. Grades) vom Mittelwert bei dem wissenschaftlichen Mitarbeiter höher (+165 ms und -120 ms) als die Abweichung der Fixationsdauer des Studenten (± 75 ms)⁴⁰⁶. Dabei konnte der wissenschaftliche Mitarbeiter mehr der gestellten Fragen zum technischen System beantworten als der Studierende. Dies weist darauf hin, dass Phasen mit hoher Fixationsdauer für eine vertiefte Analyse und Interpretation der dargestellten Gestalt stehen können.

Es haben jedoch nicht alle Probanden einen Verlauf der Fixationsdauern wie von HAHNE⁴⁰⁷ angenommen. Es konnte bei der qualitativen Betrachtung der Daten auch nicht bestätigt werden, dass der Phasenwechsel nur zu einem Maximum oder Minimum des Fixationsverlaufs stattfindet. Jedoch änderte sich in den meisten Fällen bei einem Wechsel der Phasen auch der Verlauf der Fixationsdauer. Indikatoren für einen Phasenwechsel können hierbei neben dem Anstieg aus einem Minimum oder Abfall von einem Maximum der Ausgleichskurve auch ein Wendepunkt sein.

Mithilfe des Verlaufs der Ausgleichskurve können die Phasen der Zeichnungsanalyse schnell identifiziert werden. Die Phase des Analysierens lässt sich leicht durch eine Erhöhung der Fixationsdauern feststellen. Im Folgenden werden die Vorgehen während der Zeichnungsanalyse der beiden ausgewählten Probanden (ZA09 und ZA16) erläutert.

⁴⁰⁵ Ruckpaul et al., 2015c

⁴⁰⁶ vgl. Ausschlag der roten und grünen Linie in Abbildung 6-4

⁴⁰⁷ Hahne, 2012, S. 87 ff., siehe Abbildung 2-18

6.5.2 Beispiel zur Zeichnungsanalyse durch Probanden

Exemplarisch für die Vorgehensweisen während der Zeichnungsanalyse werden die Versuche der beiden oben aufgeführten Probanden näher beschrieben. Hierzu wird die Analyse der ersten Getriebedarstellung (Kegelrad-Stirnradgetriebes aus Abbildung 6-1) herangezogen und für die jeweilige Phase der Zeichnungsanalyse ein Scanpath erstellt. Bei den Probanden handelt es sich um einen Studierenden des 4. Semesters Maschinenbau am KIT (ZA09) und einen wissenschaftlichen Mitarbeiter des IPEK (ZA16), deren Verläufe der Fixationsdauern bereits in Abbildung 6-4 aufgezeigt wurden.

Wie in Abbildung 6-4 abzulesen, betrachtete der Studierende, Proband ZA09, das erste Getriebe nur 55 Sekunden, bevor er dem Versuchsleiter signalisierte, dass er das System verstanden hat. Er durchschritt dabei alle vier Phasen der Zeichnungsanalyse und konnte sein Vorgehen auch nach Abschluss des Versuchs erklären. Die phasenbezogenen Blickpfade sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Er startete mit der ersten Phase „Identifizieren“ (Sekunde 0 bis 3 des Scanpath-Videos) und kurzen Fixationsdauern. Auch die zweite Phase „Überblicken“ dauerte nur kurz (Sekunde 3 bis 7). Dabei stieg die Dauer der einzelnen Fixationen im Vergleich zur ersten Phase bereits an. Danach begann der Proband mit der Analyse der Hauptfunktion des Getriebes. Er kommentierte, dass er hierzu in drehende und stehende Komponenten unterteilt. Er folgte bei seiner Erklärung dem Kraftfluss bis zum Ausgang des Getriebes, welchen der Proband am unteren Ende der rechten Welle vermutet. Diese Phase dauert nur 22 Sekunden (Sekunde 7 bis 32) und zeichnet sich wider der Erwartungen durch kurze Fixationsdauern aus, welche vorwiegend unterhalb des Mittelwerts liegen. Eine vertiefte Interpretation der Gestalt ist nicht zu erkennen. Statt *Scrutinizing*-Phasen im Scanpath, überflog der Studierende die Getriebedarstellung und erfasste kaum Informationen. Danach kündigte der Proband an sich die Lagerungen und das Gehäuse noch einmal anzuschauen („Überprüfen“). Dabei betrachtete er die Lagerungen und das Gehäuse zwar durch längere Fixierungen, es sind jedoch ebenfalls keine *Scrutinizing*-Phasen im Blickpfad zu erkennen.

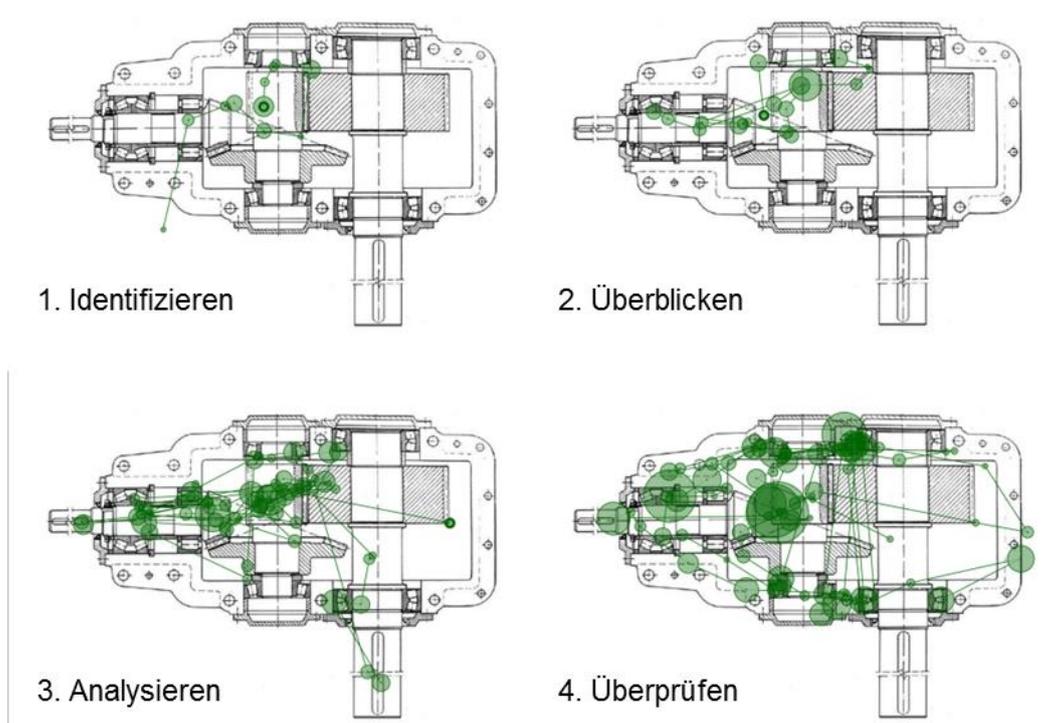


Abbildung 6-5: Scanpath eines Studierenden (ZA09) eingeteilt in die vier Phasen der Zeichnungsanalyse⁴⁰⁸

Zu den Fragen zum technischen System, die dem Probanden direkt nach der Betrachtung gestellt wurden, konnte er einige verbaute Lagertypen aufzählen, ohne deren Position genau wiederzugeben. Die Dichtung konnte der Proband nicht einschätzen und die Montage des Getriebes wurde erst nach einem Hinweis durch den Versuchsleiter richtig beschrieben. Er beantwortete zu beiden Getriebedarstellungen weniger Fragen als der Durchschnitt.

Als weiteres Beispiel wird das Vorgehen und der Scanpath eines wissenschaftlichen Mitarbeiters des IPEK vorgestellt (Abbildung 6-6). Wie bereits in Abbildung 6-4 (links) zu sehen, bearbeitet der Proband ZA16 die Aufgabenstellung bis zum Ausblenden der Zeichnung nach 180 Sekunden und somit wesentlich länger als der Studierende (ZA09). Auch dieser Proband durchlief alle vier Phasen der Zeichnungsanalyse. Nach 6 Sekunden ist die erste Phase der Identifizierung des technischen Systems mit der Aussage „Ok, das ist ein Getriebe.“ abgeschlossen. Wie auch Proband ZA09, fixiert der wissenschaftliche Mitarbeiter nur wenige Punkte auf der Zeichnung mit sehr kurzen Fixationsdauern. Dies lässt auf eine wichtige Rolle des peripheren Sichtfeldes während der ersten Phase schließen. Nach weiteren 12 Sekunden hat sich der Proband einen Überblick über das technische System verschafft. Dabei fixiert er vorwiegend die Übersetzungsstufen des Getriebes. Auch während der

⁴⁰⁸ Ruckpaul et al., 2015c

zweiten Phase waren die Fixationsdauern der Versuchsperson unterdurchschnittlich kurz.

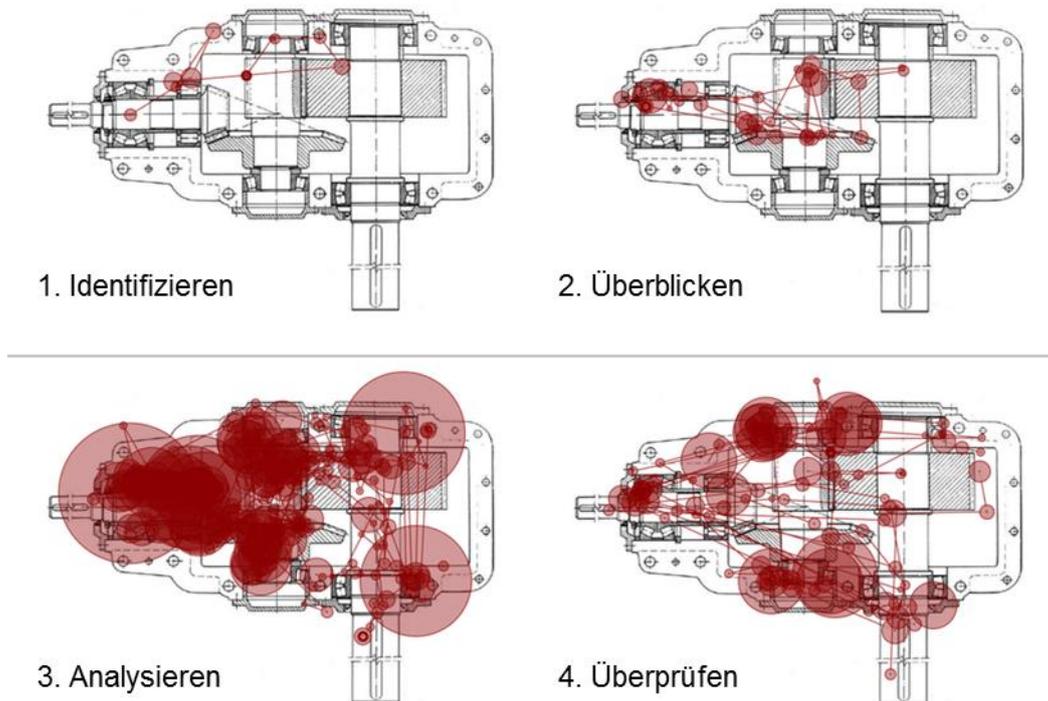


Abbildung 6-6: Scanpath eines wissenschaftlichen Mitarbeiters (ZA16) eingeteilt in die vier Phasen der Zeichnungsanalyse⁴⁰⁹

Der Schwerpunkt der Zeichnungsanalyse lag auf der dritten Phase, der Analyse der Hauptfunktionen. Er untersuchte 112 Sekunden lang den Kraftfluss im technischen System und folgte dem Fluss unter Annahme, dass die linke Welle die Eingangswelle ist. Dabei untersuchte er die Lagerungen der Wellen. Bei der Analyse einer für ihn untypischen Lageranordnung steigen die Fixationsdauern stark an, was sich auch im Scanpath widerspiegelt. Dabei wechseln sich *Scrutinizing* und *Skimming* Phasen ab, wenn er beispielsweise danach die Durchmesser der Wellen betrachtet. Der Verlauf der Fixationsdauern (Abbildung 6-4, links) spiegelt dabei den Grad der Komplexität während der Zeichnungsanalyse wider. Die letzte Phase der Überprüfung (Sekunde 130 - 180 des Scanpath-Videos) ist ebenfalls von langen Fixationen auf dem Gehäuse, Gehäusedeckel und den dort fehlenden Dichtungen gekennzeichnet. Zum Ende überprüft der Proband kurz die Übersetzungsverhältnisse der Getriebestufen, während dessen die Fixationsdauern wieder sinken.

Bei Betrachtung des Scanpath des Probanden kann erkannt werden, dass der wissenschaftliche Mitarbeiter jede Komponente des Getriebes mit seinem Blick erfasst hat. Zusätzlich hat der Proband oft weitere Interpretationen zur Funktion und

⁴⁰⁹ Ruckpaul et al., 2015c

zur Umsetzung der Gestalt getätigt. Er war in der Lage 90 % der im Anschluss gestellten Fragen zur ersten Getriebedarstellung zu beantworten. Auch das Vorgehen während der Analyse der zweiten 2D-Schnittdarstellung (Abbildung 6-2) war ähnlich. Aufgrund der intensiven Analyse konnte er 3 von 4 gestellte Fragen zum zweiten System richtig beantworten. Nur die Frage nach der Gehäusefertigung konnte er nicht beantworten, da er innerhalb der gegebenen Zeit das Gehäuse nicht betrachtete.

Bei dem Vergleich des Blickverhaltens der beiden Probanden fällt auf, dass sie meist die gleichen Komponenten betrachteten, jedoch unterschiedlich Informationen verarbeiteten. Vor allem die beiden Phasen „Analysieren“ und „Überprüfen“ unterscheiden sich sehr in der Länge und in der Tiefe der Informationsverarbeitung. Diese Unterschiede sollen im Folgenden unter Einbezug aller Probanden und Aufnahmen detailliert überprüft werden. Die vier Phasen der Zeichnungsanalyse konnten auch auf die Vorgehensweise der weiteren Probanden angewandt werden.

6.5.3 Breite und Tiefe der Analyse von Experten und Novizen

Bereits bei der Sichtung der Blickpfade weniger Probanden fällt auf, dass es wesentliche Unterschiede in der Breite und Tiefe der Zeichnungsanalyse gibt. Auf den Untersuchungen von CHI ET AL.⁴¹⁰ basiert die Hypothese, dass erfahrene Ingenieure während der Analyse technischer Zeichnungen die wahrgenommenen Informationen vertiefter verarbeiten als Studierende und sich ein tieferes Systemverständnis aufbauen. Als erfahrene Ingenieure zählen in dieser Studie alle Mitarbeiter des IPEK am KIT sowie die Entwicklungsingenieure und Konstrukteure aus der Industrie. Wie bereits erwähnt soll hierbei in der Breite und der Tiefe der Analyse und des aufgebauten Systemverständnisses unterschieden werden. Es wird erwartet, dass Ingenieure in der Breite sowie in der Tiefe der Analyse Studierenden überlegen sind.

Die Breite der Analyse wird über die Länge der Aufgabenbearbeitung quantifiziert, welche den Probanden nicht vorgegeben, jedoch auf maximal 180 Sekunden beschränkt wurde. Zwischen den beiden Gruppen der Studierenden und der Ingenieure konnte ein signifikanter Unterschied in der Länge der Zeichnungsanalyse festgestellt werden. Der Mittelwert der Bearbeitungslänge der Ingenieure beträgt für die erste Getriebezeichnung 90 Sekunden. Der Mittelwert der Studierenden beträgt dagegen nur 57,7 Sekunden. Zur Überprüfung der Nullhypothese (Es existiert kein Unterschied der Bearbeitungslängen von Ingenieuren und Studierenden.) wurde ein t-Test zur statistischen Auswertung durchgeführt. Dabei lag p-Wert für die

⁴¹⁰ Chi et al., 1981

Hypothesenüberprüfung unterhalb der Signifikanz-Grenze von 0,05. Die Nullhypothese kann somit verworfen werden.

Die Tiefe der Analyse wurde über die Art der verbalisierten Gedanken sowie die Länge der durchschnittlichen Fixationsdauern bestimmt, welche für eine intensivere Informationsverarbeitung stehen können. Dazu wurden die Think-Aloud Aufnahmen nach der Erstellung der Transkripte dem Kodierungsschema (Kapitel 6.3) zugewiesen. Da die Ingenieure, wie oben beschrieben, die Zeichnungen im Durchschnitt länger analysierten, verbalisierten sie auch mehr Sinneinheiten über längere Zeit. Aus diesem Grund wurde die Verteilung der Think-Aloud Daten auf die Kategorien des Kodierungsschemas zur statistischen Auswertung genutzt und in Tabelle 6-1 dargestellt. Dabei wurden die Verbalisierungen zu beiden Getriebedarstellungen einbezogen.

Tabelle 6-1: Relative Verteilung der verbalisierten Sinneinheiten über das Kodierungsschema

		Mittelwert der Verteilung [%]	Standard- abweichung der Verteilung [%]	p-Wert Levene- Test	p-Wert t-Test
Komponenten	Studierende	42,8	17,5	0,687	0,339
	Ingenieure	35,6	21,3		
Funktionen	Studierende	48,4	14,1	0,488	0,727
	Ingenieure	46,3	16,6		
Weitere Interpretationen	Studierende	4,6	5,0	0,072	0,006
	Ingenieure	13,3	9,0		
Nicht gezeigte Elemente	Studierende	2,2	3,1	0,226	0,247
	Ingenieure	4,3	5,2		
Fehler	Studierende	2,0	3,5	0,000	0,219 (Welch Test)
	Ingenieure	0,6	1,5		

Wie in der Tabelle abzulesen, nannten Studierende durchschnittlich mehr Komponenten als Ingenieure. Der Unterschied ist jedoch ohne statistische Signifikanz, da der p-Wert mit 0,339 oberhalb des Signifikanzniveaus liegt. Es wurde auch erwartet, dass Ingenieure mehr Funktionen nennen und mit diesen argumentieren. Dabei ist bereits der Mittelwert der prozentualen Verteilungen von Studierenden höher als der Mittelwert der Gruppe der Ingenieure. Die größte

Abweichung zeigte sich jedoch bei der Verbalisierung von weiteren Interpretationen. Ingenieure verknüpften fast dreimal so oft zusätzliches Wissen mit der wahrgenommenen Gestalt als Studierende, um die Systeme tiefer zu interpretieren. Der Unterschied der Think-Aloud Daten für diese Kategorie ist signifikant und bestätigt die Ergebnisse von CHI ET AL.⁴¹¹. Dabei macht die qualitative Analyse der Aussagen deutlich, dass diese Probanden nicht nur die geometrischen Abmaße der Gestalt wahrnehmen, sondern diese auch deuten und mit Funktionen in Zusammenhang bringen. Die Funktion steht nicht nur für den Zweck des Subsystems, z.B. Welle lagern, sondern ist auch mit der quantitativen Funktionserfüllung und Anforderungen verknüpft. Proband P22 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK und formuliert viele weitere Interpretationen: *„Ähm, ich habe aufwendige Lagerungen. Das heißt, da sind höchstwahrscheinlich höhere Kräfte am Wirken, sowohl Axial- als auch Biegekräfte. Das Gehäuse ist auch sehr dickwandig.“*

Weiter erwähnten die Gruppe der Ingenieure häufiger Komponenten und Elemente der technischen Systeme, welche die 2D-Darstellung nicht beinhaltete, und Studierende interpretierten die Gestalt öfter fehlerhaft oder trafen falsche Annahmen. Beide Unterschiede stellten sich jedoch als nicht signifikant dar.

Neben den Think-Aloud Daten wurden auch die Blickdaten für die Überprüfung der Hypothese genutzt, dass Ingenieure während der Zeichnungsanalyse Informationen vertiefter verarbeiten als Studierende. Nach DUCHOWSKI⁴¹² sind längere Fixationen ein Indikator für eine gesteigerte kognitive Aktivität. Da die Länge von Fixationen auch abhängig von den Probanden und auch dem Alter sein kann, wurde die Betrachtung der Hafenzeichnung zum Üben der Think-Aloud Methode als Referenz genutzt.

Tabelle 6-2 zeigt die Mittelwerte der Fixationsdauer der Probandengruppen, welche sich bei der Betrachtung des Referenzbildes nur wenig unterscheiden. Die Mittelwerte unterscheiden sich erst bei der Analyse der beiden Getriebedarstellungen. Das durchschnittliche Blickverhalten der Ingenieure zeichnet sich durch längere Fixationsdauern bei Betrachtung der beiden Getriebedarstellungen als bei der Betrachtung des Referenzbildes aus. Die mittlere Fixationsdauer der Gruppe der Studierenden sank bei der Betrachtung der ersten Getriebezeichnung im Vergleich zum Referenzbild. Erst während der Analyse des zweiten Getriebes ändert sich das Blickverhalten hin zu längeren Fixationsdauern. Im Vergleich mit den Ingenieuren sind die Fixationen der Studierenden auch bei der zweiten Getriebedarstellung kürzer. Es wird daher vermutet, dass sich die tiefere Informationsverarbeitung der Ingenieure durch weitere Interpretationen auch in der

⁴¹¹ Chi et al., 1981

⁴¹² Duchowski, 2007b, S. 173

längeren mittleren Fixationsdauer und somit einer höheren kognitiven Leistung auswirkt. Eine statistische Signifikanz lässt sich jedoch durch die hohen Werte der Standardabweichungen nicht bestimmen.

Tabelle 6-2: Vergleich der durchschnittlichen Fixationsdauer während der Zeichnungsanalyse

		Mittelwert der Fixationsdauer [ms]	Standardabweichung der Fixationsdauer [ms]	p-Wert Levene-Test	p-Wert t-Test
Referenzbild	Studierende	224,88	43,94	0,039	0,855
	Ingenieure	222,17	27,93		
Getriebe 1	Studierende	214,84	57,64	0,707	0,092
	Ingenieure	250,66	54,83		
Getriebe 2	Studierende	241,22	61,22	0,664	0,19
	Ingenieure	277,30	77,30		

Der Anstieg der Fixationsdauern von der ersten Getriebedarstellung zur zweiten Getriebedarstellung kann darin begründet sein, dass die Probanden erst nach der Betrachtung der ersten Getriebebezeichnung erfahren, dass Fragen zum technischen System gestellt werden. Dies war den Probanden vorher nicht mitgeteilt worden. Die Probanden erwarteten, dass der Versuchsleiter auch nach der zweiten Getriebebezeichnung Fragen stellen würde.

6.6 Diskussion der Studienergebnisse

Zur Untersuchung grundlegender Unterschiede zwischen erfahrenen Ingenieuren und Studierenden während der Analyse technischer Systeme zum Aufbau von Systemverständnis wurde eine Studie durchgeführt, innerhalb derer die Probanden zwei technische Systeme anhand von 2D-Schnittdarstellungen analysieren sollten. Die Aufgabenstellung wurde gewollt offengehalten, sodass die Versuchspersonen selbst entscheiden konnten, wann sie das System für verstanden hielten.

Es konnten vier Phasen der Zeichnungsanalyse identifiziert werden, die auf das Vorgehen von fast allen Probanden abgebildet werden konnten. Die letzte Phase der Überprüfung des Systems wurde nicht von allen Probanden durchlaufen. Bei dem Phasenmodell bleibt zu klären, ob dies auch für unbekannte und schwerer zu erschließende Systeme anwendbar ist. Bei solchen Systemen kann die Phase der Identifizierung möglicherweise wegfallen, um direkt mit einem Überblick und der anschließenden Analyse der Hauptfunktionen zu starten. Dies könnte in

anschließenden Forschungsarbeiten geklärt werden. Es ist jedoch naheliegend, dass während der Analyse von technischen Zeichnungen Phasen mit hoher Fixationsdauer für eine vertiefte Analyse und Interpretation der dargestellten Gestalt stehen können.

Bei der Untersuchung der Breite und Tiefe der Analyse zum Aufbau von Systemverständnis stellte sich heraus, dass erfahrene Ingenieure die technischen Systeme länger und tiefer analysieren. Dabei äußerten die Ingenieure signifikant mehr weitergehende Interpretationen als Studierende. Diese Interpretationen können nur durch die Einbeziehung von geometrischen, stofflichen und Zustandseigenschaften der Gestalt⁴¹³ und deren Ausprägungen geschehen. Die Gestalt muss nicht nur wahrgenommen, sondern auch mit Funktionen verknüpft und gedeutet werden. Dabei darf die Funktion nicht nur qualitativ interpretiert werden, z.B. „Energie wandeln“ als Zweck eines Systems. Auch die quantitativen Merkmale der Gestalt, z.B. die Abmessungen einer Welle, müssen interpretiert werden. Nur so kann ein tiefes Funktions- und Systemverständnis aufgebaut werden.

Die Gruppe der Ingenieure hatte signifikant öfter zusätzliches Wissen bei der Interpretation der Gestalt beider technischen Zeichnungen verknüpft als Studierende. Dabei stellt sich die Frage, ob diese weiteren Interpretationen nur auf erfahrungsbasiertem Wissen beruhen und ob es möglich ist, Studierende diese Art von Interpretationen zu lehren. So könnten Studierende schneller zu einer tieferen Analyse technischer Systeme und somit einem tieferen Aufbau eines Systemsverständnisses geleitet werden.

6.6.1 Vorschläge zum Vorgehen bei einer Analyse zum Aufbau von Systemverständnis

Aus den Erkenntnissen der Studie lassen sich folgende Vorgehen für die Analyse technischer Systeme zum Aufbau von Funktionsverständnis vorschlagen:

- Bei der Analyse einer Gestalt müssen geometrische und stoffliche Eigenschaften sowie Zustandseigenschaften berücksichtigt werden.⁴¹⁴
- Zum Aufbau von Funktions- und Systemverständnis müssen alle Eigenschaften einer Gestalt, geometrische, stoffliche sowie Zustandseigenschaften, in Betracht gezogen werden.

Die Bewusstmachung dieser beiden Punkte kann angehende und weniger erfahrene Ingenieure wesentlich bei der Analyse eines technischen Systems unterstützen. Beide Punkte sind bereits aus der Literatur bekannt, jedoch wurden sie während der

⁴¹³ vgl. Sperlich, 1993

⁴¹⁴ Definition der Gestalt nach Sperlich, 1993, siehe Kapitel 2.2.1

durchgeführten Studien vor allem von Studierenden nicht angewandt. Die Gestalt wurde von den angehenden Ingenieuren in der Studie meist als Zusammenbau einzelner Bauteile zu einem System gesehen. Wie genau die Bauteile und deren Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen aufgebaut waren und welche genauen Eigenschaften diese hatten, wurde von ihnen nicht näher analysiert. Ohne die Erfassung aller Eigenschaften kann nur ein Teil des Funktions- und somit auch Systemverständnisses gebildet werden.

7 Studie „Synthese-getriebenen Analyse“

Nach der Durchführung und Auswertung der oben beschriebenen Studie zur Untersuchung der grundlegenden Analyseprozesse von Ingenieuren wird im Folgenden eine zweite Studie zu den Vorgehensweisen während der Synthese-getriebenen Analyse⁴¹⁵ im Konstruktionsprozess erläutert. Zur Abbildung der Synthese-getriebenen Analyse wurde eine reale Problemlösungsaufgabe aus dem Alltag eines Konstruktionsingenieurs innerhalb einer kontrollierten Laborumgebung gestellt. Als Aufgabenstellung wählte man hierbei ein Problem durch Bauteilversagen im System. Damit wurde eine hohe empirische Relevanz erzielt. Gleichzeitig erhöhte sich jedoch der Aufwand für die Durchführung der Studie sowie die Aufbereitung und Auswertung der aufgenommenen Daten. Zusätzlich mussten Störfaktoren so stark wie möglich eingeschränkt werden. Die Durchführung der Studie geschah im Rahmen der eng betreuten Masterarbeit von M.Sc. Samuel RADER⁴¹⁶ und wichtige Erkenntnisse zum Studienaufbau und zu Auswertemöglichkeiten wurden von RUCKPAUL ET AL.⁴¹⁷ veröffentlicht.

7.1 Forschungsziel und Forschungsfragen

Die Studie zu Vorgehensweisen während der Synthese-getriebene Analyse ist eine Kombination aus Feld- und Laborstudie. Dabei bearbeiteten die Probanden eine reale Problemlösungsaufgabe aus dem täglichen Umfeld der Konstruktion innerhalb einer kontrollierten Laborumgebung. Somit können die Analysetätigkeiten während des Problemlösungsprozesses untersucht werden. Die Studie bezweckte daher die Beantwortung von Forschungsfragen zur Vorgehensweise bei der Analyse und Erkennung von Problemen sowie zum Zusammenhang zwischen der Problemerkennung und der Lösung des Problems. Die in diesem Kapitel formulierten spezifischen Forschungsfragen dienen zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfragen aus Kapitel 4.1.

Zunächst wurde untersucht, ob Erfahrungen im Bereich Produktentwicklung und Konstruktion sich positiv auf die Analyse von Problemen auswirken. Als Merkmal für eine erfolgreiche Analyse wurde das richtige Erkennen des Problems genutzt. Hieraus ergab sich die erste Forschungsfrage, welche zur Beantwortung der

⁴¹⁵ Siehe Kapitel 5.3.3

⁴¹⁶ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

⁴¹⁷ Ruckpaul et al., 2014a

Forschungsfrage 2.3 nach Unterschieden in der Analyse bei verschiedenen Erfahrungen aus Kapitel 4.1 dient.

Forschungsfrage 1 zur Synthese-getriebenen Analyse

Gibt es Unterschiede in der Problemerkennung von Probanden mit Erfahrung im Bereich Produktentwicklung und Konstruktion und Probanden mit wenig Erfahrung in diesem Bereich?

Die zweite Forschungsfrage behandelt den Zusammenhang zwischen einer erfolgreichen Problemerkennung und sehr guten Lösungsvorschlägen. Dabei galt es herauszufinden, ob detailliertes Wissen über das Problem durch eine erfolgreiche Analyse zu besseren Lösungsvorschlägen führt als geringe Kenntnisse über das vorliegende Problem.

Forschungsfrage 2 zur Synthese-getriebenen Analyse

Wirkt sich das richtige Erkennen der Problemsituation positiv auf vorgeschlagene Lösungen aus?

Weiter war von Interesse, wie sich die Blickpfade von Probanden in Abhängigkeit der Problemanalyse unterscheiden. Dies kann sich in langen Fixationen auf Bauteilen äußern, welche besonders relevant für die Problemstellung und das Bauteilversagen sind. Daher lautet die dritte Forschungsfrage:

Forschungsfrage 3 zur Synthese-getriebenen Analyse

Fixieren Probanden, die das Problem erfolgreich erkennen, besonders lange Bauteile, die relevant für das Bauteilversagen sind?

Beide Forschungsfragen 2 und 3 zur Synthese-getriebenen Analyse dienen der Beantwortung der Forschungsfrage 2.4 nach begünstigenden Vorgehensweisen und Faktoren für die Analyse aus Kapitel 4.1.

7.2 Aufgabenstellung und Erhebungsmethoden

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellung präsentiert, welche den Studienteilnehmern gestellt wird, und die genutzten Erhebungsmethoden diskutiert, welche zur Aufnahme der Vorgehensweisen der Probanden und zur Beantwortung der Forschungsfragen notwendig sind. Eine besondere Herausforderung bei Abbildung der Synthese-getriebenen Analyse in einer Studie war die Aufbereitung der Aufgabe inklusive der Bereitstellung von Materialien. Die Wahl der Erhebungsmethoden bestimmt maßgeblich den Aufwand der Datenaufbereitung und die Auswertemöglichkeiten. Dabei durfte die Erhebung der Blickdaten nicht die Vorgehensweisen und Handlungen der Probanden einschränken.

7.2.1 Festlegung der Aufgabenstellung und der Materialien

Für die Abbildung der Synthese-getriebene Analyse in einer Laborumgebung wird eine reale Problemstellung zur Bearbeitung durch die Probanden genutzt. Die Problemstellung muss aufbereitet werden, sodass es den Versuchsteilnehmern möglich sein muss, die Aufgabe in einer begrenzten Zeitspanne und mit den zur Verfügung gestellten Materialien lösen zu können. Die Bearbeitungszeit soll auf 20 Minuten begrenzt werden, um ein möglichst hohe Konzentration der Probanden über die gesamte Aufgabenbearbeitung zu erreichen. Bei einer längeren Bearbeitungszeit wird befürchtet, dass es zu einem Konzentrationsabfall und dadurch zu einer Änderung des Blickverhaltens kommt. Weiter muss die Aufgabe eindeutig formuliert werden, damit sie von allen Probanden in gleicher Weise verstanden wird.

Kontext

Als Problemstellung wird ein Industriebeispiel aus der Entwicklung eines Bolzensetzgeräts genutzt und beruht auf einer realen Aufgabenstellung aus dem damaligen Konstruktionsalltag von Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen bei einem Hersteller von handgehaltenen Geräten. Dabei wurde eine Gerätevariante während des Entwicklungsprozesses in Handtests einem Lebensdauertest unterzogen. Dabei versagte der Prototyp zu früh, da der Bruch eines sicherheitsrelevanten Bauteils in dem Dauertest zu einem Ausfall des gesamten Systems führte. In einer neuen Gerätevariante soll das System angepasst werden, um das frühzeitige Bauteilversagen zu vermeiden. Da dies eine nicht vorhersehbare Iteration im Entwicklungsprozess darstellte, waren der Zeit- und der Kostendruck zur Umsetzung einer neuen Variante sehr hoch. Gleichzeitig musste ein Lösungsvorschlag eine hohe Erfolgssicherheit und gute Validierungsmöglichkeit aufweisen, um umgesetzt werden zu können.

Bei dem Produkt handelt es sich um ein Bolzensetzgerät, oder auch Direktbefestigungsgerät genannt. Diese Geräte werden in der Bauindustrie zur Befestigung von Elementen an einer Trägerstruktur mittels Nägeln in nur einem Arbeitsschritt angewendet. Die Materialien der Trägerstrukturen können je nach Geräteklasse von Beton bis zu Stahl reichen. Das Produkt aus dem vorgestellten Industriebeispiel wird unter anderem für das Befestigen von Kassettenblech auf Stahlträgern angewendet. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt. Durch Zünden einer Pulverpatrone in einer Brennkammer wird die Expansionsenergie für die Beschleunigung eines Kolbens verwendet. Der Kolben wird geführt und beschleunigt wiederum einen Nagel, welcher dadurch in den Untergrund, beispielsweise ein Stahlblech, eingetrieben wird. Die Nägel werden in einem Kunststoffstreifen positioniert und in das Magazin eingelegt. Eine Feder im Magazin sorgt für die Nachführung nach einem erfolgten Setzvorgang.

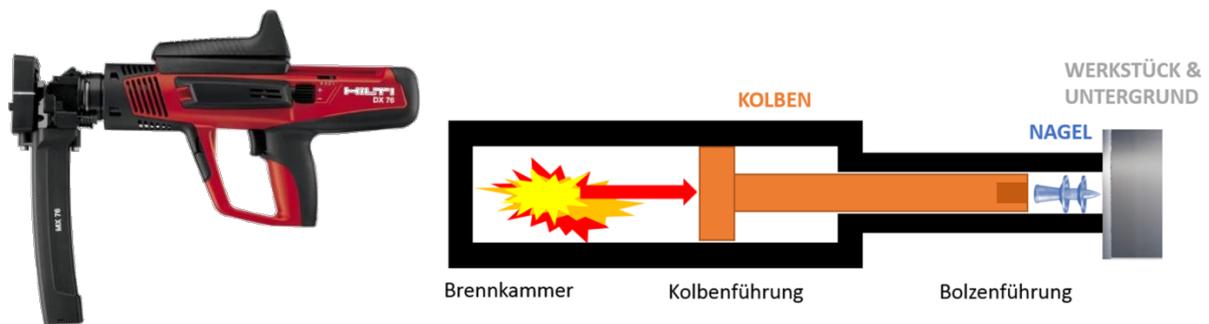


Abbildung 7-1: Beispielhaftes Direktbefestigungsgerät (links) und Funktionsprinzip des Geräts (rechts)⁴¹⁸

Um die Sicherheit für den Anwender und seiner Umwelt zu gewährleisten, verhindern mehrere Sicherheitsmechanismen ein ungewolltes Auslösen des Setzvorgangs. Zwei dieser Sicherheitsmechanismen sind die Detektion des Untergrunds und die Detektion der richtigen Nagelposition. Der Anwender muss das Gerät auf einem festen Untergrund ansetzen und gleichzeitig müssen die Nägel koaxial zur Bolzenführung positioniert sein. Wenn beide Bedingungen erfüllt sind, ist es möglich, das Gerät über einen gewisse Weg am Untergrund anzupressen und den Trigger des Geräts freizugeben (siehe Abbildung 7-2). Die Mechanismen sind in der Bolzenführung positioniert, einem gefrästen Bauteil.



Abbildung 7-2: Sicherheitsmechanismus über das Anpressen des Geräts an den Untergrund⁴¹⁹

Der Untergrund wird über einen Stift detektiert, welcher in der Bolzenführung geführt wird (Untergrunddetektion in Abbildung 7-3). Bei Anlegen des Geräts an den Untergrund gibt der Stift einen weiteren Bolzen (Anpressbolzen in Abbildung 7-3) in seiner Bewegung frei und ermöglicht das Anpressen des Geräts. Während des Anpressens wird dieser Bolzen in die Bolzenführung gedrückt. Ohne Untergrund

⁴¹⁸ Direktbefestigungsgerät DX 76 der Firma Hilti (Bildquelle: www.hilti.de) und Funktionsprinzip aus Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

⁴¹⁹ Rader, 2014, S. 25 (betreute Abschlussarbeit)

blockiert der Anpressbolzen und verhindert das Stauchen des Geräts und somit das Auslösen eines Setzvorgangs. Die Position der Nägel wird über ein gestanztes Blech abgetastet (Nageldetektion in Abbildung 7-3). Dieses Blech blockiert bei falscher Positionierung der Nägel ebenfalls den Anpressbolzen und verhindert die Kollision des Kolbens mit einem schräg im Gerät liegenden Nagels. Im Folgenden wird dieses Blech auch Nageldetektion genannt.

Abbildung 7-3 zeigt einen Schnitt durch die Bolzenführung auf der Ebene des Detektionsblechs. Die Nageldetektion ist an ihrem oberen Ende über einen Stift gelagert und kann sich um diese Achse drehen. Eine Feder spannt die Nageldetektion vor, sodass diese gegen die Nägel drückt. Diese sind in festen Abständen in einem Kunststoffstreifen positioniert und werden nach jedem Setzvorgang über das Magazin nachgeführt.

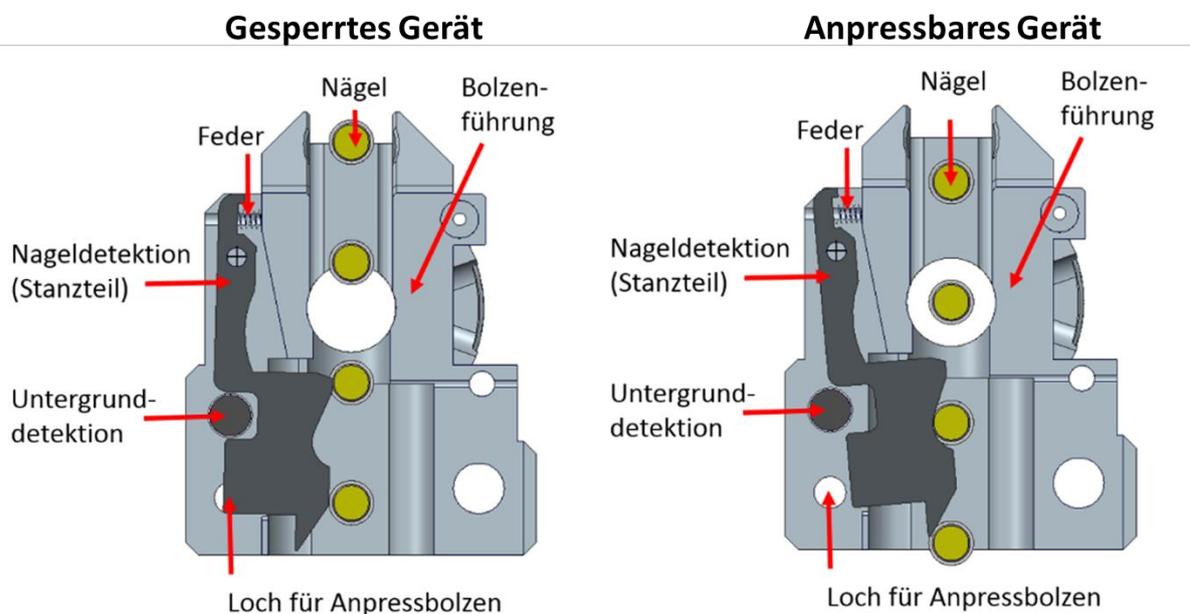


Abbildung 7-3: Position der Nageldetektion bei falsch positioniertem Nagel (links) und bei richtig positioniertem Nagel mit freigegebener Öffnung für Anpressbolzen (rechts)⁴²⁰

Wenn der Nagel nicht koaxial zur Öffnung in der Bolzenführung positioniert ist (linke Abbildung) wird das Detektionsblech gegen die Feder nach außen gedrückt. Dabei verdeckt es die Aussparung für den Anpressbolzen. Ein Anpressen des Bolzensetzgeräts ist nicht möglich und ein Setzvorgang kann nicht ausgelöst werden. Ist der zu setzende Nagel richtig positioniert (rechte Abbildung), liegt die Nageldetektion am darunter liegenden Nagel an und gibt die Öffnung für den Anpressbolzen frei. Das Setzen des Nagels kann erfolgen.

⁴²⁰ Rader, 2014, S. 26 (betreute Abschlussarbeit)

Problemstellung

Durch das Zünden der Kartusche wirkt die Expansionsenergie nicht nur auf den beschleunigten Kolben, sondern auf die gesamte Brennkammer (Abbildung 7-1). Dadurch entsteht ein starker Rückstoß des Geräts, der nicht nur von dem Anwender aufgenommen werden muss, sondern auch auf alle verbauten Komponenten wirkt. Die Nageldetektion ist in der Bolzenführung geführt, sodass nur die Schwenkbewegung ermöglicht wird. Die Bolzenführung besitzt eine Aussparung an der Unterseite zur Befestigung des Magazins und zur Führung des Nagelstreifens. In diesem Bereich ist das Blech nicht geführt und die Nageldetektion kann frei schwingen.

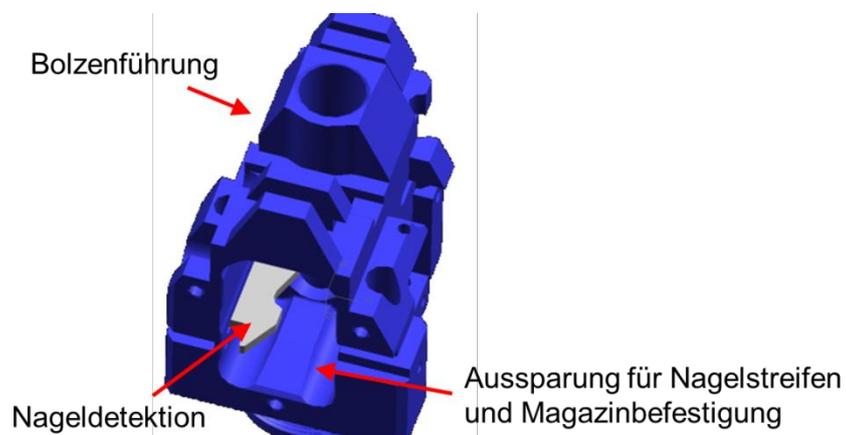


Abbildung 7-4: Einbausituation der Nageldetektion⁴²¹

Durch die Stoßbelastung bei jedem Setzvorgang kam es bei der prototypischen Gerätevariante in Handtest während des Entwicklungsprozesses nach ca. 6000 Setzungen zum Bruch der Nageldetektion und somit zum Ausfall des Gesamtgeräts. An dem Originalbauteil in Abbildung 7-5 sind die Verschleißspuren zu erkennen, die exakt mit der Kante der Aussparung in der Bolzenführung übereinstimmen. Sie entstanden durch den Schwingungskontakt an dieser Kante. Da die Kante direkt über den kleinsten Querschnitt der Nageldetektion läuft, erfährt das Blech an dieser Stelle bei jeder Stoßbelastung eine hohe Biegelast. Die Nageldetektion bricht daher am Übergang von dem in der Bolzenführung geführten zu dem nicht geführten Teil.

⁴²¹ Bildquelle: Hilti AG

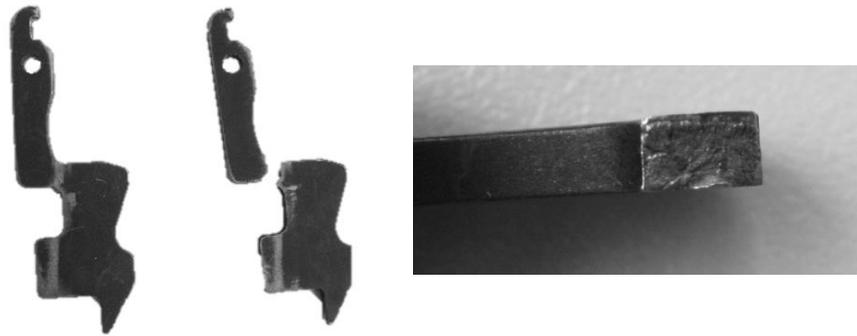


Abbildung 7-5: Originalbauteile der Nageldetektion mit Verschleißspuren (links) und gebrochen (Mitte) sowie eine Detailaufnahme der Bruchstelle (rechts)

Die Aufgabe in dem Entwicklungsprozess war die Anpassung des Systems, um längere Laufzeiten und weniger Ausfälle aufgrund des Bruchs der Nageldetektion zu erreichen. Dabei musste die Lösung mit möglichst geringem Zeitaufwand, geringen Werkzeugänderungen umgesetzt werden können und eine hohe Chance bieten, das Problem nachhaltig zu lösen. Erzielt wurde dies von dem Entwicklungsteam durch Änderung der Bolzenführung. Da die Bolzenführung ein gefrästes Bauteil ist, konnte dieses ohne großen Zeit- und vor allem Kostenaufwand geändert werden. Die Aussparung zur Befestigung des Magazins und zur Führung des Nagelstreifens lässt Spielraum zur Änderung der Aussparungsgeometrie. Damit kann die Kante, um welche die Nageldetektion gebogen wird, nach innen versetzt werden. So ist der frei schwingende Teil des Blechs geringer und die Kante verläuft nicht durch den kleinsten Querschnitt der Nageldetektion. Mit dieser Anpassungskonstruktion konnten längere Standzeiten des Detektionsblechs erreicht werden.

Aufgabenstellung und Materialien

Auch bei der Studie zur Untersuchung der Vorgehensweise zur Synthese-getriebenen Analyse ist die Umsetzung der Anforderungen an empirische Studien von hoher Relevanz.⁴²² Die Aufgabe soll eine hohe empirische Relevanz aufweisen und gleichzeitig darf die Konzentrationsspanne der Probanden nicht überschritten werden, um die Reliabilität zu gewährleisten. Zusätzlich muss die Aufgabenstellung selbsterklärend und unmissverständlich beschrieben sein. So sollen die Probanden möglichst keine Rückfragen benötigen, um die Aufgabe zu verstehen, und keine Fehlinterpretationen möglich sein. In RUCKPAUL ET AL.⁴²³ wurde an einem Beispiel die Aufbereitung einer Aufgabe zur Abbildung der Synthese-getriebenen Analyse veröffentlicht. Dazu wurden den Probanden unterschiedliche Arten von Hilfsmitteln, unter anderem technische Zeichnungen und reale Baugruppen, zur Verfügung gestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf diese Studie übertragen.

⁴²² Siehe Kapitel 5.3.1

⁴²³ Ruckpaul et al., 2014a

Die Aufgabe der Probanden ist ebenfalls die Anpassungskonstruktion des Systems, um eine höhere Anzahl der Setzvorgänge vor dem Bruch der Nageldetektion zu erreichen. Um diese bearbeiten zu können, wurden den Probanden möglichst alle Materialien zur Verfügung gestellt, die auch im Entwicklungsprozess verfügbar wären. Folgende Hilfsmittel wurden für die Bearbeitung der Aufgabe bereitgestellt:

- PowerPoint-Präsentation zur Darstellung des Kontexts
- Aufgabenblatt + Hinweis zur Aufgabe
- Technische Zeichnungen
- Originalteile der Nageldetektion (mit Verschleißspuren und gebrochen)
- Original-Baugruppe des Magazins und der Bolzenführung inkl. eines Nagelstreifens
- Plot eines 3D-Modells
- Zeichen- und Schreibmaterialien

Zur Einbettung der Aufgabenstellung in den Kontext wurde eine *PowerPoint-Präsentation* mit eingebetteten Videos genutzt (siehe Anhang C). Sie zeigte Videoaufnahmen des Anwendungsbereichs sowie eine High-Speed-Aufnahme eines Setzvorgangs, die den Rückstoß und die Auswirkung des Stoßes auf die verbauten Komponenten verdeutlicht. Weiter wird auf den Folien der Setzvorgang, die Nagelförderung und die Sicherheitsmechanismen mit Untergrunddetektion, Anpressbolzen und Nageldetektion im Detail erklärt. Die Probanden können eigenständig durch die Präsentation navigieren.

Die Aufgabenstellung wurde nicht in der Präsentation integriert, sondern auf einem extra *Aufgabenblatt* schriftlich formuliert. Das Aufgabenblatt wurde ebenfalls zur Auflistung der Hilfsmittel genutzt, die den Versuchsteilnehmern zur Verfügung standen. Nach einer Vorstudie mit 4 Teilnehmern zeigte sich, dass der Grund des Versagens – der hohe Rückstoß – ohne zusätzlichen Hinweis nur schwer wahrgenommen wird. Daher wurde den Studienteilnehmer auf einem gesonderten Zettel der *Hinweis* gegeben, dass die Nageldetektion aufgrund des Rückstoßes bei jedem Setzvorgang belastet wird und dadurch bricht.

Technische Zeichnungen sind gängige Hilfsmittel für Ingenieure zur Repräsentation von technischen Systemen und dem Transport von Informationen. Sie haben sich auch in den Vorstudien als sehr hilfreich zur Interpretation der Daten erwiesen. Daher werden auch in dieser Studie *technische Zeichnungen* als Hilfsmittel verwendet. Es wurden zwei Zeichnungen angefertigt. Die erste Zeichnung zeigt die Baugruppe der Bolzenführung mit Nageldetektion aus verschiedenen Ansichten, um die Einbau- und Umgebungssituation zu visualisieren. Die zweite Zeichnung stellt die

Schnittdarstellung derselben Baugruppe auf Ebene der Nageldetektion dar und zeigt die beiden möglichen Stellungen des Detektionsblechs (ähnlich Abbildung 7-3). Die beiden technischen Zeichnungen sowie die Erklärung der PowerPoint-Präsentation und das Aufgabenblatt können in Anhang B eingesehen werden.

Neben den technischen Zeichnungen wurden auch möglichst viele Materialien zum Anfassen bereitgestellt. Dazu zählen die *Originalteile der Nageldetektion*, sowie die *Baugruppe der Bolzenführung inklusive dem Magazin mit eingelegtem Nagelstreifen* (siehe Abbildung 7-6). Die Baugruppe kann manipuliert werden und der Sicherheitsmechanismus der Nageldetektion durch Blockieren des Anpressbolzens ausprobiert werden. Da die Baugruppe im Rahmen der Studie nicht weiter demontierbar ist, wurde ein *3D-Plot der Baugruppe Bolzenführung* mit den Bauteilen Bolzenführung, Untergrunddetektion, Nageldetektion, Feder der Nageldetektion und Nagelstreifen im Maßstab 1,5:1 erstellt. Das Modell lässt sich auf Ebene der Nageldetektion teilen. So können die Versuchsteilnehmer das Modell öffnen und den Mechanismus der Nageldetektion im Detail analysieren.

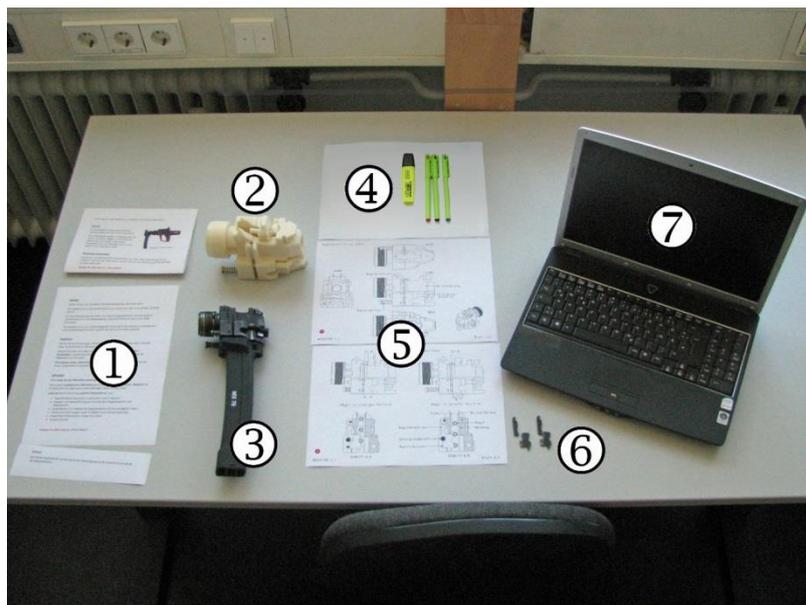


Abbildung 7-6: Originalteile der Nageldetektion (links), Baugruppe des Magazins und der Bolzenführung mit Nagelstreifen (Mitte) und ein gedrucktes 3D-Modell (rechts)⁴²⁴

Auf die Bereitstellung eines 3D-CAD-Modells wurde zur Einhaltung der Bearbeitungszeit verzichtet. In vorherigen Teststudien wurde festgestellt, dass die Navigation durch ein 3D-CAD-Programm und das Anlegen einer Schnittebene zu viel Zeit in Anspruch nimmt.

Weiter wurden den Probanden *Zeichen- und Schreibmaterialien* zur Verfügung gestellt, um Notizen und Lösungen festhalten zu können. Die Teilnehmer durften aber auch Lösungen in den technischen Zeichnungen festhalten. Eine beispielhafte Anordnung aller Hilfsmittel ist in Abbildung 7-7 zu sehen.

⁴²⁴ Rader, 2014, S. 34 (betreute Abschlussarbeit)



HILFSMITTEL

- 1: Kontext, Aufgabe & Hinweis
- 2: 3D-Modell
- 3: Magazin mit Nagelstreifen
- 4: Zeichenmaterialien
- 5: Technische Zeichnungen
- 6: Originalteil (gebrochen & benutzt)
- 7: Laptop mit PP-Präsentation

Abbildung 7-7: Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel⁴²⁵

7.2.2 Wahl der Erhebungsmethoden

Als wichtigste Parameter wurden auch in dieser Studie, die Blickdaten sowie die verbalisierten Gedanken aufgezeichnet. Für die Aufnahme der Blickdaten wurden die Eye Tracking Glasses 1.0 der Firma SMI⁴²⁶ verwendet. Da unterschiedliche Arten von Hilfsmitteln bereitgestellt wurden, welche auch von den Probanden manipuliert werden konnten, bot sich die Nutzung des *head-mounted system* an. Die Eye Tracking Aufnahme wurde über die Software *iView ETG 1.2* gesteuert. Jedem Versuchsteilnehmer wurde bei Start des Versuchs eine eindeutige Nummer zugewiesen und dokumentiert.

Die Eye Tracking Brille ermöglicht freie Kopfbewegungen und nimmt zuverlässig das Blickfeld der Probanden auf. Durch die individuellen Bewegungen der Versuchsteilnehmer müssen die Daten für einen Vergleich der Vorgehensweisen zunächst aufbereitet werden.⁴²⁷ Durch *semantic gaze mapping* können die Blickdaten einer Referenzansicht zugeordnet werden. Danach können auch statistische Auswertungen unter Einsatz von AOIs erfolgen. Die Datenaufbereitung mit *Semantic Gaze Mapping* ist ein sehr zeitintensiver Schritt. Er lässt sich jedoch bei Einsatz der Eye Tracking Brille nicht vermeiden. Ein Verzicht auf die Nutzung der Eye Tracking Brille würde einen großen Einschnitt in die empirische Relevanz der Studie bedeuten.

⁴²⁵ Rader, 2014, S. 34 (betreute Abschlussarbeit)

⁴²⁶ Siehe Kapitel 4.3.1

⁴²⁷ Siehe Kapitel 5.1.2

Zusätzlich zur Aufnahme der Augenbewegungen mittels der Eye Tracking Brille kam eine Videokamera zum Einsatz. Die Kamera zeichnete die Gestik und Mimik der Probanden sowie deren Arbeitsumgebung auf. Alle Bewegungen und Aktivitäten der Versuchsteilnehmer wurden somit erfasst. Darin eingeschlossen waren auch Bewegungen, die außerhalb des Blickfelds und somit außerhalb der Szenenkamera der Eye Tracking Brille stattfanden.

Um die Vorgehensweisen während der Synthese-getriebenen Analyse untersuchen zu können, wurde auch in dieser Studie die Think-Aloud Methode zur Verbalisierung der Gedanken eingesetzt. Das *Concurrent Think-Aloud (CTA)* war auch hier die geeignete Wahl. Um das Problem zu analysieren und erkennen zu können, mussten die Versuchsteilnehmer Gestalt-Funktion-Zusammenhänge herstellen, welche sich am besten mittels *CTA* ausdecken lassen.⁴²⁸ Die Verbalisierungen wurden über das eingebaute Mikrofon der Eye Tracking Brille sowie das Mikrofon der Videokamera aufgenommen. Das Mikrofon der Brille hatte jedoch durch die Nähe zum Mund der Probanden den großen Vorteil, dass auch sehr leise Aussagen bzw. Flüstern größtenteils verständlich aufgenommen wurden. Die *CTA*-Daten wurden im Nachgang zur Dokumentation transkribiert.

Wie von ERICSSON UND SIMON⁴²⁹ empfohlen, wurden zu Beginn des Versuch zwei Übungen mit den Probanden zur Einführung in *CTA* durchgeführt. Zunächst sollten die Probanden mit einem gedanklichen Gang durch ihre Wohnung oder Haus die Anzahl der Fenster zählen. Danach wurde ihnen eine Rechenaufgabe gestellt, welche durch Kopfrechnen gelöst werden musste. Bei Problemen mit der Think-Aloud Methode half der Versuchsleiter den Teilnehmern mit Hinweisen.

Mittels eines Fragebogens wurden die Personendaten der Versuchsteilnehmer und deren Erfahrungen in unterschiedlichen Bereichen im Nachgang des Versuchs aufgenommen. Der Fragebogen wurde gemeinsam mit dem Versuchsleiter ausgefüllt. Abgefragt wurden die Länge der Berufserfahrung bzw. die Semesteranzahl bei Studierenden sowie Erfahrungen in den Bereichen „Entwicklung und Konstruktion“, „Theoretischer Maschinenbau“, „Leichtbau und Werkstoffauswahl“ und „Fertigungstechnik“. Die Erfahrungen wurden auf einer Skala von 1 (Grundkenntnisse) bis 5 (langjährige Erfahrung) eingeordnet. Neben den Erfahrungen in Fachbereichen wurden auch weitere Kompetenzbereiche abgefragt: Erfahrung im Bereich der Entwicklungsmethodik, Erfahrung mit CAD-Programmen, Kenntnisse über Bolzensetzgeräte und Erfahrung bei der Analyse defekter Bauteile.

⁴²⁸ Siehe Kapitel 5.2.1 sowie 6.2.2

⁴²⁹ Ericsson / Simon, 1993

Die Erfahrungen und Kenntnisse wurden ebenfalls in eine Skala von 1 (unerfahren) bis 5 (sehr erfahren) eingeordnet.⁴³⁰

Der Fragebogen enthielt weitere Fragen zu Personenmerkmalen (Alter, Geschlecht, Sehstärke usw.) und Fragen zur Lösung der gestellten Aufgabe. Die Probanden wurden gefragt, ob sie die Kraft einzeichnen können, die zum Versagen der Nageldetektion führt, und woher diese Kraft rührt. Diese Frage konnte die Beurteilung unterstützen, ob der Proband das Problem richtig erkannt hat.

7.2.3 Wahl der Probandengruppen

Als Probandengruppen wurden Studierende des KITs, wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK und erfahrene Ingenieure aus der Industrie gewählt. So konnten die Vorgehensweisen von angehenden und erfahrenen Ingenieuren verglichen werden. Insgesamt nahmen 17 Probanden an der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse teil:

- 4 Studierende des Maschinenbaus am KIT aus unterschiedlichen Semestern
- 5 wissenschaftliche Mitarbeiter am KIT mit bis zu 5 Jahren Berufserfahrung
- 8 Entwicklungsingenieure/Konstrukteure mit Tätigkeit und Berufserfahrung (5 bis 35 Jahre) in der Industrie

Eine detaillierte Übersicht der teilnehmenden Probanden zeigt Tabelle 7-1. Alle Probanden sind männlich. Einer der wissenschaftlichen Mitarbeiter am KIT ist im Bereich Robotik beschäftigt (SgA05), ein weiterer wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Simulation (SgA07). Die weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiter sind alle am IPEK angestellt und im Bereich der Produktentwicklung und Konstruktion tätig. Zur Teilnahme wurden Studierende unterschiedlicher Semester eingeladen, so ergab sich die Spanne der Studienerfahrung von 2 bis 8 Semester. Die Entwicklungsingenieure und Konstrukteure waren zum Zeitpunkt der Studie alle bei der Firma Hilti angestellt. Keiner dieser Probandengruppe hat vorher mit Bolzensetzgeräten gearbeitet oder tiefere Erfahrungen im Umgang mit dem System. Die letzte Spalte in Tabelle 7-1 gibt an, ob der Proband das Problem im Versuch erkannt hat, oder nicht. Weitere Erklärungen dazu erfolgen in den folgenden Unterkapiteln.

⁴³⁰ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit). Der Fragebogen zur Erfassung der Erfahrungswerte kann in Anhang C eingesehen werden.

Tabelle 7-1: Übersicht der teilnehmenden Probanden⁴³¹

Versuchsperson	Tätigkeit	Berufserfahrung	Problem erkannt?
SgA05 ⁴³²	Doktorand (Robotik)	0,5 Jahre	Nein
SgA06	Student (8. Semester)	-	Nein
SgA07	Doktorand (Simulation)	2,5 Jahre	Nein
SgA08	Student (8. Semester)	-	Nein
SgA09	Doktorand (IPEK)	2,5 Jahre	Ja
SgA10	Doktorand (IPEK)	2 Jahre	Ja
SgA11	Student (6. Semester)	-	Nein
SgA12	Student (2. Semester)	-	Nein
SgA13	Doktorand (IPEK)	1,5 Jahre	Ja
SgA14	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	17 Jahre	Ja
SgA15	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	35 Jahre	Nein
SgA16	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	11 Jahre	Nein
SgA17	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	27 Jahre	Ja
SgA18	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	20 Jahre	Ja
SgA19	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	34 Jahre	Ja
SgA20	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	5 Jahre	Ja
SgA21	Entwicklungsing./Konstr. (Hilti)	6 Jahre	Nein

7.2.4 Festlegung des Ablaufplans

Um eine hohe Objektivität zu erreichen, wurde ein detaillierter Ablaufplan der Versuche erstellt. Ein Ausschnitt davon zeigt Abbildung 7-8. Der gesamte Ablaufplan kann in Anhang E eingesehen werden. Die roten Zeilen sind Aktionen, die sich auf die Anwendung der Eye Tracking Technologie richten. Die Blau markierten Zeilen

⁴³¹ vgl. Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

⁴³² SgA kürzt hierbei „Synthese-getriebene Analyse“ ab, um die Probandennummerierung der beiden durchgeführten Studien klar voneinander zu trennen. Die Probanden der Studie zur Zeichnungsanalyse werden in Kapitel 6 mit ZA abgekürzt.

kennzeichnen Aussagen, Fragen und Aufforderungen, die direkt an den Probanden gerichtet wurden.

1. Raum richten
 - a. BeGaze-Brillen-Koffer, Hilfsmittel-Koffer, Tablett, Probanden-Laptop, Schreibmaterialien und Blätter (2xTZ, Kontext, Aufgabe, Hinweis, Fragebogen) holen
 - b. Außenkamera holen und seitlich platzieren, Kabel prüfen
 - c. Probanden-Laptop richten und starten (Kalibrierungsfolie)
 - d. Eye-Tracking-Laptop platzieren und starten, Brille danebenlegen
 - e. **Brille anschließen, iView starten und Probanden anlegen**
2. Proband empfangen
 - a. Begrüßen, bedanken, abholen und Platz zuweisen
 - b. Wie geht es Ihnen? Sind Sie aufgeregt? Falls Sie eine Uhr haben, bitte ablegen.
 - c. **Kamera anschalten**
 - d. Die Kamera nimmt Sie auf, aber wir nutzen die Aufnahme nur zur Auswertung
3. Proband die Brille aufsetzen
 - a. Setzen Sie sich am besten so hin, dass es bequem ist und Sie am Tisch arbeiten können.
 - b. Wir wollen während des Experiments Ihre Augen aufnehmen. Dazu müssen Sie diese Brille aufziehen. Nach dem Versuch kann ich Ihnen mehr darüber verraten.
 - c. Brille aufsetzen und warten
4. Kalibrierung (mit Tablett)
 - a. Nun müssen wir die Brille noch kalibrieren. Nehmen Sie das Tablett in beide Hände. Stützen Sie die Ellenbogen auf dem Tisch ab als ob Sie etwas in den Händen betrachten würden. Und drehen Sie das Tablett leicht so, dass Ihr Blick senkrecht zum Tablett ist (zeigen/leicht korrigieren; ca. 30-40 cm).
 - b. Zur Kalibrierung ist es wichtig, dass Sie Ihren Kopf still halten, während Sie gleich hintereinander auf die 3 weißen Punkte schauen.
 - c. **3 Punkt-Kalibrierung starten**
 - d. Schauen Sie nun auf den weißen Punkt links oben. Jetzt rechts oben. Und jetzt unten
 - e. Okay, kurz Kontrolle: links oben - rechts oben – unten - Mitte
 - f. Okay (Tablett entfernen) Bitte keine hektischen Kopfbewegungen.
5. „Think Aloud“ erklären und üben
 - a. Neben Ihren Augenbewegungen wollen wir auch Ihre Gedankengänge nachvollziehen. Deshalb ist es für uns sehr wichtig, dass Sie alles, was sie denken

Abbildung 7-8: Ausschnitt aus dem Ablaufplan zur Durchführung der Versuche⁴³³

Nachdem der Raum gerichtet und der Proband begrüßt wurde, bereitete der Versuchsleiter den Probanden auf den Einsatz der Eye Tracking Technologie vor. Nach der Kalibrierung der Eye Tracking Brille wurde den Teilnehmern die Think-Aloud Methode erklärt und die Ausführung geübt. Danach begann der Versuch und die Aufnahme der Videokamera wird gestartet. Den Versuchsteilnehmern wurde zunächst eine Beschreibung zum Kontext gezeigt und einen Laptop mit der gestarteten PowerPoint-Präsentation gereicht. Die Probanden konnten ohne Zeitvorgabe durch die Präsentation navigieren und geben selbstständig an, wenn sie mit dem Versuch fortfahren wollten. Dann übergab der Versuchsleiter das Aufgabenblatt mit der Aufgabenstellung den Probanden zum Durchlesen. Die

⁴³³ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

Hilfsmittel wurden einzeln laut vorgelesen und nacheinander den Teilnehmern gereicht. Sie konnten beliebig auf dem Arbeitstisch angeordnet werden. Mit diesem Schritt wurde sichergestellt, dass die Probanden jedes Hilfsmittel mindestens einmal in die Hand nahmen und wahrnahmen. Danach informierte der Versuchsleiter die Probanden über die Bearbeitungszeit von 20 Minuten und erinnerte noch einmal an die Anwendung der Think-Aloud Methode. Erst jetzt übergab der Versuchsleiter den Hinweis zum starken Rückstoß als Versagensursache und die Versuchszeit startete. Nach Ablauf der Bearbeitungszeit wurden die Probanden gebeten, die Kraft, die zum Versagen der Nageldetektion führt, in die Zeichnung oder den Lösungsvorschlag einzuzeichnen und zu erklären, woher diese Kraft rührt. Danach konnte der Proband die Eye Tracking Brille abnehmen und die Aufnahme wurde beendet. Zum Abschluss des Versuchs füllte der Versuchsleiter gemeinsam mit den Probanden den Fragebogen zu Personenmerkmalen und Erfahrungen in den verschiedenen Fach- und Themenbereichen aus.

7.3 Festlegung der Parameter zur Quantifizierung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 7.1 werden vier Hypothesen aufgestellt, welche mit den aufgenommenen Daten verifiziert bzw. falsifiziert werden. Die erste Forschungsfrage fragt nach Unterschieden in der Problemerkennung zwischen Probanden mit wenig oder viel Erfahrung in den Bereichen Produktentwicklung und Konstruktion (PE+K) und/oder Entwicklungsmethodik (EM). Hierzu wurde die folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 1 zur Synthese-getriebenen Analyse

Experten im Bereich PE+K und/oder EM sind erfolgreicher in der Problemerkennung als Novizen in diesen Bereichen.

Probanden, die im Fachbereich PE+K und/oder EM eine Bewertung von 4 oder 5 Punkten bekamen, werden zur Beantwortung dieser Hypothese als Experten gesetzt. Eine Bewertung von 1 oder 2 Punkten im Bereich PE+K oder EM führt zur Einordnung in die Novizengruppe. Probanden mit 3 Punkten in beiden Bereichen werden zur Überprüfung der Hypothese nicht berücksichtigt. Zur Erkennung des Problems, werden die *scanpath* Videos der Probanden inklusive der verbalisierten Gedanken analysiert und die Lösungsvorschläge betrachtet. Als Abgleich wurden die Antworten auf die Frage zur Wirkrichtung der Kraft, die zum Versagen der Nageldetektion führte, ausgewertet. Die Einschätzung wurde von mindestens zwei auswertenden Personen durchgeführt. Bei gegensätzlichen Einschätzungen wurde eine dritte Meinung eingeholt.

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wird Hypothese 2 gestellt.

Hypothese 2 zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkennen, erarbeiten bessere Lösungen als Probanden, die das Problem nicht erkennen.

Zur Beurteilungen der Lösungen wurde ein Expertenrating durch zwei Personen durchgeführt. Die beiden Personen verfügten jeweils über eine mehrjährige Berufserfahrung im industriellen Umfeld. Der Versuchsleiter nahm nicht an dem Rating teil. Zur Bewertung wurden die unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten abhängig von der Güte einer Skala von 1 (keine zielführende Lösung) bis 5 (bestmögliche Lösung) zuordnet. Dabei zählt immer die bestbewertete Teillösung eines Probanden. Folgende Kriterien wurden für die Einordnung herangezogen:

- Möglichst geringe Kosten der Lösung
- Möglichst schnelle Umsetzbarkeit der Lösung
- Erfolgssicherheit und Validierungsmöglichkeiten

Falls eine der Teillösungen mit 1 bewertet wurde, wurde die Bewertung des besten Lösungsvorschlags um 0,5 Punkte verringert.⁴³⁴ Für eine Bewertung der Punktzahl 5 mussten sich die Probanden ihre örtliche Gebundenheit an das gebrochene Stanzteil „Nageldetektion“ überwinden und die auch die benachbarten Systeme für Änderungen in Betracht ziehen.

Es wird davon ausgegangen, dass das Erkennen des Problems mit der Länge der Fixierung von relevanten Gestaltmerkmalen zusammenhängt. Die folgenden Hypothesen adressieren alle Forschungsfrage 3 zur Synthese-getriebenen Analyse.

Hypothese 3a zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkennen, fixieren die Originalteile der Nageldetektion häufiger als Probanden, die das Problem nicht erkennen.

Hypothese 3b zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkennen, fixieren die Bruchfläche des defekten Bauteils häufiger als Probanden, die das Problem nicht erkennen.

Als relevante Gestaltmerkmale zur Analyse des Problems werden die Originalteile der Nageldetektion mit den Verschleißspuren sowie die Bruchfläche gesehen. Zur Auswertung der Hypothesen werden die Dauern der Fixationen auf den Originalteilen der Nageldetektion (Hypothese 3a) bzw. auf der Bruchfläche (Hypothese 3b) jedes Probanden addiert.

Weiterhin ist es wichtig, die Wechselwirkungen zwischen der Nageldetektion mit den benachbarten Systemelementen, in diesem Fall vorwiegend mit der Bolzenführung,

⁴³⁴ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

zu erkennen. Es wird davon ausgegangen, dass sich Experten im Bereich PE+K sowie Experten im Bereich „Entwicklungsmethodik“ (EM) stark auf Wechselwirkungen der Nageldetektion und Bolzenführung fokussierten.

Hypothese 4 zur Synthese-getriebenen Analyse

Experten im Bereich PE+K und EM, fokussieren stärker die Wechselwirkungen zwischen der Nageldetektion und Bolzenführung, als Novizen in den beiden Bereichen.

Da die Bolzenführung ein zentrales Bauteil für die Aufgabenstellung ist und viele Blickwechsel zwischen der Bolzenführung und dem restlichen System stattfinden, muss weiter differenziert werden. Daher wurde der Anteil der Blickwechsel zwischen der Bolzenführung und der Nageldetektion mit dem Anteil der Blickwechsel zwischen der Bolzenführung und anderen Bauteilen verglichen. Dies ist über die Auswertung der Übergangsmatrizen und der Bestimmung der Anzahl von Transitionen (Wechsel zwischen AOIs) möglich.⁴³⁵ Als Experten wurden hierbei wieder Probanden bezeichnet, die in den Bereichen PE+K und/oder EM einen Erfahrungswert von 4 oder 5 besaßen. Zur Gruppe der Novizen wurden Probanden mit Erfahrungswerten von 1 oder 2 der beiden Bereiche gezählt.

7.4 Durchführung der Studie und Aufbereitung der Daten

Alle Versuche der Studie wurden von einem Versuchsleiter durchgeführt. Die Versuche mit Studierenden und Mitarbeitern des KIT wurden in Besprechungsräumen am IPEK durchgeführt. Die Aufnahmen von Entwicklungsingenieuren und Konstrukteuren aus der Industrie wurden in zwei Besprechungszimmern des Unternehmens getätigt. Zur Durchführung der Versuche wurde jeweils ein freier Tisch in ausreichender Größe benötigt. Der Versuchsleiter setzte sich seitlich, außerhalb des direkten Blickfelds der Probanden, an den Tisch und betreute den Ablauf. Für die Durchführung hielt sich der Versuchsleiter stets streng an den dokumentierten Ablaufplan⁴³⁶.

Alle Aufnahmen wurden im Nachgang gesichtet. Durch wechselnde Abstände bei der Betrachtung von Gegenständen durch die Eye Tracking Brille kommt es teilweise zu Abweichungen des Blickpunktes im Eye Tracking Video durch Parallaxenfehler⁴³⁷. Da der Versuchsleiter die Aufnahme der Eye Tracking Brille live über die Software *iView ETG* verfolgte, konnte er Abweichung des errechneten Blickpunkts erkennen. In diesem Fall wurden die Probanden während des Versuchs auf Referenzpunkte

⁴³⁵ Siehe Kapitel 5.1.3

⁴³⁶ Siehe Kapitel 7.2.4

⁴³⁷ Siehe Kapitel 2.5.2

hingewiesen, auf die sie einen kurzen Blick werfen sollten⁴³⁸. Zu Beginn der Auswertung wurde die Kalibrierung aller Aufnahmen korrigiert und teilweise eine Nachkalibrierung durchgeführt. Dazu kann in der Software *BeGaze* ein Offset gesetzt werden.

Nach der Kontrolle aller Aufnahmen wurden *scanpath* Videos aller Probanden erstellt, welche den Blickpunkt über das Szenenbild der Eye Tracking Brille abbilden. Über die *scanpath* Videos können qualitative Auswertungen durchgeführt werden. Zur Beantwortung der Hypothesen 2 bis 4 zur Synthese-getriebenen Analysen, mussten die Fixationen aller Versuchsteilnehmer durch *semantic gaze mapping* einer Referenzansicht zugeordnet werden.⁴³⁹ Als Referenzansicht schlägt RUCKPAUL ET AL.⁴⁴⁰ eine Auflistung von Hilfsmitteln und Bauteilen auf verschiedenen Ebenen vor, von Baugruppen bis zu Teil-Geometrien von Bauteilen. Somit ist es möglich, die Betrachtung von Bauteilen und gleichzeitig das verwendete Hilfsmittel auswerten zu können.

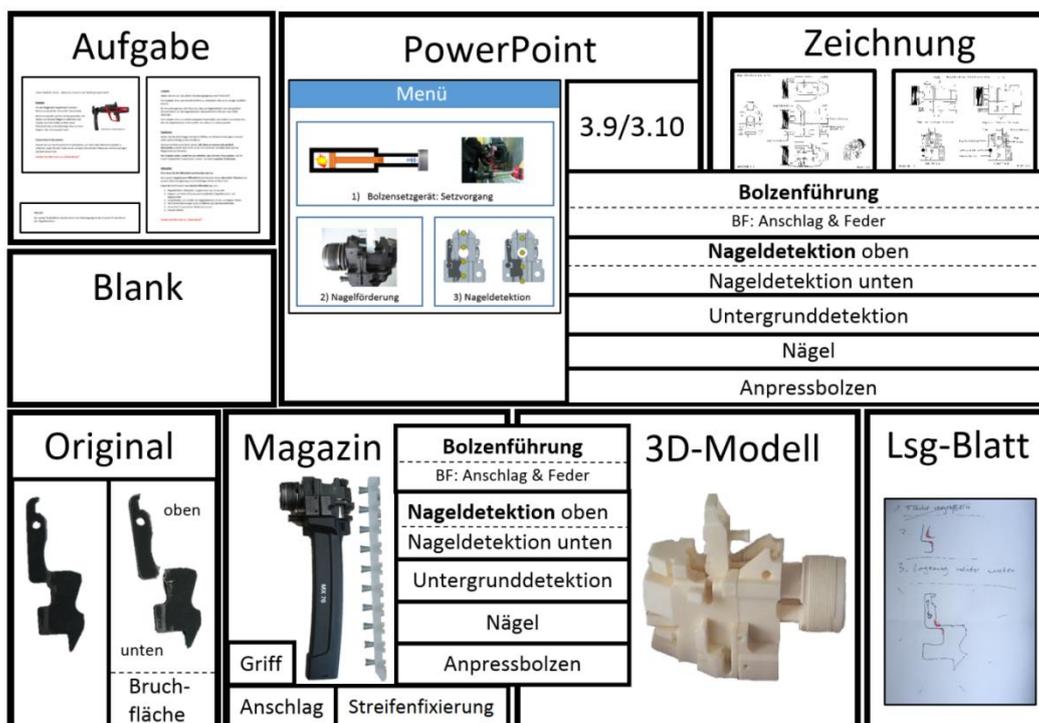


Abbildung 7-9: Referenzansicht für die Zuweisung von Fixationen über *semantic gaze mapping*⁴⁴¹

Die Referenzansicht für die Studie zur Synthese-getriebenen Analyse (Abbildung 7-9) ist in Hilfsmittel (Aufgabe, PowerPoint usw.) und Bauteile (Bolzenführung,

⁴³⁸ Ein solcher Referenzpunkt ist z.B. auf den technischen Zeichnungen in Anhang B als roter Kreis angebracht.

⁴³⁹ Siehe Kapitel 5.1.3, Auswertung von dynamischen Stimuli

⁴⁴⁰ Ruckpaul et al., 2014a

⁴⁴¹ Rader, 2014, S. 37 (betreute Abschlussarbeit)

Nageldetektion, Untergrunddetektion usw.) aufgeteilt. Die Felder der Bauteile überlappen zum Teil mehrere Hilfsmittel, da beispielsweise die Bolzenführung durch die PowerPoint-Präsentation, die technischen Zeichnungen, die Baugruppe mit Magazin und das 3D-Modell abgebildet wird. Die Baugruppe der Bolzenführung und des Magazins wird im Folgenden mit Magazin benannt, um Verwechslungen mit der Bolzenführung als Bauteil zu vermeiden. Beim Zuweisen der Blickdaten zur Referenzansicht mittel semantic gaze mapping muss jede Fixation einzeln einer Position auf der Referenzansicht zugewiesen werden (Abbildung 7-10).

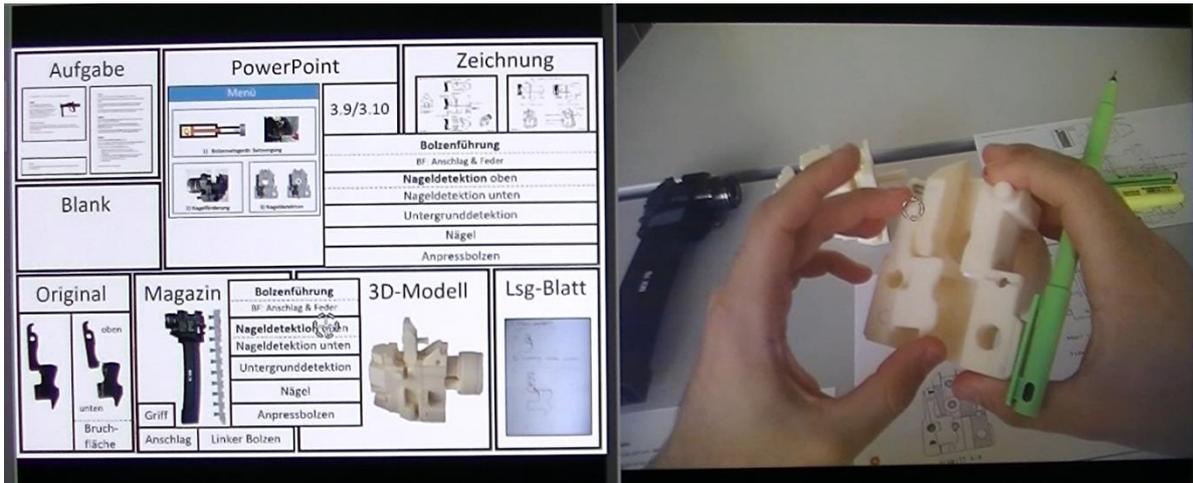


Abbildung 7-10: Zuweisung der Fixationen zur Referenzansicht durch *semantic gaze mapping*⁴⁴²

Zur Auswertung der Blickdaten wurden aus allen Probandengruppen in etwa gleich viele repräsentative Probanden ausgewählt. Die Daten der Studierenden und der wissenschaftlichen Mitarbeitern des KITs wurden alle mittels *semantic gaze mapping* zugewiesen. Aus der Gruppe der Entwicklungsingenieure und Konstrukteure aus der Industrie wurden die Blickdaten dreier Probanden vollständig zur Referenzansicht zugewiesen. Es handelt sich dabei um die Probanden SgA14, SgA19 und SgA20. Die Aufnahmen der Blickdaten wiesen bei diesen Personen eine hohe Qualität mit niedrigem Nachbereitungsaufwand auf und die Probanden repräsentieren ihre Probandengruppe mit 5, 17 und 34 Jahren Berufserfahrung sehr gut.

Zur Auswertung der Versuche wurden auf der Referenzansicht die in Abbildung 7-11 dargestellten AOIs definiert. Die AOIs werden in *BeGaze* als farbige Felder dargestellt. Durch die Überlagerung dieser Felder zählen Fixationen, die der Schnittmenge zugewiesen wurden, zu beiden übereinander liegenden AOIs. Die Fixationen zählen somit für Auswertungen bezüglich der Verwendung unterschiedlicher Hilfsmittel und gleichzeitig für die Auswertung bezüglich der Betrachtungslänge von Bauteilen.

⁴⁴² Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

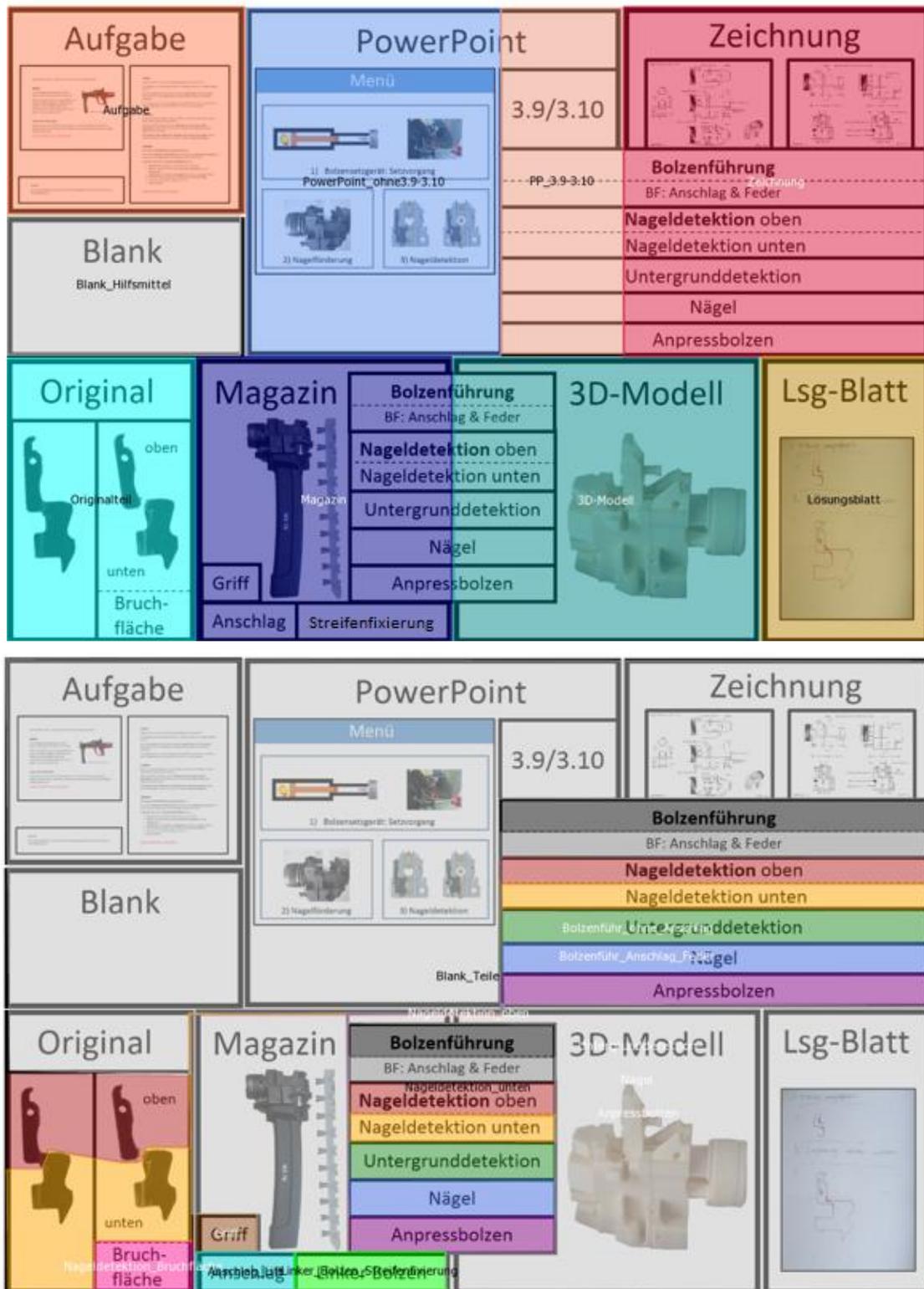


Abbildung 7-11: Verwendung von AOIs zur Auswertung der Fixationsdauern auf unterschiedlichen Hilfsmitteln (oben) und überlagerte AOIs zur Auswertung der Fixationsdauern auf Bauteilen (unten)⁴⁴³

⁴⁴³ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

7.5 Auswertung und Interpretation der Daten

7.5.1 Qualitative Auswertung der Blickpfadvideos

Um einen Überblick über die durchgeführten Versuche und die erarbeiteten Lösungen zu geben, werden im Folgenden die Ergebnisse dreier Probanden detailliert erläutert. Die kursiv gedruckten Lösungsvorschläge wählten die Probanden selbst als beste Vorschläge zu Ende des Versuchs aus.

Proband SgA07

Tabelle 7-2: Daten und Merkmal von Proband SgA07⁴⁴⁴

Bildung und Berufserfahrung		Erfahrungsmerkmale	
Alter:	28 Jahre	Bolzensetzgerät	2
Abschluss:	Dipl.-Ing. am KIT	CAD-Erfahrung	3
Vertiefung (Studium):	Theoretischer Maschinenbau	Entwicklung & Konstruktion	1
		Entwicklungsmethodik	2
Berufserfahrung:	2,5 Jahre (Doktorand)	Theoretischer Maschinenbau	4
		Leichtbau/Werkstoffauswahl	4
Tätigkeit:	Doktorand im Bereich Simulation/Leichtbau/Faserverbundwerkstoffe; ab und zu CAD-Tätigkeiten für CAE-Vereinfachungen, keine Konstruktion	Fertigungstechnik	4
		Analyse defekter Teile	3
Auswertung		Lösungsvorschläge	
Problem erkannt?	Nein	<i>Schmalstelle verbreitern</i>	
Jury-Bewertung	2,5	Magazinfederkraft reduzieren	

⁴⁴⁴ vgl. Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

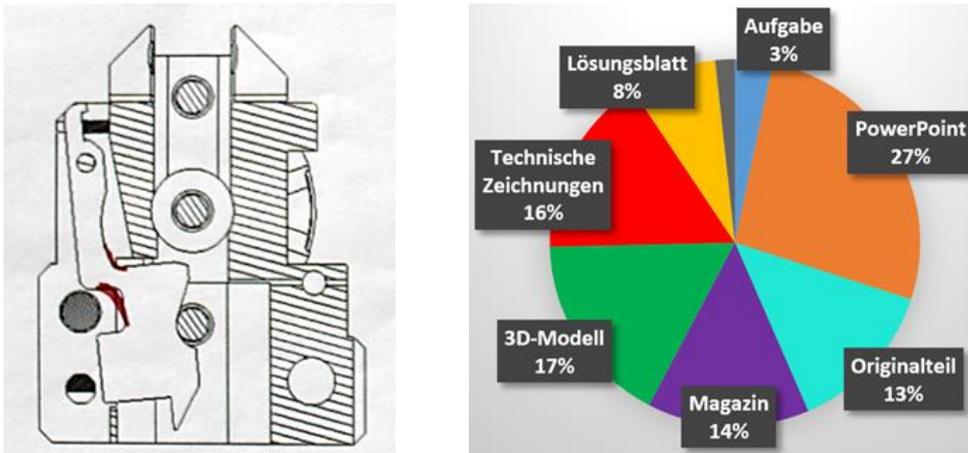


Abbildung 7-12: Lösungsvorschlag (links) und Anteile der verwendeten Hilfsmittel an der Gesamtfixationsdauer (rechts) von Proband SgA07

Der Proband verglich lange die PowerPoint Präsentation mit den Originalbauteilen und den technischen Zeichnungen. Es scheint, als benötigte der Teilnehmer viel Zeit für den Transfer der bereits vor der Aufgabenstellung angeschauten Präsentation auf das eigentliche System. Es ist festzustellen, dass das räumliche Vorstellungsvermögen dem Probanden große Probleme bereitete. Beim Montieren des 3D-Modells steckte der Versuchsteilnehmer die beiden Hälften verdreht zusammen. Im weiteren Verlauf tätigt der Proband die falsche Annahme, dass der Anpressbolzen auf der anderen Seite der Bolzenführung positioniert ist.

Der Hinweis zum Versagen der Nageldetektion aufgrund des starken Geräterückstoßes wurde ignoriert. Da die Wechselwirkungen der Systemkomponenten nicht verstanden wurden, konnte der Proband nur einen bauteilfixierten Lösungsvorschlag, die Verbreiterung der Schmalstelle an der Nageldetektion durch Änderung des Radius (Abbildung 7-12, links), äußern. Als weiteren Vorschlag nannte er die Reduzierung der Magazinfederkraft, welche die Energie zur Nachführung der Nägel speichert. Diese Kraft hat jedoch keinen Einfluss auf die Lebensdauer der Nageldetektion.

Die Probleme mit der räumlichen Vorstellung, die sich wesentlich während der Analyse des Problems zeigen, spiegeln sich auch in den Blickdaten des Probanden wieder. Er zeichnet sich durch den höchsten Median der Sakkadenamplitude ($2,7^\circ$) und der höchsten Dichte der Übergangsmatrix der AOIs Hilfsmitteln (Abbildung 7-11, oben) aus. Beide Werte sprechen für ausgeprägte *Skimming*-Phasen im Vergleich zu anderen Probanden.

Proband SgA09Tabelle 7-3: Daten und Merkmal von Proband SgA09⁴⁴⁵

Bildung und Berufserfahrung		Erfahrungsmerkmale	
Alter:	29 Jahre	Bolzensetzgerät	3
Abschluss:	Dipl.-Ing. am KIT	CAD-Erfahrung	1
Vertiefung (Studium):	Entwicklung und Konstruktion	Entwicklung & Konstruktion	3
		Entwicklungsmethodik	5
		Theoretischer Maschinenbau	3
Berufserfahrung:	2,5 Jahre (Doktorand)	Leichtbau/Werkstoffauswahl	2
Tätigkeit:	Doktorand (IPEK): Entwicklungsmethodik & - management; Studium: Teilnahme an der Lehrveranstaltung „Integrierte Produktentwicklung“	Fertigungstechnik	2
		Analyse defekter Teile	3
Auswertung		Lösungsvorschläge	
Problem erkannt?	Ja	<i>Massenträgheit senken (Löcher)</i>	
Jury-Bewertung	4	<i>Schmalstelle verbreitern Werkstoffwechsel Komplexere Form Austauschbares Teil</i>	

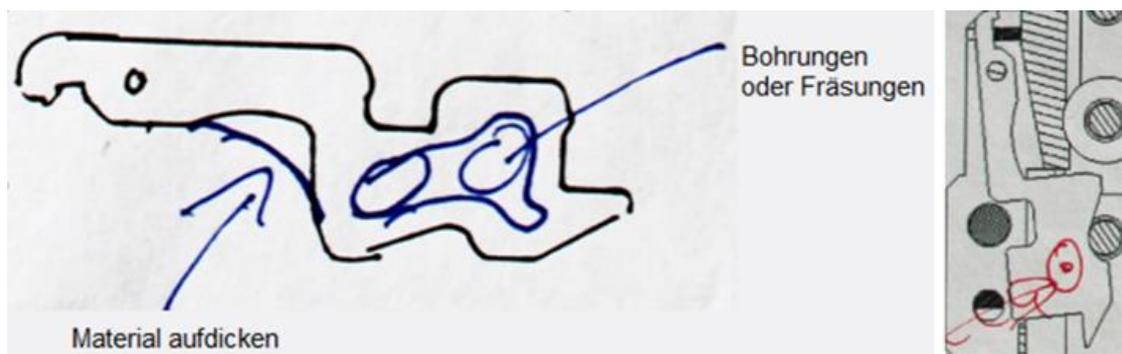


Abbildung 7-13: Lösungsvorschlag (links) und Markierung der wirkenden Kraft (rechts) von Proband SgA09

⁴⁴⁵ vgl. Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

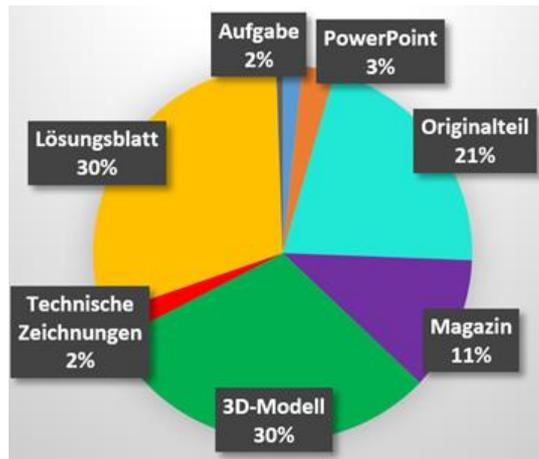


Abbildung 7-14: Anteile der verwendeten Hilfsmittel an der Gesamtfixationsdauer von Proband SgA09⁴⁴⁶

Proband SgA09 erkannte direkt zu Beginn der Aufgabenstellung und mit Lesen des Hinweises, dass die Nageldetektion aufgrund einer Biegebeanspruchung bricht. Um sich zu vergewissern, erklärte er sich selbst noch einmal die Biegung um eine Kante. „Durch die Trägheitskraft des Teils und das Aufliegen hier, die Lagerung dort, wird vermutlich eine Biegung induziert.“ Er benötigte längere Zeit zum Erkennen, welche Kante der Bolzenführung zur Biegebeanspruchung der Nageldetektion führt. Auch die Richtung, in welche die wirkende Kraft resultiert, konnte der Proband erst nach längeren Überlegungen festlegen. Dazu fixierte er vor allem die Bruchfläche der gebrochenen Nageldetektion.

Als Vorschläge zeichnete der Proband zum einen die Vergrößerung der Radien an der Schmalstelle der Nageldetektion ein. Zum anderen schlug er die Reduktion der Massenträgheit vor, indem Löcher oder eine Aussparung in den nichtgeführten Teil der Nageldetektion eingebracht werden. Die Kraft, welche zum Bruch des Bauteils führt, konnte der Proband zu Ende des Versuchs ohne Probleme mit Angabe der korrekten Richtung angeben.

Auffällig bei diesem Probanden ist die Nutzung der Hilfsmittel. Die technischen Zeichnungen wurden kaum betrachtet. Dafür leitete sich der Proband den wesentlichen Teil seiner Erkenntnisse beim Betrachten und Manipulieren des gedruckten 3D-Modells ab. Der Proband besaß kaum CAD-Erfahrung und ist ein Experte im Bereich der Entwicklungsmethodik.

⁴⁴⁶ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

Proband SgA19Tabelle 7-4: Daten und Merkmal von Proband SgA19⁴⁴⁷

Bildung und Berufserfahrung		Erfahrungsmerkmale	
Alter:	61 Jahre	Bolzensetzgerät	5
Abschluss:	Dipl.-Ing. FH Offenburg	CAD-Erfahrung	5
Vertiefung (Studium):	Statik	Entwicklung & Konstruktion	5
		Entwicklungsmethodik	1
Berufserfahrung:	34 Jahre	Theoretischer Maschinenbau	3
		Leichtbau/Werkstoffauswahl	4
Tätigkeit:	Seit 1980 in der Konstruktion; früher Schraubgeräte, später Kombi- und Meißelhämmer	Fertigungstechnik	5
		Analyse defekter Teile	5
Auswertung		Lösungsvorschläge	
Problem erkannt?	Ja	Perforierung/Sicken	
Jury-Bewertung	4	<i>Schmalstelle vergrößern</i>	
		Nageldetektion anders verschieben	
		Drehpunkt verlegen	
		<i>Masse verringern</i>	
		<i>Wandstärke erhöhen</i>	
		anderes Material verwenden	
		<i>Kugelstrahlen</i>	

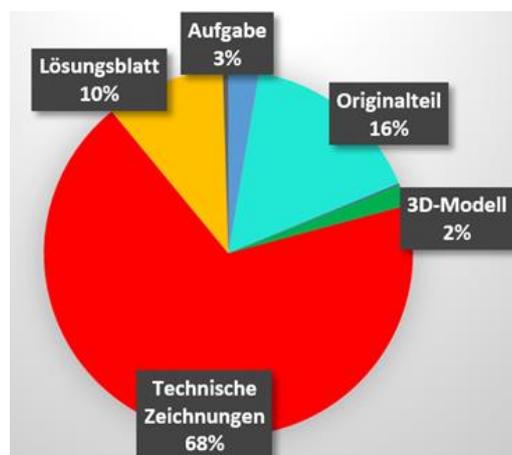
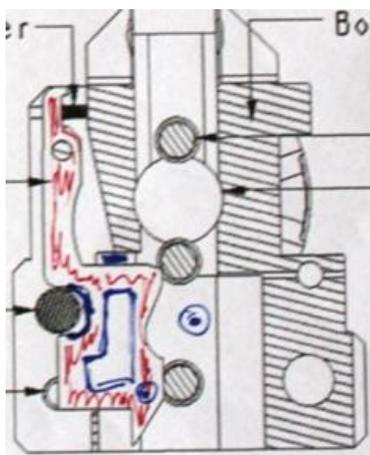


Abbildung 7-15: Lösungsvorschlag (links) und Anteile der verwendeten Hilfsmittel an der Gesamtfixationsdauer (rechts) von Proband SgA19

⁴⁴⁷ vgl. Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

Mit Beginn des Versuchs und Übergabe des Hinweises erkannte der Proband SgA19 direkt, dass Vibrationen auf das Bauteil einwirken. Die Verschleißspuren auf den Originalbauteilen der Nageldetektion führen zur Erkenntnis, welcher Teil des Bauteils geführt und welcher Teil frei schwingen kann. *„Diese Partie ist frei, liegt frei auf. Und diese ist geführt.“*

Der Proband schlug im Verlauf des Versuchs acht verschiedene Lösungsmöglichkeiten vor (siehe Tabelle 7-4). Nach mehreren Vorschlägen, unter anderem die Verwendung von Sicken, das Verbreitern der Schmalstelle durch größere Radien, äußerte er die Verringerung der Masse des freien Teils der Nageldetektion. Diese Lösung zeichnete er in die technische Zeichnung (Abbildung 7-15, links) und kommentierte, dass diese Variante nichts kosten würde. Er bedachte dabei nicht, dass die Änderung des Stanzwerkzeugs hohe Kosten mit sich bringt.

Alle vorgeschlagenen Lösungen beziehen sich auf die Nageldetektion selbst. Eine Verlagerung des Drehpunktes wurde genannt, später jedoch wieder verworfen. Als endgültige Lösung nennt der Proband eine Kombination aus mehreren Vorschlägen: die Reduktion der Masse, die Vergrößerung der Radien an der Aussparung der Untergrunddetektion, die Erhöhung der Blechdicke und eine Kugelstrahlbehandlung. Die Kraft, welche zum Versagen der Nageldetektion führt, erkannte Proband SgA19 richtig und zeichnete sie in die technische Zeichnung ein.

Im Gegensatz zu Proband SgA09 fällt bei Betrachtung der Anteile der genutzten Hilfsmittel auf, dass der Proband vorwiegend die technische Zeichnung nutzte. Das 3D-Modell nahm der Proband am Ende des Versuchs aus Interesse in die Hand. Dabei hatte der Proband sehr ausgeprägte Erfahrungen mit CAD und nutzte das Programm während des Berufsalltags.

7.5.2 Prüfung der Forschungshypothesen auf Signifikanz

Zur Auswertung der Studie und Prüfung der in Kapitel 7.3 gestellten Hypothesen wurden die *scanpath* Videos und die aufgenommenen Blickdaten der Probanden genutzt. Zur Signifikanzprüfung von Hypothese 1 konnten die Daten aller siebzehn Probanden genutzt werden. Die weiteren Hypothesen wurden anhand der aufbereiteten Daten von zwölf Versuchsteilnehmern geprüft.⁴⁴⁸ Die Überprüfung der Hypothesen wurde im Rahmen der Masterarbeit von M.Sc. Samuel RADER durchgeführt.⁴⁴⁹

Für jede empirisch-inhaltliche Hypothese wurden zunächst die Nullhypothese und die Alternativhypothese gestellt. Dabei war die Nullhypothese abzulehnen. Abhängig von

⁴⁴⁸ Siehe Kapitel 7.4

⁴⁴⁹ Rader, 2014

der Hypothese nutzte die Signifikanzprüfung den Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest⁴⁵⁰ (Hypothese 1) oder den t-Test für zwei unabhängige Stichproben⁴⁵¹ (Hypothese 2, 3 und 4). Für die Anwendung des t-Tests wurde angenommen, dass die gemessenen Daten der Normalverteilung unterliegen.

Zur Berechnung der Signifikanztests diente die Software SPSS Statistics 22 der Firma IBM. Die Software gibt zuerst eine Gruppenstatistik bei t-Tests oder eine Kreuztabelle bei Chi-Quadrat-Tests zur Übersicht der eingegebenen Daten aus. Die zweite Tabelle enthält die Ergebnisse des Signifikanztests. Zur Prüfung der Varianzgleichheit wird der Levene-Test genutzt. Die Varianzgleichheit gilt für $p > \alpha$.⁴⁵² In diesem Fall wird die obere Zeile der Ergebnistabelle aus SPSS angewendet. Falls die Varianzgleichheit nicht angenommen werden kann, wird die Alternativhypothese getestet und die zweite Zeile der Tabelle ist gültig.

Die berechnete Überschreitungswahrscheinlichkeit p musste unter dem Signifikanzniveau α liegen, um abgelehnt zu werden. Da SPSS den t-Test nur zweiseitig berechnet (Sig. (2-seitig)), die Hypothesen jedoch einseitig formuliert sind, gilt zur Ablehnung der Nullhypothesen in diesen Fällen $p < 2 * \alpha$. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Hypothese 1 zur Synthese-getriebenen Analyse

Experten im Bereich PE+K und/oder EM sind erfolgreicher in der Problemerkennung als Novizen in diesen Bereichen.

Unter der Annahme, dass einer erfolgreichen Synthese auch eine erfolgreiche Analyse zugrunde liegen muss, sind die Analyse und das Erkennen des Problems essentiell zur Bearbeitung der Aufgabenstellung. Da Experten im Bereich PE+K und EM sehr gute Kenntnisse des Produktentwicklungsprozess haben müssen, behauptet Hypothese 1, dass diese Probandengruppe auch erfolgreicher in der Problemanalyse und somit der Problemerkennung ist.

Die Testhypothesen (Nullhypothese und Alternativhypothese) lauten:

H_{1,0}: Erfahrung und Problemerkennung sind unabhängig od. negativ voneinander abhängig.

H_{1,1}: Erfahrung und Problemerkennung sind positiv voneinander abhängig.

Die Signifikanzprüfung erfolgte aufgrund der vorliegenden nominal-skalierten Merkmale der Problemerkennung und der Probandengruppe mittels des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest. Die Probanden SgA05 und SgA13 zählen weder zur Gruppe der Experten noch zu Novizen. Daher basiert die Prüfung auf den Daten von 15 Probanden.

⁴⁵⁰ Siehe Kapitel 2.3.1

⁴⁵¹ Siehe Kapitel 2.3.1

⁴⁵² Hierbei handelt es sich um den p-Wert des Levene-Tests.

Tabelle 7-5: Ausgabe der Kreuztabelle von SPSS zu Hypothese 1

			Erfahrung		Gesamtsumme
			Experte	Novize	
Problem erkannt?	Ja	Anzahl	7	0	7
		Erwartete Anzahl	4,7	2,3	7,0
	Nein	Anzahl	3	5	8
		Erwartete Anzahl	5,3	2,7	8,0
Gesamtsumme	Anzahl		10	5	15
	Erwartete Anzahl		10,0	5,0	15,0

Über die Kreuztabelle berechnet SPSS die erwartete Häufigkeiten aller vier Kombinationsmöglichkeiten der Merkmalsausprägungen.

Tabelle 7-6: Ausgabe der Ergebnistabelle von SPSS zu Hypothese 1

	Wert	df	Asymp. Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (einseitig)
Pearson-Chi-Quadrat	6,563 ^a	1	,010		
Kontinuitätskorrektur ^b	4,051	1	,044		
Likelihood-Quotient	8,510	1	,004		
Exakter Test nach Fisher				,026	,019
Anzahl der gültigen Fälle	15				

a. 3 Zellen (75,0%) haben die erwartete Anzahl von weniger als 5. Die erwartete Mindestanzahl ist 2,33.

b. Berechnung nur für eine 2x2-Tabelle

Da die erwartete Anzahl in 3 Feldern der Kreuztabelle (Tabelle 7-5) kleiner als 5 ist, kann der Chi-Quadrat-Tests nicht angewendet werden (Kommentar a in Tabelle 7-6). SPSS wählt in diesem Fall automatisch den exakten Test nach Fisher, welcher auch für Stichprobengrößen kleiner als 20 Probanden gilt. Hierzu berechnet SPSS den einseitigen p-Wert (Exakte Sig. (einseitig) in Tabelle 7-6).

Da $p < \alpha$ ($0,019 < 0,05$) gilt, kann die Nullhypothese $H_{1,0}$ abgelehnt werden. Erfahrungen in den Bereichen PE+K sowie EM beeinflussen die Analyse des Problems positiv und führen zu einer erfolgreicherer Problemerkennung.

Hypothese 2 zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkennen, erarbeiten bessere Lösungen als Probanden, die das Problem nicht erkennen.

Die zweite Hypothese prüft, ob eine erfolgreiche Problemanalyse auch zu einer erfolgreichen Problemlösung und besser bewerteten Lösungsvorschlägen führt. Hierzu bewertete eine Expertenjury die Lösungsvorschläge aller Probanden (Variable x_{Jury}) auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 5 für die Lösung mit dem

geringsten Kosten- und Umsetzungsaufwand sowie höchste Sicherheit, das Ziel zu erfüllen, steht. So gilt für die Nullhypothese bzw. die Alternativhypothese:

$$H_{2.0}: \bar{x}_{\text{Jury; erkannt}} \leq \bar{x}_{\text{Jury; nicht erkannt}}$$

$$H_{2.1}: \bar{x}_{\text{Jury; erkannt}} > \bar{x}_{\text{Jury; nicht erkannt}}$$

mit $\bar{x}_{\text{Jury; erkannt}}$ für den Mittelwert der Probandengruppe „Problem erkannt“ und $\bar{x}_{\text{Jury; nicht erkannt}}$ für die Gruppe „Problem nicht erkannt“.

Unter Annahme der Normalverteilung des Merkmals wurde zur Signifikanzprüfung der t-Test angewendet. Die Stichprobengröße umfasst alle 17 Versuchsteilnehmer.

Tabelle 7-7: Ausgabe der Gruppenstatistik von SPSS zu Hypothese 2

Gruppenstatistik				
Stichprobengröße N=17 (Proband 5-21)				
Problem erkannt?	H	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert
Jury-Bewertung	Ja	8	3,3750	,58248
	Nein	9	2,2778	,97183

Tabelle 7-8: Ausgabe der Ergebnistabelle von SPSS zu Hypothese 2

Test bei unabhängigen Stichproben										
		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-seitig)	Mittelwertdifferenz	Standardfehlerdifferenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Unterer	Oberer
Jury-Bewertung	Varianzgleichheit angenommen	5,619	,032	2,775	15	,014	1,09722	,39537	,25452	1,93992
	Varianzgleichheit nicht angenommen			2,858	13,292	,013	1,09722	,38386	,26979	1,92466

Da der p-Wert des Levene-Tests p_{Levene} keiner als das Signifikanzniveau α ist, kann die Varianzgleichheit nicht angenommen werden und die zweite Zeile der t-Test-Ergebnistabelle findet Gültigkeit. Da $p = 0,013 < 2 * \alpha$, kann die Nullhypothese abgelehnt werden. Dies bedeutet, dass für die durchgeführte Studie zur Synthese-getriebenen Analyse die erfolgreiche Problemanalyse auch bessere Lösungsvorschläge bedingt hat.

Hypothese 3a und 3b zur Synthese-getriebenen Analyse

Mit den folgenden Hypothesen wurde der Zusammenhang zwischen dem Blickverhalten und der erfolgreichen Problemanalyse und Problemerkennung geprüft. Es wurde angenommen, dass die Gestaltausprägung und Oberflächenbeschaffenheit der Originalteile und die Bruchfläche der gebrochenen Nageldetektion einen hohen Informationsgehalt besitzen (Abbildung 7-5).

Hypothese 3a zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkannten, fixierten die Originalteile der Nageldetektion häufiger als Probanden, die das Problem nicht erkannten.

Lange Fixationsdauern weisen auf *Scrutinizing*-Phasen und die Aufnahme von Informationen hin.⁴⁵³ Daher wurden die Fixationsdauern der Probanden auf den AOs der Originalteile der Nageldetektion (ND) berechnet (siehe Abbildung 7-11, unten). Für $x_{Original_ND}$ als Variable der Fixationsdauer und dem Vergleich der Probandengruppen „Problem erkannt“ und „Problem nicht erkannt“ ergeben sich die Nullhypothese und Alternativhypothese:

$$H_{3a.0}: \bar{x}_{Original_{ND}; \text{erkannt}} \leq \bar{x}_{Original_{ND}; \text{nicht erkannt}}$$

$$H_{3a.1}: \bar{x}_{Original_{ND}; \text{erkannt}} > \bar{x}_{Original_{ND}; \text{nicht erkannt}}$$

Die Stichprobengröße beträgt für die Auswertung der Fixationsdauern 12 Probanden.

Tabelle 7-9: Ausgabe der Gruppenstatistik von SPSS zu Hypothese 3a

Gruppenstatistik					
Stichprobengröße N=12 (Proband 5-14,19,20)					
Problem erkannt?		H	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert
Originalteile Fixationszeit in ms	Ja	6	119812,1333	57696,93370	23554,67455
	Nein	6	48703,9333	36720,27520	14990,98958

Tabelle 7-10: Ausgabe der Ergebnistabelle von SPSS zu Hypothese 3a

Test bei unabhängigen Stichproben										
		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-seitig)	Mittelwertdifferenz	Standardfehlerdifferenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
								Unterer	Oberer	
Originalteile Fixationszeit in ms	Varianzgleichheit angenommen	1,017	,337	2,547	10	,029	71108,20000	27920,4667	8897,52335	133318,87665
	Varianzgleichheit nicht angenommen			2,547	8,480	,033	71108,20000	27920,4667	7351,87875	134864,52125

Das der p-Wert des Levene-Test größer als das Signifikanzniveau α ist, kann die Varianzgleichheit angenommen werden. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit p (2-seitig) des t-Tests beträgt daher $p = 0,029 < 2 * \alpha$. Für das Signifikanzniveau von 0,05 kann daher die Nullhypothese abgelehnt werden. Probanden mit erfolgreicher Problemerkennung, fixierten signifikant länger die Originalteile der Nageldetektion als Probanden, welche die Biegung um die Kante der Bolzenführung nicht erkannten.

⁴⁵³ Lohmeyer / Meboldt, 2015

Hypothese 3b zur Synthese-getriebenen Analyse

Probanden, die das Problem erkannten, fixierten die Bruchfläche des defekten Bauteils häufiger als Probanden, die das Problem nicht erkannten.

Auch die Bruchfläche enthält Informationen zur Versagensart der Nageldetektion. Daher wurden auch die Fixationslängen auf der Bruchfläche x_{Bruch} miteinander verglichen. Die Testhypothesen lauteten für diese Prüfung:

$$H_{3b.0}: \bar{x}_{Bruch; erkannt} \leq \bar{x}_{Bruch; nicht erkannt}$$

$$H_{3b.1}: \bar{x}_{Bruch; erkannt} > \bar{x}_{Bruch; nicht erkannt}$$

Tabelle 7-11: Ausgabe der Gruppenstatistik von SPSS zu Hypothese 3b

Gruppenstatistik					
Stichprobengröße N=12 (Proband 5-14,19,20)					
Problem erkannt?		H	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert
Bruchfläche Fixationszeit in ms	Ja	6	11324,9333	10561,50467	4311,71623
	Nein	6	1591,6000	2291,26097	935,40338

Tabelle 7-12: Ausgabe der Ergebnistabelle von SPSS zu Hypothese 3b

Test bei unabhängigen Stichproben										
		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-seitig)	Mittelwertdifferenz	Standardfehlerdifferenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Unterer	Oberer
Bruchfläche Fixationszeit in ms	Varianzgleichheit angenommen	12,182	,006	2,206	10	,052	9733,33333	4412,01499	-97,24869	19563,91535
	Varianzgleichheit nicht angenommen			2,206	5,470	,074	9733,33333	4412,01499	-1321,394	20788,06125

Da die Varianzgleichheit nicht angenommen werden kann, beträgt der berechnete p-Wert für die 2-seitige Signifikanzprüfung mit dem t-Test 0,074. Da $p < 2 * \alpha$ ist kann die Nullhypothese zum Vergleich der Fixationsdauern auf der Bruchfläche ebenfalls abgelehnt werden. Versuchsteilnehmer, die das Problem richtig erkannten, fixierten neben den Originalteilen auch die Bruchfläche der Nageldetektion signifikant länger als die Teilnehmer, die nicht erfolgreich in der Problemanalyse waren.

Hypothese 4 zur Synthese-getriebenen Analyse

Experten im Bereich PE+K und EM, fokussieren stärker auf Wechselwirkungen zwischen der Nageldetektion und Bolzenführung, als Novizen in den beiden Bereichen.

Neben der detaillierten Analyse von Teilsystemen und Bauteilen, die durch die beiden vorherigen Hypothesen überprüft wurde, sind nach C&C²-A die

Wechselwirkungen zwischen Bauteilen essentiell.⁴⁵⁴ Um diese Wechselwirkungen analysieren zu können, wurde angenommen, dass der Blickpfad der Probanden oft zwischen der Nageldetektion und der Bolzenführung wechseln muss.

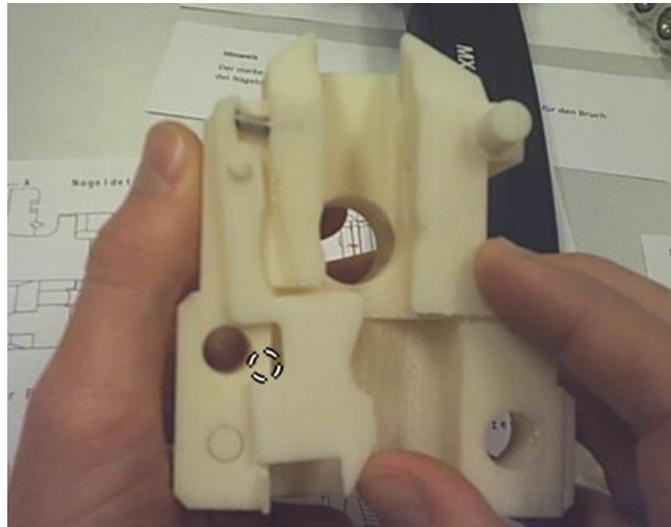


Abbildung 7-16: Blick auf die Grenzfläche zwischen der Nageldetektion und der Bolzenführung (unterbrochener Kreis) bei Betrachtung des geöffneten 3D-Modells (Proband SgA20, 13'45'')

Dazu wurden die Transitionen in der Übergangsmatrix unter Verwendung der AOs aus Abbildung 7-11 berechnet. Wie in Kapitel 7.3 erklärt, wird die Bolzenführung oft fixiert. Daher wird die Anzahl der Transitionen zwischen Bolzenführung und Nageldetektion der Anzahl der Transitionen zwischen Bolzenführung und den weiteren Bauteilen gegenübergestellt. Der prozentuale Anteil der Transitionen zwischen Bolzenführung (BF) und Nageldetektion (ND) berechnet sich durch:

$$x_{\text{Anteil BF zu ND}} = \frac{\text{Anzahl der Transitionen zwischen BF und ND}}{\text{Anzahl der Transitionen zwischen BF und anderen Teilen}} \cdot 100\%$$

Die Einteilung der Probanden zur Gruppe der Experten bzw. Novizen der Bereiche PE+K und/oder EM erfolgt entsprechend zur Hypothese 1. Da die Probanden SgA05 und SgA13 weder zur Gruppe der Experten noch zu Novizen zählen, beträgt die Stichprobengröße für diese Prüfung 10 Teilnehmer.

Die Testhypothesen lauten daher:

$$H_{4.0}: \bar{x}_{\text{Anteil BF zu ND; Experte}} \leq \bar{x}_{\text{Anteil BF zu ND; Novize}}$$

$$H_{4.1}: \bar{x}_{\text{Anteil BF zu ND; Experte}} > \bar{x}_{\text{Anteil BF zu ND; Novize}}$$

Tabelle 7-13: Ausgabe der Gruppenstatistik von SPSS zu Hypothese 4

⁴⁵⁴ vgl. Matthiesen, 2002a

Gruppenstatistik					
Stichprobengröße N=10 (Proband SgA06-12, SgA14, SgA19, SgA20)					
Erfahrung		H	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert
Anteil BF zu ND in %	Experte	5	35,7740	5,99667	2,68179
	Novize	5	22,0240	3,79840	1,69870

Tabelle 7-14: Ausgabe der Ergebnistabelle von SPSS zu Hypothese 4

Test bei unabhängigen Stichproben										
		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-seitig)	Mittelwertdifferenz	Standardfehlerdifferenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
								Unterer	Oberer	
Anteil BF zu ND in %	Varianzgleichheit angenommen	,467	,514	4,331	8	,003	13,75000	3,17452	6,42955	21,0704
	Varianzgleichheit nicht angenommen			4,331	6,765	,004	13,75000	3,17452	6,19020	21,3098

Da die Varianzgleichheit angenommen werden kann, folgt $p = 0,003$ und ist somit kleiner als $2 * \alpha$. Probanden mit Erfahrungen in den Bereichen PE+K und/oder EM fokussierten sich signifikant stärker auf Wechselwirkungen zwischen der Nageldetektion und der Bolzenführung als Novizen in diesen Bereichen. Die Probandengruppe mit hoher Erfahrung in den Bereichen PE+K und/oder EM war auch signifikant besser im Erkennen des Problems, was wiederum zu signifikant besser bewerteten Lösungsvorschlägen geführt hat.

7.5.3 Unterschiede in der Verwendung von Hilfsmitteln

Während der Auswertung der Studie fiel den Versuchsleitern auf, dass die bereitgestellten Hilfsmittel unterschiedlich oft von den Versuchspersonen verwendet wurden. Ein sehr großer Unterschied in der Betrachtungszeit der Materialien ließ sich beispielsweise zwischen den Probanden SgA09 und SgA19 feststellen.⁴⁵⁵ SgA09 betrachtete vorwiegend das gedruckte 3D-Modell, das manipuliert werden konnte. Der Teilnehmer SgA19 fokussierte sich im Gegensatz dazu fast ausschließlich auf die technischen Zeichnungen mit 2D-Schnittdarstellung. Da die Erfahrungen der beiden Personen im Bereich der CAD-Systeme stark variierten, wurde der Zusammenhang näher untersucht und ist in Abbildung 7-17 dargestellt. Für jeden Probanden wurden die prozentualen Anteile der Fixationsdauern auf dem 3D-Modell (grün) und der technischen Zeichnungen (rot) im Verhältnis zu der Fixationsdauer auf beiden Hilfsmitteln berechnet. Hierzu wurden die *dwell times* auf den AOIs aus dem oben Teil der Abbildung 7-11 ausgewertet. Auf der x-Achse sind die Probanden nach CAD-Erfahrung geordnet aufgetragen.

⁴⁵⁵ Siehe Kapitel 7.5.1

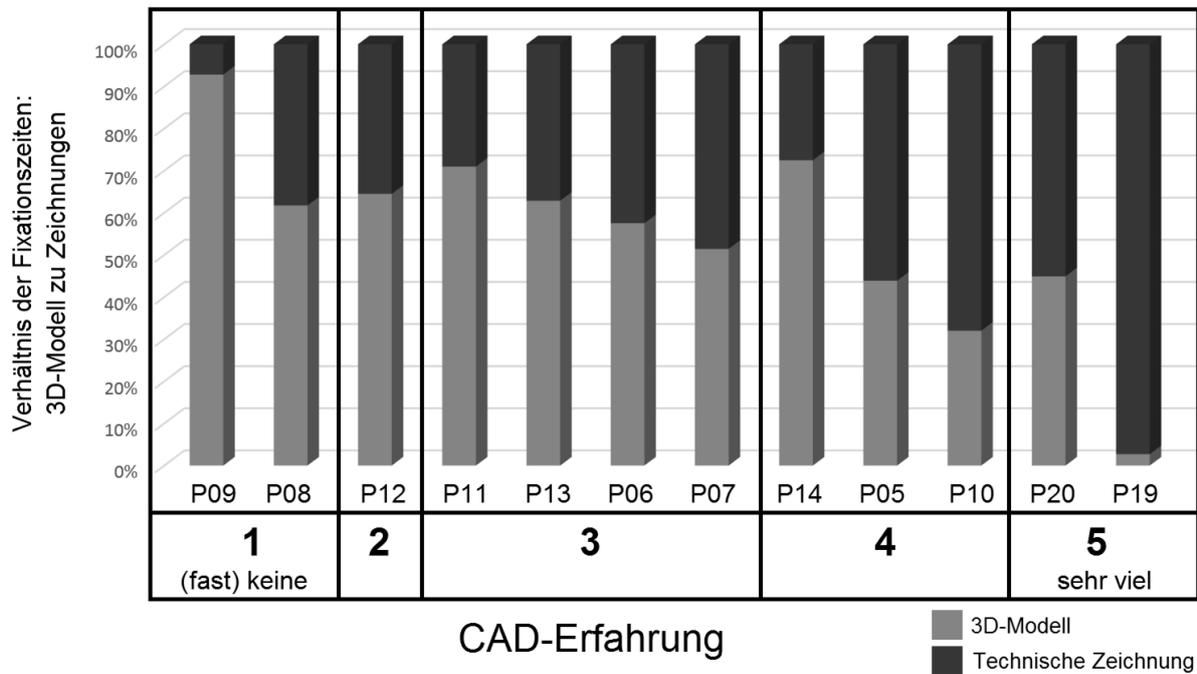


Abbildung 7-17: Verhältnis der Fixationsdauern auf den technischen Zeichnungen (rot) und dem 3D-Modell (grün) über die CAD-Erfahrung der Probanden⁴⁵⁶

Es ist eine Tendenz zur Nutzung des 3D-Modells bei geringen CAD-Erfahrungen zu erkennen. Das Modell erleichtert in diesem Fall das räumliche Denken. Erfahrungen mit CAD-Programmen bedingen jedoch nicht zwingend Erfahrungen mit 2D-Schnittdarstellungen. Daher variiert das Verhältnis der Fixationsdauern bei hohen CAD-Erfahrungen stärker als bei niedrigen CAD-Erfahrungen.

Das Diagramm zeigt die Wichtigkeit der Bereitstellung unterschiedlicher Hilfsmittel für Studien zur Synthese-getriebenen Analyse auf. Die Analyseprozesse der Versuchsteilnehmer sollen realitätsnah abgebildet werden und dürfen nicht durch unzureichend verfügbare Materialien eingeschränkt werden. Die Versuchsteilnehmer können selbstständig ihr bevorzugtes Hilfsmittel auswählen, um das Problem zu analysieren.

7.6 Diskussion der Studienergebnisse und des Studienablaufs

Zur Untersuchung von Vorgehensweisen während der Synthese-getriebenen Analyse von technischen Systemen wurde eine Studie unter Einsatz der Eye Tracking Technologie und der Think-Aloud Methode durchgeführt. Dazu wurde eine reale Problemstellung in einer Laborumgebung abgebildet. So konnte eine hohe empirische Relevanz erreicht werden. An der Studie nahmen Studierende und wissenschaftliche Mitarbeiter am KIT sowie Entwicklungsingenieure und Konstrukteure aus der Industrie teil. Durch die Aufbereitung der Problemstellung

⁴⁵⁶ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

mittels verschiedener Hilfsmittel und Arbeitsmaterialien, konnte die Studie zielführend durchgeführt werden. Dabei wurden die Anforderungen an die Objektivität, Validität und Reliabilität der Studie berücksichtigt. Die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung der Studie benötigten einen hohen Zeitaufwand.

Zur Auswertung der Studie wurde der Erfolg der Problemanalyse beurteilt, der über das Erkennen des Problems gemessen wurde. Hierzu wurden die qualitative Auswertung der *scanpath*-Videos genutzt. Mittels der aufgenommenen Blickdaten wurden Hypothesen zu Abhängigkeiten zwischen betrachteten Gestaltmerkmalen und der Problemerkennung quantitativ geprüft.

Erfahrungen im Bereich der Produktentwicklung und Konstruktion als auch Erfahrungen im Bereich der Entwicklungsmethodik beeinflussten die Analyse während des Problemlösungsprozesses positiv. Die Expertengruppe erkannte signifikant häufiger, dass die Nageldetektion aufgrund der Biegebelastung um die Kante der Bolzenführung bricht. Eine erfolgreiche Problemanalyse und das Erkennen des Problems führten in dieser Studie zu signifikant besseren Lösungsvorschlägen.

Um zu untersuchen, woraus sich die Unterschiede in der Problemerkennung ergeben, wurden die Blickdaten verglichen. Probanden, die das System erfolgreich analysierten, betrachteten signifikant länger die Originalteile und die Bruchfläche der Nageldetektion. Die Gestaltmerkmale dieser Objekte enthielten viele Informationen, die Interpretationen von Wechselwirkungen mit benachbarten Bauteilen zuließen. Experten in den Bereichen PE+K und/oder EM betrachteten auch die Wechselwirkungen des versagenden Bauteils und der Umgebung signifikant häufiger als Novizen in diesen Bereichen.

Die Repräsentation des technischen Systems und des Kontexts durch unterschiedliche Hilfsmittel ermöglichte die Problemanalyse für Probanden mit unterschiedlichen Erfahrungsstufen. Probanden mit wenig Erfahrung in CAD-Systemen konnten sich das Problem anhand des 3D-Modells erschließen. Experten in diesem Fachbereich behielten die Möglichkeit das System anhand von 2D-Schnittdarstellungen zu analysieren.

7.6.1 Vorschläge zum Vorgehen bei einer Synthese-getriebenen Analyse

Auch für die Synthese-getriebene Analyse lassen sich die Vorschläge aus der vorherigen Studie „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“ übertragen. Zusätzlich können aus den Erkenntnissen folgende weitere Vorschläge zum Vorgehen gegeben werden. Diese beziehen sich auf die Synthese-getriebene Analyse eines Systems mit einer versagender Leitstützstruktur als Problemstellung, wie die gebrochene Nageldetektion in der oben beschriebenen Aufgabenstellung.

Zur erfolgreichen Lösung eines Problems muss als Basis der Synthese ein tiefes Systemverständnis aufgebaut und das Problem erkannt werden:

- Die genauen Wechselwirkungen der versagenden Leitstützstruktur mit den benachbarten Strukturen müssen analysiert werden.
- Dazu muss die „örtliche Gebundenheit“ an die versagende Struktur überwunden werden, um auch benachbarte Gestalt-Funktion-Elemente in die Problemsuche einzubeziehen.
- Die Analyse von Originalteilen aus Versuchen auf Verschleiß- bzw. Versagensarten unterstützen erfolgreich die Problemsuche.

Die Eigenschaften der Gestalt können auch an realen Bauteilen analysiert und mit Funktionen verknüpft werden. Zu den Eigenschaften der Gestalt eines realen Prototyps zählen unter anderem auch die Bruchflächen von versagenden Bauteilen und die Oberflächenbeschaffenheit von Strukturen. Über die Analyse der Wechselwirkungen zwischen der versagenden Leitstützstruktur und benachbarten Strukturen, über die Analyse deren Gestalteeigenschaften sowie über die Analyse der Wirkflächenpaare kann auf die Versagensursache geschlossen werden. Daraus lässt sich ein hohes Systemverständnis ableiten und das Problem im Detail erkennen. Dieser Schritt bildet die Basis für die Synthese einer neuen Produktgestalt und der Lösung des Problems.

Der Begriff der *örtlichen Gebundenheit* wurde während der Diskussion der Erkenntnisse dieser Studie von MATTHIESEN und RUCKPAUL definiert. Als Basis diente der Begriff der funktionalen Gebundenheit von DUNCKER und MAIER⁴⁵⁷, der beschreibt, dass Probanden Gegenstände mit einer bestimmten Funktionen verknüpfen und diese Gegenstände nicht mehr getrennt von diesen Funktionen wahrnehmen und mit anderen Funktionen belegen können. Übertragen auf die Analyse eines Systems mit einem versagenden Bauteil aus dieser Studie ergibt sich ein ähnliches Bild. Alle Probanden fokussierten während der Analyse und Lösungssuche das versagende Bauteil. Es wurden zwar die Wechselwirkungen des Bauteils mit den benachbarten Strukturen analysiert und erkannt, jedoch bezogen sich die Lösungsvorschläge fast ausschließlich auf das versagende Bauteil. Diese *örtliche Gebundenheit* entstand rein aus den Auffassungen der Probanden und wurde nicht durch die Aufgabenstellung vorgegeben. Daher müssen angehende sowie für erfahrene Ingenieure die *örtliche Gebundenheit* an versagende Strukturen überwinden, um auch Lösungsvorschläge losgelöst von dem Versagensort erarbeiten zu können.

⁴⁵⁷ Duncker, 1935; Maier, 1931, siehe Kapitel 2.4.2

7.6.2 Einschränkungen der Ergebnisse

Es ist anzumerken, dass aus der Gruppe von Novizen im Bereich PE+K und/oder EM kein Teilnehmer das Problem erkannt hat. Aus der Expertengruppe im Bereich PE+K und/oder EM haben alle Probanden, deren Blickdaten komplett ausgewertet wurden, das Problem erfolgreich analysiert. Dies begünstigt die positive Signifikanzprüfung der gestellten Hypothesen. Um Verallgemeinerungen der Ergebnisse dieser Studie treffen zu können, ist eine größere Stichprobengröße notwendig. Die Stichprobengröße zur Signifikanzprüfung der Hypothesen variierte zwischen 10 und 17 Probanden.

8 Erkenntnisse für weitere Untersuchungen unter Einsatz von Eye Tracking

Alle in dieser Dissertation erarbeiteten Ergebnisse konnten durch den kombinierten Einsatz der Eye Tracking Technologie mit etablierten Erhebungsmethoden der empirischen Forschung abgeleitet werden. Die erhobenen Daten für Fixationsdauern auf bestimmten Systemteilen oder Materialien stützen die Erkenntnisse, die aus Beobachtungen, Transkripten und Befragungen gezogen wurden. Im Folgenden werden die Erkenntnisse nach Themengebieten zusammengefasst.

Ablaufpläne und Versuchsprotokoll

Für beide Studien wurden detaillierte Ablaufpläne und Versuchsprotokolle angelegt. Die Vorbereitung der Teilnehmer auf den Einsatz der Eye Tracking Technologie und die Think-Aloud Methode wurde in den Ablaufplänen dokumentiert und konsequent umgesetzt. Die Protokolle haben sich als sehr geeignet und extrem wichtig in der Durchführung der Studien erwiesen. Die Studie zur Analyse von technischen Zeichnungen wurde durch zwei Personen geleitet. Mittels des angelegten Versuchsprotokolls und der intensiven Übergabe, war es möglich, einen nahezu gleichen Durchlauf der Tests zu gewährleisten. Der Wechsel zwischen zwei Versuchsleiter sollte jedoch nach Möglichkeit vermieden werden, um keine zusätzliche Störgröße zu erzeugen.

Aufgabenstellung

In beiden Studien wurden die Analyseprozesse von industrierelevanten Fragestellungen aufgenommen. Zum einen wurde der Freigabeprozess von technischen Zeichnungen abgebildet, zum anderen die Synthese-getriebene Analyse zur Bearbeitung einer realen Problemstellung. Die erstellten Aufgabenbeschreibungen wurden selbsterklärend und eindeutig formuliert. Die Probanden mussten keine inhaltlichen Rückfragen zu den Aufgaben stellen. Um dies zu erreichen, waren jedoch intensive Vorstudien notwendig. Für die Studie zur Synthese-getriebenen Analyse waren mehrere Iteration zur Beschreibung des Aufgabenkontexts und der Aufgabenstellung notwendig. Vor allem die Präsentation des Kontexts mit eingebundenen Anwendungsvideos war essentiell für die Bearbeitung der Aufgabe durch die Probanden. Hierauf sollte in ähnlichen Studien besonderen Wert gelegt werden.

Arbeitsmaterialien und Hilfsmittel

Als Arbeitsmaterialien wurden den Versuchsteilnehmern in der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse unterschiedliche Hilfsmittel zur Verfügung gestellt. Diese

reichten von 2D-Schnittdarstellungen über reale Baugruppen bis zu einem ausgedruckten 3D-Modell. So wurden Informationen redundant abgebildet. Während der Durchführung der Studie hat sich gezeigt, dass die große Anzahl der Hilfsmittel sehr vorteilhaft war. Die Probanden konnten frei die Arbeitsmaterialien wählen, die sie bevorzugten. Es empfiehlt sich für weitere Studien, ebenfalls unterschiedliche Arten von Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen und somit Störfaktoren aufgrund von unterschiedlichen Expertisen in der 2D- oder 3D-Modellierung zu vermeiden.

Expertenrating der Lösungsvorschläge

Bei einer späteren Bewertung der Lösungen durch eine unabhängige Jury, müssen die Kriterien der Bewertung aus der Aufgabenstellung ersichtlich sein. Dies kann durch direkte Angabe der Kriterien erfolgen oder auf implizite Weise über Beschreibungen des Projekts. Es können Angaben des Projektstands in der Projektbeschreibung aufgenommen werden, um der Versuchsperson zu verdeutlichen, ob eine weitgehende Veränderung des Gesamtsystems möglich ist oder ob eine schnelle, kostensparende Lösung zu bevorzugen ist. Die Angabe der Bewertungskriterien, direkt oder indirekt, ist abhängig von dem Studienaufbau und den zu prüfenden Hypothesen. Im Fall der direkten Angabe der Kriterien kann vorausgesetzt werden, dass sie allen Probanden bekannt sind und die Teilnehmer versuchen, diese umzusetzen. Bei indirekter Angabe entscheidet der Erfahrungsstand der Probanden darüber, ob sie die Bewertungskriterien richtig auslesen können. Dies kann gezielt für die Auswertung ausgenutzt werden. Es kann jedoch auch einen weiteren Störfaktor darstellen.

Verhältnis der Kosten bzw. des Zeitaufwands zum Nutzen

Nicht nur die Durchführung von Vorstudien zur Absicherung der Aufgabenstellung benötigt Zeit. Auch die eigentliche Durchführung der Studien und die Nachbereitung der Daten sind zeitintensive Aktivitäten. Die Zeitaufwände sind als Kostenfaktoren zu berücksichtigen. Dabei sollte man zwei Arten von Aufwänden unterscheiden: Zeit, die vom Forschungsinstitut investiert werden muss, und Zeit, die durch die Probanden aufgewendet werden muss.

Die Versuchsdauer der Studie zum Aufbau von Systemverständnis war auf einen kurzen Zeitraum begrenzt. Dadurch war es möglich, eine große Anzahl von Probanden aufzunehmen. Der Zeitaufwand der Versuchsteilnehmer beschränkte sich auf die Bearbeitungszeit der Aufgabe und eine kurze Vorbereitungs- und Nachbereitungsphase. Begünstigend war hier auch die Verwendung der technischen Zeichnungen als statische Stimuli. Der Aufwand der Datennachbereitung ist gering. Durch die Definition von AOIs können mit wenig Aufwand statistische Auswertungen durchgeführt werden.

Die Studie zur Synthese-getriebenen Analyse benötigte einen wesentlich höheren Aufwand. Um den Zeitaufwand für die Probanden gering zu halten, wurde die Aufgabenbearbeitung auf einen Zeitraum von 20 Minuten begrenzt. Die Vorbereitung der Versuchsteilnehmer benötigte jedoch länger, sodass ein Versuch insgesamt zwischen 60 bis 75 Minuten dauerte. Ohne eine Nachbereitung der Daten ist nur eine qualitative Auswertung der Daten möglich. Zur quantitativen Auswertung von Fixationsdauern auf AOIs müssen die Blickdaten aller Probanden über *semantic gaze mapping* einer Referenzansicht zugewiesen werden. Dieser Vorgang benötigt ca. die 3- bis 4-fache Dauer der Aufnahme. So muss pro Versuchsteilnehmer mindestens eine Stunde Zeitaufwand zur Zuweisung der Fixationen gerechnet werden. Da jedoch nur durch die Abbildung der realen Problemstellung mit verschiedenen Arbeitsmaterialien eine hohe empirische Relevanz erreicht werden kann, kann der Aufwand im Vergleich zum Nutzen gerechtfertigt werden.

Die zukünftige Entwicklung von Eye Tracking Systemen lässt jedoch auf eine automatisierte Zuweisung von Fixationen zu AOIs hoffen. Erste Ansätze sind bei etablierten Herstellern bereits in der Entwicklung. Dadurch würde sich der Zeitaufwand für die Aufbereitung der Daten wesentlich verringern.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit betrachtete in empirischen Studien unter Einsatz der Eye Tracking Technologie die Analyse technischer Systeme in der Produktentwicklung und leistet damit einen Beitrag zum Messen und Verstehen von Analyseprozessen während der Konstruktion. Hierzu wurde neben der Analyse technischer Zeichnungen zum Aufbau von Systemverständnis auch die Synthese-getriebene Analyse in empirischen Studien umgesetzt. Eine reale Problemstellung aus der Industrie diente als Aufgabe, um die Vorgehensweisen von erfahrenen Konstrukteuren und angehenden Ingenieuren untersuchen zu können. Das Erkennen des vorliegenden Problems war hierbei der Schlüssel für eine erfolgreiche Problemlösung und der Synthese einer verbesserten Produktgestalt. Dazu mussten die Probanden die Gebundenheit an versagende Bauteile, was auch als *örtliche Gebundenheit* eingeführt wurde, überwinden. Nur so konnten die Wechselwirkungen und Systemzusammenhänge erkannt werden. .

Um die Analyseprozesse messbar zu machen, wurde zunächst untersucht, wie die Eye Tracking Technologie in empirischen Studien zur Konstruktionsforschung eingesetzt werden kann. Dazu wurden Möglichkeiten verschiedener Eye Tracking Systeme mit der Nutzung unterschiedlicher Arbeitsmaterialien aufgezeigt. Die Wahl des Eye Tracking Systems, *Remote System oder Eye Tracking Brille*, bedingte auch die Auswertemöglichkeiten und den Aufwand der Datenaufbereitung. Dies musste bei der Planung von Eye Tracking Studien bedacht werden.

Einen großen Mehrwert versprach die Kombination der Blickdatenerfassung mit etablierten Erhebungsmethoden wie der Think-Aloud Methode. Dazu musste jedoch die Wechselwirkungen der Verbalisierung von Gedanken bei *Concurrent Think-Aloud (CTA)* und *Retrospective Think-Aloud (RTA)* auf das Blickverhalten untersucht werden. In einer Teststudie konnte festgestellt werden, dass sich der Einsatz von *CTA* für Studien zur Beobachtung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen sehr gut eignet und ohne signifikante Beeinflussung der Blickdaten, wie Fixationsdauern und Sakkadenlängen, mit Eye Tracking kombiniert werden kann.

Daraufhin wurden die Anforderungen an empirische Studien auf die Anwendung der Eye Tracking Technologie übertragen. Zu diesen Anforderungen zählen die Gewährleistung der Objektivität, der Validität und der Reliabilität. Weiter soll eine möglichst hohe empirische Relevanz und ein ausgeglichenes Kosten/Nutzen Verhältnis umgesetzt werden.

Aus den übertragenen Anforderungen wurden zwei Studienkonzepte zu Analyseprozessen während der Konstruktion erarbeitet. Das erste Konzept untersuchte grundlegende Analyseprozesse mit möglichst engen Randbedingungen in einer Laborstudie. Dazu wurde die Analyse technischer Zeichnungen zum Aufbau von Systemverständnis genutzt. Das zweite Studienkonzept übertrug einen realen Problemlösungsprozess mit hoher empirischer Relevanz in eine Laborstudie. Diese Studie bildete den Analyseprozess zum Zweck der Synthese technischer Systeme, die Synthese-getriebene Analyse, ab. Zu beiden Studien wurden die passenden Aufgabenstellungen, Hilfsmaterialien und Ablaufpläne erarbeitet. Auch Parameter zur Quantifizierung der Ergebnisse wurden für eine zielgerichtete Auswertung festgelegt und genutzt.

Die Studien wurden mit Probandengruppen durchgeführt, die verschiedene Ausbildungsstände von Studierenden bis hin zu erfahrenen Ingenieuren umfasste. Dabei ließ sich feststellen, dass erfahrene Ingenieure während des Aufbaus von Systemverständnis an Hand technischer Zeichnungen die gezeigten Systeme tiefergehend analysierten und interpretierten. Für die genannten Interpretationen und ein tiefes Systemverständnis war das reine Erkennen von Bauteilen, deren Wechselwirkungen und der Funktionen nicht ausreichend. Hierzu mussten auch geometrische und stoffliche Merkmale im Detail erfasst werden, wie z.B. die Dimensionen der Wellendurchmesser. Hierin unterschieden sich Studierende und erfahrene Ingenieure signifikant. Weiter wurde das Phasenmodell zur Zeichnungsanalyse durch die qualitative Auswertung der Daten angepasst. Ein Nachweis der Phasen anhand der Blickdaten, mit Zunahme bzw. Abnahme der Fixationsdauern über den Versuchsverlauf, konnte nicht abschließend getätigt werden.

Bei Auswertung der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse konnten Unterschiede in der Analyse der Problemstellung und somit der Problemerkennung festgestellt werden. Dabei beeinflussten Erfahrungen in den Bereichen der Produktentwicklung und Konstruktion sowie im Bereich der Entwicklungsmethodik die Problemerkennung positiv. Eine erfolgreiche Problemanalyse führte dabei auch zu besseren Lösungsvorschlägen. Versuchsteilnehmer, die das zu lösende Problem richtig erkannten, schauten länger auf relevante Bauteile. Gleichzeitig wechselten sie ihren Blick öfter zwischen den Komponenten, die das Problem verursachten.

Aus den Erkenntnissen beider Studien wurden Vorschläge zum Vorgehen während der Analyse technischer Systeme erarbeitet. Diese richten sich vorwiegend an angehende und wenig erfahrene Ingenieure. Dabei bieten sie auch erfahrenden Ingenieuren Hilfestellung bei der Synthese-getriebenen Analyse. Um ein tiefes Systemverständnis aufbauen zu können, müssen alle Eigenschaften der Gestalt (geometrische und stoffliche Eigenschaften sowie Zustandseigenschaften) und auch

die Wechselwirkungen der Strukturen analysiert werden. Dazu ist es sinnvoll, Bauteile aus Versuchsreihen, wie beispielsweise Prototypentests, im Detail auf ihre Verschleiß- bzw. Versagensarten zu untersuchen. Nur auf Basis einer detaillierten Analyse und des aufgebauten Systemverständnisses kann eine neue Produktgestalt generiert werden. Dabei muss bei Systemen, die aufgrund von Bauteilversagen optimiert werden, die *örtliche Gebundenheit* an das versagende Bauteil überwunden werden. Dies bedeutet, dass sich die Ingenieure von der Fokussierung auf dieses Bauteil lösen müssen, um weitere, eventuell erfolgreichere Lösungsmöglichkeiten durch Anpassung von benachbarten Strukturen einbeziehen zu können.

9.2 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit kann als Grundlage für weitere empirische Untersuchungen im Bereich der Konstruktionsmethodik unter Einsatz der Eye Tracking Technologie genutzt werden. Vor allem die Erarbeitung der Anforderungen in Kapitel 5.3 und die Zusammenfassung der Erkenntnisse in Kapitel 8 sind hierfür hilfreich.

Im direkten Bezug auf die durchgeführten Studien wäre es sinnvoll, die Studie zur Synthese-getriebenen Analyse mit weiteren Probanden durchzuführen, um auf eine größere Stichprobe zur Signifikanzprüfung der Hypothesen zurückgreifen zu können. Die Studie zur Analyse technischer Zeichnungen zum Aufbau von Systemverständnis kann ebenfalls mit weiteren Probanden erweitert werden oder durch neue Zeichnungen ergänzt werden, um das Phasenmodell zur Zeichnungsanalyse zu verifizieren. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können auch weitere Studien zur Untersuchungen von Analyseprozessen mit anderem Fokus erstellt und durchgeführt werden.

Es sind auch Feldstudien zu Analyseprozessen unter Einsatz der Eye Tracking Technologie denkbar. Dabei müssen Situationen im Berufsalltag von Entwicklungsingenieuren und Konstrukteuren gefunden werden, in denen die Systemanalyse notwendig ist. Eventuell können diese auch provoziert werden. Feldstudien können meist nur mit Eye Tracking Brillen durchgeführt werden. Solche Studien sind nur für qualitative Untersuchungen zu empfehlen. Da ein dynamischer Stimulus entsteht, wäre ansonsten der Aufbereitungsaufwand für eine quantitative Datenauswertung sehr hoch.

Basierend auf den Erkenntnissen und Erfahrungen dieser Forschungsarbeit und weiterer am IPEK durchgeführter Studien wird zurzeit ein DFG-gefördertes Forschungsvorhaben durch wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEKs bearbeitet. Dabei werden Studien zum Aufbau von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen während der Synthese-getriebenen Analyse durchgeführt. Neben einer realen Problemstellung

aufgrund von Bauteilversagen wird auch eine Problemstellung zum Funktionsversagen aufbereitet. Dabei kann ein technisches System seine Funktion nicht ausführen, da die Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten gestört sind. Der große Unterschied zwischen Problemstellungen zum Bauteilversagen liegt darin, dass die Versuchsteilnehmer gezwungen sind, sich auf die Wechselwirkungen der Strukturen zu konzentrieren. Der Aufbau des Funktions- und Systemverständnis ist für die Bearbeitung dieser Aufgabe essentiell. Eine *örtliche Gebundenheit* kann hierbei nicht auftreten. Es sind sehr interessante Ergebnisse mit hoher empirischer Relevanz aus diesem Forschungsvorhaben zu erwarten.

10 Literaturverzeichnis

Ahmed 2007

Ahmed, S.: Empirical research in engineering practice. In: *Journal of Design research* 6 (6 // 3), S. 359–380, 2007.

Albers et al. 2008a

Albers, A.; Matthiesen, S.; Thau, S.; Alink, T.: Support of design engineering activity through C&CM – Temporal decomposition of design problems. In: Proceedings of the TMCE. Unter Mitarbeit von I. Horáth und Z. Rusák. Tools and Methods of Competitive Engineering. Izmir, Türkei, 2008.

Albers et al. 2008b

Albers, A.; Alink, T.; Matthiesen, S.; Thau, S.: Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model. In: International Design Conference. DESIGN 2008. Dubrovnik, Kroatien, S. 245–252, 2008.

Albers 2010

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: Horváth, I., Mandorli, F. und Zóltan, R. (Hg.): Proceedings of the TMCE. Tools and methods of competitive engineering. Ancona, Italy, 2010.

Albers et al. 2011c

Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: A new Perspective on Product Engineering - Overcoming Sequential Process Models. In: Birkhofer, H. (Hg.): The Future of Design Methodology. London, New York: Springer, S. 199–209, 2011.

Albers et al. 2012

Albers, A.; Denkena, B.; Matthiesen, S.: Faszination Konstruktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

Albers et al. 2015d

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. SSP. Stuttgart, Deutschland. Stuttgart, 2015.

Albers / Matthiesen 1999

Albers, A.; Matthiesen, S.: Das Karlsruher Lehrmodell. In: 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Maschinenbau im Informationszeitalter. Technische Universität Ilmenau, 1999.

Albers / Meboldt 2006

Albers, A.; Meboldt, M.: A new Approach in Product Development, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: AEDS Workshop, Bd. 2006. Pilsen, 2006.

Albers / Wintergerst 2014

Albers, A.; Wintergerst, E.: The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: Chakrabarti, A. und Blessing, L. T. M. (Hg.): An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations: Springer, S. 151–172, 2014.

Alink 2010

Alink, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2010.

Anders 2001

Anders, G.: Pilot's Attention Allocation during Approach and Landing: Eye- and Head-Tracking Research in an A330 Full Flight Simulator. In: International Symposium on Aviation Psychology. Columbus, OH, USA, 2001.

Anderson 2007

Anderson, J. R.: Kognitive Psychologie. 6. Auflage. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl., 2007.

Badke-Schaub / Frankenberger 2004

Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E.: Management Kritischer Situationen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.

Badni 2012

Badni, K. S.: Real Product Eye Tracking. In: International Design Conference. DESIGN 2012. Dubrovnik, Kroatien, S. 1275–1282, 2012.

Bender 2004

Bender, B.: Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, TU Berlin. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte VDI, Nr. 377), 2004.

Birkhofer 1980a

Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften. Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Nr. 70), 1980.

Birkhofer 2011b

Birkhofer, H. (Hg.) (2011): The Future of Design Methodology. London, New York: Springer.

Blessing / Chakrabarti 2009

Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Dordrecht, New York: Springer, 2009.

Boa et al. 2013

Boa, D.; Hicks, B.; Nassehi, A.: A comparison of product preference and visual behaviour for product representations. In: International Conference on Engineering Design 2013. ICED'13. Seoul, Südkorea, S. 487–496, 2013.

Boa / Hicks 2014

Boa, D.; Hicks, B.: Information Operations: A Model for Characterising the Information Interaction of Engineers. In: Proceedings of the HBiD. Analyzing Cognitive Processes during Design. Unter Mitarbeit von Mirko Meboldt, Sven Matthiesen, Petra Badke-Schaub und Quentin Lohmeyer. Ascona, Schweiz, 2014.

Bock 1955

Bock, A.: Die Begriffe Konstruieren, Entwerfen und Gestalten. In: *Die Technik: technisch-wissenschaftliche Zeitschrift für Grundsatz- und Querschnittsfragen* (8), S. 504–505, 1955.

Bortz / Döring 2009

Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler. 4., überarb. Aufl., Nachdr. Heidelberg: Springer-Medizin-Verl. (Springer-Lehrbuch Bachelor, Master), 2009.

Brown / Blessing 2005

Brown, D. C.; Blessing, L.: The Relationship Between Function and Affordance. In: ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. al. Long Beach, California, USA, September 24–28, 2005, S. 155–160, 2005.

Chandrasekaran / Josephson 2000

Chandrasekaran, B.; Josephson, J. R.: Function in Device Representation. In: *EWC* 16 (3-4), S. 162–177, 2000.

Chi et al. 1981

Chi, M. T. H.; Feltovich, P. J.; Glaser, R.: Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices. In: *Cognitive Science* 5 (2), S. 121–152, 1981.

Davies 1995

Davies, S. P.: Effects of concurrent verbalization on design problem solving. In: *Design Studies* (16), S. 102–116, 1995.

Delabarre 1898

Delabarre, E. B.: A Method of Recording Eye-Movements. In: *The American Journal of Psychology* 9 (4), S. 572, 1898.

Dodge / Cline 1901

Dodge, R.; Cline, T. S.: The angle velocity of eye movements. In: *Psychological Review* 8 (2), S. 145–157, 1901.

Dörner 1979

Dörner, D.: Problemlösen als Informationsverarbeitung, 1979.

Dörner 1989

Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. 1. Aufl. Hamburg: Rowohlt, 1989.

Duchowski 2002a

Duchowski, A. T.: A breadth-first survey of eye-tracking applications. In: *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 34 (4), S. 455–470, 2002.

Duchowski 2007b

Duchowski, A. T.: Eye tracking methodology. Theory and practice. 2nd. London: Springer, 2007.

Duncker 1935

Duncker, K.: Zur Psychologie des produktiven Denkens. Berlin: Springer, 1935.

Dylla 1990

Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. München: Carl Hanser Verlag, 1990.

Eckert et al. 2003a

Eckert, C.; Clarkson, J.; Stacey, M.: The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In: International Conference on Engineering Design 2007. ICED'03. Stockholm, Schweden, S. 245–246, 2003.

Eckert et al. 2010

Eckert, C.; Alink, T.; Albers, A.: Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. In: International Design Conference. Dubrovnik, Kroatien, S. 673–682, 2010.

Eckert et al. 2011b

Eckert, C.; Alink, T.; Ruckpaul, A.; Albers, A.: Different notions of function: results from an experiment on the analysis of an existing product. In: *Journal of Engineering Design* 22 (11-12), S. 811–837, 2011.

Eckert et al. 2012c

Eckert, C.; Ruckpaul, A.; Alink, T.; Albers, A.: Variations in functional decomposition for an existing product: Experimental results. In: *AIEDAM* 26 (02), S. 107–128, 2012.

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009.

Erden et al. 2008

Erden, M. S.; Komoto, H.; van Beek, T. J.; D'Amelio, V.; Echavarria, E.; Tomiyama, T.: A review of function modeling: Approaches and applications. In: *AIEDAM* 22 (02), 2008.

Ericsson / Simon 1993

Ericsson, K. A.; Simon, H. A.: Protocol analysis. Verbal reports as data. Rev. ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1993.

Frankenberger 1997

Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung. Empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte / VDI Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Nr. 291), 1997.

Fricke 1993

Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß. Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl (Fortschritt-Berichte VDI / 1, 227), 1993.

Gero / Kannengiesser 2002

Gero, J. S.; Kannengiesser, U.: The Situated Function - Behaviour - Structure Framework. In: *Artificial Intelligence in Design*, S. 89–104, 2002.

Gero / Tang 2001

Gero, J. S.; Tang, H.-H.: The differences between retrospective and concurrent protocols in revealing the process-oriented aspects of the design process. In: *Design Studies* 22 (3), S. 283–295, 2001.

Goldberg / Kotval 1999

Goldberg, J. H.; Kotval, X. P.: Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 24 (6), S. 631–645, 1999.

Günther 1998

Günther, J.: Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess. Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker (Konstruktionstechnik München, Bd. 30), 1998.

Hacker 2002

Hacker, W.: Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen. München, Mering, Zürich: Hampp; Vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, 2002.

Hahne 2012

Hahne, M.: Entwicklung eines Prozessmodells der Interpretation technischer Zeichnungen. 1. Aufl. Soest: Maschinenelemente-Verl, 2012.

Holmqvist et al. 2011

Holmqvist, K.; Nyström, M.; Andersson, R.; Dewhurst, R.; Jarodzka, H.; van de Weijer, J.: Eye tracking. A comprehensive guide to methods and measures. Oxford: Oxford university press, 2011.

Huber 2000

Huber, O.: Das psychologische Experiment. Eine Einführung. 3. Aufl., unverändert nach der 2. ergänzten und korr. Aufl. Bern, Göttingen, Toronto [etc.]: H. Huber (Aus dem Programm Huber. Psychologie-Lehrbuch), 2000.

Hubka 1984

Hubka, V.: Theorie Technischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984.

Hussy et al. 2013

Hussy, W.; Schreier, M.; Echterhoff, G.: Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften. 2., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer (Springer-Lehrbuch), 2013.

Jänsch 2006

Jänsch, J.: Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz. Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht. Dissertation, VDI Verlag, Düsseldorf, 2006.

Kuusela / Paul 2000

Kuusela, H.; Paul, P.: A Comparison of Concurrent and Retrospective Verbal Protocol Analysis. In: *The American Journal of Psychology* (113), S. 387–404, 2000.

Lienert / Raatz 1998

Lienert, G. A.; Raatz, U.: Testaufbau und Testanalyse. 6. Aufl., Studienausg. Weinheim: Beltz, Psychologie Verl.-Union, 1998.

Lindemann 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

Litchfield et al. 2010

Litchfield, D.; Ball, L. J.; Donovan, T.; Manning, D. J.; Crawford, T.: Viewing another person's eye movements improves identification of pulmonary nodules in chest x-ray inspection. In: *Journal of experimental psychology. Applied* 16 (3), S. 251–262, 2010.

Lohmeyer et al. 2013

Lohmeyer, Q.; Meboldt, M.; Matthiesen, S.: Analyzing Visual Strategies of Novice and Experienced Designers by Eye Tracking Application. In: International Conference on Engineering and Product Design Education. Dublin, Irland, S. 202–207, 2013.

Lohmeyer 2013

Lohmeyer, Q.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Band 59, Karlsruhe, 2013.

Lohmeyer et al. 2014a

Lohmeyer, Q.; Matthiesen, S.; Mussgnug, M.; Meboldt, M.: Analysing Visual Behavior in Engineering Design By Eye Tracking Experiments. In: Horváth, I., Mandorli, F. und Zóltan, R. (Hg.): Proceedings of the TMCE. Tools and Methods of Competitive Engineering. Budapest, Ungarn, S. 949–958, 2014.

Lohmeyer et al. 2014b

Lohmeyer, Q.; Mussgnug, M.; Meboldt, M.: Skimming and Scrutinizing: Quantifying Two Basic Patterns of Visual Behavior in Design. In: Proceedings of the HBiD. Analyzing Cognitive Processes during Design. Unter Mitarbeit von Mirko Meboldt, Sven Matthiesen, Petra Badke-Schaub und Quentin Lohmeyer. Ascona, Schweiz, 2014.

Lohmeyer et al. 2014c

Lohmeyer, Q.; Matthiesen, S.; Meboldt, M.: Task-dependent visual behavior of engineering designers – An eye tracking experiment. In: International Design Conference. DESIGN 2014. Dubrovnik, Kroatien, 2014.

Lohmeyer / Meboldt 2015

Lohmeyer, Q.; Meboldt, M.: How we understand engineering drawings: an eye tracking study investigating skimming and scrutinizing sequences. In: International Conference on Engineering Design. ICED'15. Mailand, Italien, S. 359–368, 2015.

Lohmeyer / Meboldt 2016

Lohmeyer, Q.; Meboldt, M.: The Integration of Quantitative Biometric Measures and Experimental Design Research. In: Cash, P., Stanković, T. und Štorga, M. (Hg.): Experimental Design Research. Cham: Springer International Publishing, S. 97–112, 2016.

Maier 1931

Maier, N. R. F.: Reasoning in Humans. II. The Solution of a Problem and its Appearance in Consciousness. In: *Journal of Comparative Psychology* (12), S. 181–194, 1931.

Maier et al. 2014

Maier, A. M.; Baltsen, N.; Christoffersen, H.; Störrle, H.: Towards diagram understanding: A pilot study measuring cognitive workload through eye-tracking. In: Proceedings of the HBiD. Analyzing Cognitive Processes during Design. Unter Mitarbeit von Mirko Meboldt, Sven Matthiesen, Petra Badke-Schaub und Quentin Lohmeyer. Ascona, Schweiz, 2014.

Matthiesen 2002a

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation, Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Band 6, Karlsruhe, 2002.

Matthiesen 2011b

Matthiesen, S.: Seven Years of Product Development in Industry - Experiences and Requirements for Supporting Engineering Design with 'Thinking Tools'. In: International Conference on Engineering Design. ICED'11. Kopenhagen, Dänemark, S. 236–245, 2011.

Matthiesen et al. 2013

Matthiesen, S.; Meboldt, M.; Ruckpaul, A.; Mussgnug, M.: Eye tracking, a method for engineering design research on engineers' behavior while analyzing technical systems. In: International Conference on Engineering Design 2013. ICED'13. Seoul, Südkorea, S. 277–286, 2013.

Matthiesen 2016c

Matthiesen, S.: Konstruktion entsteht im Kopf! In: *Konstruktion* (4), 2016.

Matthiesen / Ruckpaul 2012

Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: New Insights on the Contact&Channel-Approach - Modelling of Systems with Several Logical States. In: International Design Conference. DESIGN 2012. Dubrovnik, Kroatien, S. 1019–1028, 2012.

Meboldt 2008

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), Band 29, Karlsruhe, 2008.

Meboldt et al. 2012

Meboldt, M.; Matthiesen, S.; Lohmeyer, Q.: The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In: 2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes. MMEP. Cambridge, UK, S. 127–139, 2012.

Noton / Stark 1971

Noton, D.; Stark, L.: Scanpaths in Eye Movements during Pattern Perception. In: *Science* 171 (3968), S. 308–311, 1971.

Ognjanovic et al. 2014

Ognjanovic, S.; Lohmeyer, Q.; Hölscher, C.; Meboldt, M.: Visual Behavior in Task-Driven Reading of Engineering Drawings. In: Proceedings of the HBiD. Analyzing Cognitive Processes during Design. Unter Mitarbeit von Mirko Meboldt, Sven Matthiesen, Petra Badke-Schaub und Quentin Lohmeyer. Ascona, Schweiz, 2014.

Pahl 1994

Pahl, G. (Hg.) (1994): Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses von Mai 1992 bis Oktober 1993. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

Pahl et al. 2006

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7., neu bearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer, 2006.

Posner 1988

Posner, M. I.: Structures and function of selective attention. In: Boll, T. und Bryant, B. K. (Hg.): Clinical neuropsychology and brain function: Research, measurement, and practice. Washington, DC, US: American Psychological Association, S. 173–202, 1988.

Pospeschill 2006

Pospeschill, M.: Statistische Methoden. Strukturen, Grundlagen, Anwendungen in Psychologie und Sozialwissenschaften. 1. Aufl. München: Spektrum Akad. Verl, 2006.

Rayner 1998

Rayner, K.: Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. In: *Psychological Bulletin* 124 (3), S. 372–422, 1998.

Rodenacker 1970

Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Konstruktionsbücher, 27), 1970.

Ruckpaul et al. 2014a

Ruckpaul, A.; Kriltz, A.; Matthiesen, S.: Using Eye Tracking to Understand the Engineering Designers' Behavior in Synthesis-Driven Analyzing Processes - Experiences in Study Design. In: Proceedings of the HBiD. Analyzing Cognitive Processes during Design. Unter Mitarbeit von Mirko Meboldt, Sven Matthiesen, Petra Badke-Schaub und Quentin Lohmeyer. Ascona, Schweiz, 2014.

Ruckpaul et al. 2015b

Ruckpaul, A.; Fürstnhöfer, T.; Matthiesen, S.: Combination of Eye Tracking and Think-Aloud Methods in Engineering Design Research. In: Design Computing and Cognition '14. Unter Mitarbeit von John S. Gero und Sean Hanna, S. 81–97, 2015.

Ruckpaul et al. 2015c

Ruckpaul, A.; Nelius, T.; Matthiesen, S.: Differences in analysis and interpretation of technical systems by expert and novice engineering designers. In: International Conference on Engineering Design. ICED'15. Mailand, Italien, S. 339–348, 2015.

Ryan / Haslegrave 2007

Ryan, B.; Haslegrave, C. M.: Use of concurrent and retrospective verbal protocols to investigate workers' thoughts during a manual-handling task. In: *Applied Ergonomics* 38 (2), S. 177–190, 2007.

SensoMotoric Instruments GmbH 2012

SensoMotoric Instruments GmbH: BeGaze Manual - Version 3.1. Hg. v. SensoMotoric Instruments GmbH, 2012, zuletzt geprüft am 06.04.2015.

Sperlich 1993

Sperlich, H.: Zur Definition der Gestalt in der Konstruktion. In: *Konstruktion* (45), S. 61–65, 1993.

Steinhilper / Sauer 2012

Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. 2 Bände. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch, 2), 2012.

van Gog et al. 2005

van Gog, T.; Paas, F.; van Merriënboer, J. J. G.; Witte, P.: Uncovering the Problem-Solving Process: Cued Retrospective Reporting Versus Concurrent and Retrospective Reporting. In: *Journal of Experimental Psychology: Applied* 11 (4), S. 237–244, 2005.

Van Someren et al. 1994

Van Someren, M. W.; Barnard, Y. F.; Sandberg, J. A. C.: The Think Aloud Method: A Practical Guide to Modelling Cognitive Processes. Amsterdam: Academic Press, 1994.

Verein Deutscher Ingenieure 1993

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf, 1993.

Verein Deutscher Ingenieure 1997

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2222 - Blatt 1. Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf, 1997.

Verein Deutscher Ingenieure 2004

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2223. Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Düsseldorf, 2004.

Vermaas 2010

Vermaas, P.: Technical functions: towards accepting different engineering meanings with one overall account. In: Horváth, I., Mandorli, F. und Zóltan, R. (Hg.): Proceedings of the TMCE. Tools and methods of competitive engineering. Ancona, Italy, 2010.

Wallace et al. 2005

Wallace, K.; Ahmed, S.; Bracewell, R.: Engineering knowledge management. In: Clarkson, J. und Eckert, C. (Hg.): Design process improvement. A review of current practice. London, U.K.: Springer, S. 326–343, 2005.

Wang et al. 2011

Wang, Z. Y.; Liu, H. S.; Shi, H. H.; Liu, H.: The Research of Automobile Design Evaluation Method Based on the Eye Tracking System Technology. In: *AMR* 230-232, S. 654–658, 2011.

Watson 1920

Watson, J. B.: Is thinking merely the action of language mechanisms? In: *British Journal of Psychology* (11), S. 87–104, 1920.

Weber 2012

Weber, C.: Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz. In: DfX-Symposium 2012, S. 25–62, 2012.

Weber / Werner 2000a

Weber, C.; Werner, H.: Klassifizierung von CAX-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells. In: DfX-Symposium 2000, S. 126–143, 2000.

Weber / Werner 2001b

Weber, C.; Werner, H.: Schlussfolgerungen für "Design for X" aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. In: DfX-Symposium 2001, S. 37–48, 2001.

Wiedner 2013

Wiedner, A.: Feldstudie zur Identifikation der von Konstrukteuren praktizierten Handlungsmuster bei der Funktion-Gestalt-Synthese. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Band 65, Karlsruhe, 2013.

Wintergerst 2015

Wintergerst, E.: Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.

Yamamoto 2009

Yamamoto, A. (2009): Antriebsstrang-Vorrichtung mit Kegelradgetriebe am 20.01.2009. Anmelden: DE200911000225. Veröffentlichungsnr: DE112009000225 T5.

Yarbus 1967

Yarbus, A. L.: Eye Movements and Vision. Boston, MA: Springer US, 1967.

Young / Sheena 1975

Young, L.; Sheena, D.: Survey of eye movement recording methods. In: *Behavior Research Methods & Instrumentation* 7 (5), S. 397–429, 1975.

Betreute studentische Abschlussarbeiten

Fürstenhöfer 2013

Fürstenhöfer, T.; Co-Betreuer/in: Ruckpaul, A.; Betreuer: Matthiesen, S.: Untersuchung des Einflusses von think aloud Methoden während der Analyse technischer Systeme mit Hilfe von Eye-Tracking. Bachelorarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2013.

Nelius 2014

Nelius, T.; Co-Betreuer/in: Ruckpaul, A.; Betreuer: Matthiesen, S.: Experiment zur Wahrnehmung von technischen Zeichnungen bei Ingenieuren in Abhängigkeit ihrer Erfahrung. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2014.

Rader 2014

Rader, S.; Co-Betreuer/in: Ruckpaul, A.; Betreuer: Matthiesen, S.: Untersuchungen zu Vorgehensweisen von Ingenieuren mit Eye-Tracking und weiteren empirischen Methoden. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2014.

11 Glossar

Begriff	Quelle	Erklärung
AOIs – Areas of Interest	Holmqvist et al., 2011	AOIs sind Bereiche auf einem Stimulus, welche die Forscher interessieren und näher ausgewertet werden sollen. Die Bereiche werden entsprechend den Forschungshypothesen im Vorfeld des Experiments festgelegt.
Dwell time	Holmqvist et al., 2011	Die dwell time bezeichnet die Verweildauer des Blicks eines Probanden auf einer AOI.
Event detection	Holmqvist et al., 2011	Die event detection bezeichnet die Zuordnung der Blick-Rohdaten zu okulomotorischen Ereignissen wie Fixationen und Sakkaden. Dies geschieht über Algorithmen, welche aus der Blickposition, der Blickgeschwindigkeit und der Blickbeschleunigung die Ereignisse rechnerisch bestimmen.
Externe Validität	Bortz / Döring, 2009	Durch eine hohe externe Validität können Ergebnisse erzielt werden, die durch die natürlichen Untersuchungsbedingungen generalisierbar sind.
Eye Tracker	Holmqvist et al., 2011	Messsysteme zur Messung von Augenbewegungen werden als Eye Tracker bezeichnet. Abhängig von dem verwendeten System können sie die Position des Auges relativ zur Kopfposition oder im Verhältnis zur Umgebung messen. Video-basierte Eye Tracker mit kombinierter Pupillen-Hornhautreflexion gehören heute zu der dominierenden Technologie.
Fixationen	Duchowski, 2007	Fixationen bezeichnen Augenbewegungen, welche die Retina, genauer die Fovea, über einem stationären Objekt stabilisieren. Das Auge steht während einer Fixation nicht still, sondern führt kleinste Bewegungen aus, welche ein Tremor, Drift oder Mikrosakkaden sein können.
Head-mounted Eye Tracker	Holmqvist et al., 2011	Head-mounted Eye Tracker werden auf dem Kopf der Versuchsperson befestigt. Die Aufnahmeelemente wie Augenkamera und die Beleuchtung können an einem Helm befestigt oder in einer Brille integriert sein.
Interne Validität	Bortz / Döring, 2009	Sie ist ein Maß für die kausal eindeutige Interpretation der Ergebnisse. Eine hohe interne Validität kann durch die Kontrolle und das Festhalten aller Störfaktoren innerhalb einer Laborstudie erzielt werden.

Begriff	Quelle	Erklärung
Remote Eye Tracker	Holmqvist et al., 2011	Remote Eye Tracker sind statische Systeme. Die Videokamera zur Aufnahme der Augen sowie die Infrarot-Beleuchtung sind ebenfalls statisch meist unterhalb des Stimulus angebracht. Sie erlauben geringe Kopfbewegungen der Versuchspersonen in einem gewissen Volumenbereich.
Sakkaden	Holmqvist et al., 2011	Sakkaden sind schnelle Augenbewegungen zwischen zwei Fixationen. Diese Bewegungen sind die schnellsten Bewegungen, die vom menschlichen Körper ausgeführt werden können. Sie dauern in der Regel zwischen 30 und 80 ms. Es kann angenommen werden, dass während Sakkaden keine Informationen vom Menschen aufgenommen werden kann.
Scanpath	Holmqvist et al., 2011 und Noton / Stark, 1971	Ein Scanpath beschreibt die Bewegung des Auges eines Probanden im Raum. Es gibt unterschiedliche Arten und Definitionen für den Scanpath. Es können Fixationsdauern in die Repräsentation des Pfads aufgenommen, Fixationen aber ohne deren Dauer dargestellt oder auch als eine Abfolge von Sakkaden definiert werden. Der Scanpath wird üblicherweise dem Stimulus überlagert.
Scrutinizing	Lohmeyer et al., 2014a	Skimming und Scrutinizing sind zwei Grundtypen des Blickverhaltens im Blickpfad während der Analyse technischer Zeichnungen. Scrutinizing bezeichnet die Strategie zur detaillierten Betrachtung der Zeichnung. Der Blickpfad während Scrutinizing weist vorwiegend lange Fixationsdauern und kurzen Sakkaden auf.
Semantic gaze mapping	SensoMotoric Systems	Semantic gaze mapping bezeichnet die Zuweisung von Fixationen von einem dynamischen Stimulus auf einen statischen Stimulus. So können Auswertemethoden für statische Stimuli auch für Aufnahmen mit dynamischen Stimuli angewendet werden.
Sequence chart	Holmqvist et al., 2011	Über sequence charts können Abfolgen von betrachteten AOIs über der Zeit dargestellt werden.
Skimming	Lohmeyer et al., 2014a	Skimming und Scrutinizing sind zwei Grundtypen des Blickverhaltens im Blickpfad während der Analyse technischer Zeichnungen. Skimming bezeichnet die Strategie zum Verschaffen einer Übersicht. Dabei zeichnet sich der Blickpfad während Skimming über Fixationen mit kurzer Dauer und langen Sakkaden aus.

Begriff	Quelle	Erklärung
Stimulus	eigene	Ein Stimulus bezeichnet einen Reiz, welcher eine Reaktion auslöst. In dieser Arbeit wird der Stimulus als visueller Reiz verstanden, der eine visuelle Informationsverarbeitung auslöst.
Synthese- getriebene Analyse	eigene	Die Synthese-getriebene Analyse bezeichnet die Analyseprozesse während der Synthese eines technischen Systems. Dabei wechseln sich Analyse- und Syntheseschritte ständig ab. Die Analyse kann dabei nicht getrennt von der Synthese betrachtet werden, da sie von der Suche nach neuen Lösungsmöglichkeiten getrieben wird. Diese Art der Analyse tritt bei der Problemlösung im täglichen Arbeitsalltag von Konstrukteuren und Entwicklern auf.
Übergangsmatrix / transition matrix	Holmqvist et al., 2011	Für eine Übergangsmatrix bzw. transition matrix werden die definierten AOIs in einer Matrix eingetragen und die Anzahl der Übergänge zwischen den AOIs eingetragen. Damit kann detektiert werden, ob ein häufiger Abgleich zwischen zwei AOIs stattfindet.

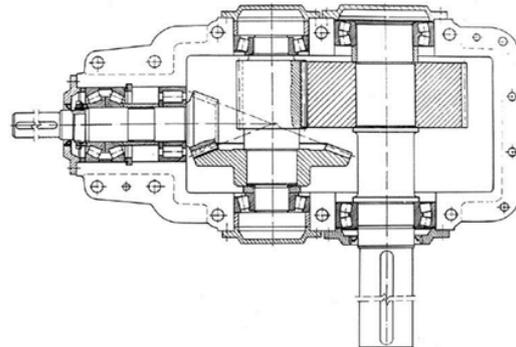
12 Anhang

A. Folien der Studie „Analyse zum Aufbau von Systemverständnis“

Es werden Ihnen nacheinander verschiedene Abbildungen gezeigt. Beschreiben Sie, was Sie dabei wahrnehmen.



Nun folgen technische Zeichnungen. Beschreiben Sie, was Sie wahrnehmen. Geben Sie Bescheid, wenn Sie die Zeichnung verstanden haben.



Beschreiben Sie, was Sie wahrnehmen. Geben Sie Bescheid, wenn Sie die Zeichnung verstanden haben.

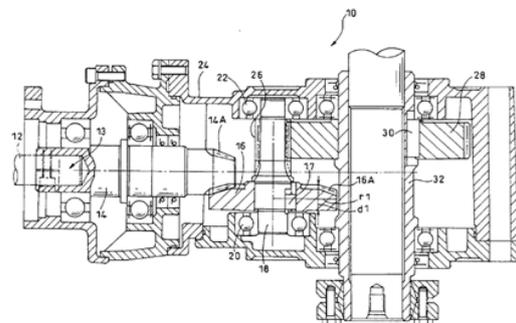


Abbildung 12-1: Über das *Experiment Center* erstellte Folien⁴⁵⁸

⁴⁵⁸ Nelius, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

B. Hilfsmittel der Studie zur Synthese-getriebene Analyse

Vielen Dank für die Teilnahme an unserem Eye-Tracking-Experiment!

Kontext

Im nachfolgenden Experiment wird ein Bolzensetzgerät der Firma HILTI betrachtet.

Bolzensetzgeräte werden im Baugewerbe zum Setzen von Bolzen/Nägeln in Stahl benutzt. Hierbei wird der Kolben mittels einer Pulverpatrone so beschleunigt, dass er einen Nagel in den Untergrund treibt.



Abbildung 1: Bolzensetzgerät

PowerPoint-Präsentation

Starten Sie nun die PowerPoint-Präsentation, um mehr über Bolzensetzgeräte zu erfahren. Lesen Sie alle Texte durch, schauen Sie sich alle Videos an und überspringen Sie bitte keine Folie.

Denken Sie bitte stets an „Think Aloud“!

Hinweis

Der starke Rückstoß des Geräts (durch den Setzvorgang) ist die Ursache für den Bruch der Nageldetektion.

Abbildung 12-2: Erklärung zum Kontext und Hinweis (wurde abgetrennt übergeben)⁴⁵⁹

⁴⁵⁹ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

Aufgabe

Stellen Sie sich vor, Sie wären Entwicklungsingenieur der Firma HILTI.

Ihre Aufgabe ist es, das aktuelle Gerät so zu verbessern, dass es zu weniger Ausfällen kommt.

Ein Versuchsingenieur teilt Ihnen mit, dass die Nageldetektion eine der größten Schwachstellen ist: Die Nageldetektion (Stanzteil) bricht oft schon nach 6000 Setzungen.

Ihre Aufgabe ist es nun mittels geeigneter Konstruktion des Systems zu ermöglichen, dass die Nageldetektion nicht ausfällt. Sie sind auf sich alleine gestellt.

Ergebnisse

Nutzen Sie die Zeichnungen und leeren Blätter, um Skizzen anzufertigen und/oder Ideen stichwortartig zu dokumentieren.

Scheuen Sie bitte nicht davor zurück, **alle Ideen zu nennen oder grafisch darzustellen**, sobald diese Ihnen in den Sinn kommen. Sie haben jederzeit die Möglichkeit zur Korrektur.

Die Aufgabe endet, sobald Sie uns mitteilen, dass Sie eine Lösung haben, die Sie Ihrem Vorgesetzten präsentieren würden. Sie haben **maximal 20 Minuten**.

Hilfsmittel

Bitte **lesen Sie die Hilfsmittel nacheinander laut vor**.

Nach jedem **vorgelesenen Hilfsmittel** bekommen Sie dieses **überreicht**. **Platzieren** Sie es dann ohne Verzögerung an einer beliebigen Stelle auf dem Tisch.

Lesen Sie direkt danach das **nächste Hilfsmittel vor**, usw. ...

- Nageldetektion (Stanzteil): 1x gebrochen und 1x benutzt
- Magazin und Bolzenführung samt (verdeckter) Nageldetektion und Nagelstreifen
- Vergrößertes 1,5:1 Modell der Nageldetektion mit den wichtigsten Teilen
- Technische Zeichnungen (zwei A4-Blätter) und Zeichenmaterialien
- PowerPoint-Präsentation (haben Sie schon)
- Hinweis (Zettel)

Denken Sie bitte stets an „Think Aloud“!

Abbildung 12-3: Aufgabenblatt⁴⁶⁰

⁴⁶⁰ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

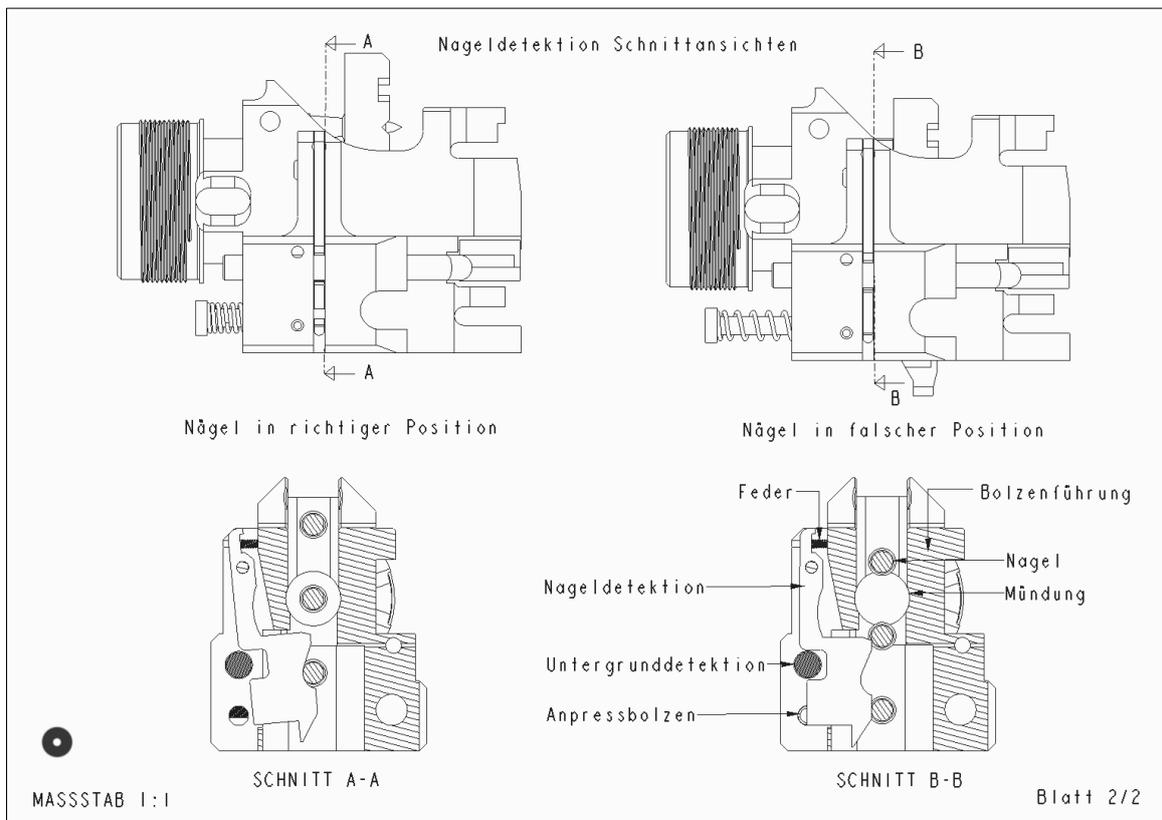
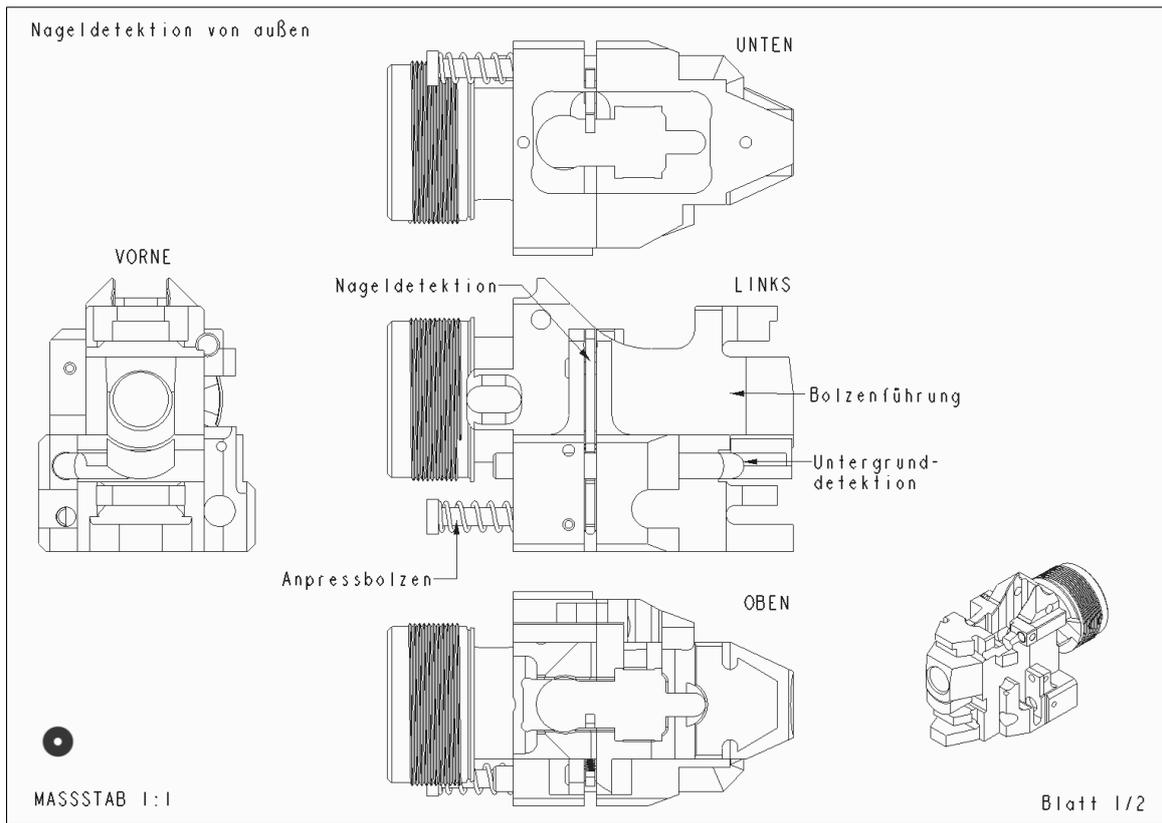


Abbildung 12-4: Technische Zeichnungen der Bolzenführung und Nageldetektion⁴⁶¹

⁴⁶¹ Rader, 2014 (betreute Abschlussarbeit)

C. Erklärungsfolien der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse

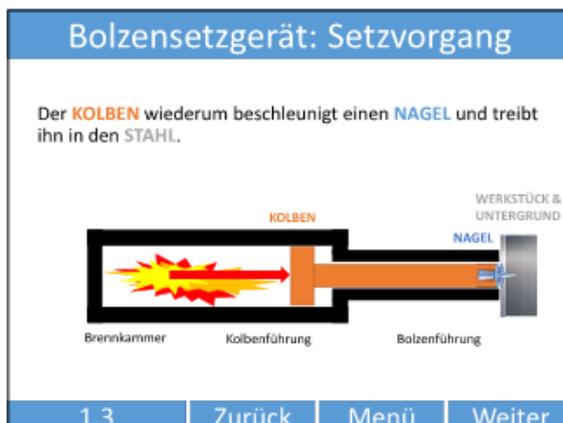
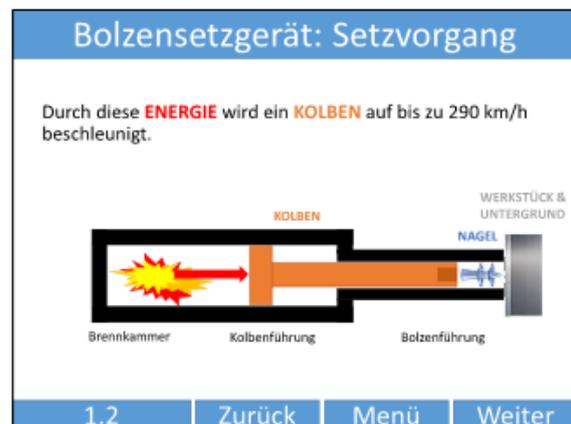
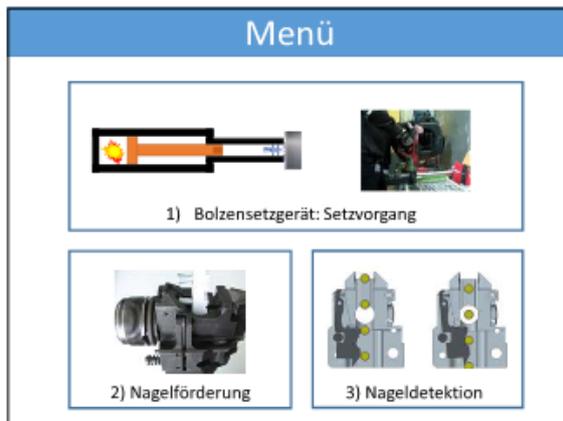


Abbildung 12-5: Power-Point-Folien 1-6 zur Erklärung des Systemkontexts⁴⁶²

Bolzensetzgerät: Setzvorgang

HILTI-Versuchsabteilung



Video

1.5 Zurück Menü Weiter

Bolzensetzgerät: Setzvorgang

Rückstoß auf die Komponenten des Geräts



High-Speed-Video

1.6 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung



Bolzenführung

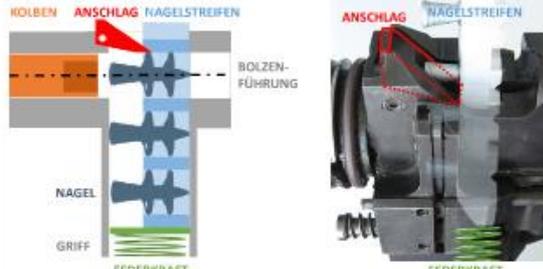
Magazin

Nagel

2.1 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Übersicht



HOLBEN ANSCHLAG NAGELSTREIFEN

BOLZEN-FÜHRUNG

NAGEL

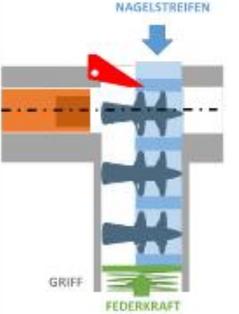
GRIFF

FEDERKRAFT

2.2 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Einlegen des Nagelstreifens



NAGELSTREIFEN

Der **NAGELSTREIFEN** wird so weit es geht hineingeschoben.

Dabei wird die **FEDER** im **GRIFF** vorgespannt.

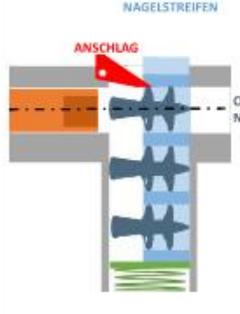
GRIFF

FEDERKRAFT

2.3 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Einlegen des Nagelstreifens



NAGELSTREIFEN

Der **ANSCHLAG** arretiert den **NAGELSTREIFEN** so, dass der **OBERSTER NAGEL** in richtiger Position ist,...

ANSCHLAG

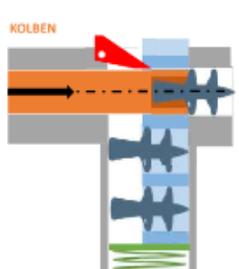
OBERSTER NAGEL

2.4 Zurück Menü Weiter

Abbildung 12-6: Power-Point-Folien 7-12 zur Erklärung des Systemkontexts⁴⁶³

Die Nagelförderung

Setzen eines Nagels

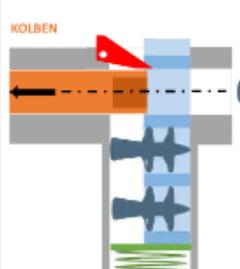


...um vom **KOLBEN** in den Stahl getrieben zu werden.

2.5 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Nachladen



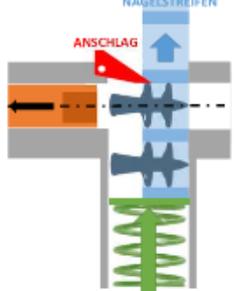
Nach dem Setzvorgang ist der **OBERSTE NAGEL** nicht mehr im Gerät.

Sobald der **KOLBEN** zurückgezogen wird,...

2.6 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Nachladen

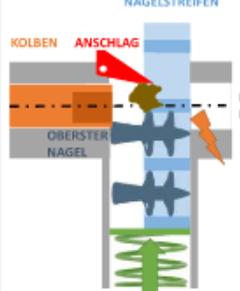


... drückt die **FEDER** den **NAGELSTREIFEN** weiter nach oben bis ihn der **ANSCHLAG** am nächsten Nagel erneut arretiert.

2.7 Zurück Menü Weiter

Die Nagelförderung

Fehlstellungen



Durch **SCHMUTZ**, fehlerhafte Nagelstreifen, falsche Benutzung oder Missbrauch kann es zu einer **Fehlstellung der NÄGEL** kommen.

Dies ist ein **Sicherheitsrisiko**, das durch die **Nageldetektion** minimiert werden soll.

2.8 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Bolzensetzgeräte sind aus Sicherheitsgründen so ausgelegt, dass sie zusammengedrückt werden müssen, bevor die Pulverpatrone gezündet werden kann.



3.1 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Dazu gibt es zwei Sicherheitsvorkehrungen: Die **Untergrunddetektion** und die **Nageldetektion**.



3.2 Zurück Menü Weiter

Abbildung 12-7: Power-Point-Folien 13-18 zur Erklärung des Systemkontexts⁴⁶⁴

⁴⁶⁴ Rader, 2014

Die Nageldetektion

- Dazu gibt es zwei Sicherheitsvorkehrungen: Die **Untergrunddetektion** und die **Nageldetektion**.



3.3 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Die **Untergrunddetektion** besteht darin, dass sich die Maschine nur durch eine Gegenkraft des Untergrundes zusammendrücken lässt.



3.4 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Die **Untergrunddetektion** besteht darin, dass sich die Maschine nur durch eine Gegenkraft des Untergrundes zusammendrücken lässt.



3.5 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Ein weiteres Zusammendrücken des Geräts wird dann von der **Nageldetektion** verhindert, wenn die Nägel in falscher Position sind.



3.6 Zurück Menü Weiter

Die Nageldetektion

- Dabei schiebt sich das **Nageldetektionsblech** in den Weg eines **Anpressbolzens**.



3.7 Zurück Menü Weiter

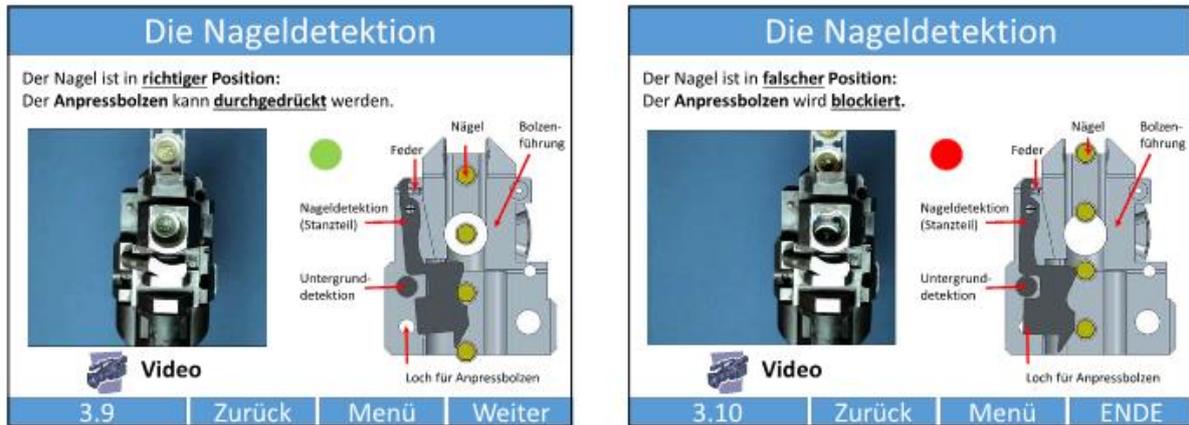
Die Nageldetektion

- Wenn die Nägel richtig stehen, kann der **Anpressbolzen** die **Nageldetektion** überwinden. Der Nagel kann gesetzt werden.



3.8 Zurück Menü Weiter

Abbildung 12-8: Power-Point-Folien 19-24 zur Erklärung des Systemkontexts⁴⁶⁵

Abbildung 12-9: Power-Point-Folien 25-26 zur Erklärung des Systemkontexts⁴⁶⁶

⁴⁶⁶ Rader, 2014

D. Erfassung der Probandenmerkmale nach der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse

Die Erfassung der Probandenmerkmale wurde im Rahmen der Masterarbeit von M.Sc. Samuel RADER⁴⁶⁷ erstellt:

Bolzensetzgerät

1. Kannte ich gar nicht
2. Nur gesehen oder davon gehört, aber keine Ahnung, wie das System funktioniert oder nur ähnliches Gerät ohne starken Rückstoß benutzt (z.B. Bolzenschusspistole)
3. Selbst schon einmal ausprobiert, aber kein tieferes Systemverständnis
4. Das patentierte Kolbenprinzip von HILTI war mir vertraut und ich habe das Gerät schon verwendet. Die PowerPoint-Präsentation zu Kapitel 1 hätte ich nicht gebraucht
5. Ich kenne das Prinzip sehr gut, habe das Gerät schon verwendet und habe selbst schon an ähnlichen Geräten mit Rückstoß gearbeitet

CAD-Erfahrung

1. nie gelernt (bzw. erfolgreich darum gedrückt)
2. nur Grundkenntnisse (z.B. aus einer Vorlesung wie MKL am KIT oder eine Weiterbildung)
3. zusätzlich ab und zu mit CAD konstruiert (Werksstudent, Praktikum, privat) oder ab und zu beruflich kleinere Tätigkeiten mit CAD
4. häufiger schon mit (verschiedenen) CAD-Programmen gearbeitet
ODER: fast täglich, aber noch nicht so lange
5. mehrere Jahre fast tägliche CAD-Erfahrung

Entwicklung und Konstruktion

1. nur Pflichtvorlesungen im Bachelor/Vordiplom;
ODER generell verdrängt/ alles vergessen/ nur gelernt um durchzukommen
2. durch Vorlesung, Praktikum oder Werksstudentenjob etwas zusätzliche Erfahrung auf diesem Gebiet gesammelt
3. Vertiefungsrichtung im Master/Diplom, zu der schon viele Fächer geprüft wurden (z.B. IP); zusätzlich etwas Erfahrung durch Praktikum oder Werksstudentenjob
ODER: ab und zu beruflich
4. Seit mindestens zwei Jahren beruflich in der Konstruktion
5. Seit mindestens sieben Jahren beruflich in der Konstruktion

Entwicklungsmethodik

1. Grundkenntnisse ODER beruflich fast nie
2. Fortgeschrittene Kenntnisse, z.B. durch Vorlesungen wie PE ODER selten beruflich
3. Vertieft im Studium; Doktorand am IPEK ohne im Bereich Methodik zu promovieren ODER ab und zu beruflich
4. Stark vertieft im Studium (z.B. durch IP) ODER immer wieder beruflich
5. Promotionsthema ODER häufig beruflich

Theoretischer Maschinenbau (Techn. Mechanik, Strömungslehre, Simulation/CAE)

1. nur Pflichtvorlesungen im Bachelor/Vordiplom;
ODER generell verdrängt/ alles vergessen/ nur gelernt um durchzukommen
2. durch Vorlesung, Praktikum oder Werksstudentenjob etwas zusätzliche Erfahrung auf diesem Gebiet gesammelt (z.B. CAE, mathematische Methoden der Festigkeitslehre)

⁴⁶⁷ Rader, 2014

3. Vertiefungsrichtung im Master/Diplom, zu der schon viele Fächer geprüft wurden; zusätzlich etwas Erfahrung durch Praktikum oder Werksstudentenjob
UN/ODER: ab und zu beruflich
4. Seit mindestens zwei Jahren häufig beruflich; zusätzlich theoretische Grundlagen (siehe 3)
5. Seit mindestens sieben Jahren häufig beruflich; zusätzlich theoretische Grundlagen (siehe 3)

Leichtbau und Werkstoffauswahl

1. nur Pflichtvorlesungen im Bachelor/Vordiplom;
ODER generell verdrängt/ alles vergessen/ nur gelernt um durchzukommen
2. durch Vorlesung (z.B. PE), Praktikum oder Werksstudentenjob etwas zusätzliche Erfahrung auf diesem Gebiet gesammelt
3. Vertiefungsrichtung im Master/Diplom, zu der schon viele Fächer geprüft wurden; zusätzlich etwas Erfahrung durch Praktikum oder Werksstudentenjob
ODER ab und zu beruflich
4. Seit mindestens zwei Jahren häufig beruflich
5. Seit mindestens sieben Jahren häufig beruflich

Fertigungstechnik

1. nur Pflichtvorlesungen im Bachelor/Vordiplom;
ODER generell verdrängt/ alles vergessen/ nur gelernt um durchzukommen
2. durch Vorlesung (z.B. PE), Praktikum oder Werksstudentenjob etwas zusätzliche Erfahrung auf diesem Gebiet gesammelt
3. Vertiefungsrichtung im Master/Diplom, zu der schon viele Fächer geprüft wurden; zusätzlich etwas Erfahrung durch Praktikum oder Werksstudentenjob
ODER ab und zu beruflich
4. Seit mindestens zwei Jahren häufig beruflich
5. Seit mindestens sieben Jahren häufig beruflich

Theoretische/praktische Erfahrung mit defekten Teilen

Aktives Analysieren der Bruchstelle: Darum ist es gebrochen.

1. Ich habe mit der Analyse defekter Teile theoretisch sowie praktisch nahezu keine Erfahrung gemacht (bis auf Grundvorlesungen wie Werkstoffkunde)
2. selten: privat, im Praktikum oder als Werksstudent
3. Ab und zu beruflich UN/ODER häufig hobbymäßig oder durch die Vertiefungsrichtung
4. immer wieder im Beruf
5. häufig im Beruf seit mehreren Jahren

E. Ablaufplan der Studie zur Synthese-getriebenen Analyse

Der Ablaufplan wurde im Rahmen der Masterarbeit von M.Sc. Samuel RADER⁴⁶⁸ erstellt:

1. Raum richten
 - a. BeGaze-Brillen-Koffer, Hilfsmittel-Koffer, Tablett, Probanden-Laptop, Schreibmaterialien und Blätter (2xTZ, Kontext, Aufgabe, Hinweis, Fragebogen) holen
 - b. Außenkamera holen und seitlich platzieren, Kabel prüfen
 - c. Probanden-Laptop richten und starten (Kalibrierungsfolie)
 - d. Eye-Tracking-Laptop platzieren und starten, Brille danebenlegen
 - e. **Brille anschließen, iView starten und Probanden anlegen**
2. Proband empfangen
 - a. Begrüßen, bedanken, abholen und Platz zuweisen
 - b. Wie geht es Ihnen? Sind Sie aufgeregt? Falls Sie eine Uhr haben, bitte ablegen.
 - c. **Kamera anschalten**
 - d. Die Kamera nimmt Sie auf, aber wir nutzen die Aufnahme nur zur Auswertung
3. Proband die Brille aufsetzen
 - a. Setzen Sie sich am besten so hin, dass es bequem ist und Sie am Tisch arbeiten können.
 - b. Wir wollen während des Experiments Ihre Augen aufnehmen. Dazu müssen Sie diese Brille aufziehen. Nach dem Versuch kann ich Ihnen mehr darüber verraten.
 - c. Brille aufsetzen und warten
4. Kalibrierung (mit Tablett)
 - a. Nun müssen wir die Brille noch kalibrieren. Nehmen Sie das Tablett in beide Hände. Stützen Sie die Ellenbogen auf dem Tisch ab als ob Sie etwas in den Händen betrachten würden. Und drehen Sie das Tablett leicht so, dass Ihr Blick senkrecht zum Tablett ist (zeigen/leicht korrigieren; ca. 30-40 cm).
 - b. Zur Kalibrierung ist es wichtig, dass Sie Ihren Kopf still halten, während Sie gleich hintereinander auf die 3 weißen Punkte schauen.
 - c. **3 Punkt-Kalibrierung starten**
 - d. Schauen Sie nun auf den weißen Punkt links oben. Jetzt rechts oben. Und jetzt unten
 - e. Okay, kurz Kontrolle: links oben - rechts oben – unten - Mitte
 - f. Okay (Tablett entfernen) Bitte keine hektischen Kopfbewegungen.
5. „Think Aloud“ erklären und üben
 - a. Neben Ihren Augenbewegungen wollen wir auch Ihre Gedankengänge nachvollziehen. Deshalb ist es für uns sehr wichtig, dass Sie alles, was sie denken laut aussprechen ohne vorher nachzudenken. Das nennt sich THINK ALOUD. Bitte sagen Sie ALLES, was Sie denken, von Anfang bis zum Ende der Aufgabe. Reden Sie KONSTANT laut. Planen Sie nicht, was Sie sagen und reden Sie nicht mit MIR. Tun Sie so als würden Sie mit sich selbst sprechen. Es ist sehr wichtig, dass Sie immer weiterreden, auch wenn Sie keine Antwort oder Feedback bekommen. Alles klar?
 - b. Wir werden nun ein kleines Training dazu machen (**23x16 Blatt geben**)
 - c. Rechnen Sie 23x16 uns sagen Sie mir, was Sie während der Rechnung denken. (Warten)
 - d. Gut(368). Hier ist der zweite Test.
 - e. Denken Sie an das Haus zurück, in dem Sie aufgewachsen sind. Zähle Sie die Fenster die es hatte. Nennen Sie allerdings nicht nur die Zahl, sondern verbalisieren Sie alles, was Ihnen dabei in den Sinn kommt. (Warten und Rückmeldung)
 - f. Beim Lesen oder Zeichnen wird es vielleicht nicht möglich sein zeitgleich zu reden. Dann wäre es gut, wenn Sie mir stattdessen direkt danach sagen könnten, was Sie gedacht haben. Wenn Sie länger nichts sagen, werde ich „weiter“ sagen.
 - g. Haben Sie Think Aloud verstanden?

⁴⁶⁸ Rader, 2014

6. Nageldetektion Vorbereitung
 - a. **REC**
 - b. Gut, dann fängt nun die eigentliche Aufgabe an, wobei Sie zu Beginn nur den Kontext erfahren. (**Blatt zum Kontext (A5) geben** und warten bis es gelesen wurde)
 - c. Bitte schauen Sie kurz auf den roten Punkt und navigieren Sie sich dann einfach weiter. Sagen Sie mir, wenn Sie mit der Präsentation fertig sind und denken Sie an „Think Aloud“.
 - d. Danach: Laptop um positionieren, auf **Kalibrierungsfolie** stellen
7. Nageldetektion: Aufgabe und Hilfsmittel
 - a. Gut, dann kommt nun die Aufgabe.
 - b. **Stopp-Rec, Neu-REC Aufgabenblatt geben**, Koffer holen und warten
 - c. Gebrochen und benutzt. (**echte Teile geben**)
 - d. Den Nagelstreifen schieben Sie einfach hier rein. Rausbekommen ist etwas schwerer. Da müssen sie hier runterdrücken und dann entsperren. (Nagelstreifen rein-, raus- und wieder reinschieben, dann **Magazin geben**)
 - e. Hier ist das 3D-Modell mit Nägeln. Das können Sie öffnen (Nägel raus, öffnen und wieder zusammenstecken, Nägel reinstecken). Die Nägel müssen Sie dazu rausmachen.
(**3D-Modell geschlossen geben**)
 - f. In die Zeichnungen können Sie auch Ihre Lösungen reinskizzieren. (**beide Zeichnungen, Blätter und Stifte geben**)
 - g. Ordnen Sie jetzt einfach alles an, wie Sie es für richtig halten. (kurz warten)
 - h. Hier können Sie du auch die einzelnen Kapitel anklicken (**PowerPoint-Menü**)
 - i. **Nachkalibrierung:** Bevor Sie den Hinweis bekommen, machen wir noch eine Nachkalibrierung. Schauen Sie bitte noch einmal auf den roten Punkt in der Präsentation (Zurückschalten auf PowerPoint-Menü) und den roten Punkt der Zeichnungen.
 - j. Gut. Das Experiment endet, sobald sie eine Lösung haben, die Sie Ihrem Vorgesetzten präsentieren würden - oder nach 20 Minuten. 5 Minuten vor dem Ende werde ich Sie daran erinnern.
 - k. Ansonsten bin ich jetzt still und werde nur etwas sagen, wenn Sie das „Think Aloud“ vergessen. Viel Spaß und jetzt kommt der Hinweis. **Hinweis geben**
8. Während des Versuchs
 - a. Blickpfad kontrollieren
 - b. Möglichst nach 30-60 Sekunden an Think Aloud erinnern („Weiter“), sofern Proband nicht sehr vertieft ist. Dann geeigneten Moment finden.
 - c. Nur helfen, wenn es länger technische Probleme gibt (Laptop, Nägel gehen nicht aus Magazin, Feder springt aus 3D-Modell heraus, fehlendes Teil)
 - d. Ca. 4-5 Minuten vor Ende: „Noch 5 Minuten“ bzw. 4 Minuten
 - e. Nach spätestens 20 Experiment stoppen, aber gegebenenfalls daran erinnern, dass Gestaltsänderungen eingezeichnet werden müssen
9. Erste Fragen
 - a. Wie zufrieden sind Sie mit Ihrer Lösung auf einer Skala von 1-5? 5 heißt sehr zufrieden, 1 heißt sehr unzufrieden.
 - b. Können Sie die Kraft oder Kräfte einzeichnen, die zum Versagen führen? Woher kommen diese Kräfte?
 - c. Nochmal Kalibrierungspunkte durchgehen
 - d. **REC STOPP** Brille abnehmen und bei Proband bedanken
10. Fragebogen
 - a. Fragebogen Teil 1: Merkmale und Fragenbogen Teil 2: Merkmale (Word)
 - b. Weiter mit Fragebogen Teil 1 ab Frage 3 (Fragen zur Lösung/Vorgehen)
 - c. Weitere Anmerkungen, offene Fragen zum Experiment, Ergebnissen, abbauen...