

Sebastian Horn

**Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung
von bautechnisch bewerteten Befestigungs-
mitteln am Beispiel eines chemischen
Befestigungsmittels zur Integration eines
Verschiebungssensors**

Design method for the mechatronization of
approved fasteners using the example of a chemical
fastener for the integration of a displacement sensor

Band 144

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Sebastian Horn

**Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung von
bautechnisch bewerteten Befestigungsmitteln am
Beispiel eines chemischen Befestigungsmittels zur
Integration eines Verschiebungssensors**

Design method for the mechatronization of approved
fasteners using the example of a chemical fastener for
the integration of a displacement sensor

Band 144

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

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
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

Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung von bautechnisch bewerteten Befestigungsmitteln am Beispiel eines chemischen Befestigungsmittels zur Integration eines Verschiebungssensors

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sebastian Horn

Tag der mündlichen Prüfung: 08.11.2021

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Vorwort der Herausgeber

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

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

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

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zu Band 144

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Mechatronisierung eines bautechnisch bewerteten Verbundankersystems zur kontinuierlichen Überwachung der Befestigungssituation sowie die begleitende Beschreibung der hierbei angewendeten Entwicklungsmethode.

Die Arbeit liefert Erkenntnisse zu einem in Bauwerken nachrüstbaren Befestigungselement, welches zukünftig einen Beitrag zur Überwachung und Sicherung von Bauwerken liefern kann. Der mechatronisierte Verbundanker zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung wird die sinnvolle Digitalisierung und Mechatronisierung von Bauwerken erfolgreich unterstützen und zum Teil auch erst ermöglichen. Neben diesem in Grundzügen in der vorliegenden Arbeit bereits validierten technischen System liefert Sebastian Horn wichtige Erkenntnisse zu Schadensmechanismen und Vorgängen beim zentrischen Auszug dieser Befestigungselemente. Hierfür müssen Versagensmechanismen, Designräume und geeignete Messprinzipien identifiziert und verifiziert werden.

Die Mechatronisierung des speziellen Befestigungsmittels ist nur möglich, wenn mehrere Forschungslücken im Stand der Forschung geschlossen werden.

Zunächst einmal ist unbekannt, wie das Befestigungsmittel genau mit dem Untergrund verankert ist, welche Versagensmechanismen bei Überlastung des Befestigungsmittels auftreten und welche Gestaltelemente des Befestigers an der eigentlichen Haltefunktion teilnehmen. Erstmals in der Forschung konnte visuell gezeigt werden, wie das Versagen stattfindet. Dies wurde von Herrn Horn durch den geschickten Einsatz einer Methode zur Überwindung der Beobachtungsbarriere beim zentrischen Auszug eines Befestigungselementes realisiert. Durch die Zuordnung der Haltefunktion zu den wichtigsten Gestalt-Funktions-Elementen, die an der Funktionserfüllung beteiligt sind, gelingt es Sebastian Horn ein zum Teil quantitatives Gestalt-Funktions-Verständnis aufzubauen. Nur aufgrund dieses Verständnisses ist es möglich, Designräume am bautechnisch bewerteten Befestigungselement zu nutzen und Messprinzipien in den Befestiger zu integrieren. Ganz hervorragend zeigt Sebastian Horn sein wissenschaftliches Vorgehen, indem er sich zunächst nicht auf die Konstruktion des mechatronisierten Befestigers konzentriert, sondern 27 sogenannte Erkenntnisprototypen entwickelt, die alleine dazu dienen, den Gestalt-Funktions-Zusammenhang in statistisch hervorragend ausgewerteten Experimenten zu erheben. Neben den

entwickelten Systemen werden von Sebastian Horn zwei Prüfstände und passende Prüfverfahren entwickelt. In der statistischen Auswertung gelingt es Sebastian Horn, aus einer Vielzahl schwierig interpretierbarer Messergebnisse Erkenntnisse abzuleiten und in seinen Funktionsprototypen zu nutzen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse stellen die Basis für die Entwicklung der Messtechnik an den Befestigern dar. Das gewählte Messprinzip ist die kapazitive Abstandsmessung, die in für die Primärfunktion nicht relevante Designräume des Elementes integriert wird.

Eine besonders wichtige Randbedingung für die Entwicklung derartiger Befestiger kommt aus dem zeitlich aufwändigen bautechnischen Zulassungsprozess. Bei der nachträglichen Mechatronisierung eines bereits zugelassenen Befestigungselementes ist es wichtig, die Zulassung für den veränderten Befestiger nicht zu verlieren.

Die Funktionsfähigkeit des Messprinzips und die ungestörte Funktion Haltekraftaufbringen weist Sebastian Horn in Prototypen nach. So gelingt es ihm, einen mechatronisierten Befestiger zu entwickeln, der seine bautechnische Zulassung nicht noch einmal nachweisen muss, da nicht in die zur Aufbringung der Haltefunktion relevanten Gestalt-Funktions-Elemente durch die Mechatronisierung eingegriffen wurde. Sein Vorgehen überführt Herr Horn in die Entwicklungsmethode ASTra. Die Entwicklungsmethode gliedert sich in drei Entwicklungsschritte: Analyse, Synthese und Rücktransformation.

November 2021

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Durch immer größere und umfangreichere Bauprojekte und die steigende Lebensdauer von Bestandsgebäuden wachsen auch die Anforderungen an nachträgliche lasteinleitende Befestigungselemente. Mit dem Einzug der Digitalisierung in die Bauindustrie werden zunehmend neue Produkte zur Unterstützung eines Life-Cycle-Managements von Bauwerken entwickelt und eingeführt.

Diese Arbeit stellt eine hierin entwickelte Methode ‚ASTRA‘ zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln vor. Das Akronym ASTRA steht für die Entwicklungsschritte dieser Methode ‚ANALYSE-SYNTHESE-TRANSFORMATION‘. Den Kern dieser Entwicklungsmethode bildet die Erweiterung eines bestehenden Befestigungsmittels, um eine mechatronische Sekundärfunktion ohne deren Primärfunktion zu beeinflussen. Dies geschieht am Beispiel einer Sensorintegration zur kontinuierlichen Zustandserfassung in ein bestehendes bautechnisch bewertetes Verbundankersystem, ohne dessen Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu verschlechtern. Hieraus leitet sich die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit ab:

Ist es möglich, ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungsmittel mit einer geeigneten Entwicklungsmethode für die kontinuierliche Überwachung der Befestigungssituation zu mechatronisieren, ohne dabei seine Primärfunktion zu verschlechtern?

Um diese zentrale Frage zu beantworten, werden zunächst mit Hilfe ausgewählter Methoden und erstellter Ersatzsysteme Teilforschungsfragen beantwortet, die aus dieser Frage abgeleitet wurden. Diese Vorgehensweise und die dafür ausgewählten Methoden werden schließlich als neue Entwicklungsmethode ASTRA zusammengefasst. Durch die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage dieser Arbeit wird der erste Entwicklungsschritt, die *Analyse*, durch die Überwindung der Beobachtungsbarriere beim Auszugsversuch eines Verbundankers beispielhaft dargestellt. Hierdurch ist es erstmals möglich, die kontinuierlichen Versagensmechanismen, wie die Rissbildung und deren Wachstum, beim zentralen Auszugsversuch eines Verbundankers zeitlich und räumlich bestimmt zu beobachten und dadurch das Systemverständnis zu Verbundankersystemen zu erweitern. Mithilfe verschiedener Modellbildungsmethoden werden anschließend aus diesen Beobachtungen Erkenntnisse abgeleitet, um potenzielle Designräume zum Einbringen zusätzlicher mechatronischer Gestaltelemente zu identifizieren.

Hierauf folgt die Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage, mit der der zweite Schritt, die *Synthese*, der neu erstellten Entwicklungsmethode ASTRA vorgestellt wird. Dieser Schritt zeigt die besondere Vorgehensweise im Vergleich zu anderen Entwicklungsmethoden. Hierbei werden die Erkenntnisse nicht direkt in das zu entwickelnde

Produkt eingebracht, sondern es werden Ersatzmodelle erstellt, an denen mit geringem Herstellungs- und Versuchsaufwand bereits in einer sehr frühen Phase der Entwicklung eines mechatronisierten Befestigungsmittels Effekte und Wechselwirkungen der in Designräumen eingebrachten Gestaltelemente mit der zu erhaltenden Primärfunktion ermittelt werden können. Diese Ersatzmodelle werden als Gestalt-Funktion-Versuchsmuster (GFZ-Versuchsmuster) bezeichnet. Unterstützt wird auch dieser Entwicklungsschritt mit Experimenten nach Vorgaben des Bewertungsdokumentes EAD 330499-00-0601 im zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung und mit mathematischen Methoden zur statistischen Bewertung der Ergebnisse. Anhand dieses Entwicklungsschrittes kann somit erstmals der quantifizierte Effekt einer Gestaltänderung bereits im frühen Stadium der Entwicklung von Befestigungsmitteln bestimmt werden, ohne dessen exakte gestalterische oder funktionale Ausprägung in diesem Entwicklungsstadium bereits zu erkennen. Hieraus ergibt sich das Entwicklungsziel dieses Schrittes: die Definition der nutzbaren Designräume für Sekundärfunktionen.

Mit dem dritten Schritt der Entwicklungsmethode, der *Rücktransformation*, wird die dritte Teilforschungsfrage am Beispiel eines Verbundankers beantwortet. Dieser Schritt hat die Verifizierung der Funktionsprototypen der mechatronisierten Befestigungsmittel, in diesem Beispiel des sensorintegrierten Verbundankers, zum Ziel. Hierfür werden die zuvor identifizierten Designräume genutzt, um methodisch ausgewählte Messprinzipien im Verbundankersystem zu integrieren, ohne dessen Primärfunktion negativ zu beeinflussen. Anschließend wird die eingebrachte Sekundärfunktion, in diesem Beispiel die kontinuierliche Zustandskontrolle, auf zusätzliche ausgewählte Umwelteinflüsse verifiziert.

Erstmals können die hier gezeigten methodischen Forschungsansätze zusammengefasst in der neuen Entwicklungsmethode ASTRA bei der Produktentwicklung zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln unterstützen. Das mechatronisierte Verbundankersystem mit kapazitivem Abstandssensor liefert bereits im Status des Funktionsprototypen robuste und reproduzierbare Signale und könnte zukünftig die Sicherheit, Wartung und den Betrieb von Gebäuden verbessern. Das zweite vorgestellte mechatronisierte Verbundankersystem mit kapazitivem Impedanzsensor benötigt hingegen noch weitere Verbesserungen, um die Signale besser bewerten zu können, und muss robuster gegenüber Umwelteinflüssen konstruiert werden. Dennoch ist es mit dem mechatronisierten Verbundankersystem mit kapazitivem Abstandssensor erstmals möglich, durch integrierte Sensoren bei Verbundankersystemen kontinuierlich deren Zustand durch Erfassung der axialen Verschiebung zu überwachen.

Abstract

As a result of ever larger and more extensive construction projects and the increasing service life of existing buildings, the requirements for subsequent, load-transmitting fastening elements have grown. Following the digitalization of the construction industry, new products are increasingly being developed and introduced to support the life-cycle management of structures.

This thesis presents a new method 'ASTRA' for the mechatronization of fasteners. The acronym ASTRA stands for the development steps of this method *ANALYSIS-SYNTHESIS-TRANSFORMATION*. This method is based on an extension of an existing fastener with a mechatronic secondary function that does not affect its primary function. An example is presented of a sensor integration for continuous condition monitoring in an existing assessed chemical anchor system without degrading its primary function of "ensuring holding force for attachments". This leads to the central research question of this thesis:

Is it possible to mechatronize a structural assessed chemical anchor with a suitable development method for the continuous monitoring of the fastener situation without altering its primary function?

To answer this central question, certain sub-research questions are answered using selected methods and by creating substitute systems. This approach and the methods utilized are summarized as a new development method ASTRA. By answering the first sub-research question of this thesis, the first development step, the *analysis*, is exemplified by overcoming the observation barrier during the pull-out test of a chemical anchor. This allows the continuous failure mechanisms, such as crack formation and their growth, to be observed for the first time during the centric pull-out test of a chemical anchor in a temporally and spatially determined manner, thus expanding the system understanding of chemical anchor systems. Various modeling methods are used to identify potential design spaces for the introduction of additional mechatronic design elements.

Following this, the second sub-research question is answered, and the second step *synthesis* of the newly created development method ASTRA is presented. This step demonstrates the special approach compared with other development methods. Here, the findings are not directly introduced to the product to be developed; however, substitute models are created on which the effects and interaction of the design elements introduced in design spaces with the primary function of being maintained can be determined at a very early stage of the development of a mechatronic fastener, with little manufacturing and testing effort. These substitute models are referred to as "embodi-

ment-function-relation test patterns" (GFZ test patterns). This development step is supported with experiments according to the specifications of the assessment document EAD 330499-00-0601 in the centric confined pull-out test and with mathematical methods to statistically evaluate the results. This step thus enables the quantified effect of a design change to be determined at an early stage in the development of fasteners for the first time, without prior knowledge of the exact design or functional characteristics. This results in the development objective of this step: the definition of usable design spaces for secondary functions.

The third step of the development method, the *reverse transformation*, answers the third sub-research question using the example of a chemical anchor. This step aims to verify the functional prototypes of the mechatronized fasteners using the example a sensor-integrated chemical anchor. For this purpose, the previously identified design spaces are used to methodically integrate selected measurement principles in the chemical anchor system without negatively affecting its primary function. The introduced secondary function (in this example, the continuous condition monitoring) is subsequently verified for additional selected environmental influences.

The methodical research approaches shown in this thesis, which are summarized in a new development method ASTRA, support product development in the mechatronization of fasteners. The mechatronized chemical anchor system, which has a capacitive distance sensor, provides robust and reproducible signals in the status of the functional prototype and could improve the safety, maintenance, and operation of buildings in future. Meanwhile, the second mechatronized chemical anchor system presented, which has a capacitive impedance sensor, requires further improvements to better evaluate the signals and should be designed more robustly against environmental influences. Nevertheless, the mechatronic chemical anchor system with a capacitive distance sensor enables the condition of chemical anchor systems to be continuously monitored by detecting their axial displacement using integrated sensors for the first time.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Forschungs Kooperation des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit der Fischerwerke GmbH & Co. KG.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen bedanken. Durch das entgegengebrachte Vertrauen und seine wissenschaftliche Förderung konnte ich mich durch anregende Diskussionen und intensivem Ideenaustausch persönlich wie fachlich weiterentwickeln.

Auch möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann für die Übernahme des Korreferats bedanken. Seine Anregungen und Kommentare haben mir bei der Ausarbeitung dieser Arbeit sehr geholfen.

Für die finanzielle Unterstützung meiner Forschungsarbeit möchte ich mich bei der Unternehmensgruppe fischer bedanken. Insbesondere bei Dr. Joachim Schätzle möchte ich für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen, die Möglichkeit des Forschungsaustausches beim fischer Doktorandenkolloquium und die tiefen Einblicke in die Welt der Polymere bedanken. Auch bei Jürgen Grün möchte ich mich für die langjährige Unterstützung meiner Forschung bedanken.

Beim gesamten IPEK-Team, insbesondere der Forschungsgruppen des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente danke ich für die herzliche Aufnahme ins Team und den regen Forschungsaustausch. Ganz besonders möchte ich mich bei Thomas Gwosch, Thomas Nelius, Kevin Hölz, Sebastian Schmidt, Tim Bruchmüller, Michael Uhl und Sebastian Zimprich für die Diskussionen und das konstruktive Feedback zu meiner Forschung bedanken.

Ein weiteres Dankeschön gilt Emanuel Strieder für den intensiven wissenschaftlichen Austausch, meinen studentischen Abschlussarbeitern Michael Schwabe und Marco Neumayer für die tolle Zusammenarbeit und Annette Hug-Stüb und Susanne Krippendorf für die Lösung vieler kleiner alltäglicher Probleme.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Bei meiner Frau Monja und meiner Tochter Marie möchte ich mich von ganzem Herzen für die Unterstützung, die Geduld und den Rückhalt bedanken. Bei meinen Eltern Edith und Siegfried möchte ich mich herzlichst bedanken, dass sie bei allem was ich mache hinter mir stehen, für die Unterstützung während meines Studiums und der Promotion und mir so meinen Lebensweg ermöglichen haben. Außerdem danke ich meinem Bruder Christopher für seine Ratschläge.

Eutingen im Gäu, November 2021

Sebastian Horn

What is a scientist after all?
It is a curious man looking through a keyhole,
the keyhole of nature,
trying to know what's going on.

Jacques-Yves Cousteau, 1971

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xxiii
Abkürzungsverzeichnis	xxv
Formelverzeichnis	xxix
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Chemische Schwerlastbefestigungen: Verbundanker	6
2.1.1 Allgemeines zur reaktiven Komponente der Verbundanker	6
2.1.2 Montage eines Verbundankersystems	8
2.1.3 Beton als Verankerungsgrund	12
2.1.4 Lasteinleitung in den Beton	14
2.2 Bewertung von Verbundankersystemen	19
2.2.1 Bewertung von Verbundankern	21
2.2.2 Untersuchungen zu Versagensmechanismen von Verbundankern	30
2.3 Ausgewählte Schadensfälle in der Befestigungstechnik.....	34
2.3.1 Gründe für Schäden im Ingenieurbau.....	34
2.3.2 Wartungsaufwand von Befestigungssystemen	35
2.3.3 Fort-Point-Channel-Tunnel, Boston, MA, USA (10.07.2006).....	38
2.3.4 Sasago-Tunnel, Präfektur Yamanashi, Japan (02.12.2012)	40
2.3.5 Zusammenfassung für Befestigungsmittel	42
2.4 Digitalisierung in der Bautechnik.....	43
2.4.1 Bauwerksüberwachung/Structural Health Monitoring	44
2.5 Allgemeine Messprinzipien für die Verschiebungsmessung.....	47
2.5.1 Prinzipien für Wegsensoren	47
2.5.2 Prinzipien für Abstandssensoren	50
2.5.3 Funktionsweise kapazitives Messprinzip	52
2.5.4 Allgemeine Einflussgrößen für Messungen	55

2.5.5	Allgemeiner Aufbau einer Messkette	56
2.6	Modellbildung	58
2.6.1	Eliminierung von Beobachtungsbarrieren	59
2.6.2	Schubviereck nach Mattheck	61
2.6.3	C&C ² -Ansatz zum Beschreiben von Versagensvorgängen	63
2.6.4	Statistische Versuchsplanung	66
2.7	Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung	71
3	Motivation und Zielsetzung	75
3.1	Motivation	75
3.2	Zielsetzung	76
4	Vorgehensweise und Forschungsdesign	79
4.1	Forschungsfragen	79
4.2	Forschungsvorgehen	81
5	Versagensmechanismen und Gestalt-Funktion-Zusammenhänge eines Verbundankers	85
5.1	Vorstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes	86
5.1.1	Erstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes	86
5.1.2	Verifikation des In Situ-Erkenntnisprüfstandes	97
5.1.3	Versuchsergebnisse des In Situ-Erkenntnisprüfstandes	102
5.1.4	Rissentstehung und -verlauf	105
5.2	Identifikation funktionsrelevanter Gestaltelemente	106
5.3	Diskussion der Ergebnisse	115
5.4	Entwicklungsmethode ASTRA: Analyseschritt	117
5.5	Zwischenfazit	118
6	Haltekrafteinfluss zusätzlicher Gestaltelemente	119
6.1	Versuchsplan und Versuchsdurchführung	121
6.2	Erstellung der GFZ-Versuchsmuster	124
6.3	Vorbereitung und Durchführung der Versuche	136
6.4	Ergebnisse der Versuche	137
6.5	Statistische Darstellung der Versuchsergebnisse	144
6.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	149
6.7	Entwicklungsmethode ASTRA: Syntheseschritt	152
6.8	Zwischenfazit	153

7	Gestaltelemente zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung	155
7.1	Relevante Versagensmechanismen für die Zustandsüberwachung	156
7.2	Anforderungen an die Mechatronisierung eines chemischen Befestigungsmittels	162
7.3	Auswahl der geeigneten Messprinzipien für chemische Befestigungsmittel	166
7.4	Aufbau der sensorischen Elemente	170
7.4.1	Kapazitiver Abstandssensor im Bohrlochgrund	171
7.4.2	Kapazitiver Impedanzsensor in der Verbundfläche.....	176
7.4.3	Verbleibende Designräume	178
7.5	Verifizierung der sensorischen Systeme	178
7.5.1	Funktion des kapazitiven Abstandssensors	178
7.5.2	Funktion des kapazitiven Impedanzsensors	185
7.6	Einfluss der Umweltbedingungen	187
7.6.1	Signaländerung kapazitiver Abstandssensor	191
7.6.2	Signaländerung kapazitiver Impedanzsensor	195
7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	199
7.8	Entwicklungsmethode ASTRA: Rücktransformation.....	202
7.9	Zwischenfazit.....	202
8	Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung	205
8.1	Analyse	207
8.2	Synthese	208
8.3	Rücktransformation	209
8.4	Anwendung der ASTRA-Methode auf andere Befestigungsmittel	210
9	Zusammenfassung und Ausblick	213
9.1	Zusammenfassung	213
9.2	Ausblick.....	217
	Literaturverzeichnis	I
	Anhang A	XV
	Versuchsergebnisse der In Situ- & Referenzversuche	XV
	Versuchsergebnisse der Haltekrafteinflüsse der Gestaltelemente	XVIII
	Anhang B	XIX
	Quelltext des ersten Messelektronikprototypen.....	XIX
	Anhang C	XXII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Einfluss des Füllstoffanteils in Vol.-% auf die Zugfestigkeit (links) und den Zugmodul (rechts) von Epoxidmörtel (Zhu, 2018) 8
Abbildung 2.2:	Gaspatrone (a) und Injektionskartusche als Shuttleausführung (b) (Bildquelle: https://www.fischer.de) 9
Abbildung 2.3:	Montagezubehör für Verbundanker: (a) Reinigungsbürste, (b) Ausbläser, (c) Statikmischer (oder Mischwendel) und (d) Handauspresspistole (Bildquelle: https://www.fischer.de) 9
Abbildung 2.4:	Verbundankertypen für die Verwendung mit Verbundmörtel auf Vinylesterbasis: (a) Standardgewindestange, (b) Anker für Dynamikanwendungen und (c) Anker für geringe Achs- und Randabstände (Bildquelle: https://www.fischer.de) 10
Abbildung 2.5:	Montageanleitung eines FIS V-Verbundankers auf Vinylesterbasis der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG mit den notwendigen Schritten von links nach rechts: Bohren, Reinigen, Mörtel injizieren und Gewindestange einbringen, optische Kontrolle und Aufbringen des Installationsmomentes nach Aushärtezeit (Bildquelle: https://www.fischer.de) 11
Abbildung 2.6:	Modell der Einleitung der Last eines Verbundankers über Gewindestange zu Mörtel in Beton nach R. A. Cook et al. (2007) 14
Abbildung 2.7:	Verbundspannung über Verankerungstiefe aus Versuchen mit einem Verbundanker ($d = 20$ mm, $h_{ef} = 240$ mm) links und aus numerischen Untersuchungen mit einem Verbundanker ($d = 12$ mm, $h_{ef} = 144$ mm) rechts (Mészáros, 2002) 15
Abbildung 2.8:	Versagensarten von Verbundanker unter zentrischer Zuglast mit (a) Betonausbruch, (b–d) Herausziehen und (e) Stahlbruch (R. Cook et al., 1998) 16
Abbildung 2.9:	Einfluss der Rissbreite auf die Bruchkraft von Verbundankern bezogen auf die mittlere Bruchlast in ungerissenem Beton (Eligehausen et al., 2004) 17
Abbildung 2.10:	Beispielhafter Versuchsaufbau für zentrische Auszugsversuche mit enger Abstützung aus (TR 048) 27

Abbildung 2.11:	Halblogarithmische Darstellung der Verschiebung eines Verbundankers über die Zeit im Langzeit-Lastversuch aus (Eligehausen, 2008).....	28
Abbildung 2.12:	Beispielhaft, das Ergebnis des Versuchs 3 der Effekt- beziehungsweise Risslokalisierung mittels Schallemission mit Seitenansicht XZ-Perspektive (links) und Draufsicht XY-Perspektive (rechts) nach (Pregartner et al., 1998).....	31
Abbildung 2.13:	Versuchsaufbau mit zwei aneinandergesetzten Betonprüfkörpern und einem im Spalt dazwischen gesetzten Verbundanker (Appl, 2009)	32
Abbildung 2.14:	Vergleich des Versagensbildes des Auszugversuchs von APPL (rechts) und des numerischen Modells links (Appl, 2009)	33
Abbildung 2.15:	Darstellung der ursprünglichen Deckenkonstruktion (Modell links) und forensische Fotodokumentation (rechts) nach dem Verbundankerversagen aus dem Unfallbericht des NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARDS (ROSENKER ET AL., 2007)	39
Abbildung 2.16:	Schematische Darstellung des eingesetzten Epoxidsystems (links) und versagte Verbundankersysteme aus den Untersuchungen der Deckenabhängungen weiterer Tunnelsegmente (rechts) aus dem Unfallbericht des National Transportation Safety Boards (Rosenker et al., 2007)	39
Abbildung 2.17:	Darstellung der eingestürzten Tunneldecke und Trennwand in der Skizze (links) und Fotografie der forensischen Dokumentation (rechts) (Shirato, 2014)	40
Abbildung 2.18:	Querschnitt einer entnommenen Probe eines versagten Verbundankers mit 30 mm zu tiefer Bohrung und dementsprechend nicht ausreichend durchmischtem Verbundanker (überarbeitet nach Shirato, 2014)	41
Abbildung 2.19:	Querschnitt einer weiteren entnommenen Probe mit Hohlraum direkt am Bohrloch und darin verdrängtem Verbundmörtel (Shirato, 2014).....	41
Abbildung 2.20:	Das LVDT-Sensorelement in schematischer Darstellung (Schönfelder & Hering, 2018).....	48
Abbildung 2.21:	Schematische Darstellung der Änderung der Kapazität als kapazitives Messprinzip nach (Schönfelder & Hering, 2018).....	53

Abbildung 2.22:	Schematische Darstellung des Ersatzschaltbildes sowie der Lade- und Entladekurven eines Kondensators nach (Schnabel, 2017)	54
Abbildung 2.23:	Abbildung einer allgemeinen Messkette mit Beispiel (überarbeitet nach (Bernstein, 2014))	57
Abbildung 2.24:	Modell zur Überwindung der Beobachtungsbarriere eines Spreizdübels in Polymethylmethacrylat zur Darstellung der Spreizkräfte mittels der Analysemethode Spannungsoptik (Matthiesen et al., 2017)	60
Abbildung 2.25:	Beispielhafte Erstellung eines Modells der qualitativen Kraftvektoren eines vertikal belasteten, nicht rotierbaren Elementes (Achenbach et al., 2010).....	61
Abbildung 2.26:	Beispiele für die Anwendung der Methode SCHUBVIERECK nach Mattheck (2010) am Beispiel von Zugbelastung (A), schubbelasteter Riss/Schlitz (Mode II) (B) und Torsion (C) aus C. Wissner (2010)	62
Abbildung 2.27:	Übersicht der Elemente und der Grundhypothesen des C&C ² -Ansatzes (Matthiesen et al., 2018)	63
Abbildung 2.28:	Darstellung aller Zusammenhänge der Elemente des C&C ² -Ansatzes (Matthiesen et al., 2018)	65
Abbildung 2.29:	Grafische Darstellung des 2 ³ -vollfaktoriellen Versuchsplans mit den Faktoren A, B und C und den jeweiligen Stufen in den Indizes sowie ein Center-Point-Versuch (Frank, 2019)	69
Abbildung 4.1:	Forschungsvorgehen	82
Abbildung 5.1:	Darstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Detailaufnahme des Beobachtungsraumes mit Rastermarkierung.....	87
Abbildung 5.2:	Betonprüfkörper nach Erstellung des Bohrlochs und anschließendem Aussägen eines Viertels des Würfels	88
Abbildung 5.3:	Präparierte Gewindestange mit entferntem Viertel über eine Länge von 50 mm parallel zur Gewindestangenachse	89
Abbildung 5.4:	Eingeklebte und gereinigte Gewindestange in Betonprüfkörper	90
Abbildung 5.5:	Erstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit vorbereiteter Gussform links (a) und eingegossenem Epoxidsichtfenster rechts (b)	91
Abbildung 5.6:	Fertiger In Situ-Erkenntnisprüfstand mit Epoxidsichtfenster für den Auszugsversuch mit enger Abstützung.....	92

Abbildung 5.7:	Beispielhafter Versuchsaufbau für einen zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung nach (ETAG 001 - PART 5).....	93
Abbildung 5.8:	Änderung des Brechungsindex am In Situ-Erkenntnisprüfstand mit Epoxid durch spannungsinduziertes Ablösen an der Trennfläche bei geringer Last (links, a)) und beim Erreichen der Auszugskraft (rechts, b)) (bearbeitet, mit Schärfekorrektur)	94
Abbildung 5.9:	Beispielhaft einer der verwendeten In Situ-Erkenntnisprüfstände ohne Epoxidsichtfenster	95
Abbildung 5.10:	Tastversuch eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Rastermarkierung und Rissprüfspray bei keiner Belastung (links) und beim Erreichen der Auszugskraft (rechts)	96
Abbildung 5.11:	Versagensbild der ausgezogenen Verbundanker nach zentrischem Auszug mit enger Abstützung nach (ETAG 001 - PART 5) des Referenzversuchs (links) und des In Situ-Versuchs (rechts) mit einem Ausbruchkegelwinkel von ca. 35 °	98
Abbildung 5.12:	Darstellung zur Messung des Überstandes am Beispiel des Überstandes rechts zur Berechnung des Korrekturfaktors	99
Abbildung 5.13:	Verbundspannung über den Weg, exemplarisch für einen In Situ-Versuch und einen Referenzversuch (Horn, Hölz et al., 2020).....	100
Abbildung 5.14:	Vergleich der maximalen Verbundspannung der jeweils sechs In Situ-Versuche und der jeweils drei Referenzversuche in C20/25 und C50/60	101
Abbildung 5.15:	Verteilung der Rissbildungen aller Versuche (mit Raute markiert) über die Einbindetiefe	103
Abbildung 5.16:	Exemplarische Darstellung der Versagensvorgänge bei etwa 35 % der Auszugskraft (oben) und nach Versagen des Verbundankers (unten)	104
Abbildung 5.17:	Darstellung eines SCHUBVIERECK-Modells nach (Mattheck & Bethge, 2004) mit der horizontalen und vertikalen Scherspannung mit resultierender Druck- und Zugstrebe über den Riss aus dem Beobachtungsraum eines In Situ-Versuchs	107
Abbildung 5.18:	Darstellung des C&C ² -Modells aus den Beobachtungen des In Situ-Prüfstandes mit eingezeichnetem Betrachtungsbereich für das C&C ² -Sequenzmodell	108
Abbildung 5.19:	Darstellung des C&C ² -MODELLS nach Aufbringen des Installationsmomentes	110

Abbildung 5.20:	Darstellung des C&C ² -MODELLS bei erster Rissbildung zwischen 30 % und 40 % der Auszugskraft <i>FU</i> 111
Abbildung 5.21:	Darstellung des C&C ² -MODELLS bei Risswachstum zwischen 40 % und 80 % der Auszugskraft <i>FU</i> 111
Abbildung 5.22:	Darstellung des C&C ² -MODELLS bei lokalem Versagen zwischen 80 % und bis zum Erreichen der Auszugskraft <i>FU</i> 112
Abbildung 5.23:	Darstellung des C&C ² -MODELLS bei Erreichen der Auszugskraft <i>FU</i> und Verbundversagen des Ankers 113
Abbildung 5.24:	Darstellung der identifizierten funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen aus den In Situ-Versuchen 115
Abbildung 6.1:	Darstellung der Positionen der einzelnen Faktorstufen für den vollfaktoriellen 3 ³ -Versuchsplan 122
Abbildung 6.2:	Darstellung einer als Referenz und Rohling der GFZ-Versuchsmuster, verwendeten M12-Gewindestange der Länge 160 mm und der Festigkeitsklasse 12.9 125
Abbildung 6.3:	Gewindestange mit aufgeklebtem weißem Gestaltelement an der Gewindestangenstirnfläche mit dem Außendurchmesser <i>da</i> = 12 mm und der Dicke <i>t</i> = 5 mm zur Darstellung der Faktorstufe (2:y:z)..... 125
Abbildung 6.4:	Darstellung der zweiten Faktorstufe des Faktors 1 (2:y:z) als blaues Element im Einbauzustand 126
Abbildung 6.5:	Gewindestange mit axialem Element, einer Stahlunterlegscheibe zur Darstellung der Faktorstufe (3:y:z) mit Innendurchmesser <i>di</i> = 12 mm, Außendurchmesser <i>da</i> = 28 mm und Dicke <i>t</i> = 5 mm 126
Abbildung 6.6:	Einbauzustand der dritten Faktorstufe des ersten Faktors (3:y:z) schematisch als grünes Element dargestellt 127
Abbildung 6.7:	Foto der Gewindestange mit 0,2 mm Kupferlackdraht im Gewindegrund zur Abbildung der Faktorstufe (x:2:z) des Versuchsplans sowie eine Skala für die Einbindetiefe und eine schematische Darstellung des Kupferlackdrahtes im Gewindegrund 128
Abbildung 6.8:	Darstellung der in Rot gekennzeichneten zweiten Faktorstufe des Faktors 2 (x:2:z) im Einbauzustand mit Detaildarstellung des Gestaltelementes im Gewindegrund 128

Abbildung 6.9:	Foto der Gewindestange mit 0,75 mm Kupferlackdraht im Gewindegang zur Abbildung der Faktorstufe (x:3:z) des Versuchsplans sowie eine Skala für die Einbindtiefe und eine schematische Darstellung des Kupferlackdrahtes im Gewindegrund.....	129
Abbildung 6.10:	Schematische Darstellung des Einbauzustandes der dritten Faktorstufe des Faktors 2 (x:3:z) in Magenta gekennzeichnet mit Detaildarstellung im Schnittbild.....	129
Abbildung 6.11:	Darstellung der 3D-gedruckten Steggeometrie und Foto des Versuchsmusters der Faktorstufe (x:y:2) für eine 12,5-prozentige Verbundabdeckung mit den relevanten Maßen	130
Abbildung 6.12:	Darstellung der in Gelb dargestellten zweiten Faktorstufe des Faktors 3 (x:y:2) mit 12,5-prozentiger Abdeckung der Verbundfläche im Einbauzustand.....	131
Abbildung 6.13:	Abbildung der Faktorstufe (x:y:3) zur großflächigen Abdeckung der Verbundfläche von 50 %, aufgeteilt in vier rotationssymmetrisch angeordnete Elemente mit allen relevanten Maßen	132
Abbildung 6.14:	Schematische Darstellung des Einbauzustandes der dritten Faktorstufe des Faktors 3 (x:y:3) in Orange dargestellt mit einer Abdeckung von 50 % der Verbundfläche	133
Abbildung 6.15:	Kombinationen aus dem Versuchsplan mit der ersten Stufe des Faktors 1 mit geringfügiger (12,5 %) bzw. großflächiger (50 %) Abdeckung des Verbundes, jeweils mit Gewindegrundabdeckung (a (1:2:2) und b (1:2:3)) bzw. Auffüllen des Gewindegangs (c (1:3:2) und d (1:3:3))	134
Abbildung 6.16:	Versuchsmuster mit der Faktorzusammensetzung mit geringfügiger (12,5 %) (2:1:2) (a) und großflächiger (50 %) (2:1:3) (b) Abdeckung des Gewindegrundes und ‚Element im Bohrlochgrund‘	134
Abbildung 6.17:	Variation der Unterbrechung der Verbundfläche z mit der Faktorzusammensetzung (2:2:z) ‚Abdeckung des Bohrlochgrundes‘ und ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘	135
Abbildung 6.18:	Darstellung der Versuchsmuster mit (2:y:z), Abdeckung des Bohrlochgrundes, und (x:3:z), Abdeckung des Gewindeganges, mit den verschiedenen Stufen des Faktors 3: keine Unterbrechung der Verbundfläche (0 %) (x:y:1) (a), geringfügige (12,5 %) Abdeckung der Verbundfläche (x:y:2) (b) und großflächige (50 %) Abdeckung der Verbundfläche (x:y:3) (c).....	135

Abbildung 6.19:	Beispielhafte Darstellung eines vorbereiteten Betonprüfkörpers mit installierten Versuchsmustern und zwei zu tiefen Fehlbohrungen ..	137
Abbildung 6.20:	Beispielhafte Darstellung von Versuchsmustern mit verschiedenen Faktorstufen (siehe Codierung) vor und nach dem Auszugsversuch	138
Abbildung 6.21:	Kraft-Weg-Diagramm der Auszugsversuche 1 bis 9 nach randomisiertem Versuchsplan jeweils mit eingezeichneter Auszugskraft	139
Abbildung 6.22:	Darstellung des Kraft-Weg-Diagrammes mit den jeweiligen Maximalwerten der Versuche 10 bis 18 in der randomisierten Reihenfolge des Versuchsplans	140
Abbildung 6.23:	Kraft-Weg-Diagramme der Versuche 19 bis 27 der randomisierten Versuchsreihenfolge mit der jeweiligen maximalen Auszugskraft ..	141
Abbildung 6.24:	Verlauf der Auszugskraft über den Weg am Beispiel der Versuchsmuster N18 (2:3:3) und N20 (3:2:1) aus den Versuchen ...	142
Abbildung 6.25:	Übersicht aller Verbundspannungen, geordnet über die Faktoren und Faktorstufen mit Versuchsmusterbezeichnung und dazugehöriger Stufenzusammensetzung der jeweiligen Faktoren	143
Abbildung 6.26:	Haupteffektdiagramm der ersten Anpassung der Regressionsgleichung mit den Faktorstufen 2 und 3 der Faktoren 1 bis 3 mit der jeweiligen 1. Faktorstufe als Referenzwert und dem 95 %-Konfidenzintervall	144
Abbildung 6.27:	Diagramm der Zweifachwechselwirkungen der ersten Anpassung der Regressionsgleichung mit den Referenzwerten (1:1:z), (1:y:1) und (x:1:1) und Konfidenzintervall von $\pm 1,18$ MPa.....	146
Abbildung 6.28:	Wahrscheinlichkeitsnetz für die Normalverteilung der zweiten Anpassung des Regressionsmodells	147
Abbildung 6.29:	Haupteffektdiagramm der zweiten Anpassung des Regressionsmodells für die Faktorstufen der Faktoren 2 und 3 mit jeweiliger Referenz (x:1:z) beziehungsweise (x:y:1) und dem 95 %-Konfidenzintervall	148
Abbildung 6.30:	Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm der zweiten Anpassung des Regressionsmodells mit der Referenz (x:1:1) und dem 95 %-Konfidenzintervall	149
Abbildung 7.1:	Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ‚Betonoberfläche‘ (grün)	157

Abbildung 7.2:	Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ,geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (gelb).....	158
Abbildung 7.3:	Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ,Abdeckung des Gewindegrundes‘ (rot) mit Detailvergrößerung	159
Abbildung 7.4:	Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ,Bohrlochgrund‘ (blau) mit Detailvergrößerung	160
Abbildung 7.5:	Zusammenfassung der zur Verfügung stehenden Designräume ,Betonoberfläche‘ (grün), ,geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (gelb), ,Abdeckung des Gewindegrundes‘ (rot) und ,Element im Bohrlochgrund‘ (blau)	170
Abbildung 7.6:	Entwurf eines kapazitiven Abstandssensors für Verbundankersysteme im Designraum ,Bohrlochgrund‘ mit Nutzung des Designraumes ,geringfügige Abdeckung Verbundfläche‘	172
Abbildung 7.7:	3D-gedruckter Prototyp des Sensorhalters mit Gewindestange (oben) und der Messelektronik mit Gehäuse (unten)	174
Abbildung 7.8:	Prototyp aus Polyethylen-Sensorhalter mit spritzgussintegriertem Edelstahlblech als Messelektrode und Signalleitung	175
Abbildung 7.9:	Messelektronik Prototyp der Firma LNT Automation GmbH für den kapazitiven Abstandssensor.....	175
Abbildung 7.10:	Darstellung des Messprinzips des kapazitiven Impedanzsensors (links) mit Messfeld (orange) und Referenzfeld (blau) und dem vereinfachten Ersatzschaltbild (rechts).....	176
Abbildung 7.11:	Prototyp des konstruierten Impedanzsensors mit Messelektronik der Firma SENSOSURF mit integrierter Messdatenübertragung mittels BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE)	177
Abbildung 7.12:	Kalibrierprüfstand für die Zuordnung der Ausgangsspannung zur zugehörigen Verschiebung.....	179
Abbildung 7.13:	Messsignal-Verschiebung-Verlauf des Abstandssensors aus dem Kalibrierprüfstand mit beispielhaft eingezeichneten relevanten Messbereichen für verschiedene Anwendungen des Verbundankers FIS V mit M12-Gewindestange.....	180
Abbildung 7.14:	Maschinenweg und Messsignal über den Messverlauf des ersten Auszugsversuches	181
Abbildung 7.15:	Kraft-Weg-Verlauf des ersten Auszugsversuches mit eingezeichnetem Messsignal	181

Abbildung 7.16:	Verlauf des Messsignals und des Maschinenweges im zweiten Auszugsversuch über die Zeit	182
Abbildung 7.17:	Verlauf der Kraft und des Messsignals über den Maschinenweg des zweiten Auszugsversuches	182
Abbildung 7.18:	Darstellung des Maschinenweges und des Messsignals über den dritten Auszugsversuch	183
Abbildung 7.19:	Kraft-Weg-Diagramm des dritten Auszugversuchs mit Darstellung des Messsignals über die Verschiebung.....	184
Abbildung 7.20:	Kraft-Weg-Verlauf der Auszugsversuche mit drei Impedanzsensoren für den Funktionstest	185
Abbildung 7.21:	Auswertung der Messsignale aus dem Auszugsversuch der drei Impedanzsensoren (überarbeitet nach Firma SENSOSURF)	186
Abbildung 7.22:	Vorgespannter mechatronisierter Verbundanker mit Federpaket in Betonwürfel (Neumayer, 2019).....	188
Abbildung 7.23:	Zwei vorgespannte Prüfkörper im Ofen (Neumayer, 2019)	189
Abbildung 7.24:	Prüfkörper in der Salzsprühnebelkammer zur Ermittlung des Einflusses von Feuchtigkeit oder korrosiver Medien auf die mechatronisierten Verbundanker (Neumayer, 2019)	190
Abbildung 7.25:	Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors integriert im belasteten Verbundanker bei 50°C für 16 beziehungsweise 20 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))	191
Abbildung 7.26:	Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors integriert im belasteten Verbundanker bei 80°C für 18 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))	192
Abbildung 7.27:	Einfluss der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors (überarbeitet nach Neumayer (2019))	193
Abbildung 7.28:	Einfluss einer korrosiven Atmosphäre auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors in der Salzsprühkammer (überarbeitet nach Neumayer (2019)).....	194
Abbildung 7.29:	Einfluss auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors integriert im belasteten Verbundanker bei 50°C für 16 beziehungsweise 20 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))	195

Abbildung 7.30:	Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors integriert im belasteten Verbundanker bei 80°C für 18 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019)).....	196
Abbildung 7.31:	Einfluss der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors (überarbeitet nach Neumayer (2019)).....	197
Abbildung 7.32:	Einfluss einer korrosiven Atmosphäre auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors in der Salzsprühkammer (überarbeitet nach Neumayer (2019))	198
Abbildung 7.33:	Mechatronisierter Verbundanker mit kapazitivem Abstandssensor	199
Abbildung 7.34:	Mechatronisierter Verbundanker mit kapazitivem Impedanzsensor	200
Abbildung 8.1:	Darstellung der Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung bestehender Befestigungsmittel mit einer Sekundärfunktion	206
Abbildung Anhang 1:	Verläufe der Verbundspannung über den Weg der In Situ-Auszugsversuche in C20/25	XV
Abbildung Anhang 2:	Verläufe der Verbundspannung über den Weg der Referenz-Auszugsversuche in C20/25	XV
Abbildung Anhang 3:	Verläufe der Verbundspannung über den Weg der In Situ-Auszugsversuche in C50/60	XVI
Abbildung Anhang 4:	Verläufe der Verbundspannung über den Weg der Referenz-Auszugsversuche in C50/60	XVI
Abbildung Anhang 5:	Übersicht der ermittelten Verbundspannungen aus den Versuchen zur Ermittlung der Haltekrafteinflüsse zusätzlicher Gestaltelemente aufgetragen über die randomisierte Durchlaufreihenfolge mit Versuchsmusterbezeichnung und dazugehöriger Stufenzusammensetzung der jeweiligen Faktoren	XVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wesentliche Produktcharakteristiken, Methoden und Kriterien zum Bewerten der Leistungsmerkmale des Produktes in Bezug auf die wesentlichen Charakteristiken aus (EAD 330499-00-0601).....	24
Tabelle 2:	Beispielhafter nicht randomisierter 2 ³ -Versuchsplan mit Center-Point-Versuch.....	69
Tabelle 4:	Übersicht der Faktoren und der jeweiligen Stufen des vollfaktoriellen 3 ³ -Versuchsplans	121
Tabelle 5:	Versuchsplan der Versuche des GFZs	123
Tabelle 6:	Qualitative Bewertungsmatrix zur Eignung der Designräume bezogen auf die unterschiedlichen Versagensarten für die Integration einer axialen Verschiebungsmessung.....	161
Tabelle 7:	Werte für die maximal auftretende Verschiebung eines chemischen Befestigungsmittels FIS V mit M12-Gewindestange für unterschiedliche Anwendungen im trockenen oder nassen Beton gesetzt und auf Zug beansprucht nach (ETA-02/0024).....	163
Tabelle 8:	Vergleich der Messprinzipien zu den Anforderungen für die Integration der Verschiebungsmessung in den identifizierten Designräumen aus Schönfelder und Hering (2018) und Recherche kommerzieller Sensoren.....	167
Tabelle Anhang 1:	Prüfkörperparameter der In Situ-Erkennntnisprüfstände	XVII
Tabelle Anhang 2:	Verwendete internationale Patentklassifikationen (IPC) für die Recherche nach sensorischen Befestigungsmitteln.....	XXII

Abkürzungsverzeichnis

abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
A/D	Analog/Digital
ASTM	American Society for Testing Materials
BF	Begrenzungsfläche (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
BIM	Building Information Modeling
BLE	Bluetooth Low Energy
BNC	Bayonet Neill Concelman
C	Connector (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
C&C ² -A	Contact&Channel-Ansatz
C20/25	Niederfester Beton für Standardversuche
C50/60	Hochfester Beton für Standardversuche
CAD	Computer Aided Design
CC	Concrete Capacity
CE	Conformité Européenne (Europäische Konformität)
CEN	Comité Européen de Normalisation
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Design of Experiments
EAD	European Assessment Document
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit

EN	Europäische Norm
EOTA	European Organization for Technical Assessment
ETA	European Technical Assessment (Europäische Technische Bewertung)
ETAG	European Technical Approval Guideline
FHWA	Federal Highway Administration
fib	Fédération international du béton
ICC-AC	International Code Council - Acceptance Criteria
ICC-ES	International Code Council - Evaluation Service
IfBt	Institut für Bautechnik
IFC	Industry Foundation Classes
INS	Induktiver Näherungssensor
IoT	Internet of Things
IP	International Protection (Schutzklasse für elektrische Geräte)
IWS	Induktiver Wegsensor
LDVT	Linear Variable Differential Transformer
LED	Light-emitting diode
LSS	Leitstützstruktur (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
NSS	Neutral salt spray
OFAT	One-factor-at-a-time
RFID	Radio-Frequency Identification
RS	Reststruktur (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
SVA	Sachverständigenausschuss

TOMIE	Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation
TR	Technical Report
TS	Tragstruktur (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
TS	Technical Specification
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolettstrahlung
WF	Wirkfläche (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)
WFP	Wirkflächenpaar (vgl. Contact&Channel ² -Ansatz)

Formelverzeichnis

α	Signifikanzniveau [%]
α_{gap}	Faktor für Ringspalt [-]
A	Verbundfläche [mm ²]
A_K	Plattenfläche Kondensator [mm ²]
A_{Mantel}	Mantelfläche [mm ²]
A_s	Spannungsquerschnittsfläche
$A_{c,N}$	Projizierte Fläche „Betonausbruch“ [mm ²]
$A_{c,N}^0$	Grundwert der projizierten Fläche „Betonausbruch“ [mm ²]
$A_{3/4}$	Verbundfläche In Situ-Erkenntnisprüfstand [mm ²]
A_{ef}	Effektive Verbundfläche [mm ²]
A_5	Bruchdehnung [%]
b_x	Regressionskoeffizienten [-]
C	Kapazität [F]
$c_{cr,N}$	Charakteristischer Randabstand für Betonausbruch [mm]
$c_{cr,sp}$	Charakteristischer Randabstand für Betonspaltung [mm]
c_{min}	Minimaler Randabstand [mm]
$c_{V\delta}$	Variationskoeffizient der Verschiebung [%]
δ_0	Verschiebung des Befestigers unter Kurzzeit-Belastung [mm]
δ_∞	Langzeit-Verschiebung des Befestigers [mm]
δ_{20}	Verschiebung des Befestigers nach 20 Risszyklen [mm]
δ_{1000}	Verschiebung des Befestigers nach 1000 Risszyklen [mm]
$\delta_{N,eq}$	Verschiebung d. Befestigers unter Zugspannung (seismisch) [mm]
$\delta_{u,adh}$	Mittlere Verschiebung bei Versuchen zum Adhäsionsverlust [mm]
$\delta_{V,eq}$	Verschiebung des Befestigers unter Querlast (seismisch) [mm]

Δd	Wegdifferenz [mm]
d bzw. d_0	Durchmesser bzw. Bohrennenddurchmesser [mm]
d_a	Außendurchmesser [mm]
d_i	Innendurchmesser [mm]
d_K	Plattenabstand Kondensator [mm]
d_{conf}	Durchmesser enge Abstützung [mm]
d_{cut}	Bohrereckmaß [mm]
d_{nom}	Eff. \emptyset d. Befestigers z. Berechnung v. Betonkantenbruch [mm]
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante ($8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$)
ϵ_r	Dielektrizitätszahl [As/Vm]
$f_{c,150}$	Betondruckfestigkeit an Würfel mit 150 mm Kantenlänge [N/mm ²]
$f_{ck,cube}$	Char. Druckfestigkeit von Betonwürfeln [N/mm ²]
$f_{ck,cyl}$	Char. Druckfestigkeit von Betonzylindern [N/mm ²]
f_{ctm}	Charakteristische mittlere Betonzugfestigung [N/mm ²]
f_{uk}	Charakteristische Zugfestigkeit des Stahlelements [N/mm ²]
γ_{inst}	Montagesicherheitsfaktor [-]
Δh	Abstand zw. Bohrlochgrund und Rückseite des Betons [mm]
h	Betondicke [mm]
h_{ef}	Effektive Verankerungstiefe [mm]
$h_{ef,gemessen}$	Gemessene effektive Verankerungstiefe [mm]
$h_{ef,min}$	Mindestverankerungstiefe [mm]
$h_{ef,max}$	Maximalverankerungstiefe [mm]
h_{min}	Minimale Betondicke [mm]
$h_{min,In Situ}$	Minimale Betondicke des In Situ-Erkenntnisprüfstandes [mm]
h_{sensor}	Höhe des Sensorelementes [mm]
I_C	Kondensatorstrom [A]
k_7	Faktor für Duktilität des Befestigungsmittels [-]

k_8	Faktor f. d. Berechnung des char. Widerstands gegen „Pry-Out“ [-]
$k_{cr,N}$	Widerstandsfaktor gegen Betonversagen, gerissener Beton [-]
$k_{ucr,N}$	Widerstandsfaktor gegen Betonversagen, ungerissener Beton [-]
λ	Wellenlänge [nm]
l	Länge [mm]
l_f	Effektive Länge des Befestigers unter Scherbelastung [mm]
$M_{Rk,s}^0$	Char. Widerstand für Stahlversagen mit Hebelarm [Nm]
N	Anzahl [-]
N bzw. F	(Zug-)Kraft [N]
N_u bzw. F_u	Bruchlast oder Auszugskraft [N]
$N_{u,adh}$	Last bei Verlust der Adhäsion [N]
$N_{u,c}^0$	Mittlere Bruchkraft Betonausbruch [N]
$N_{u,m}$	Mittlere Bruchlast [N]
$N_{p,red}$	Bruchlast bei Auszug, reduziert [N]
N_{Rk}^0	Grundwert d. char. Widerstand des Einzelverbundankers [N]
$N_{Rk,c}$	Char. Wdst. des Einzelverbundankers gegen „Betonausbruch“ [N]
$N_{Rk,c}^0$	Grundwert d. char. Wdst. f. d. Versagensart „Betonausbruch“ [N]
$N_{Rk,p}^0$	Char. Widerstand für die Versagensart „Herausziehen“ [N]
$N_{Rk,s}$	Charakteristischer Widerstand gegen Stahlbruch [N]
$N_{Rk,s,eq}$	Charakteristischer Widerstand gegen Stahlbruch (seismisch) [N]
N_{sust}	Dauerlast auf den Befestiger [N]
$N_{sust,red}$	Reduzierte Dauerlast auf den Befestiger [N]
$\psi_{ec,N}$	Beiwert zur Berücksichtigung von Exzentrizität [-]
$\psi_{re,N}$	Beiwert zur Berücksichtigung von dichter Bewehrung [-]
$\psi_{s,N}$	Beiwert zur Berücksichtigung von Rändern [-]
$\psi_{ucr,N}$	Beiwert für ungerissenen Beton [-]
Q_L	Spulengüte [-]

R	Elektrischer Widerstand [Ω]
R^2	Bestimmtheitsmaß [%]
s_{min}	Minimaler Achsabstand [mm]
τ	Zeitkonstante Kondensator [s]
τ bzw. τ_0	Verbundspannung [N/mm ²]
$\bar{\tau}$	Mittlere Verbundspannung [N/mm ²]
$\tau_{3/4}$	Verbundspannung des In Situ- Erkenntnisprüfstandes [N/mm ²]
$\tau_{5\%}$	Charakteristische Verbundspannung (5 %-Fraktilwert) [N/mm ²]
τ_{Rk}	Charakteristische Verbundspannung [N/mm ²]
$\tau_{Rk,peq}$	Char. Verbundspannung („Herausziehen“; seismisch) [N/mm ²]
τ_u	Bruchspannung [N/mm ²]
t	Dicke [mm]
$\max T_{fix}$	Maximales Montagemoment [Nm]
T_{lt}	Maximale Langzeit Temperatur [°C]
T_{st}	Maximale Kurzzeit Temperatur [°C]
t_{work}	Verarbeitungszeit Kunstharz [min]
U_{ges}	Gesamtmessunsicherheit [%]
U_{ges}	Versorgungsspannung [V]
\ddot{U}_L bzw. \ddot{U}_R	Korrekturfaktor (Kreisbogen) des Überstand [mm]
$V_{Rk,s}^0$	Charakteristischer Scherwiderstand für Stahl [N]
$V_{Rk,s,eq}$	Charakteristischer Scherwiderstand für Stahl (seismisch) [N]
Δw	Rissbreite [mm]
x_L bzw. x_R	Gemessener Überstand d. Gewindestange [mm]
\bar{Y}	Statistischer Mittelwert

1 Einleitung

Die Nachfrage nach Gebäuden für Wohnraum, Gewerbe und Industrie, aber auch Infrastruktur nimmt trotz marktüblicher Schwankungen weltweit stetig zu. Hinzu kommen viele Bestandsbauwerke, die aufgrund ihres durchschnittlichen Alters oder steigender Verkehrslasten instandgesetzt oder ertüchtigt werden müssen. Sowohl im Neubau als auch bei der Instandsetzung von Bestandsbauwerken helfen vor allem nachträgliche Schwerlastbefestigungen, sicherheitsrelevante, funktionale oder strukturelle lasteinleitende Bauteile zu montieren. Sicherheitsrelevante Bauteile können beispielsweise Geländer, Belüftungssysteme oder Brandschutzelemente sein. Strukturelle lasteinleitende Bauteile können Stahltragwerke und funktionale Bauteile können abgehängte Decke sein. In der Regel besitzen Bauwerke eine Lebensdauer von weit über 50 Jahren. Somit sollten auch nachträgliche Befestigungselemente eine vergleichbar hohe Lebensdauer aufweisen. Aus diesem Grund gibt es besondere Bewertungen für Befestigungsmittel, die diesen Bauteilen eine ausreichende Prüfung auf Lastragfähigkeit und Lebensdauer unter unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen durch unabhängige Gutachter gewährleisten.

Dennoch kommt es mit Schwerlastbefestigungsmitteln auch aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen oder von Anwenderfehlern zu unvorhersehbaren Schadensfällen mit Personen oder Sachgegenständen. Um diese im Betrieb zu vermeiden, werden besonders sicherheitsrelevante Gebäude und ihre Komponenten regelmäßig überprüft. Bei Befestigungsmitteln ist dies jedoch nicht immer ohne weiteres möglich, da sich diese auch an schwer erreichbaren oder nicht zugänglichen Orten, wie beispielsweise an Hallen- oder abgehängten Tunneldecken, befinden können. Auch wenn für das Bauingenieurwesen nicht immer zutreffend, werden im Sinne des Maschinenbauwesens und vor allem der Elektrotechnik aufgrund der möglichen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur oder korrosiven Medien die herrschenden Umgebungsbedingungen im Folgenden als rau bezeichnet.

Durch die stetige Weiterentwicklung der Digitalisierung in der Bautechnik steigt auch die Akzeptanz von Sensorik im Bereich der Gebäudesteuerung oder der kontinuierlichen Bauwerksüberwachung. Parallel hierzu gibt es forschungsseitig Bestrebungen, sensorische Elemente direkt in Bauteile zu integrieren, diese also zu mechatronisieren (Vorwerk-Handing, Gwosch, Schork, Kirchner & Matthiesen, 2019; Vorwerk-Handing, Vogel & Kirchner, 2019). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der methodischen Vorgehensweise zur Mechatronisierung eines Schwerlastbefestigungselementes. Hierfür wird am Beispiel eines konventionellen Verbundankers auf Vinylesterbasis mit integrierten Zustandssensoren eine neue Entwicklungsmethode

ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln vorgestellt. Die Entwicklungsmethode gliedert sich in drei Entwicklungsschritte: *Analyse*, *Synthese* und *Rücktransformation*. Das Akronym ASTRA bezieht sich auf diese Entwicklungsschritte und bedeutet ausgeschrieben ‚ANALYSE-SYNTHESE-TRANSFORMATION‘. Diese Entwicklungsschritte werden in den drei Hauptkapiteln am Beispiel des oben genannten Verbundankersystems veranschaulicht und am Ende des jeweiligen Kapitels abstrahiert und beschrieben. Anhand dieser drei Schritte ist es möglich, Erkenntnisse für ein tieferes Verständnis der Versagensvorgänge zu generieren, den Gestalt-Funktion-Zusammenhang zu ermitteln und schließlich das zu untersuchende System zu mechatronisieren, ohne dessen Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen.

Der Aufbau der Arbeit wird im Folgenden vorgestellt. In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen und der Stand der Forschung zu diesem Thema dargelegt. Hierfür werden der Untersuchungsgegenstand, der Verbundanker auf Vinylesterbasis, sowie der Beton als geläufigster Verankerungsgrund für diese Art von Befestigungsmittel vorgestellt. Darauf folgend wird ein Einblick in die Bemessung und Bewertung dieser Systeme gegeben, der die Besonderheiten von Verbundankern aufzeigen soll. Hieraus lassen sich relevante Informationen für die Mechatronisierung des Verbundankers gewinnen. Die Richtlinien zur Prüfung von Bauwerken, der Wartungsaufwand und ausgewählte Schadensfälle zeigen die Notwendigkeit für ein kontinuierliches Überwachen, auch von Befestigungselementen, auf. Daraufhin wird ein Einblick in die Digitalisierung der Baubranche mit Beispielen der Bauwerksüberwachung gegeben. Hier werden auch erste Ansätze der Integration von Sensordaten in DIGITALE ZWILLINGE vorgestellt. An dieses Unterkapitel schließen sich die Messprinzipien für die Verschiebungsmessung, untergliedert in Sensoren für Weg- und Abstandsmessung, an. Die Verschiebung ist, wie im Unterkapitel der Bemessung und Bewertung vorgestellt, ein bedeutsamer Aspekt für den Zustand eines Verbundankersystems. Abschließend werden die in dieser Arbeit angewendeten Methoden zur Modellbildung vorgestellt.

Kapitel 3 erläutert die Motivation resultierend aus dem Stand der Forschung zur Bearbeitung dieser Thematik in der vorliegenden Arbeit. Hieraus wird wiederum die Zielsetzung abgeleitet. Das Forschungsvorgehen zum Erreichen dieses Ziels wird begleitet durch die vorgestellte Entwicklungsmethode ASTRA in Kapitel 4 dargelegt, wobei auch die Teilforschungsfragen erläutert werden, die diese Arbeit letztlich strukturieren.

Das Kapitel 5 beschreibt den ersten Schritt, die *Analyse*, der Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung eines Befestigungsmittels. Für die *Analyse* des hier genutzten Forschungsgegenstandes, des Verbundankers auf Vinylesterbasis, wird

ein In Situ-Erkenntnisprüfstand erstellt, mit dem es erstmals möglich ist, die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen im zentrischen Auszugsversuch sichtbar zu machen. Der In Situ-Erkenntnisprüfstand wird hierfür in drei Schritten verifiziert. Daraufhin werden über die SCHUBVIERECKMETHODE und den C&C²-ANSATZ Modelle erstellt, die zum einen die qualitativen Kraftverläufe darstellen und zum anderen die einzelnen Versagensvorgänge in fünf Zustände gliedern. Hierdurch können die funktionsrelevanten Wirkflächen und die funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen identifiziert werden.

Über die identifizierten Wirkflächen und Begrenzungsflächen sollen im Kapitel 6 die Designräume validiert werden, an denen sensorische Elemente in einen Verbundanker eingebracht werden können, ohne deren Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ signifikant zu beeinflussen. Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise des zweiten Schrittes, der *Synthese*, der vorgestellten Entwicklungsmethode ASTRA am Beispiel des Verbundankers. Positionen zur Einbringung zusätzlicher Gestaltelemente ohne dessen Primärfunktionen ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen, sind bisher unbekannt. Aus diesem Grund werden aus den Erkenntnissen des vorangegangenen Kapitels 5, also den identifizierten Wirkflächen und Begrenzungsflächen, in Kapitel 6 Gestaltelemente konstruiert und mittels Rapid-Prototyping-Verfahren erstellt. Diese werden anschließend in konventionelle Verbundanker integriert. Über die Methode der statistischen Versuchsplanung wird daraufhin ein vollfaktorierter 3³-Versuchsplan erstellt und die Versuche werden daraus randomisiert durchgeführt. Mit den Versuchsergebnissen wird ein lineares Regressionsmodell erstellt, wobei signifikante und nicht signifikante Effekte der Gestaltelemente bewertet werden. Designräume zur Integration von sensorischen Elementen, ohne Beeinflussung der Primärfunktion des Verbundankers, können schließlich hieraus abgeleitet werden.

In Kapitel 7 wird der dritte und letzte Schritt, die *Rücktransformation*, der Entwicklungsmethode ASTRA am Beispiel des Untersuchungsgegenstandes Verbundanker beispielhaft dargestellt. Anhand der zur Verfügung stehenden Designräume und den beobachteten Schädigungsmechanismen im In Situ-Erkenntnisprüfstand wird ein Messprinzip zur axialen Verschiebungsmessung aus dem Stand der Forschung ausgewählt. Wie in diesem Kapitel aufgezeigt wird, ist die Messung der axialen Verschiebung des Verbundankers am effektivsten für die Detektion der relevantesten Schädigungsmechanismen. Hierfür werden mittels der Physical-Computing-Plattform ARDUINO und des Rapid-Prototyping-Verfahrens Funktionsprototypen erstellt. Aus diesen Erkenntnissen werden ein spezifisches Sensorboard und ein seriennahes Sensorelement abgeleitet, das vorgestellt und im Versuch verifiziert wird. Ein Versuchsprogramm mit unterschiedlichen Versuchen soll die Robustheit der Systeme und den Nutzen für das kontinuierliche Überwachen darstellen.

Die einzelnen Entwicklungsschritte *Analyse*, *Synthese* und *Rücktransformation* der Entwicklungsmethode ASTRA werden in Kapitel 8 schließlich abstrahiert als Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln zusammengefasst und beschrieben. Daraufhin wird in diesem Kapitel die Anwendbarkeit dieser Methode auf Befestigungsmittel diskutiert.

Abschließend werden in Kapitel 9 alle Ergebnisse und Erkenntnisse gesammelt und es wird ein Ausblick auf weitere notwendige Aktivitäten gegeben. Auch werden weiterhin bestehende Fragen zusammengefasst.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel fasst die für die vorliegende Forschungsarbeit relevanten Grundlagen aus dem Stand der Forschung zusammen. Das erste Unterkapitel 2.1 befasst sich dabei mit dem Gegenstand dieser Forschung, dem Verbundankersystem auf Vinylesterbasis. Nach der Vorstellung der einzelnen Komponenten des Systems und der besonderen Montagevorgaben wird auf den Verankerungsgrund Beton eingegangen und die Lasteinleitung eines Verbundankers in diesen Untergrund erläutert.

Im zweiten Unterkapitel werden die aktuellen Bemessungsverfahren für Verbundankersysteme vorgestellt und es wird die aktuell gültige Bewertungsrichtlinie zum Erreichen eines bautechnischen Bewertungsdokumentes nach der Bauprodukteverordnung des europäischen Rates thematisiert. Diese wird spezifisch nur für den weiter untersuchten Anwendungsfall dieser Forschungsarbeit behandelt, wobei die Kernpunkte besprochen werden. Ein Kernpunkt ist die axiale Verschiebung unter Langzeitbelastung, die seit Jahren in der Forschung diskutiert wird und mit aktuellem Stand der Bewertungsrichtlinien über Lastminderungsfaktoren bei Verbundankersystemen berücksichtigt wird. Abgeschlossen wird das Unterkapitel mit Forschungsbeiträgen zur Ermittlung der Versagensmechanismen von Verbundankersystemen.

Trotz dieser umfassenden Bewertungsrichtlinien und Bemessungsverfahren mit Sicherheitsfaktoren über 50 Jahre Lebensdauer kann es dennoch zu Schadensfällen kommen. Diese werden in Unterkapitel 2.3 näher beleuchtet, angefangen bei allgemeinen Schäden im Ingenieurbau, die beispielsweise durch Risse Verbundanker direkt beeinflussen können, über die Richtlinien zum Wartungsaufwand von Ingenieurbauwerken, bis hin zu den Wartungsaufwendungen der einzelnen Befestigungssysteme. Zwei besonders schwerwiegende Schadensfälle mit Verbundankersystemen der letzten Jahre in Boston und Sasago, noch vor Einführung der oben genannten Lastminderungsfaktoren in den Bewertungsrichtlinien, zeigen abschließend die Bedeutung der Einhaltung von Bewertungsdokumenten und regelmäßigen Wartungsarbeiten auf.

Die darauffolgenden Unterkapitel 2.4 und 2.5 befassen sich mit der Entwicklung der Digitalisierung in der Bautechnik, dem aktuellen Stand der Technik im Bereich der strukturellen Bauwerksüberwachung und den Messprinzipien, die sich für Verbundankersysteme eignen könnten, um in zukünftigen DIGITALEN ZWILLINGEN von

Gebäuden im Rahmen des BUILDING INFORMATION MODELING ihren Beitrag leisten zu können.

Das letzte Unterkapitel 2.6 beschäftigt sich mit den Modellbildungsmethoden, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit angewendet wurden, um das bestehende System zu analysieren, die gewonnenen Erkenntnisse umzusetzen und die Forschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten.

2.1 Chemische Schwerlastbefestigungen: Verbundanker

Mit der Patentanmeldung spreizkraftfreier Befestigungsmittel in der 1950er Jahren durch die Bergwerksverband GmbH (Schuermann & Novotny, 1959) fanden die sogenannten chemischen Befestigungsmittel durch die Firma UPAT GmbH & Co. KG schon wenige Jahre später, im Jahr 1962, ihren Einsatz im Bauwesen. Diese Verbundanker basieren auf einer organischen Komponente sowie mineralischen Zuschlagstoffen und sind seit 1975 bauaufsichtlich zugelassen (Eligehausen, Mällée & Rehm, 1984).

Seit ihrer Einführung und vor allem ihrer bauaufsichtlichen Zulassung haben sich Verbundanker durch die stetige Weiterentwicklung und ihre flexiblen Einsatzmöglichkeiten bei gutem Preis-Leistungs-Verhältnis einen festen Platz auf dem Markt gesichert (Eligehausen, Appl, Lehr & Mészáros, J., Fuchs, W., 2004). Durch ihre spreizdruckfreie Montage ist es beispielsweise möglich, Befestigungen randnah an Betonkanten zu platzieren, ohne Kantenausbrüche des Untergrundes zu riskieren oder geringe Achsabstände zwischen den Befestigungspunkten, beispielsweise bei der Montage von Ankerplatten, zu realisieren. Auch für Befestigungen in Mauerwerk mit Lochanteil können Verbundanker aufgrund der Ausbildung von Formschluss und somit der Erhöhung der lasteinleitenden Flächen sehr hohe Lasten in den Untergrund einleiten (Welz, 2011).

2.1.1 Allgemeines zur reaktiven Komponente der Verbundanker

Die gängigsten Systeme in der Befestigungstechnik sind Kunstharze mit Härter. Hierbei kommen heutzutage Epoxid- (EP), Vinylester- (VE) oder ungesättigte Polyesterharze (UP) zum Einsatz. Die wichtigsten Vertreter für die Schwerlastbefestigung sind Systeme mit Epoxid- und Vinylesterharzen. (Jaswal & Gaur, 2014)

Kunstharz und Härter werden hierbei vor der Anwendung in separaten Behältern aufbewahrt und erst bei der Applikation im richtigen Mischungsverhältnis möglichst homogen zusammengeführt. Nach der irreversiblen Vernetzungsreaktion bildet sich

ein Duroplast aus. Epoxidharze beispielsweise besitzen sehr gute Adhäsionseigenschaften gegenüber anorganischen Stoffen und höhere Verbundspannungen, haben jedoch im Vergleich zu Vinylesterharzen sehr lange Aushärtezeiten und sind aufgrund hochpreisiger Bestandteile vergleichsweise teuer. (Huber, 2017; Schätzle, 2013)

Vinylesterharze sind beliebt in der Befestigungstechnik. Sie härten nicht wie Epoxidsysteme über Polyaddition (Habenicht, 2009), sondern je nach Menge des beigemischten Initiators (meist peroxidische Radikalstarter) wesentlich schneller und bei geringeren Umgebungstemperaturen durch freie radikalische Polymerisation aus. So können die Aushärtezeiten bei 21 °C Umgebungstemperatur bis zur vollständigen Belastbarkeit zwischen 5 Minuten bei Vinylestersystemen (ETA-12/0258) und 10 Stunden bei Epoxidsystemen (ETA-17/0979) variieren. Vinylesterharze besitzen geringere Adhäsionseigenschaften gegenüber anorganischen Stoffen als Systeme auf Epoxidharzbasis, weshalb der Formschluss bei diesen Systemen stärker gewichtet ist. Hierfür sind eine hohe Zug- und Druckfestigkeit sowie ein geringer Volumenschwund erforderlich. Diese Faktoren können durch die Wahl geeigneter Füllstoffe erreicht werden und haben somit letztlich auch einen Einfluss auf die Versagensmechanismen von Verbundankern auf Vinylesterbasis.

Vinylesterharze besitzen eine vergleichsweise hohe thermische und chemische Beständigkeit kombiniert mit sehr guten mechanischen Eigenschaften. Für die Applikation und Anwendung als Befestigungsmittel werden den Harzen typischerweise Reaktivverdünner zur Senkung der Viskosität, Einstellung der mechanischen Eigenschaften und Erhöhung der Füllstoffkonzentration beigemischt. Außerdem werden Haftvermittler, Thixotropiermittel und Füllstoffe beigegeben. (Huber, 2017)

Diese Füllstoffe sind meist mineralisch und nehmen je nach Produkt in der Regel bis zu 70 Gew.-% ein. Am häufigsten werden beispielsweise Zement oder Quarzsand beigefügt. Sie sind unter anderem nötig, um die Rohstoffpreise gering zu halten und damit die Herstellkosten zu senken. Sie sorgen hiermit für die Wettbewerbsfähigkeit der Verbundsysteme gegenüber anderen Schwerlastbefestigungsmitteln. Zusätzlich können diese Füllstoffe auch die Eigenschaften des Verbundankers verbessern. So sorgen sie, gerade bei radikalisch härtenden Systemen, für einen geringeren Volumenschwund und höhere Druckfestigkeit, wodurch sich Formschluss und Adhäsion verbessern können. Außerdem besteht die Möglichkeit der mikromechanischen Leistungssteigerung des Verbundankers durch diese Füllstoffe (Huber, 2017). Anhand des relativ hohen Anteils mineralischer Stoffe im Gemisch wird in der Befestigungstechnik deshalb auch von Verbundmörtel gesprochen und nicht wie anzunehmen von Verbundharz.

ZHU (2018) belegt in seiner Arbeit am Beispiel von Epoxidharzsystemen, dass bis zu einem gewissen Anteil Volumenprozent die Füllstoffe den Verbundmörtel des Verbundankers beeinflussen. Diese Ergebnisse wurden gewählt, da sie die aktuellsten Untersuchungen zum Einfluss der Füllstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Verbundankersystemen zeigen und weitestgehend auf Systeme mit Vinylesterharz übertragbar sind. So lässt sich in Abbildung 2.1 links erkennen, dass bis zu einem Volumenprozentanteil von etwa 6 Vol.-% die Zugfestigkeit relativ konstant bleibt, dann jedoch auf ein deutlich niedrigeres Niveau abfällt. Dabei verliert der hier dargestellte Epoxidmörtel über ein Drittel seiner Zugfestigkeit, von etwa 62 MPa bei 0 Vol.-% auf etwa 38 MPa bei 18 Vol.-% durch Füllstoffe, während Abbildung 2.1 rechts einen Anstieg des Zugmoduls von 1 Vol.-% bis 7 Vol.-% zeigt. Hierbei steigt der Zugmodul von 3,3 GPa auf 4,5 GPa.

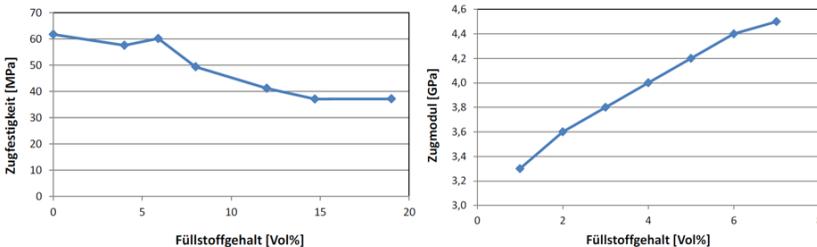


Abbildung 2.1: Einfluss des Füllstoffanteils in Vol.-% auf die Zugfestigkeit (links) und den Zugmodul (rechts) von Epoxidmörtel (Zhu, 2018)

Da der Forschungsgegenstand dieser Arbeit ein Verbundankersystem auf Vinylesterbasis der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG ist, wird im Folgenden auf dieses System näher eingegangen.

2.1.2 Montage eines Verbundankersystems

Verbundanker sind als sogenannte Patronen- oder als Injektionssysteme erhältlich. In Abbildung 2.2 a ist eine Glaspatrone dargestellt, in der ein Glasröhrchen mit Härterpulver und das Harz eingeschlossen sind. Abbildung 2.2 b zeigt eine Injektionskartusche in sogenannter Shuttleausführung. Hierbei befindet sich in der großen Kavität das Harz und in der kleineren aufgesetzten Kavität der Härter. Da der Forschungsgegenstand dieser Arbeit auf dem Injektionssystem basiert, wird das Patronensystem jedoch nicht weiter beschrieben.



Abbildung 2.2: Glaspatrone (a) und Injektionskartusche als Shuttleausführung (b)
(Bildquelle: <https://www.fischer.de>)

Zur Installation aller erhältlichen Verbundankersystemen werden laut Montageanleitung und dazugehöriger Bewertung ‚ETA‘ (European Technical Approval) weitere Hilfsmittel für die Montage benötigt. Abbildung 2.3 enthält beispielhaft eine Übersicht der benötigten Montagehilfen aus dem Sortiment von fischerwerke GmbH & Co. KG. Die Reinigungsbürste (Abbildung 2.3 a) ist wie der Statikmischer (oder Mischwendel; Abbildung 2.3 c) und die Handauspresspistole (Abbildung 2.3 d) nur bei Injektionssystemen nötig. Der Ausbläser (Abbildung 2.3 b) ist bei allen Verbundankersystemen notwendig, kann jedoch auch durch einen Staubsauger ersetzt werden.



Abbildung 2.3: Montagezubehör für Verbundanker: (a) Reinigungsbürste, (b) Ausbläser, (c) Statikmischer (oder Mischwendel) und (d) Handauspresspistole
(Bildquelle: <https://www.fischer.de>)

Das eigentliche Befestigungsmittel besteht aus Verbundmörtel, Gewindestange, Unterlegscheibe und Mutter. Hierbei variieren je nach Anwendungsfall Mörtelrezeptur und Stahlanker oder es sind Zusatzteile wie beispielsweise Siebhülsen oder sogenannte Verfüllscheiben erforderlich, die das Spiel bei Querlasten reduzieren. Beispielshaft hierfür sind in Abbildung 2.4 unterschiedliche Ankertypen dargestellt, die mit verschiedenen Mörtelsystemen auf Vinylesterbasis für verschiedene Anwendungszwecke gedacht sind. Die Standardgewindestange (Abbildung 2.4 a) ist der am häufigsten verwendete Verbundanker und wird vielseitig eingesetzt. Bei dynamischen Lasten, wie sie beispielsweise bei Fertigungsrobotern in Produktionen zu erwarten sind, werden spezielle Dynamikanker (Abbildung 2.4 b) eingesetzt. Liegen besonders geringe Achs- oder Randabstände vor, ist hierfür der in Abbildung 2.4 c ersichtliche Anker geeignet.

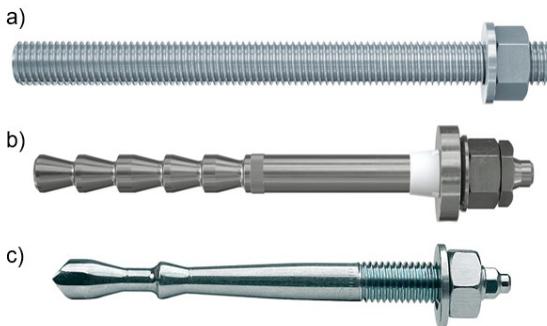


Abbildung 2.4: Verbundankertypen für die Verwendung mit Verbundmörtel auf Vinylesterbasis: (a) Standardgewindestange, (b) Anker für Dynamikanwendungen und (c) Anker für geringe Achs- und Randabstände
(Bildquelle: <https://www.fischer.de>)

Für die Installation von Verbundankern gibt es in den dazugehörigen Bewertungsdokumenten eine detaillierte Anweisung zur Montage, damit die angegebenen Widerstandswerte eingehalten werden können. Diese werden dem Anwender von den Herstellern meist grafisch aufgearbeitet zur Verfügung gestellt. In Abbildung 2.5 ist eine solche Montageanleitung für das Produkt FIS V der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG aus der dazugehörigen Bewertung (ETA-02/0024) in Beton zu erkennen.

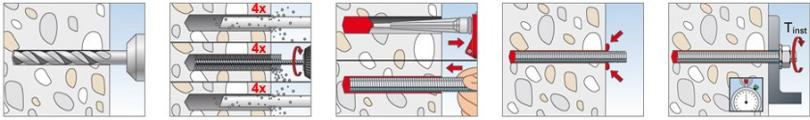


Abbildung 2.5: Montageanleitung eines FIS V-Verbundankers auf Vinylesterbasis der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG mit den notwendigen Schritten von links nach rechts: Bohren, Reinigen, Mörtel injizieren und Gewindestange einbringen, optische Kontrolle und Aufbringen des Installationsmomentes nach Aushärtezeit
(Bildquelle: <https://www.fischer.de>)

Die Montageanleitung visualisiert von links nach rechts die notwendigen Schritte zum Setzen eines FIS V-Verbundankers, angefangen beim Bohren. Hier ist es im Gegensatz zu Kunststoffdübeln oder Stahlankern notwendig, mit einem größeren Bohrer zu bohren als der Durchmesser des zu setzenden Ankers, da für den Verbund ein Ringspalt zwischen Stahlelement und Bohrlochwandung benötigt wird. Auch ist darauf zu achten, das Bohrloch ausreichend tief zu bohren, beim Einbringen des Stahlelements keine Lufteinschlüsse zu verursachen und eine gleichmäßige Füllung des Bohrlochs zu erhalten. Der nächste Schritt, die Bohrlochreinigung, ist bei allen Injektionsankern, die nicht mit Hohlbohrern und Absaugung gebohrt werden, zentral, da er direkt die Haltekraft des Verbundankers beeinflusst. Im Fall des FIS V soll das Bohrloch viermal ausgeblasen, viermal gebürstet und nochmals viermal ausgeblasen werden. Dies ist nötig, um den überwiegenden Teil des losen Bohrstaubes, der sich beim Bohren an die Bohrlochwand gelegt hat, zu entfernen. Hierfür wird eine auf die Bohrlochgröße abgestimmte Drahtbürste benötigt, wie sie in Abbildung 2.3 a dargestellt ist. Ohne Reinigung würde sich die noch flüssige Mörtelmasse beim Injizieren des Mörtels in das Bohrloch mit dem Bohrstaub und nicht der eigentlichen Bohrlochwandung verbinden. Die eventuell daraus resultierende Reduzierung der Haltekraft gilt es durch die vorgeschriebene Reinigung zu vermeiden. Nach der Reinigung des Bohrlochs wird der Mörtel injiziert, indem das Harz und der Härter durch die Auspresspistole in den Statikmischer gedrückt werden. Durch die speziell geformte Wendel im Inneren des Statikmischer werden Harz und Härter beim Austritt aus der Spitze im vorgeschriebenen Verhältnis vermengt und direkt ins Bohrloch gegeben. Anschließend wird das Stahlelement, beispielsweise eine Gewindestange, in das Bohrloch geschoben, bis der Mörtel am Stahlelement entlang aus dem Bohrloch austritt. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Lufteinschlüsse im Mörtel entstehen. Ein Eindrehen des Verbundankers kann hierbei helfen und gleichzeitig die nötige Kraft zum Einbringen reduzieren. Nach Erreichen der vom Hersteller angegebenen Aushärtezeit bei der bestehenden

Umgebungstemperatur kann das Installationsmoment auf das Stahlelement mittels Anbauteil, Unterlegscheibe und Mutter aufgebracht werden, um das System leicht vorzuspannen. Alternativ zu dieser Montage ist es ebenfalls möglich, den Verbundanker in Durchsteckmontage zu setzen. Hierbei wird das Anbauteil bereits beim Bohren angelegt und das Stahlelement durch die Anbauteilbohrung direkt in das Bohrloch gedrückt. Ansonsten unterscheidet sich diese Alternative nicht vom vorgestellten Montageverfahren.

2.1.3 Beton als Verankerungsgrund

Das Tragverhalten eines Verbundankers hängt stark vom jeweiligen Untergrund ab. Beton ist der meistgenutzte Untergrund für Verbundanker, gefolgt von Anwendungen im Mauerwerk. Da Beton durch seine Herstellung und Bestandteile in seinen mechanischen Eigenschaften variieren kann, wird er für die Befestigungstechnik in Druckfestigkeitsklassen unterteilt, die durch die Norm DIN EN 206 „*Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*“ (DIN EN 206:2017-01) definiert sind. Um Beton auf diese Klassifizierung zu prüfen, besteht einerseits die Möglichkeit, einen zylindrischen Prüfling mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 300 mm oder einen würfelförmigen Prüfling mit einer Kantenlänge von 150 mm anzufertigen. Nach der 28-tägigen Aushärtung wird der Prüfling nach DIN EN 12390-3 „*Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*“ (DIN EN 12390-3:2019-10) mit einer Druckfestigkeitsprüfung bewertet, wobei die charakteristische Betondruckfestigkeit für die zylindrische Probe $f_{ck,cyl}$ und für Würfel $f_{ck,cube}$ ermittelt wird. Damit lässt sich der Prüfkörper in die Druckfestigkeitsklasse nach DIN EN 206 einstufen (DIN EN 206:2017-01, S. 27). Die Notation der Klasse nach Norm ist daraus folgend in Gleichung 2-1 dargestellt. So entspricht beispielsweise C20/25 einem Beton mit einer charakteristischen Festigkeit eines Zylinders von $f_{ck,cyl} = 20 \text{ N/mm}^2$ und eines Würfels von $f_{ck,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$.

$$C(f_{ck,cyl})/(f_{ck,cube}) \qquad 2-1$$

Die Zugfestigkeit von Beton ist deutlich geringer als seine Druckfestigkeit. So wird beispielsweise im Eurocode 2 oder auch EN 1992, einer Norm zur „*Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*“ (DIN EN 1992-1-1:2011-01), die charakteristische mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} für die Bemessung angegeben. Sie liegt bei etwa 10 % der charakteristischen zylindrischen Betondruckfestigkeit. Analytisch kann die Zugfestigkeit mit Gleichung 2-2 für Festigkeitsklassen $\leq C50/60$ und Gleichung 2-3 für Druckfestigkeitsklassen $> C50/60$ bestimmt werden (DIN EN 1992-1-1:2011-01, S. 24).

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck,cyl}^2} \quad \text{für } \leq C50/60 \quad 2-2$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left[1 + \frac{f_{ck,cyl}+8}{10}\right] \quad \text{für } > C50/60 \quad 2-3$$

Somit besitzt beispielsweise ein Beton der Festigkeitsklasse C20/25 nur eine Zugfestigkeit von 2,2 N/mm². Aus diesem Grund werden bei Betonkonstruktionen zur Steigerung der Zugtragfähigkeit Bewehrungen aus Stahl oder Textilien eingelegt, die die Zugspannung, die im Betonbauteil wirkt, aufnehmen. Diese Zugbewehrungen wirken jedoch in der Regel großflächiger über das komplette Bauteil und nicht lokal wie bei einem Befestigungspunkt.

Dennoch kommt es durch Alterung beziehungsweise Carbonatisierung des Betons zu Schäden gerade an Stahlbewehrungen und einer Steigerung der Härte des Betons. Bei der Carbonatisierung reagieren die Zementsteinphasen mit dem Kohlendioxid der Umgebung und es entsteht vor allem Carbonat. Hierdurch verändert sich das Zementsteingefüge und die Alkalität des Betons, die anfangs bei bis zu pH 13,8 liegt und ein alkalisches Schutzmilieu für den Baustahl bietet, wird nach und nach neutralisiert. Begünstigt werden kann diese Reaktion durch zu hohe Zementanteile, geringe Betonüberdeckung der Bewehrung oder Schadstoffe in der umgebenden Luft, wie etwa erhöhte Kohlendioxidwerte, Stickoxide oder Schwefeldioxid. Hierdurch verliert der Bewehrungsstahl den alkalischen Schutz und fängt an, zu korrodieren. Durch die geringere Dichte des sich bildenden Eisenoxids und die durch die Ausdehnung entstehenden lokalen Spannungen kann es zu lokalen Rissen und Abplatzungen in den oberflächennahen Bereichen des Betons kommen (Stark & Wicht, 2013, S. 104–108). Weitere für die Lasteinleitung von Verbundsystemen weniger relevante Schädigungsmechanismen, abgesehen von Korrosion durch falsche Stahlauswahl, sind beispielsweise Sulfatangriff, Säureangriff oder die Einwirkung von Chloriden auf den Beton (Stark & Wicht, 2013). Risse im Beton können unter anderem nach dem DEUTSCHEN BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E. V. aber auch schon beim Setzen des Frischbetons, Schwinden sowie durch äußere Temperatureinwirkungen und äußere Lasten entstehen (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2006).

2.1.4 Lasteinleitung in den Beton

Verbundanker werden in der Regel auf Zug belastet und leiten diese Kraft lokal in den Beton ein. Diese Krafteinleitung in den Beton findet, wie bereits erwähnt, primär über Stoff- und Formschluss zwischen Stahlanker und Mörtel sowie Mörtel und Bohrlochwandung im Beton statt. Diese verteilt sich rotationssymmetrisch über die komplette Mantelfläche des Verbundankers. Abbildung 2.6 zeigt ein Modell der Lasteinleitung von der Gewindestange über den Mörtel in den Beton (R. A. Cook, Eligehausen & Appl, 2007). Neben der Zugkraft N sind auch die resultierenden Verbundspannungen τ zwischen Stahlelement und Mörtel sowie τ_0 zwischen Mörtel und Betonwandung dargestellt.

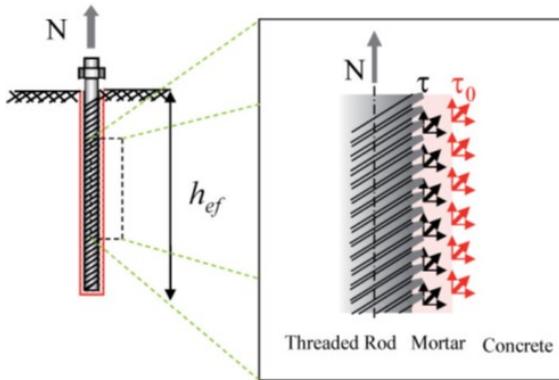


Abbildung 2.6: Modell der Einleitung der Last eines Verbundankers über Gewindestange zu Mörtel in Beton nach R. A. Cook et al. (2007)

Diese Lasteinleitung wirkt jedoch nicht linear über die Einbindetiefe, wie Eligehausen et al. (2004) per numerischer Simulation und durch Versuche ermittelt haben. So ist die Verbundspannung oberflächennah wesentlich geringer als in der maximalen Verankerungstiefe h_{ef} . Die Verbundspannung definiert sich bei Verbundankern mit der Auszugskraft geteilt durch die wirkende Fläche, also der eingebundenen Mantelfläche der Gewindestange, vereinfacht als Zylinder mit Nenndurchmesser berechnet, und ohne Stirnfläche. Zum Erreichen der bestmöglichen hohen Bruchlast N_u ist also eine möglichst große Verankerungstiefe nötig. Als Gründe für diesen Effekt im oberflächennahen Bereich des Betons werden die hohe Zugspannungsaufnahme des Betons, die Ausbildung des Ausbruchkegels und eventuelle Schädigungen durch das Bohren genannt.

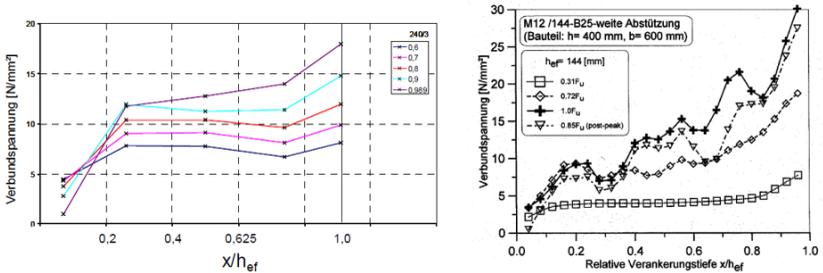


Abbildung 2.7: Verbundspannung über Verankerungstiefe aus Versuchen mit einem Verbundanker ($d = 20 \text{ mm}$, $h_{ef} = 240 \text{ mm}$) links und aus numerischen Untersuchungen mit einem Verbundanker ($d = 12 \text{ mm}$, $h_{ef} = 144 \text{ mm}$) rechts (Mészáros, 2002)

Abbildung 2.7 links veranschaulicht den Verlauf der Verbundspannung über die Verankerungstiefe aus experimentellen Untersuchungen mit einem Verbundanker mit einem Durchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ und einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 240 \text{ mm}$, wobei Abbildung 2.7 rechts den Verlauf der Verbundspannung eines Verbundankers mit einem Durchmesser von $d = 12 \text{ mm}$ und einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 144 \text{ mm}$ aus numerischen Untersuchungen zeigt (Mészáros, 2002). Die Grafiken lassen einen deutlichen Anstieg der Verbundspannung in hohen Verankerungstiefen bei steigender Last erkennen. Bei geringen Lasten wie in Abbildung 2.7 links bei $0,6 * F_u$ (blaue Linie) oder in Abbildung 2.7 rechts $0,31 * F_u$ (Quadratlinie) offenbart die Verbundspannung einen nahezu konstanten Verlauf über die Verankerungstiefe. Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Verankerungstiefe auf die Verbundspannung finden sich beispielsweise in den Untersuchungen von Appl (2009).

Durch die sich verändernden Umgebungsbedingungen werden in der Befestigungstechnik wie auch in vergleichbaren Branchen Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung von Befestigungspunkten zum Einsatz verwendet. Somit wird in der Praxis vereinfachend eine gleichmäßige, also konstante Verbundspannung über die Verankerungstiefe angenommen. Berechnet wird die Verbundspannung τ_u des Verbundmörtels über die Höchstlast N_u geteilt durch die Mantelfläche des Verbundankers mit $A_{Mantel} = \pi * d * h_{ef}$, wie in Gleichung 2-4 dargestellt, mit dem Außendurchmesser des Stahlelementes d und der Verankerungstiefe h_{ef} (Eligehausen et al., 2004).

$$\tau_u = \frac{N_u}{\pi * d * h_{ef}} \quad 2-4$$

Diese Gleichung bildet zugleich die Grundlage für das sogenannte UNIFORM BOND STRESS MODEL (R. COOK, KUNZ, FUCHS & KONZ, 1998), das aus den Ergebnissen mit zentrisch belasteten Einzelverbundankern, gesammelt in einer weltweiten Ver- suchsdatenbank, abgeleitet wurde.

Durch außerordentliche Zuglasten, falsch angenommene beziehungsweise nicht berücksichtigte Beanspruchungen oder eine Schädigung des Untergrundes kann ein Verbundanker trotz der Sicherheitsbeiwerte über die Lebensdauer von etwa 50 Jahren Schäden erfahren. Abbildung 2.8 nach R. Cook et al. (1998) gibt Aufschluss darüber, welche Versagensarten hierbei auftreten können. So zeigt Abbildung 2.8 a das Versagen des Untergrundes, den sogenannten Betonausbruch mit charakteristischem Ausbruchkegel. Hier kann aufgrund der Schädigungsart ‚Betonversagen‘ aber auch das Spalten des Betonkörpers bei beispielsweise dünnwandigen Bauteilen zugeordnet werden (Mészáros, 2002). Abbildung 2.8 b–d veranschaulicht die Versagensart ‚Herausziehen‘ in drei Varianten. Hierbei versagt der Verbundanker direkt am Verbund Beton und Mörtel (Abbildung 2.8 b), am Verbund Mörtel und Stahlanker (Abbildung 2.8 c) oder als Mischversagen. Beim Mischversagen versagen der Verbund Beton und Mörtel wie auch der Verbund Mörtel und Stahlanker in verschiedenen Verankerungstiefen (Abbildung 2.8 d). Als letzte mögliche Versagensart in dieser Übersicht ist der Stahlbruch des Stahlankers dargestellt (Abbildung 2.8 e) (R. Cook et al., 1998).

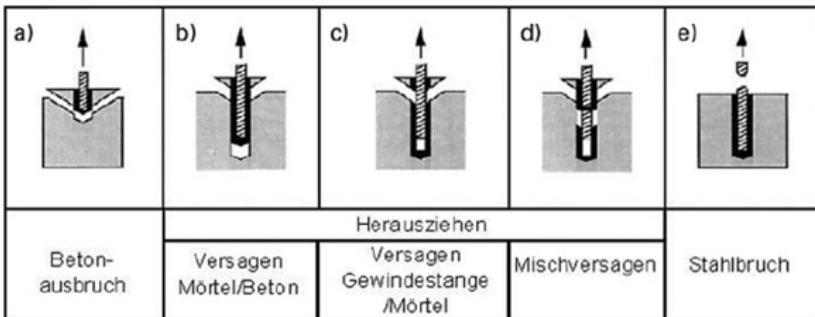


Abbildung 2.8: Versagensarten von Verbundanker unter zentrischer Zuglast mit (a) Betonausbruch, (b–d) Herausziehen und (e) Stahlbruch (R. Cook et al., 1998)

Beim Stahlbruch in Abbildung 2.8 e bricht das Stahlelement des Verbundankers außerhalb des Verbundbereichs. Im Schadensfall sind meist ein Ermüdungsbruch durch dynamische Lasten, eine unvorhergesehene Querlast oder eine andere Fehlbelastung des Befestigungspunktes Gründe für ein solches Versagen (Lachinger & Bergmeister, 2014). Außerdem können unvorhersehbare Fehler bei der Bemessung des Befestigungspunktes, Fehler in der Werkstoffzusammensetzung oder eine Vorschädigung des Stahlankers, wie beispielsweise Korrosion, einen Stahlbruch verursachen.

Die anderen Versagensarten können ebenfalls mehrere Ursachen haben. So ist eine der Hauptursachen für einen Betonausbruch die Betonspaltung oder ein Herausziehen durch eine zu hohe zentrische Last an diesem Punkt. Dies kann beispielsweise auf eine Veränderung des Untergrundes, wie Rissbildung im Beton durch Carbonatisierung, eine steigende äußere Last oder eine andere oben bereits genannte Ursache beziehungsweise eine Kombination aus mehreren genannten Faktoren zurückgeführt werden.

Um den Einfluss solcher Risse im Beton auf die Tragfähigkeit für Verbundanker zu bestimmen, sind maximal zulässige Rissbreiten numerisch und experimentell bestimmt worden. So sind sie unter quasi-ständiger Last begrenzt auf 0,3 bis 0,4 mm Breite. Unter der zulässigen Last sind auch breitere Risse im Beton möglich (Eligehausen et al., 2004).

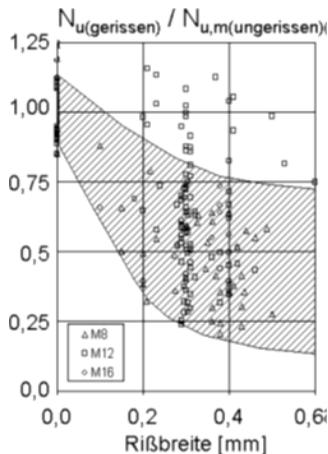


Abbildung 2.9: Einfluss der Rissbreite auf die Bruchkraft von Verbundankern bezogen auf die mittlere Bruchlast in ungerissenem Beton (Eligehausen et al., 2004)

In Abbildung 2.9 ist eine breite Streuung der Bruchlast über die Rissbreite aus dem Verhältniswert von Verbundankern im gerissenen und ungerissenen Beton ersichtlich. Die Werte hierfür wurden experimentell durch das Setzen von Verbundankern in Haarrissen und das Aufweiten dieser Risse auf definierte Rissbreiten Δw ermittelt. Laut Eligehausen et al. (2004) ist die breite Streuung darauf zurückzuführen, dass der Verlauf des Risses über die Bohrlochwandung und die Verankerungstiefe stark variieren kann. Da im Weiteren davon ausgegangen wird, dass Versuchsergebnisse mit einem Verhältniswert von $N_{u(\text{gerissen})}/N_{u,m(\text{ungerissen})} > 0,8$ nicht gewertet werden können, da dort vermutlich der Riss nur im Bereich der Betonoberfläche verlief, kann angenommen werden, dass eine Rissbreite von 0,3 mm – 0,4 mm die Bruchlast eines Verbundankers um ca. 25 % bis 80 % reduziert. Im Mittel ergibt sich laut Eligehausen et al. (2004) somit eine Reduzierung der mittleren Bruchlast von Verbundankern im ungerissenen Beton von ungefähr 50 %. (Eligehausen et al., 2004)

Das Herausziehen des Verbundankers aufgrund einer Überschreitung der Verbundspannung des eingesetzten Mörtels durch eine Überlast am Befestigungspunkt ist ein häufiger Grund für das Versagen einer Befestigung. Hierbei tritt, vor allem bei enger Abstützung, das Versagen zwischen Stahlanker und Mörtel oder als Mischversagen auf. Von einer engen Abstützung wird gesprochen, wenn beispielsweise ein Verbundanker zentrisch auf Zug belastet wird, während das Stahlanbauteil um seine Befestigungsbohrung niedergehalten wird. Diese Art von Versagen wird unter Laborbedingungen zur Ermittlung der Verbundfestigkeit im Versuch, unter anderem für die technische Bewertung von Verbundankern, mithilfe niedergehaltener Stahlplatten provoziert. Ein weiterer Grund, vor allem für das Herausziehen (Abbildung 2.8 b–d), ist die falsche Montage der Verbundanker. So kann ein schlecht oder nicht ausreichend gereinigtes Bohrloch zu dem Schadensbild ‚Versagen Beton/Mörtel‘ (Abbildung 2.8 b) führen. Auch kann bei der Montage der Mörtel an sich Grund für das Versagen sein. Wird beispielsweise Mörtel verwendet, dessen angegebene Haltbarkeitsdauer überschritten wurde, oder wird der Mörtel nicht verhältnismäßig korrekt gemischt, beispielsweise durch einen falschen Statikmischer, kann dies ebenfalls zu einem Versagen führen (Eligehausen et al., 2004). Das Setzen eines Verbundankers bei geringen Temperaturen ohne nachträgliche Erwärmung kann ebenfalls die Traglast mindern oder sogar ein Kriechen des Systems aufgrund des geringeren Aushärtgrades bewirken. Hierbei wechseln die bei niedrigen Temperaturen ausgehärteten Systeme in Kurzzeitversuchen von einem Versagen zwischen Mörtel und Stahlanker zu einem Versagen zwischen Beton und Mörtel (Fuchs, Hofmann & Hülde, 2015).

Um das Verbundankersystem bestmöglich auszunutzen, wird in der Praxis versucht, die Zugkraft, die auf eine Verankerung wirkt, möglichst tief im Beton einzuleiten.

Dies verdeutlicht Gleichung 2-5. Die mittlere Bruchkraft $N_{u,c}^0$ bei kegelförmigem Betonausbruch eines zentrisch gezogenen einzelnen Verbundankers steigt dabei mit steigender Einbindetiefe h_{ef} aufgrund des Exponenten stärker, während eine Steigerung der Betondruckfestigkeit $f_{cc,200}$ aufgrund des kleineren Exponenten einen geringen Einfluss auf die Bruchkraft hat. Die Betondruckfestigkeit wird hier mit einem würfelförmigen Prüfling der Kantenlänge 200 mm ermittelt. (Eligehausen, Mallée & Silva, 2006)

$$N_{u,c}^0 = 13,5 * h_{ef}^{1,5} * \sqrt{f_{cc,200}} \quad 2-5$$

Hierdurch wird deutlich, dass die Betonhärte für die Aufnahme der Druckspannungen bei Verbundankern zwar eine Rolle spielt, die Überdeckung mit Beton durch die höhere Einbindetiefe jedoch von wesentlich größerer Bedeutung für die Auszugskraft und somit für die Haltekraft eines Verbundankersystems ist.

Wie oben gezeigt, müssen für die Mechatronisierung eines Verbundankers durch die Integration von Sensoren zur Zustandsüberwachung verschiedenste Versagensursachen und -arten berücksichtigt werden. Hieraus geht jedoch auch hervor, dass die axiale Verschiebung des Verbundankers relativ zum Untergrund die relevanteste Versagensart darstellt, sowohl bei Überbelastung und Untergrundschädigung als auch durch Rissbildung.

2.2 Bewertung von Verbundankersystemen

Bereits seit Jahrhunderten werden Elemente, meist aus Holz oder Stahl, in Wände eingemörtelt, um Anbauteile daran zu befestigen. Der erste industriell gefertigte Spreizdübel, damals noch aus Hanfschnur und einem Klebstoff aus Tierblut, wurde 1911 von Rawlings (1911) angemeldet. Kurze Zeit später erfand Rawlings den ersten Metallspreizdübel (Rawlings, 1930) und so begann, wenn auch langsam, die Auslegung und Bemessung von nachträglichen Befestigungen. Durch die fortschreitende Entwicklung elektrischer Handbohrmaschinen, die anfangs noch vergleichsweise schwach waren, wurden ab den 1960er Jahren vorerst kleinere Dübel-Durchmesser angeboten. Hierbei wurden als Kennwerte für den Kunden Auszugskräfte und Lastfälle beliebig vom Hersteller angegeben. Meist wurden diese Dübel mittig aus ungerissenen Betonplatten ausgezogen, alle Versuchsergebnisse gemittelt und dann mit einem Sicherheitsbeiwert verrechnet. (Fuchs, 2009)

Erst mit der breiten Markteinführung der Hammerbohrtechnik in den 1970er Jahren war es möglich, größere Dübel und somit nachträglich größere Lasten in die Wand einzuleiten. Durch fehlende Erfahrung sind zu dieser Zeit jedoch viele, teilweise

auch tödliche Unfälle mit Befestigungen geschehen, die die Dringlichkeit aufzeigten, rechtliche Grundlagen in der Bemessung nachträglicher Befestigungsmittel zu schaffen. Das Institut für Bautechnik (IfBt) in Berlin gründete daraufhin den Sachverständigenausschuss (SVA) ‚Ankerschienen und Dübel‘. (Fuchs, 2009)

Der SVA definierte Anwendungsbedingungen und entwickelte daraus folgend Versuchs- und Auswerterichtlinien zur reproduzierbaren Erfassung von vergleichbaren Messwerten, die wiederum die Grundlage für damalige Zulassungen der ersten Metallanker bildeten. In den folgenden Jahren wurden weitere Befestigungstypen und die Einführung der systematischen Statistik in die Zulassungen für Befestigungen aufgenommen. (Fuchs, 2009)

Erst ab 1978, als zum ersten Mal Zweifachbefestigungen ihren Weg in die Zulassung fanden, und 1979, als der erste Dübel in gerissenem Beton zugelassen wurde, wurde das Zugversagen als bis dahin einzig kritische Versagensart um weitere Versagensfälle erweitert und daraus das sogenannte Kappa-Verfahren zur Bemessung von Befestigungsmitteln entwickelt (R. Lehmann, 1979). Ab 1984 wurden die Dübel der sogenannten neuen Generation in ungerissenem und gerissenem Beton zugelassen. Dies war der Beginn der praxistauglichen und breiten Anwendung von Befestigungsmitteln mit höheren Tragfähigkeiten (Fuchs, 2009).

Nach der Erweiterung des Kappa-Verfahrens um Querlasten 1988 wurde dieses 1993 vom CC-Verfahren (Fuchs & Eligehausen, 1995) (Concrete-Capacity-Verfahren oder in den USA Concrete Capacity Design, CCD) vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt, Umbenennung des IfBt nach der Wiedervereinigung 1993) für Bemessungsverfahren abgelöst. Die bis 1998 vom DIBt ausgegebenen „Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen“ (kurz abZ)¹ wurden um die Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval) erweitert, die europaweit als harmonisierte Norm in der Befestigungstechnik Einzug fand (Fuchs, 2009). Seit Inkrafttreten der Europäischen Bauproduktenverordnung (EUV 305/2011) (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2014) und der Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG (Rat der europäischen Gemeinschaften, 1988) im Jahr 2011 werden diese nun als Europäische Technische Bewertung beziehungsweise European Technical Assessments (ETA)² bezeichnet. Auch diese basieren auf dem aktuellen Stand des CC-Verfahrens nach Fuchs und Eligehausen (1995). Parallel hierzu

¹ Deutsches Institut für Bautechnik: <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-et-as-und-mehr/allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-abz/> (Zuletzt geprüft am 22.07.2020).

² European Organisation for Technical Assessment [EOTA]: https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/product-regulation/european-assessment_en (Zuletzt geprüft am 22.07.2020).

wurde bis 1993 die DIBt-Richtlinie mit geringfügigen Änderungen in die Leitlinie ETAG 001, Annex C (European Technical Approval Guideline) (ETAG 001 - Annex C) umgewandelt und 2008 mit weiteren Änderungen in den Eurocode 2 - Teil 4 für die „Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton“ (DIN EN 1992-4:2019-04) übernommen. Es basieren außerdem weitere relevante Bemessungsrichtlinien, wie beispielsweise der Technical Report 029 (TR 029) der EOTA (European Organisation for Technical Assessments) und der fib Model Code (Fédération Internationale du Béton [fib], 2013), auf dem CC-Verfahren. Im Jahr 2015 wurde der Annex C der ETAG 001 dann durch die Neufassung der EN 1992-4 vollständig ersetzt (Stierschneider, Zeman, Lachinger & Bergmeister, 2016).

2.2.1 Bewertung von Verbundankern

Damit der Anwender die nötigen Werte zur Bemessung eines Befestigungsmittels erhält, muss das Befestigungsmittel zur Bewertung (ehemals Zulassung) vom Hersteller in verschiedenen Versuchen den Nachweis für die Eignung bestimmter Anwendungen durchlaufen. Diese Versuche sind für chemische Befestigungsmittel in der (EAD 330499-00-0601) BONDED FASTENERS FOR USE IN CONCRETE beschrieben und zusammengefasst. Eine solche Bewertung ist für die meisten Befestigungen im öffentlichen Raum, wie etwa in Infrastrukturgebäuden, zwingend erforderlich. Hiermit können sich Betreiber von Gebäuden oder Strukturen versichern, dass das Befestigungsmittel für das Einsatzgebiet ausreichend geprüft wurde, um ein Versagen und somit die Gefährdung von Menschen und Sachgegenständen weitestgehend auszuschließen.

Aus der Bemessungsrichtlinie für Verbundanker DIN CEN/TS 1992-4-5 (DIN CEN/TS 1992-4-5) oder auch dem technischen Report TR 029 (TR 029) der EOTA kann entnommen werden, dass in der Bewertung beispielsweise Werte für statische und quasi-statische Zug- und Querlasten in verschiedenen Versagensformen zum Vergleich mit den zu erwartenden Werten im Einsatz des Verbundankers nötig sind. Eine Erläuterung der Bemessungsrichtlinien mit Beispielen findet sich bei Pregartner (2009) nach der Annex C der ETAG 001, wobei auch die Änderungen zur neuen Richtlinie anhand des Entwurfs der EN 1992-4-5 thematisiert werden. Wie diese für die Bewertung ermittelt werden, soll im Folgenden erläutert werden. Zuerst werden jedoch allgemeine Randbedingungen für den Erhalt der Bewertung aufgezeigt und beschrieben.

2.2.1.1 Allgemeine Einstufungen für das Erreichen einer Bewertung

Die Richtlinie der EOTA (EAD 330499-00-0601) BONDED FASTENERS FOR USE IN CONCRETE deckt Verbundanker ab, die eine technische Bewertung anstreben. EAD

steht hierbei für EUROPEAN ASSESSMENT DOCUMENT, also Europäisches Bewertungsdokument. Die Verbundankersysteme bestehen aus einem Verbundmaterial und einem darin eingebetteten Metallelement, das in vorgebohrte Betonbohrlöcher gesetzt und durch einen Verbund dort verankert wird. Welche Systeme durch diese Richtlinie bewertet werden können, definiert diese Richtlinie sehr genau. Der Forschungsgegenstand dieser Arbeit, ein Injektionssystem der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG auf Vinylesterbasis, FIS V 360 S mit einer FIS A M12-Gewindestange in Längen zwischen 120 mm bis 160 mm mit einer Mindestfestigkeitsklasse von 8.8, liegt in dieser Richtlinie.

Im Folgenden soll näher auf die Nachweisversuche, die zum Erreichen einer technischen Bewertung notwendig sind, eingegangen werden. Hierunter fallen folgende erreichbare Anwendungen für Verbundanker:

- nur in ungerissenen Beton
- in gerissenen und ungerissenen Beton
- unter statischer oder quasi-statischer Belastung
- unter seismischer Belastung

Die Richtlinie schreibt weiterhin gewisse Einstufungen fest, die im Folgenden aufgezählt und kurz erläutert werden sollen. Der Beton, in welchen der Verbundanker gesetzt werden soll, muss laut Richtlinie eine Betondruckfestigkeit zwischen C20/25 und C50/60 nach EN 206 (DIN EN 206:2017-01) besitzen. (EAD 330499-00-0601)

Weitere Einstufungen für den Untergrund, die die Bewertung des Verbundankers erfüllen kann, sind Unterschiede im Betonzustand. So gibt es die Einstufung *I1* für die Installation in trockenem oder feuchtem Beton und die Verwendung in einem solchen oder die Einstufung *I2* für die Installation in einem wassergefüllten Bohrloch (nicht Meerwasser). Auch die Temperaturvorgabe für die Installation der Verbundanker ist für die Erstellung einer technischen Bewertung notwendig, soll aber durch den Hersteller bereitgestellt werden, der die Verarbeitungstemperaturen im Labor bestimmen kann. Die Einstufungen *D1*, *D2* und *D3* beschreiben die Installationsrichtung eines Verbundankers. So ist in Einstufung *D1* nur eine Installation nach unten, beispielsweise in den Betonboden, für eine Bewertung mit dieser Einstufung erlaubt, während *D2* die Installation nach unten und horizontal, beispielsweise in eine Betonwand, und *D3* auch die Überkopfinstallation nach oben, beispielsweise in eine Betondecke, klassifiziert. Das Bewertungsdokument deckt eine Installationstemperatur des Betongrundmaterials von 0 °C bis +40 °C ab und teilt die Betriebstemperaturen für Verbundanker wieder in drei Temperaturnutzungsbereiche auf. Die Einstufung *T1*: 24 °C/40 °C deckt einen Temperaturnutzungsbereich von -40 °C bis

+40 °C mit einer maximalen Langzeittemperatur von +24 °C und einer Kurzzeittemperaturbelastung von +40 °C ab. T2: 50 °C/80 °C besitzt einen Nutzungsbereich von -40 °C bis +80 °C mit einer maximalen Langzeittemperatur von +50 °C und einer Kurzzeittemperatur von +80 °C. Als dritte Einstufung steht T3: T_{lt}/T_{st} zur Verfügung. Diese hat einen Temperaturbereich von -40 °C bis $+T_{st}$ mit einer Langzeittemperatur von $T_{lt} = 0,6$ bis $1,0 \cdot T_{st}$ und einer maximalen Kurzzeittemperatur von $T_{st} \geq +40$ °C. Die Temperaturwerte T_{st} und T_{lt} werden dabei vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Für den Verankerungsgrund schreibt die Richtlinie einen mindestens 21 Tage ausgehärteten Beton vor, der eine Mindestdicke des Betons h von $h \geq h_{ef} + \Delta h$ und $h \geq 100$ mm mit einem $\Delta h \geq 2 \cdot d_0$ und $\Delta h \geq 30$ mm aufweist, wobei h_{ef} die Verankerungstiefe, d_0 der Durchmesser des Stahlelementes und Δh der Abstand zwischen Bohrlochgrund und Rückseite des Betons ist. Die Leistungsmerkmale entsprechen den Vorschriften der EN 1992-4 und basieren auf einer Lebensdauer des Verbundankers von 50 Jahren. Hierzu muss der planende Ingenieur Erfahrung im Umgang mit Befestigungsmitteln und Beton aufweisen und der ausführende Installateur speziell in der Montage ausgebildet sein. Verbundanker, die für Stoßbelastung und/oder Ermüdungsbelastung entworfen sind, werden in dieser Richtlinie nicht betrachtet. (EAD 330499-00-0601)

2.2.1.2 Bestimmung der wesentlichen Charakteristiken des Verbundankers

Die Bewertung eines Verbundankers kann für bestimmte Charakteristiken erreicht werden. Welche erreicht werden können und wie diese geprüft werden müssen, beschreibt die (EAD 330499-00-0601) in ihrem Kapitel 2, zusammengefasst in der nachfolgenden Tabelle 1. Im Folgenden soll auf die für diese Arbeit relevanten Kriterien eingegangen werden. Hierzu werden zuerst die Kriterien für Verbundanker besprochen, wie sie für das untersuchte System zutreffen. Des Weiteren wird das für die Verifizierung verwendete Versuchsprogramm R1 „*Verbundfestigkeit mit enger Abstützung*“ erläutert und es werden die Charakteristika mit Bezug auf zulässige Verschiebungen im zentrischen Zug in ungerissenem Beton thematisiert. Da die Charakteristika 8 bis 10 und 12 bis 18 nicht relevant sind, werden sie nicht näher betrachtet. Die Beständigkeit der Stahlelemente beispielsweise in Charakteristik 12 kann über geeignete Normversuche nachgewiesen werden, während die Auslegung von Verbundankern auf seismische Lasten in der Bewertungsmethode TR 049 der EOTA erläutert werden. Dass eine Bewertung eines Verbundankers auch die Punkte Hygiene, Gesundheit und Umwelt in Charakteristik 18 abdeckt, ist durch deren Erwähnung in Tabelle 1 der Vollständigkeit halber aufgeführt, wird aber ebenfalls nicht weiter erläutert.

Tabelle 1: Wesentliche Produktcharakteristiken, Methoden und Kriterien zum Bewerten der Leistungsmerkmale des Produktes in Bezug auf die wesentlichen Charakteristiken aus (EAD 330499-00-0601)

Nr.	Wesentliche Charakteristik	Ausprägungstyp der Produktleistung (Niveau, Klasse, Beschreibung)
Basisanforderung 1: Mechanischer Widerstand und Stabilität		
Char. Widerstand gegen Zugbelastung (statische und quasi-statische Belastung)		
1	Widerstand gegen Stahlbruch (Zug)	$N_{RK,s}$ [kN]
2	Widerstand gegen kombiniertes Versagen	τ_{RK} [N/mm ²]
3	Widerstand gegen Ausbruchkegel	$c_{cr,N}$ [mm], $k_{cr,N}$, $k_{ucr,N}$ [-]
4	Randabstand gegen Spalten unter Last	$c_{cr,sp}$ [mm]
5	Robustheit	γ_{inst} [-]
6	Maximales Montagemoment	$max T_{fix}$ [Nm]
7	Minimaler Rand- und Achsabstand	c_{min} , s_{min} , h_{min} [mm]
Charakteristischer Widerstand gegen Querbelaat (statische und quasi-statische Belastung)		
8	Widerstand gegen Stahlbruch (Scherung)	$V^0_{RK,s}$ [kN], $M^0_{RK,s}$ [Nm], k_7 [-]
9	Widerstand gegen rückwärtigen Betonausbruch	k_8 [-]
10	Widerstand gegen Betonkantenbruch	d_{nom} , l_f [mm]
Verschiebung unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung		
11	Verschiebung unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung	δ_0 , δ_∞ [mm oder mm/(N/mm ²)]
Beständigkeit		
12	Beständigkeit der Metallteile	Beschreibung
Char. Widerstand und Verschiebung für seismische Leistungsklasse C1 oder C2 (optional)		
13	Widerstand gegen Stahlbruch	$N_{RK,s,eq}$, $V_{RK,s,eq}$ [kN]
14	Widerstand gegen Auszug	$\tau_{RK,p,eq}$ [N/mm ²]
15	Bruchdehnung	A_5 [%]
16	Faktor für Ringspalt	$\alpha_{g@p}$ [-]
17	Verschiebung	$\delta_{N,eq}$, $\delta_{V,eq}$ [mm]
Basisanforderung 3: Hygiene, Gesundheit und Umwelt		
18	Inhaltstoffe, Emission und/oder Freisetzung von gefährlichen Substanzen	Beschreibung

Charakteristikum 1 behandelt das Stahlversagen auf Zug und ist in die beiden Kategorien ‚Versuchsserie N1‘ und ‚Versuchsserie N2‘ gegliedert. N1 beschreibt dabei den axialen Stahlbruch aufgrund der wirkenden Zuglast, wofür mit der Gleichung

2-6 die Bruchlast berechnet werden kann. A_s ist hierbei die Spannungsquerschnittsfläche beziehungsweise, wenn sich die Festigkeit des Stahlelementes über seine Länge ändert, die Querschnittsfläche mit geringster Festigkeit.

$$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} \quad 2-6$$

In der Regel genügt in diesem Zusammenhang eine Kalkulation der erreichbaren Werte, außer das Stahlelement ist Teil des Produktes des Herstellers (CE-Kennzeichnung) und die Kalkulation des charakteristischen Widerstandes zum Stahlversagen ist nicht zumutbar, weil die Verteilung der Stahlfestigkeit des fertigen Produktes über die Länge des Befestigungselementes unbekannt ist oder nicht einfach bestimmt werden kann. In diesem Fall schreibt die Richtlinie fünf Stahl-Zugprüfungen des fertigen Produktes vor. Diese Verbundankersysteme werden als eine Einheit geliefert und verwendet. Ist das einzubettende Metallelement vom Hersteller spezifiziert und durch eine europäische oder ISO-Norm als einzubettend definiert, darf auch ein Metallelement eines Dritten verwendet werden. Verbundanker, die durch diese Richtlinie abgebildet werden, werden durch weitere Punkte definiert, die im Folgenden erläutert werden:

Es werden nur Verbundanker betrachtet, bei denen das Mischverhältnis durch das System selbst eingehalten wird. Hierzu zählen Glaspatronen, Folienkapseln, Injektionskartuschen (als Koaxialsystem oder Shuttle-System), vorportionierte Systeme oder andere Systeme, die nicht durch den Anwender gemischt und abgewogen werden müssen, wie dies beispielsweise bei Faserverstärkung von Bauwerken mit Epoxidharzen in Eimern gemacht wird. Für die Mischtechnik schreibt die Richtlinie Systeme vor, die durch das Installationssystem gemischt werden, wie der Statikmischer der Injektionskartuschen, vorportioniert durch den Anwender gemischt werden können oder die während der eigentlichen Installation vermischt werden, wie dies beispielsweise bei Glaspatronen der Fall ist. Des Weiteren soll das Verbundmaterial durch Kapsel oder Patronen portioniert oder bei beispielsweise Injektionssystemen durch den Anwender portionierbar sein. Der Verbundanker soll weiterhin entweder in ein zylindrisches oder ein hinterschnittenes Bohrloch eingesetzt werden. Gebohrt werden darf hierbei entweder mit einem elektrischen oder pneumatischen Bohrhammer oder einem Diamantbohrer. Verbundanker nach dieser Richtlinie sollen entweder durch das Einstecken einer Kapsel und anschließendem drehenden und schlagenden Elektrowerkzeug, durch das Injizieren des Verbundmaterials in das Bohrloch und anschließendem Einbringen des Stahlelementes oder durch Eingießen des Verbundmaterials in das Bohrloch gefolgt von Einbringen des Stahlelementes installiert werden. (EAD 330499-00-0601)

Als Wirkprinzip sollen diese Verbundanker je nach Bohrloch entweder direkt den Verbund zwischen Bohrlochwandung und Stahlelement oder bei Hinterschnitt-Systemen eine Kombination von Materialverbund und Formschluss bilden. Die Versuchsprogramme der letzten beiden Varianten sind in separaten technischen Reports der EOTA aufgeführt, werden aber, da für diese Arbeit nicht relevant, nicht näher erläutert. (EAD 330499-00-0601)

Die EAD 330499 legt weiterhin fest, aus welchen Materialien Verbundanker bestehen müssen, um diese Richtlinie zur Zulassung beziehungsweise Bewertung anzuwenden. Hierbei kann als Verbundmaterial synthetischer Mörtel, zementöser Mörtel oder eine Mischung aus beidem mit Füllstoffen und/oder Additiven verwendet werden. Alle diese Kriterien erfüllt das hier verwendete System, wie die ausgestellte Bewertung (ETA-02/0024) nachweisen kann.

Das verwendete Versuchsprogramm *R1* „*Verbundfestigkeit mit enger Abstützung*“ wird in Unterkapitel 2.2.2.1 der (EAD 330499-00-0601) mit den Referenz-Versuchsprogrammen *R2* bis *R3* erläutert. Es handelt sich hierbei um Auszugsversuche mit enger Abstützung, die der Ermittlung der Verbundspannung gegenüber der Versagensart ‚Herausziehen‘ dienen. Der Zweck dieser Versuche liegt in der Festlegung einer Referenz für die Bewertung für niederfesten Beton (*R1* und *R3*). Hierfür sollen die Versuche mit dem gleichen Durchmesser und einem Betonprüfkörper aus derselben Charge getestet werden. Die *R1*-Versuche müssen zusätzlich mit M12-Verbundankern nach dem Versuchsprogramm *A2* „*Charakteristischer Widerstand gegen Zuglasten ohne Einfluss von Achs- und Randabständen*“ ohne enge Abstützung durchgeführt werden, um einen möglichen Einfluss verschiedener Betonchargen quantifizieren beziehungsweise ausschließen zu können (EAD 330499-00-0601). Wie bereits erwähnt, werden die Referenzversuche in der Regel mit niederfestem Beton der Klasse C20/25 durchgeführt. Die ermittelten Erhöhungsfaktoren ψ_c für höhere Betondruckfestigkeiten sind für jeden Verbundanker in der dazugehörigen ETA aufgeführt. Für das Injektionssystem fischer FIS V beträgt dieser Erhöhungsfaktor laut ETA-02/0024 beispielsweise bei Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 $\psi_c = 1,26$ für die Erhöhung der charakteristischen Verbundspannung τ_{Rk} (ETA-02/0024).

In Abbildung 2.10 ist ein beispielhafter Versuchsaufbau für den zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung dargestellt. Wie bereits erwähnt, dient dieser Versuchsaufbau der Ermittlung der Verbundspannung eines Verbundankers. Hierfür wird eine enge Abstützung, also eine Stahlplatte mit zentrischer Bohrung und ausreichender Steifigkeit, um das Bohrloch gelegt und die Auszugskraft dagegen abgestützt. Diese Stahlplatte verhindert somit die Versagensart ‚Betonausbruch‘. Wie in Abbildung 2.10 zu erkennen, sollte die Stahlplatte für eine enge Abstützung

eine zentrische Bohrung von $d_0 + 4 \text{ mm}$ mit dem Bohrenndurchmesser d_0 aufweisen. Für den eigentlichen Auszugsversuch müssen die wirkende Kraft und die Verschiebung kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die Messabweichung der verwendeten Messmittel darf dabei nicht größer sein als 2 % mit der Ausnahme von Verschiebungen $< 1 \text{ mm}$. Hier sind Messabweichungen bis $0,02 \text{ mm}$ des Wegaufnehmers konform. (TR 048)

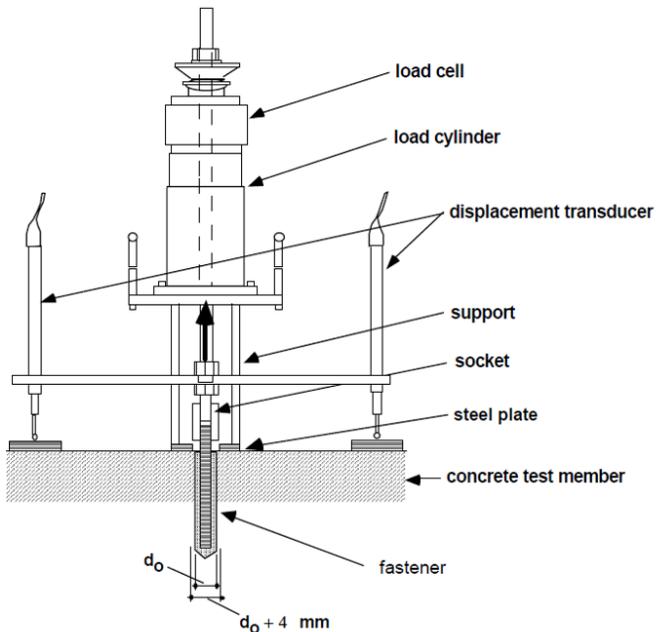


Abbildung 2.10: Beispielhafter Versuchsaufbau für zentrische Auszugsversuche mit enger Abstützung aus (TR 048)

Zu den zulässigen Verschiebungen von Verbundankern sind in der (EAD 330499-00-0601) mehrere Angaben entsprechend den Versuchsprogrammen der verschiedenen Charakteristika vorhanden.

2.2.1.3 Langzeitverhalten von Verbundankern unter Dauerlast

Wie bereits erläutert, wird auch in den Versuchen der (EAD 330499-00-0601) das Langzeitverhalten von Verbundankern über drei Monate, also fast 2.200 Stunden,

unter der Last N_{sust} aus der Verbundspannung vorangegangener Versuche ermittelt und mit dem FINDLEY-Ansatz auf 50 Jahre, also 438.000 Stunden, extrapoliert.

Dieses Langzeitverhalten wird untersucht, da Polymere, bedingt durch ihre molekulare Struktur, zum Kriechen neigen. Verbundanker sind in der Regel Duroplaste, also hochvernetzte Polymere. Nach ausreichender Reaktion, also Verkettung der Monomere zu langkettigen vernetzten Polymerketten, sind diese jedoch nur noch bedingt beweglich. Um ein Kriechen zu verhindern, müssten die Polymerketten eine starke Vernetzung aufweisen, die Beweglichkeit der Polymerketten müsste also eingeschränkt sein, oder die Temperatur müsste ausreichend unterhalb deren Glas- und Schmelzpunkt abgesenkt werden. Während eine Temperaturerhöhung bei Aushärtung der Verbundanker die Vernetzungsreaktionen beschleunigen kann, kann eine Temperaturerhöhung im ausgehärteten Zustand die Beweglichkeit der Polymerketten erhöhen und ein vernachlässigbares Kriechen begünstigen. Kritisch wird das Kriechen in der Regel erst bei Erreichen der Glasübergangstemperatur. Oberhalb dieser beginnen Polymerketten unter mechanischer Belastung zu fließen. Um die Glasübergangstemperaturen von Verbundankern über deren Lebensdauer von 50 Jahren zu bestimmen, müssten Versuche hierzu annähernd so lange dauern. Aus diesem Grund wird in der (EAD 330499-00-0601) die Langzeit-Verbundspannung mittels FINDLEY-Ansatz extrapoliert. (Schätzle, 2013)

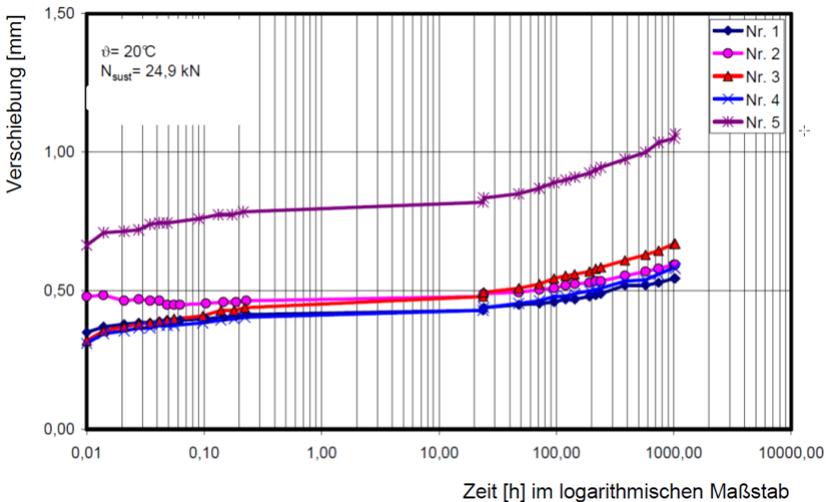


Abbildung 2.11: Halblogarithmische Darstellung der Verschiebung eines Verbundankers über die Zeit im Langzeit-Lastversuch aus (Elgehausen, 2008)

Abbildung 2.11 zeigt beispielhaft solche Verschiebungskurven aus fünf Versuchen bei Raumtemperatur (Versuchsprogramm *B14* (EAD 330499-00-0601)) über die Zeit von 1000 Stunden halblogarithmisch aufgetragen.

Die Extrapolation der Versuchsergebnisse mittels des Potenzansatzes von FINDLEY (Findley, Lai & Onaran, 1976) stellt eine konservative Betrachtung dar, die mit deutlichen Abminderungsfaktoren der tatsächlichen Verbundspannung zur Sicherstellung der Dauerlastfähigkeit einhergeht (Wan-Wendner et al., 2017). Grund hierfür ist, dass dieser Ansatz grundsätzlich für thermoplastische und nicht hochvernetzte duroplastische Kunststoffe entwickelt wurde. Bei Thermoplasten ist von einer unbegrenzten Beweglichkeit der Polymerketten auszugehen, während eine Aktivierung der Vernetzungsstellen bei Duroplasten zu einer Begrenzung der Verschiebung führt (Schätzle, 2013). Außerdem zeigen Verbundanker aus Langzeitversuchen vor Verbundversagen meist eine größere Verschiebung auf, als dies in Kurzzeitversuchen gemessen wird. Somit ist eine Verschiebung nicht grundsätzlich als Schädigung zu betrachten (Schätzle, 2013). Eine weitere Problematik bezüglich der aktuellen Methode mit dem FINDLEY-Ansatz, die zu einer Minderung der Verbundspannungen durch Sicherheitsfaktoren führt, liegt in den hohen Messunsicherheiten in Dauerstandversuchen, die eine erweiterte Gesamtmessunsicherheit U_{ges} von $\pm 5\%$ - 15% erreichen können (Stierscheider, Schwenn, Zeman & Bergmeister, 2020). Dennoch ist der FINDLEY-Ansatz trotz grober Vereinfachung momentan der einzige praxistaugliche Ansatz (Wan-Wendner et al., 2017).

Zur Verbesserung der Bewertungssituation werden alternative mathematische, experimentelle oder numerische Ansätze untersucht, um eine realistischere Prognose zum Dauerlastverhalten der Verbundspannung zu erhalten. So werden unter anderem beispielsweise von (ASTM E1512-01) logarithmische Modelle oder andere mathematische Modelle vorgeschlagen, die laut Wan-Wendner et al. (2017) aus der Notwendigkeit entstanden sind, „...mit praxistauglichen Mitteln und vertretbarem Aufwand (Kurzzeittests) das Dauerstandverhalten zu bewerten...“. Wan-Wendner et al. (2017) bewerten diese Modelle aufgrund der mathematisch ungenauen Extrapolation und der hohen Streuung der Versuche jedoch als unzureichend für die Bestimmung des Dauerlastverhaltens. Eine Alternative hierzu wurde mit der TIME-TO-FAILURE-METHODE von Davis und Cook (2012) vorgestellt. Dennoch ist auch diese Methode zum Zeitpunkt dieser Arbeit von der EOTA noch nicht in ein Bewertungsdokument aufgenommen worden.

Es gibt noch weitere Ansätze, um das Dauerstandverhalten von Verbundankern unter Last zu beschreiben. So stellen Kränkel und Gehlen (2018) ein rheologisches Modell auf Basis des BURGERS-Modells auf. Dieses ist jedoch für das nichtlineare viskoelastische Deformationsverhalten von Verbundankern angepasst worden und

kann eine Prognose zum Dauerstandversagen liefern. Hierbei werden als Eingangsparemeter für das Modell Ergebnisse aus Auszugs-, Kurzzeitkriech- und Degradationsversuchen verwendet. Eine Besonderheit dieses Verfahrens ist die Anwendung der Degradationsversuche, die üblicherweise bei der Beurteilung von Beton und Stahlbeton helfen, für Verbundanker zu nutzen. (Kränkel & Gehlen, 2018)

Zhu (2018) stellt in seiner Arbeit ein numerisches Modell vor, das ohne die zeit- und ressourcenaufwendige Versuchsdurchführung der (EAD 330499-00-0601) die Dauerstandversuche simulativ abbilden kann. Auch hierbei kamen für die Erstellung des Materialmodells neuartige Untersuchungsmethoden für Verbundanker zum Einsatz. So wurde das Kriechverhalten des Mörtels auf Mikroebene mittels Nanoindentierung und auf Makroebene anhand eines belasteten Verbundankers im Computertomographen (CT) untersucht. (Zhu, 2018)

Blochwitz (2019) untersucht in seiner Arbeit ein mögliches Prüfverfahren um das Tragverhalten von Verbunddübeln unter Dauerlast in einer praxistauglichen Prüfzeit zu bestimmen. Er kommt in den darauffolgenden Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass bei keinem der getesteten Verbundankersysteme eine Extrapolation auf 50 Jahre mit diesem Testaufbau möglich ist. Anhand der Auswertung seiner Versuchsergebnisse stellt er außerdem die Hypothese auf, dass die bisherige Annahme eines gleichmäßigen Spannungsverlaufs über die Einbindetiefe, auf der die aktuellen Prüfnormen basieren, nicht dem realen Spannungsverlauf entsprechen. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. (Blochwitz, 2019)

Grundsätzlich kann jedoch aus all diesen Modellen abgeleitet werden, dass die axiale Verschiebung eines Verbundankersystems über die Lebensdauer auch aufgrund des potenziellen Kriechens eine bedeutsame Bewertung zur Qualität der gesamten Befestigungssituation darstellen kann.

2.2.2 Untersuchungen zu Versagensmechanismen von Verbundankern

Verschiedene Untersuchungen versuchen die Versagensmechanismen kontinuierlich oder zumindest Zustände davon zu erklären. So nutzt beispielsweise Mészáros (2002) die Schallemissionsanalyse, um die Versagensmechanismen eines Verbundankers dreidimensional während eines Auszugsversuches kontinuierlich zu untersuchen. Die Schallemissionsanalyse ist ein akustisches Messverfahren, bei dem Schallemissionen aufgenommen und analysiert werden, die durch spontane Änderungen im Gefüge des Prüflings durch chemische, thermische oder mechanische Einwirkung ausgelöst werden. Die Risse, die beim Auszug der Verbundanker im Beton oder im Verbund durch die Einwirkung einer externen mechanischen Kraft

entstehen, kann Mészáros (2002) somit detektieren. Bedingt durch diese Messmethode und die gegebenen Randbedingungen beim Auszug eines Verbundankers wird hier eine Messgenauigkeit von ± 10 mm zur Lokalisierung eines entstehenden Risses erreicht. Durch die Versuche mit dieser Messmethode konnte festgestellt werden, dass die ersten Schädigungen des Systems oberflächennah im Beton in Ankerhöhe entstehen. Mit steigender Last lassen die Messsignale in diesen Versuchen auf die Ausbildung eines Ausbruchkegels schließen. Zwischen 80 und 95 % der Auszugskraft können die meisten Schädigungsmechanismen registriert werden. Kurz vor Erreichen der Auszugskraft bis zum tatsächlichen Versagen treten in diesen Messungen die Messsignale, also Schäden am Befestigungssystem, hauptsächlich im Bereich des Verbundes auf. Nach der Auswertung aller Signale kann gezeigt werden, dass trotz der vergleichsweise schlechten Lokalisierbarkeit von ± 10 mm über den gesamten Versuch eine Häufung der Schädigungsereignisse im Beton und nicht im Verbundmörtel auftritt. Steigt die Kraft weiter und nähert sich der Auszugskraft an, ändert sich dies und die Häufigkeit der Signale nimmt am Verbund zu, bis diese die Häufigkeit der im Beton initiierten Signale erreicht (Mészáros, 2002). Die Ergebnisse hierzu sind im BERICHT NR. 1/101-98/5 (PREGARTNER, MÉSZÁROŠ, ELIGEHAUSEN & FUCHS, 1998) des INSTITUTS FÜR WERKSTOFFE IM BAUWESEN der Universität Stuttgart detailliert zusammengefasst.

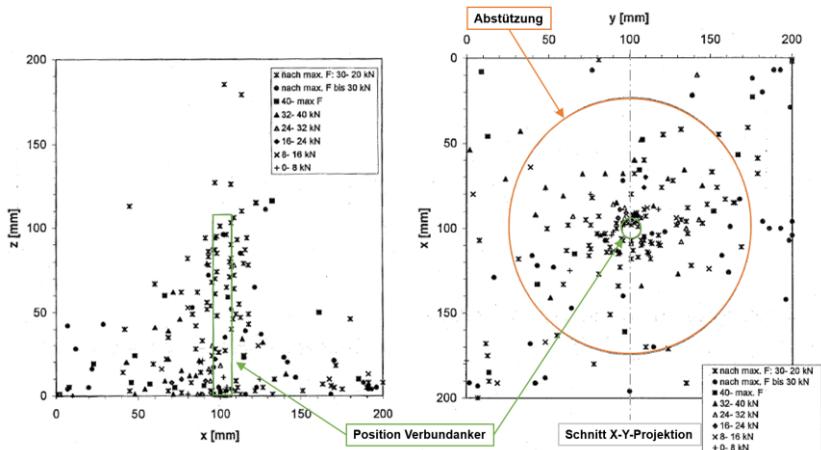


Abbildung 2.12: Beispielhaft, das Ergebnis des Versuchs 3 der Effekt- beziehungsweise Risslokalisierung mittels Schallemission mit Seitenansicht XZ-Perspektive (links) und Draufsicht XY-Perspektive (rechts) nach (Pregartner et al., 1998)

In Abbildung 2.12 sind beispielhaft die lokalisierten Effekte bei der Schallemissionsanalyse in einem Betonwürfel mit zentrischer Last an einem M12-Verbundanker aus dem Versuch 3 des Berichtes in der Seitenansicht mit schematisch dargestelltem Verbundanker nach unten (XZ-Perspektive links) und in der Draufsicht mit schematisch dargestellter Abstützung mit Durchmesser 150 mm (XY-Perspektive rechts) veranschaulicht. Abbildung 2.12 links zeigt in der XZ-Perspektive die Seitenansicht des Betonwürfels mit schematisch dargestellter Ankerposition nach unten. Es ist eine Anhäufung der Risse im Bereich des Ausbruchkegels des Verbundankers zu erkennen, wobei dieser durch die eingeschränkte Abstützung von 150 mm von den üblichen Ausbruchkegeln der weiten Abstützung durch den steileren Verlauf zum Bohrlochgrund hin abweicht. Die Effekterfassung, die mit der Rissentstehung korreliert, ist in mehrere Lastbereiche unterteilt. So zeigt Abbildung 2.12, dass im Lastbereich 0–8 kN bereits erste Risse im Beton entstehen. Diese Risse befinden sich entfernt vom eigentlichen Verbundanker im Beton. Die gemessenen Effekte konzentrieren sich mit steigender Last in Verbundankernähe, bis schließlich die maximale Kraft erreicht ist und der Verbundanker ausgezogen wird.

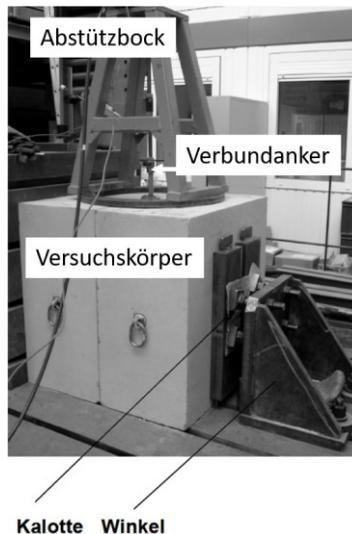


Abbildung 2.13: Versuchsaufbau mit zwei aneinandergesetzten Betonprüfkörpern und einem im Spalt dazwischen gesetzten Verbundanker (Appl, 2009)

Appl (2009) nutzt in seiner Arbeit die Versuchsergebnisse aus einzelnen Versagenszuständen, um einen Abgleich mit dem jeweiligen numerischen Modell durchführen zu können. Die einzelnen Versagenszustände konnte er zeigen, indem er einen speziellen Versuchsaufbau verwendete. Hierfür wurden zwei niederfeste, speziell für diesen Versuch angefertigte Betonprüfkörper an zwei besonders ebenen Oberflächen aneinandergespresst. Im Spalt zwischen beiden Betonkörpern wurde eine Bohrung für den Verbundanker eingebracht und dieser dort nach Herstellerangaben gesetzt. Der Versuchsaufbau hierzu ist in Abbildung 2.13 dargestellt. In einem Auszugsversuch mit weiter Abstützung nach (ETAG 001 - Part 5) wurde auf die Verbundanker eine zentrische Last bis zu einem gewünschten Niveau aufgebracht. Daraufhin wurde der Versuch gestoppt und die beiden Betonprüfkörper wurden voneinander getrennt. Der nun sichtbare Versagenszustand des Verbundankers konnte dann mit dem Ergebnis der numerischen Software bei diesem Lastniveau verglichen werden (Appl, 2009). Ein erneutes Zusammenfügen der beiden Hälften und eine Fortführung des Auszuges sind mit diesem Versuchsmodell nicht möglich. Somit lässt sich pro Versuch nur ein Versagenszustand auf einem Lastniveau untersuchen. In Abbildung 2.14 ist der Vergleich eines Auszugsversuchs mit einem Ergebnis aus der numerischen Simulation links im Bild erkennbar.

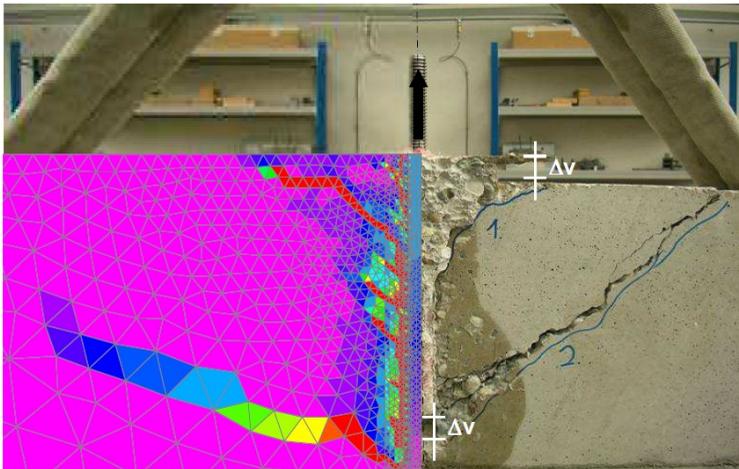


Abbildung 2.14: Vergleich des Versagensbildes des Auszugsversuchs von APPL (rechts) und des numerischen Modells links (Appl, 2009)

2.3 Ausgewählte Schadensfälle in der Befestigungstechnik

Viele Schwerlast-Befestigungsmittel besitzen Zulassungen beziehungsweise Bewertungen, wie in Europa sogenannte ETAs. Durch die Prüfungen, die ein Befestigungsmittel für eine solche Bewertung (ehemals Zulassung) durchlaufen muss, bestätigen unabhängige Gutachter dem Befestigungsmittelhersteller, dass Befestigungsmittel für die Lasten und Umgebungsbedingungen bestimmter Einsatzgebiete über die angegebene Lebensdauer bei korrekter Handhabung geeignet sind. Da sich Befestigungsmittel jedoch an ganz unterschiedlichen Positionen und oft auch in rauen Umgebungen befinden können, ist gerade für Befestigungen im öffentlichen Raum die Kontrolle beziehungsweise Wartung der Befestigungsmittel vorgeschrieben. Auch da über die vorhergesehene Lebensdauer von 50 Jahren außergewöhnliche Belastungen entstehen können, ist die Intension dahinter, größere Schäden an den Strukturen oder sogar lebensbedrohliche Situationen durch ein Versagen des Befestigungsmittels zu verhindern.

Im Folgenden soll näher auf die Gründe für Gebäudeschäden im Allgemeinen, auf präventive Maßnahmen durch die Kontrolle und Wartung von Befestigungssystemen bei Infrastrukturgebäuden sowie auf die Berichte von zwei Schadensfällen mit Todesfolge in Verbindung mit chemischen Befestigungsmitteln eingegangen werden.

2.3.1 Gründe für Schäden im Ingenieurbau

Parfitt (2008) erläutert in einem Editorial die Bedeutung des Lernens aus Bauwerksstörungen oder -versagen für den Erfolg zukünftiger Projekte und definiert dabei mehrere Punkte, die seiner Ansicht nach Störungen oder Versagen verursachen. Neben den klassischen Alterungserscheinungen, die bei solchen Gebäuden oft nicht ausreichend instandgesetzt wurden, wirtschaftlichen oder technischen Fehlern in der Planung oder verfahrenstechnischen Ausführung nennt er auch Strukturversagen, beispielsweise durch Unfälle oder Naturkatastrophen als Ursachen solcher Bauwerksstörungen beziehungsweise Bauwerksversagen. (Parfitt, 2008)

Dennoch kommt es trotz jahrzehntelanger Erfahrung immer wieder vor, dass durch falsche Anwendung, wie etwa einer fehlerhaften Montage, aufgrund unsachgemäßen Belastungen oder durch die Verwendung von nicht für spezifische Einsatzgebiete bewertete oder zugelassene Befestigungsmittel Anbausituationen beschädigt werden oder sogar gänzlich versagen. Parfitt (2008) nennt diesbezüglich in seinem Editorial drei Beispiele aus den USA. Ein Beispiel ist der Einsturz der Betondeckenplatten eines Interstate-I-90-Verbindungstunnels in Boston (Boston's Big Dig) im Juli 2006 aufgrund des Versagens von chemischen Befestigungsmitteln. Das zweite

Beispiel ist das Versagen eines einzelnen Schiebeverbinders einer Dehnungsfuge, das im Februar 2007 zu einem teilweisen Einbruch einer befahrbaren Bodenplatte des DAVID L. LAWRENCE-CONVENTION-CENTERS (DLLCC) in Pittsburgh führte. Als drittes Beispiel dient der Einsturz einer Interstate-I-35W-Brücke in Minneapolis aufgrund eines unterdimensionierten Knotenblechs im August 2007. Diese Schadensfälle verursachten mehrere Todesfälle und erhebliche finanzielle Schäden. (Parfitt, 2008)

Beispielhaft für Schadensfälle auf dem afrikanischen Kontinent führen Oloyede, Omoogun und Akinjare (2010) mehrere Gebäudeversagen in Nigeria an. Sie ermitteln in ihrem Beitrag die schlechte Qualität des verwendeten Materials, fehlende Standards beziehungsweise fehlende Bauverordnungen seitens der Politik sowie nicht vorhandene Gebäudewartungen (Oloyede et al., 2010). Elbaz, Shen, Arulrajah und Horpibulsuk (2016) berichten von geologischen Gefahren durch Tiefbauaktivitäten und erläutern anhand von neun Beispielen aus dem asiatischen Raum verschiedene Ursachen, die zum Versagen der Bauwerke geführt haben. Die Häufung der aufeinanderfolgenden Bauwerksversagen in Asien begründen sie mit einem schnellen Anstieg des Bedarfs und der Entwicklung der Infrastruktur sowie dem steigenden Umfang von Planung, Bau und Instandhaltung der Gebäude, speziell in diesen Ländern (Elbaz et al., 2016).

Hauptverantwortlich für das Versagen der aufgeführten Bauwerke ist laut Elbaz et al. (2016) der Mensch – sei es in der Planungsphase, beispielsweise beim Ermitteln des Bauuntergrundes, der Planung des Ablaufs durchzuführender Tätigkeiten oder der Wartung der einzelnen Bauteile beziehungsweise Gebäudeteile des Bauwerkes. Als Beispiel eines Unglückes aufgrund mangelhafter Wartung und Instandhaltung wird hier der SASAGO-TUNNEL in Japan angeführt. Hier waren im Jahr 2012, 35 Jahre nach Eröffnung des Tunnels, Betondeckenplatten, ähnlich dem Unglück des BOSTON BIG DIG, auf die Fahrbahn gestürzt. (Elbaz et al., 2016)

2.3.2 Wartungsaufwand von Befestigungssystemen

Beispiele wie die im vorangegangenen Unterkapitel verdeutlichen eine große Notwendigkeit ausführlicher Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten, ohne hierbei, wie auch Elbaz et al. (2016) erläutern, die Projektkosten über den Lebenszyklus des Gebäudes aus den Augen zu verlieren. Gerade mit einem immer umfangreicheren Bauwerk steigt auch der Instandhaltungsaufwand von Strukturen im öffentlichen Raum. (Elbaz et al., 2016)

Der Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von derart aufwendigen Ingenieurbauwerken ist im EUROCODE 2 (DIN EN 1992-1-1:2011-01) festgehalten. Ist hiermit die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der Grenzzustände

ausreichend gering, gilt das Ingenieurbauwerk als ausreichend bemessen. Jedoch kann über die lange Lebensdauer eines solchen Bauwerkes durch unvorhersehbare Ereignisse, eine Überschreitung der Grenzzustände, Alterungserscheinungen oder einfach durch eine gebrauchstypische Zustandsänderung einzelner Elemente ein zumindest teilweiser Funktionsausfall der Struktur auftreten. Um die Gebrauchstauglichkeit aller Systeme einer Struktur kontinuierlich zu gewährleisten, müssen Wartungen und Instandhaltungen durchgeführt werden. Für Infrastrukturgebäude in Deutschland regelt dies im Hinblick auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit beispielsweise die DIN 1076 „INGENIEURBAUWERKE IM ZUGE VON STRAßEN UND WEGEN – ÜBERWACHUNG UND PRÜFUNG“ (DIN 1076:1999-11). In dieser Norm sind Ingenieurbauwerke definiert, für die diese Norm gilt, und es ist der Verweis auf das jeweils dazugehörige Bauwerksbuch aufgelistet, in dem die Prüfungs- und Überwachungstätigkeiten detailliert aufgeführt werden und der nötige Umfang der Dokumentation zur Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken beschrieben ist. Zur eigentlichen Bauwerksprüfung beschreibt diese Norm vier Kategorien von Prüfungen, die von sachkundigen Ingenieuren durchgeführt werden sollen: Hauptprüfungen, einfache Prüfungen, Prüfungen aus besonderem Anlass (Sonderprüfung) und Prüfungen nach besonderen Vorschriften. (DIN 1076:1999-11)

Hauptprüfungen bezeichnen Prüfungen, die in sechsjährigen Intervallen durchgeführt werden sollen, wobei die erste Hauptprüfung vor Abnahme der Bauleistung und die zweite Abnahme vor Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung durchzuführen ist. Diese Prüfungen schreiben die Kontrolle auch von schwer zugänglichen Gebäudeteilen vor, auch von solchen, die beispielsweise durch Abdeckungen und Verkleidungen verdeckt sind, sodass sie handnah geprüft werden können. Gegebenenfalls nötige Reinigungen einzelner Bauteile sind hierbei erforderlich, um mögliche Schäden oder Mängel an Bauwerksteilen erkennen zu können. Ebenso müssen Besichtigungseinrichtungen, die beispielsweise für Prüfungen genutzt werden, geprüft werden. Befestigungsmittel und Verschraubungen werden direkt und indirekt in den Hauptprüfungen dieser Norm als ‚zu prüfen‘ angegeben. So ist zu prüfen, ob an massiven Bauteilen wie Beton, Stahlbeton oder Mauerwerk sichtbare Schäden wie Rostverfärbungen, Hohlräume, Risse oder Abplatzungen vorhanden sind, die die Haltekraft eines Befestigungsmittels beeinflussen. Zum anderen werden unter den weiteren Punkten auch explizit die Überprüfung der Schraubverbindungen auf festen Sitz bei Metall- oder Holzkonstruktionen sowie die stichprobenartige Kontrolle der Befestigungen von Wand- und Deckenverkleidungen und Schutzvorrichtungen wie auch die Überprüfung des allgemeinen Korrosionsschutzes von Stahlbauteilen in der Norm für Hauptprüfungen aufgeführt. (DIN 1076:1999-11)

Die einfache Prüfung soll drei Jahre nach einer Hauptprüfung durchgeführt werden und umfasst die intensive Sichtprüfung des Ingenieurbauwerks ohne die zwingende Verwendung von Besichtigungsgeräten oder -einrichtungen, falls vertretbar. Hierbei wird neben der Prüfung von Funktionsteilen auch die Prüfung von Befestigungssystemen explizit beispielsweise in Form von Verankerungen von Lärmschutzwänden oder Leitungen erwähnt.

Die Prüfung aus besonderem Anlass, auch Sonderprüfung genannt, soll nur nach Ereignissen stattfinden, die den Zustand des Ingenieurbauwerks beeinflusst haben könnten. Auslöser kann beispielsweise das Resultat einer Bauwerksüberwachung sein. Diese ersetzt indes keine Haupt- oder einfache Prüfung. Die Prüfung nach besonderen Vorschriften schließt die Prüfungen der Bauteile mit ein, die nach anderen Vorschriften zu prüfen sind, wie beispielsweise elektromechanische Prüfungen von Strahlventilatoren in Tunneln. Die Dokumentation von solchen zusätzlichen technischen Systemen ist gesondert zu führen, wobei ebenfalls eine Prüfung der dazugehörigen Befestigungsmittel durchgeführt werden muss. (DIN 1076:1999-11)

Die (DIN 1076:1999-11) definiert und beschreibt neben der Prüfung auch die notwendigen Tätigkeiten der Bauwerksüberwachung. Hierbei wird zwischen einer Besichtigung und einer laufenden Beobachtung, jeweils durch eine sachkundige Person, unterschieden. Die Besichtigung muss regelmäßig ohne besondere Aufwendungen wie beispielsweise Besichtigungsfahrzeuge oder Rüstung einmal jährlich durchgeführt werden, wobei vorhandene Besichtigungsmöglichkeiten am Bauwerk genutzt werden sollen. Eine Veränderung von Befestigungssituationen lässt sich bei einer Besichtigung somit nur bei leicht zu erreichenden Strukturen oder drastischen Veränderungen erkennen, kann jedoch eine Sonderprüfung dieser hervorbringen. Ähnlich verhält es sich bei der zusätzlich zweimal im Jahr durchzuführenden laufenden Beobachtung, mit dem Unterschied, dass hier von der Verkehrsebene und dem Geländeniveau das Bauwerk in der Regel rein visuell im Rahmen der Streckenkontrolle kontrolliert wird.

Allein in Deutschland befanden sich zum 31.12.2012 in der Baulast des Bundes 39.231 Brückenbauwerke mit einer Brückenfläche von über 30 Millionen Quadratmetern, mit jährlich steigender Tendenz. Damit ist offensichtlich, dass für die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken ein großer finanzieller und personeller Aufwand betrieben wird (Bund/Länder Arbeitsgruppe Brücken- und Ingenieurbau, 2013). Um diese Kosten und den Aufwand zu senken, wird an verschiedenen Ansätzen geforscht, beispielsweise, um die Inspektionen von Bauwerken zu automatisieren.

Auch Tunnel erfreuen sich einer immer größeren Beliebtheit, um infrastrukturell aufwendige Probleme zu lösen. So existierten in Japan im Jahr 2006 fast 9000 aktive Tunnel unterschiedlicher Länge, bis hin zum Seikan-Tunnel mit einer Länge von 54 km. Auch sie unterliegen einer aufwendigen Inspektion, da sich durch ihre eingeschränkte Zugänglichkeit Alterungserscheinungen oder sich ändernde Umweltbedingungen nur mit einem großen Aufwand erkennen lassen. Es eignen sich auch hier automatisierte Inspektionen. Laut TOMIE MANUAL (FHWA HIF-15-005) der FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) befinden sich die üblichen Schäden an Betonelementen an Tunneln im oberflächennahen Bereich, beispielsweise in Form von Abplatzungen oder Rissen (Montero, Victores, Martínez, Jardón & Balaguer, 2015). Dies kann, je nach Verankerungstiefe und Tiefe des Schadens, Befestigungselemente und deren Funktion grundlegend beeinflussen.

Jedoch können auch immer Anwendungsfehler bei der Montage für Schadensfälle von Befestigungsmitteln verantwortlich sein. Im Folgenden soll auf zwei der schwerwiegendsten Schadensfälle mit Verbundankersystemen der letzten Jahre eingegangen werden.

2.3.3 Fort-Point-Channel-Tunnel, Boston, MA, USA (10.07.2006)

Am 10. Juli 2006 ist in Bostons Fort-Point-Channel-Tunnel, genauer im D-Street-Portal, eine 24 Tonnen schwere Deckenplatte aus Beton mit Trümmerteilen von der Decke auf die Fahrbahn gestürzt. Hierbei wurde der Fahrer des getroffenen Fahrzeugs leicht verletzt und seine Beifahrerin getötet. Dies geschah etwa 3,5 Jahre nach vollständiger Öffnung des Ted-Williams-Tunnels, zu dem das entsprechende D-Street-Portal gehört. Abbildung 2.15 zeigt auf der linken Seite ein digitales Modell des Tunnelsegmentes mit den betroffenen Deckenplatten vor und auf der rechten Seite ein forensisches Foto nach dem Einsturz dieser Elemente aus dem Unfallbericht des NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARDS (ROSENKER, SUMWALT, HERSMAN, O'LEARY HIGGINS & CHEALANDER, 2007).

In diesem Unfallbericht kamen die Gutachter bei weiteren Untersuchungen zu der Erkenntnis, dass das Verbundankersystem, das die abgehängten Deckenplatten mit der Betonhülle verbinden sollte, kein bautechnisch bewertetes Produkt war. Es wurde ein Epoxid-basierendes Verbundankersystem eingesetzt, das für diesen Einsatzzweck ungeeignet war. Eine schematische Darstellung des eingesetzten Systems ist in Abbildung 2.16 links ersichtlich. Versagensursache war, wie bereits in Zulassungsversuchen nach ICC-ES-AC58 nachgewiesen, das Kriechen des Epoxids bereits bei geringen Temperaturen von 40 °F (ca. 21 °C) bis 70 °F (ca. 43 °C) (Rosenker et al., 2007).

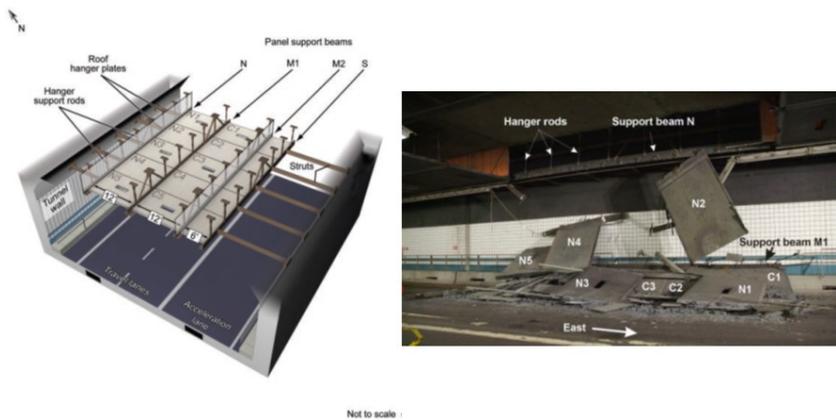


Abbildung 2.15: Darstellung der ursprünglichen Deckenkonstruktion (Modell links) und forensische Fotodokumentation (rechts) nach dem Verbundankerversagen aus dem Unfallbericht des NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARDS (ROSENKER ET AL., 2007)



Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des eingesetzten Epoxidsystems (links) und versagte Verbundankersysteme aus den Untersuchungen der Deckenabhängungen weiterer Tunnelsegmente (rechts) aus dem Unfallbericht des National Transportation Safety Boards (Rosenker et al., 2007)

Bei Untersuchungen der verbliebenen abgehängten Decken wurden von den Gutachtern weitere bereits versagte Verbundankersysteme basierend auf diesem Epoxidsystem gefunden, die daraufhin ausgetauscht wurden. Dieser Unfall hatte zur Folge, dass eine Überkopfmontage von Verbundankersystemen unter Dauerlast in Highway-Anwendungen ohne geeignete neue Versuchsprogramme und -protokolle zur Bestimmung des Kriechwiderstandes in den USA nicht mehr zu genehmigen ist. (Rosenker et al., 2007)

2.3.4 Sasago-Tunnel, Präfektur Yamanashi, Japan (02.12.2012)

Am 2. Dezember 2012 stürzte im Sasago-Tunnel der zentralen Expressstraße in der Präfektur Yamanashi ein etwa 140 m langes Tunneldeckensegment mit Trennwand und einem Gesamtgewicht von etwa 500 Tonnen auf die Fahrbahn und tötete dabei neun Personen. Der Tunnel wurde 1977 eröffnet und besaß zum Zeitpunkt des Unfalls eine Gesamtlänge von 4,4 km. Die abgehängte Decke wurde wie üblich zur Ventilation von Luft und für Versorgungsleitungen verwendet. Abbildung 2.17 links enthält eine schematische Darstellung der eingestürzten Deckenelemente sowie der Trennwand der Ventilation. Eine Fotografie der forensischen Dokumentation des Unglücks verdeutlicht die verheerende Auswirkung über die gesamte Fahrbahnbreite in Abbildung 2.17 rechts. (Shirato, 2014)

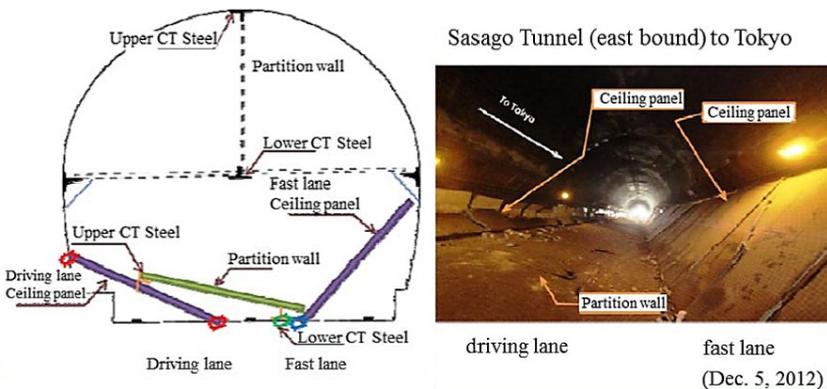


Abbildung 2.17: Darstellung der eingestürzten Tunneldecke und Trennwand in der Skizze (links) und Fotografie der forensischen Dokumentation (rechts) (Shirato, 2014)

Bei Untersuchungen zum Unfallhergang wurden zufällig ausgewählte Verbundanker im Bauwerk ausgezogen, um deren Tragfähigkeit zu ermitteln. Außerdem

konnte eruiert werden, dass das tatsächliche Lastniveau pro Anker etwa dem 1,6-Fachen der ausgelegten Last entsprach. Ausschlaggebend für das Versagen hingegen war aus Sicht der Gutachter die falsche Montage der Verbundankersysteme. Diese Erkenntnis konnte mithilfe von Querschnitten aus entnommenen Proben der versagten Verbundanker gewonnen werden. (Shirato, 2014)

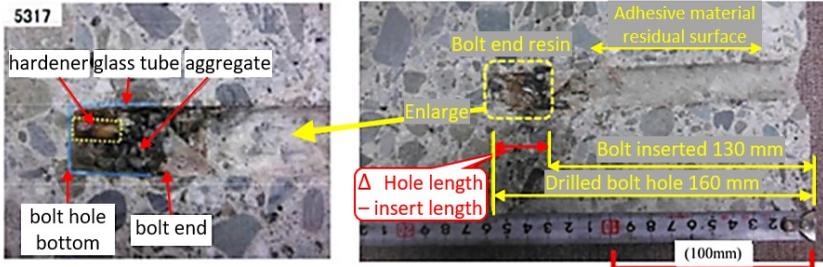


Abbildung 2.18: Querschnitt einer entnommenen Probe eines versagten Verbundankers mit 30 mm zu tiefer Bohrung und dementsprechend nicht ausreichend durchmischtem Verbundanker (überarbeitet nach Shirato, 2014)

Abbildung 2.18 zeigt beispielsweise, dass bei dem eingesetzten Verbundankersystem mit Glaskartusche die vorgeschriebene Bohrlochtiefe nicht eingehalten wurde. Hierdurch wurde die Glaskartusche nicht vollständig, wie erforderlich, zertrümmert und die zwei Komponenten des Verbundmörtels wurden nicht ausreichend vermischt. Dies offenbart die Detailaufnahme in Abbildung 2.18 links mit Resten der Glaskartusche und des ungemischten Härters und Harzes. (Shirato, 2014)

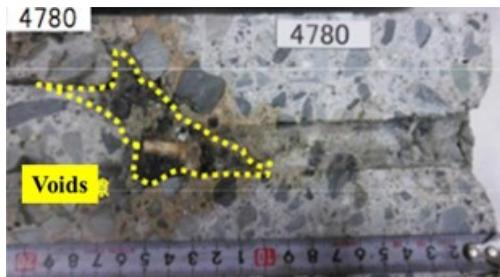


Abbildung 2.19: Querschnitt einer weiteren entnommenen Probe mit Hohlraum direkt am Bohrloch und darin verdrängtem Verbundmörtel (Shirato, 2014)

Einen weiteren Grund für das Versagen der Verbundanker veranschaulicht Abbildung 2.19. In dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der Bohrlöcher zum Teil Hohlräume vorhanden sind, in die der Verbundmörtel des Verbundankers verdrängt wurde, wodurch die Verbundlänge deutlich reduziert wurde (Shirato, 2014). Der wahrscheinlichste Grund für diese Hohlräume im Beton ist eine fehlerhafte Verdichtung des Betons.

Als Folge dieses Unglücks wurde vom Untersuchungskomitee empfohlen, alle bestehenden Verbundanker aus Deckensystemen von Tunneln zu entfernen und durch Befestigungsmittel anderer Wirkweise zu ersetzen. Wo dies nicht möglich ist, sollten zusätzliche Verstärkungen eingebracht und Wartungsintervalle verkürzt werden. Darüber hinaus sollte eine zusätzliche Überwachung dieser Befestigungssituationen eingeführt werden.

2.3.5 Zusammenfassung für Befestigungsmittel

Ein häufiger Grund für das Versagen von chemischen Befestigungsmitteln ist die Schädigung des Untergrundes (vgl. Unterkapitel 2.1.3). In den meisten Fällen, vor allem bei neuzeitlichen Ingenieurbauwerken, besteht der Untergrund aus Beton, in dem auch bei sachgemäßer Nutzung durch Alterungserscheinungen Risse entstehen. Außerdem carbonatisiert dieser über die Lebensdauer. Durch diesen chemischen Prozess verliert der eingelegte Bewehrungsstahl mit der Zeit sein alkalisches Milieu, das den Stahl vor Korrosion schützt. Die entstehenden Oxidationsprodukte sind Eisen(II)-oxid, Eisen(III)-oxid und Kristallwasser, allgemein als Rost bekannt. Diese besitzen eine geringere Dichte als der unkorrodierte Stahl und hierdurch ein größeres Volumen. Durch die Ausbildung von Spannungen im Beton, bedingt durch das ansteigende Volumen im Bereich der Bewehrung, entstehen Risse oder aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Betons sogar Abplatzungen. Hierdurch kann der in Bewertungsrichtlinien und -unterlagen definierte ‚gerissene Beton‘ entstehen. Ein weiterer Grund für Risse im Beton sind mechanische Überbelastungen von Bauwerken, wie beispielsweise Brücken. Durch das heutzutage erhöhte Verkehrsaufkommen, das zur Zeit der damaligen Planung nicht ausreichend berücksichtigt wurde, kann ein Bauwerk entsprechend überbelastet und geschädigt werden (vgl. Unterkapitel 2.3.1). Solche Risse können, wenn sie an einem chemischen Befestigungssystem entlanglaufen, durch den steigenden Ringspalt ebenfalls zum Versagen dieser Befestigungsmittel, also einer axialen Verschiebung aus dem Bohrloch, führen. Hierfür gibt es, wie bereits erwähnt, auch chemische Befestigungssysteme, die nachspreizen können (vgl. Abbildung 2.4 b und c). Solche Systeme sind jedoch aufgrund der höheren Kosten seltener im Einsatz.

Der letzte Aspekt für das Versagen eines chemischen Befestigungssystems ist, wie im Rahmen der vorgestellten Schadensfälle von Boston (Unterkapitel 2.3.3) und Sasago (Unterkapitel 2.3.4) erläutert, die falsche Montage oder Verwendung eines ungeeigneten chemischen Befestigungssystems. Für die fehlerhafte Montage lassen sich gerade bei chemischen Befestigungsmitteln mehrere Gründe anführen. Die relevantesten sind nicht ausreichend gereinigte Bohrlöcher oder das nicht ausreichende Verfüllen des Bohrlochs mit dem vorgeschriebenen Polymer-Mörtel. Zur Vermeidung solcher Fehler ist der Einsatz von bautechnisch bewerteten chemischen Befestigungssystemen in sicherheitsrelevanten Anwendungen, gerade in Europa, zwingend notwendig. Das zu jedem bewerteten chemischen System ausgegebene Bewertungsdokument (ETA) enthält, wie bereits erwähnt, alle dem System zugelassenen Komponenten, Anwendungen, Lastfälle und vor allem die Montageanleitung, an die sich strikt gehalten werden muss.

2.4 Digitalisierung in der Bautechnik

Während sich in weiten Teilen der Industrie und der Medien der Begriff INDUSTRIE 4.0 als Synonym für die Digitalisierung etabliert hat, wird in der Bautechnik oder Bauindustrie weitestgehend der Überbegriff BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) für die Digitalisierung dieses Industriezweigs verwendet. Durch seine ursprüngliche Bedeutung und stetige Erweiterungen wird der Begriff heute vielfältig und mit unterschiedlichen Standards definiert (Sacks, Eastman, Lee & Teicholz, 2018). Grundsätzlich wurde BIM für die Schaffung digitaler Prozesse von Planung (etwa die Nutzung von CAD im Entwurf) und Bauwirtschaft (etwa Datenbanksysteme für automatisierte Mengen- und Stücklisten (Stracke & Kepplin, 2020)) ausgelegt. Mit gemeinsamen Schnittstellen, wie beispielsweise Industry Foundation Classes (IFC) (Sacks et al., 2018), soll die Kommunikation zwischen Bauherren, Planern und Bauunternehmen vereinfacht werden. Durch den stetigen Einsatz neuer Materialien und (vernetzter) Produkte, beispielsweise für Steuerungs- und Reglungstechnik, eine Steigerung der Energieeffizienz oder strukturelle Überwachung wird BIM nach und nach um den Aspekt des Life-Cycle-Managements erweitert. Hierbei wird von einem sogenannten dynamischen BIM (Chen, Bulbul, Taylor & Olgun, 2014) oder DIGITALEN ZWILLING (BOTZ & GROBE, 2020) gesprochen. Dieser soll zukünftig von der Planung über den Betrieb bis zum Um- beziehungsweise Rückbau des Gebäudes mit Daten gepflegt werden, wodurch Gebäude kosteneffizient geplant, gebaut, betrieben und rückgebaut werden können. Ausführliche Informationen zu BIM sowie verschiedene Definitionen und Ausprägungen werden beispielsweise von Tautschnig, Frösch, Mösl und Gächter (2017), van Treeck et al. (2016) und Sacks et al. (2018) erläutert. Im Folgenden sollen die verschiedenen Ansätze zur Bauwerksüberwachung (engl. Structural Health Monitoring) und die Integration der Bauwerksüberwachung in BIM kurz besprochen werden.

2.4.1 Bauwerksüberwachung/Structural Health Monitoring

Bereits seit vielen Jahren werden vor allem Bestandsbauwerke im Infrastrukturbereich neben der gesetzlich vorgeschriebenen regelmäßigen Überwachung und Prüfung, wie für Deutschland beispielhaft bereits in Unterkapitel 2.3.2 erläutert (DIN 1076:1999-11), immer öfter durch (teil-)automatisierte Sensorsysteme auf ihren Zustand überwacht. Caprani (2018) betont in seinem Beitrag die Notwendigkeit der flächendeckenden Bauwerksüberwachung, um Unglücke zukünftig zu verhindern. Weiterhin kann eine sensorische Ausstattung eines Bauwerkes auch dessen Instandsetzung oder die Ertüchtigungsmaßnahmen überwachen oder begleiten (Weidner, Ruff, Jauretzko & Ummenhofer, 2019). Die Entwicklung des Structural Health Monitoring, basierend auf Sensorsystemen, wurde durch verschiedene Schadensfälle historisch forciert und zu Beginn vor allem für die Überwachung bautechnisch aufwendiger und besonders belasteter Bauwerke eingesetzt. Hierzu zählen vor allem Dämme, Brücken, Offshore-Bauwerke, Atomkraftwerke oder Tunnel (Brownjohn, 2007). Grund hierfür sind oftmals geänderte Belastungen der Gebäude, wie beispielsweise ein höheres Verkehrsaufkommen, oder verschiedene Alterungserscheinungen, wie die Carbonatisierung des Betons oder Korrosion des Stahltragwerks beziehungsweise der Bewehrung (González et al., 2018). So sind von den 39.818 Brücken (Stand 01.03.2020) an Bundesfernstraßen in Deutschland beispielsweise 51,4 % der Bundesautobahnbrücken und 48,0 % der Bundesstraßenbrücken angesichts ihrer Erbauung zwischen 1960 bis 1984 zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit 36 bis 60 Jahre alt (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020). Eine Zusammenfassung aller gängigen Verfahren zur Bestimmung der Alterungseinflüsse an betonbasierenden Infrastrukturegebäuden findet sich bei Bergmeister (2003). Zu diesen kamen seit der Erstellung dieser Zusammenfassung einige neue Verfahren und Techniken zur kontinuierlichen strukturellen Zustandsüberwachung hinzu. Eine umfangreiche Übersicht mit Grundlagen, Schädigungsmechanismen, Berechnungs- und Versuchsentwürfen und -vorschlägen, gängiger eingesetzter Sensoren und ausgewählter Beispiele zur Bauwerksüberwachung ist in Taerwe et al. (2018) aufgeführt. Im Betonbau werden hauptsächlich Messprinzipien, wie beispielsweise Schwingungsmessung mittels Beschleunigungssensoren (González et al., 2018), Dehnungsmessung mittels Dehnungssensoren (González et al., 2018; Schacht, Käding, Bolle & Marx, 2019) oder optische Rückstrahl-Reflektometrie (González et al., 2018; Ko & Ni, 2005; Ye, Su & Han, 2014), autonom visuelle Untersuchung mittels Drohnen (González et al., 2018), Globales Positionsbestimmungssystem (GPS) (Ko & Ni, 2005) und Verschiebungsmessung mittels mechanischer Wegaufnehmer (Ko & Ni, 2005) oder optischer Bildkorrelation (González et al., 2018) eingesetzt. Auch im Holz- oder im Tunnelbau bildet die Bauwerksüberwachung einen Forschungsschwerpunkt. Da bei Holztragwerken jedoch andere Ursachen für Bauwerksversagen vorliegen, werden neben statischen Einwirkungen primär die klimatischen erfasst, wie etwa Feuchtigkeit oder Temperatur (Stapf,

Lehmann & Ruckteschell, 2015). Im Tunnelbau müssen zusätzlich zu betontypischen Überwachungen auch solche zum Setzungsverhalten des Gesteins, gerade beim Vortrieb oder in den ersten Bauphasen, durchgeführt werden. Hier werden zusätzlich spezifische Sensoren basierend auf beispielsweise Radar- oder Schallemissionsmessungen eingesetzt (Strauss et al., 2020). Da es sich bei allen zu überwachenden Strukturen um Individualkonstruktionen handelt, sind trotz der wiederkehrenden direkten und indirekten Messprinzipien alle in der Literatur vorgestellten Bauwerksüberwachungen spezifisch für dieses Gebäude konstruktiv ausgelegt und wirtschaftlich wie auch technisch entsprechend aufwendig.

Aktuelle Forschungsaktivitäten befassen sich, dank des technologischen Fortschritts, mit kabellosen oder energieautarken Sensorsystemen für Bauwerke. So stellen Chacón, Guzmán, Mirambell, Real und Oñate (2009) ein kabelloses Sensornetzwerkssystem zur Erfassung von mechanischen Spannungen vor, oder Huisinga, Mohrmann und Hofmann (2014) Konzepte für die intelligente Energieversorgung am Bauwerk mittels Photovoltaik- und Kleinwindanlagen sowie weitere Energy-Harvesting-Systeme und Möglichkeiten zum Speichern der Energie. Diese Entwicklungen können beim Entwerfen serientauglicher, leicht an die individuellen Begebenheiten anpassbarer Sensorsysteme unterstützend wirken, die zukünftig ohne hohen wirtschaftlichen oder technischen Aufwand zur Bauwerksüberwachung eingesetzt werden können. Durch die Bearbeitung dieser Teilsysteme der Bauwerksüberwachung können größere Probleme der Daten- und Energieversorgungsverkabelung gelöst werden.

Mit der Verknüpfung von Technologien wie BIM mit Technologien des INTERNET OF THINGS (IoT) werden Vorschläge erarbeitet, wie der Betrieb von Gebäuden für Verwalter, Besitzer, Gebäudemanager und Nutzer zukünftig wirtschaftlicher und effektiver gestaltet werden kann. So zeigen Pasini et al. (2016) am Beispiel einer Klimatechnikanlage, wie dies für die Regelung des Gebäudeklimas genutzt werden kann. Botz und Große (2020) bewerten eine solche Integration von Echtzeitmessdaten in digitale Modelle, also den bereits erwähnten DIGITALEN ZWILLING, als nächsten Sprung über mehrere Stufen in der Digitalisierung der Bautechnik. Dabei erachten sie das sensorische Monitoring als zwingende Grundlage für DIGITALE ZWILLINGE. Einen ersten Ansatz zum Einbetten von Sensoren zur Bauwerksüberwachung in BIM, mit dem Ziel, ein dynamisches BIM für Gebäudebetreiber bereitzustellen, stellen Chen et al. (2014) vor. Sie verarbeiten hierbei die Daten von thermischen Sensoren in einem experimentellen geothermischen System zur Fahrbahnenteisung, bilden die Sensordaten virtuell ab und importieren sie mittels IFC-Schnittstelle in Echtzeit in ein BIM-Modell, also einen DIGITALEN ZWILLING, des experimentellen Modells (Chen et al., 2014). Zhang und Bai (2015) präsentieren einen bruchgetrigger-

ten RFID-Sensor, der unzulässige Dehnungen des Stahltragwerks hinter Brandschutz- oder ähnlichen Verkleidungen detektieren kann, wenn er von einer Person mit einem RFID-Leser und einer Smartphone-Applikation ausgelesen wird. Dies kann dank der Applikation direkt im zugehörigen BIM-Modell implementiert werden, wobei gegebenenfalls Reaktionen geplant werden können. Auch hier stehen eine kostengünstigere Wartung und höhere Sicherheit durch eine schnell und einfach durchführbare Bauwerksüberwachung, beispielsweise nach Erdbeben oder vergleichbaren Ereignissen, im Vordergrund.

In den veröffentlichten Patenten aus einer Recherche Stand 01.04.2021 finden sich mit Bezug auf klassische Befestigungsmittel mit integrierter Sensorik in mineralischen Untergründen wenige Treffer. Die meisten veröffentlichten Patente in den gewählten internationalen Patentklassifikationen (IPC) aufgeführt in Tabelle Anhang 2 im Anhang C zeigen klassische Maschinenschraubenverbindungen erweitert um die Funktionen der beispielsweise Installations- oder Zustandsüberwachung. Jedoch finden sich auch Anwendungen von Sensoren oder sensorischen Elementen im Bereich der Kunststoffdübel, wie Feuchtigkeitssensoren in Dämmstoffhalterdübeln (Schiffke, 2015) oder Setzkontrollen mittels durchtrennbarer elektrischer Leiterbahnen in klassischen Kunststoffdübeln (K. Wissner, 2015). Im Bereich der sensorüberwachten Schwerlastbefestigungen im mineralischen Untergrund finden sich neben den, im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichten Patente (Horn & Winkelmann, 2017; Horn & Schwab, 2018) auch beispielsweise Patente mit kapazitiven Messverfahren für die Verschiebungsmessung des Anbauteils (Schätzle, Suchy, Lehmann, Horn & Riexinger, 2019) oder zur Messung von Vorspannkräften beispielsweise von Schraubenverbindungen (F. Lehmann, Ernst & Laumann, 2016). Weitere Patente, vor allem aus dem deutschsprachigen Raum, beschreiben beispielsweise die Integration eines Sensors in einen Hinterschnittanker zur Installationskontrolle (Schmidt, Appl & Khandozhko, 2013), einen nicht näher spezifizierten, jedoch mit verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten beschriebenen, Abstandssensor an der Ankerspitze (Teufelhart, 2017), die Nutzung einer Hülse mit integrierten Spannungssensoren zur Erfassung von Querkräften an verschiedenen Ankervarianten (Pfarr, Gut, Winkler, Ter Braack & Khandozhko, 2020), eine Kommunikationsschnittstelle am Anker, vorzugsweise mit Piezoelement, zum Auslesen des Zustandes der Verpeizung (Kederer et al., 2019) oder einem Befestigungselement, das mit einem Computer verbunden werden kann um dessen Position in ein BIM Modell zu übertragen (Küenzlen, 2020). Aus dem asiatischen Raum finden sich vorrangig chinesische Patente in Bezug auf sensorintegrierte Befestigungsmittel. Diese beschreiben beispielsweise ein Befestigungsmittel zur Tunnelüberwachung (Li, Zhou, Zhao, Ding & Guo, 2017), ein Anker mit Dünnschicht-Drucksensor für die Installations- und Zustandsüberwachung (Liu, Liu & Liu, 2019) und einen Ankerbolzen mit integrierter Verformungserfassung (Duo & Liu, 2019).

2.5 Allgemeine Messprinzipien für die Verschiebungsmessung

Im Folgenden soll ein Einblick in die verschiedenen allgemeinen Messprinzipien zur Verschiebungsmessung, unterteilt in Weg- und Abstandssensoren, und die Funktionsweise des kapazitiven Messprinzips im Speziellen gegeben werden. Darüber hinaus werden allgemeine Einflussgrößen für Messungen besprochen und es erfolgt ein kurzer Überblick über weitere notwendige Komponenten zum Aufbau einer Messkette. Die detaillierte Beschreibung des kapazitiven Messprinzips soll dem tieferen Verständnis des beschriebenen Aufbaus in Unterkapitel 7.4 dienen.

Die Grundlagen dieser Messprinzipien werden für die spätere Auswahl eines geeigneten Messprinzips für die Mechatronisierung eines Verbundankers in Unterkapitel 7.3 aufgegriffen, wobei nach den Bewertungskriterien das geeignetste ausgewählt wird. Für weiterführende Informationen werden in der Literatur beispielsweise durch Parthier (2020), Schönfelder und Hering (2018) sowie Bernstein (2014) tiefergehende Beschreibungen zu Grundlagen der Messtechnik und kommerziell verfügbare Sensoren aufgeführt. Die für diese Arbeit relevanten Informationen werden in Unterkapitel 7.3 aufgegriffen und für die ausgewählten Randbedingungen bewertet.

Eine Verschiebungsmessung lässt sich mit verschiedenen Weg- und Abstandssensoren realisieren. Weg- und Abstandssensoren unterscheiden sich hierbei durch den Aufbau. Wegsensoren messen den Abstand des zu messenden Objektes von einem positionsgebenden, in der Regel feststehenden Element aus. Abstandssensoren messen hingegen die Entfernung einer aktiven Sensorfläche zu einer kooperativen oder nichtkooperativen Targetfläche (Positionsgeberfläche). Eine kooperative Targetfläche ist eine Messfläche mit definierten Eigenschaften, während eine nichtkooperative Targetfläche ein Objekt beliebiger Natur darstellt. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1 Prinzipien für Wegsensoren

2.5.1.1 Induktivsensor (LVDT)

Induktive Messprinzipien bestehen in der Regel aus mindestens einem reaktiven Bauteil, meist einer Spule. Beeinflusst durch die Position des Targets verändert sich die Reaktanz (der Blindwiderstand) des Bauteils. Die hieraus resultierende Änderung der Induktivität, der Verlustleistung oder der hergeleiteten Größe, wie Impedanz oder Spulengüte, dient als detektierbarer Messwert. Ein Linear Variable Differential Transformer (LVDT) besteht aus einem kooperativen Positionsgeber, der mechanisch starr mit dem Target verbunden ist. Er besitzt in seinem meist zylindri-

schen Gehäuse eine primäre und eine sekundäre Spulenwicklung um einen weichmagnetischen Kern. Abbildung 2.20 visualisiert den schematischen Aufbau eines LVDT-Sensorelementes mit primärer und sekundärer Wicklung sowie weichmagnetischem Kern. (Schönfelder & Hering, 2018)

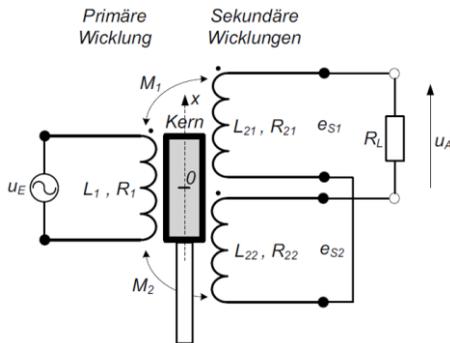


Abbildung 2.20: Das LVDT-Sensorelement in schematischer Darstellung (Schönfelder & Hering, 2018)

Die primäre Wicklung induziert, wie bei einem Transformator, ein magnetisches Feld. In mittiger Stellung werden hierdurch in die sekundäre Wicklung zwei identische Ausgangsspannungen induziert. Durch die translatorische Bewegung des Kerns bei Bewegung des zu messenden Objektes reduziert sich die eine und erhöht sich die andere Ausgangsspannung, woraus ein zurückgelegter Weg abgeleitet werden kann (Schönfelder & Hering, 2018). Die Messgenauigkeit liegt bei diesem Messprinzip zwischen $<0,01$ mm und $<0,05$ mm. Die Schutzarten liegen bei kommerziellen Produkten mit diesen Sensoren in der Regel bei IP64 bis IP65 (DIN EN 60529) und die Arbeitstemperaturen reichen von -250 °C bis 600 °C. Sensoren auf diesem Messprinzip finden häufig Anwendung in temporären Versuchsaufbauten in der Wissenschaft als berührende Wegaufnehmer. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1.2 Optische Interferometrie

Die optische Interferometrie nutzt den Wellencharakter von kohärentem Laserlicht. Hierfür wird ein Laserstrahl in zwei Teilbündel aufgeteilt, wobei ein Teilbündel über einen teildurchlässigen Spiegel zu einem feststehenden Spiegel geleitet wird und das andere zum sich bewegenden zu messenden spiegelnden Target. Durch die Reflektion der Teilbündel werden diese über den teildurchlässigen Spiegel interfe-

riert, also überlagert. Durch die konstante Periodizität der Wellenlänge λ des kohärenten Lichtes kann über die Intensitätsschwankungen die Wegdifferenz des zu messenden Objektes bestimmt werden. Aufgrund der kleinen Wellenlängen können ohne Weiteres Messungen im Mikrometerbereich durchgeführt werden, wobei indes die optischen Eigenschaften der Luft berücksichtigt werden müssen. Dies bedeutet, dass der Einfluss von Lufttemperatur, -feuchte und -druck und vor allem Partikeln wie Staub den Brechungsindex beeinflussen. Die Genauigkeit liegt bei diesem Messprinzip bei $<0,001$ mm. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1.3 Fotoelektrische Abtastung

Die fotoelektrische Abtastung ist mit Optik und Abtastplatte ein abbildendes Messprinzip. Über die Abtastplatte wird eine Fotodiode mit eng begrenzten Lichtbündeln in der gleichen Breite bestrahlt. Mit der Breite und dem Abstand zum nächsten Lichtbündel wird ein sich wiederholender definierter Weg Δd vorgegeben. Durch die, mit bekannter Anzahl N , periodisch angeordneten Elemente kann ein Abstand oder Weg bestimmt werden. Die Richtung wird über eine zweite Maske mit einer um ein Viertel verschobenen Teilungsperiode mittels Signalauswertung aufgenommen. Bauformen reichen dabei von der translatorischen Bauweise bis zur rotatorischen Bauweise. Die Teilungsperioden betragen meist $4 \mu\text{m}$ bis $40 \mu\text{m}$ und erreichen mit Interpolationsverfahren Genauigkeiten von $<0,001$ mm bis $<0,01$ mm. Anwendung findet sich beispielsweise in Werkzeugmaschinen. Auch hier müssen aufgrund der eingesetzten Optik Verschmutzungen vermieden werden. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1.4 Magnetostriktive Sensoren

Dieser Sensor ist aus einem feststehenden Element, einem Wellenleiter, einem elektromechanischen Wandler und einem beweglichen Permanentmagneten aufgebaut. In diesem Messprinzip wird mit einem Stromimpuls ein zirkulares Magnetfeld erzeugt. Im Bereich der Überlagerung des Magnetfeldes des Wandlers und des Permanentmagneten entsteht eine elastische Deformation, durch die zwei sich in entgegengesetzter Richtung ausbreitende Schwingungen entstehen. Die Schwingung zum Wandler hin wird von diesem in ein elektrisches Signal umgewandelt. Durch die bekannte Wellenausbreitung der Schwingung im Material kann über die Laufzeit und den bekannten Zeitpunkt des Stromimpulses die Position des beweglichen Permanentmagneten bestimmt werden. Mithilfe dieses Messprinzips lassen sich Genauigkeiten von $<0,01$ mm bis $<0,05$ mm bei vergleichsweise hoher Toleranz gegenüber Umwelteinflüssen erreichen. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1.5 Berührungslose induktive Wegsensoren (IWS)

Dieses Messprinzip detektiert eine Spulendämpfung zweier planarer Flächen, die sich mit konstantem Abstand und parallel zueinander translatorisch bewegen. Das Target ist hierbei ein dünnes metallisches Element und das Sensorelement eine flache kernlose Spule. Anwendung findet dieses Prinzip beispielsweise in Werkzeugmaschinen. Es lassen sich Genauigkeiten von $<0,001$ mm bis $<0,01$ mm bei einer Schutzklasse von IP67 (DIN EN 60529) und Arbeitstemperaturbereichen von -40 °C bis zu 120 °C erreichen. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.1.6 Potenziometrische Wegsensoren

Dieses Messprinzip hat aufgrund seiner positiven Eigenschaften und den geringen Kosten einen großen Marktanteil. Der Potentiometergeber besteht aus einem festen Widerstand und einem beweglichen Schleifer, der einerseits starr mechanisch mit dem Target verbunden und andererseits elektrisch mit dem Widerstand kontaktiert ist. Bei einer Wegänderung verändert sich der elektrische Widerstand und somit die Spannung im Spannungsteiler. Durch den annähernd linearen Verlauf der Widerstandsänderung lässt sich die Wegänderung mit geringen Fehlern bestimmen. Häufige Anwendung findet dieses Messprinzip im Anlagen- und Automobilbau, mit einem möglichen Temperaturbereich von -40 °C bis 150 °C und einer Genauigkeit von $<0,05$ mm bis $<0,1$ mm bei Schutzarten von typischerweise IP65, aber auch IP69K. (Schönfelder & Hering, 2018; DIN EN 60529)

2.5.2 Prinzipien für Abstandssensoren

2.5.2.1 Induktiver Näherungssensor (INS)

Diese Sensoren gelten als zuverlässig, robust, kompakt und unempfindlich gegen Verschmutzungen bei vergleichsweise geringen Kosten. Sie besitzen wie andere Abstandsmessungen nichtkooperative Target-Flächen, das heißt, es können Abstände zu beliebigen dem Sensor nicht zugehörigen metallischen Objekte erfasst werden. Hierbei wirkt ein vom Sensor erzeugtes magnetisches Feld, das vom im Sensorbereich liegenden metallischen Target beeinflusst wird. Induktive Näherungssensoren verhalten sich also wie Wirbelstrom-Induktivsensoren. Der INS besteht aus einer gewickelten Spule, einem Kern sowie einer metallischen Ummantelung und erzeugt ein magnetisches Feld, das einen Wirbelstrom im metallischen Target generiert. Verändert sich nun das magnetische Feld durch Annäherung oder Entfernung des metallischen Targets vom sensorischen Element, verändern sich auch die elektrischen Parameter der Spule, da sich die elektrischen Verluste verändern. Die Spulengüte Q_L dient dann, durch weitere Berechnungen und Kenntnisse des Verhaltens der Spule, der Bestimmung des Abstandes zur Targetfläche. In der

Prozesstechnik, bei Werkzeugmaschinen oder im Anlagenbau findet dieser Sensor häufig Anwendung. Er erreicht hierbei je nach Bauform Genauigkeiten von $<0,05$ mm bis $<0,1$ mm und Arbeitstemperaturbereiche von -25 °C bis zu 125 °C, bei einer Schutzklasse von IP67. (Schönfelder & Hering, 2018; DIN EN 60529)

2.5.2.2 Kapazitiver Näherungssensor

Dieses Messprinzip findet durch die Möglichkeit, berührungslos ein nichtkooperatives Target zu messen, vielseitige Anwendung, beispielsweise als Füllstandsanzeige für Tanks, als Abstandssensor oder Näherungsschalter. Zu unterscheiden sind dabei die Ausführungsformen des Sensors als Platten-, Zylinder- oder Röhrenkondensator. Die Ausführung des Sensors als Plattenkondensator eignet sich besonders zur Erfassung von Abständen. Der Aufbau ähnelt hier dem des induktiven Näherungssensors, jedoch ist in diesem Aufbau anstatt Spule und Kern lediglich eine Kondensatorfläche notwendig. Durch die bekannte Geometrie der Kondensatorfläche, eine abschirmende Ummantelung sowie die Kenntnisse zur angelegten Spannung und zur Permittivität der Umgebung (in der Regel Luft) kann die Ladezeit des Kondensators ‚Kondensatorfläche/Target‘ gemessen werden, wodurch sich wiederum der Abstand berechnen lässt. Das Target muss im Vergleich zum induktiven Näherungsschalter nicht zwingend metallisch sein (Parthier, 2020). Die Genauigkeiten liegen bei diesem Sensor im Bereich von $<0,05$ mm bis $<0,1$ mm, bei Arbeitstemperaturbereichen von -25 °C bis 125 °C und einer Schutzklasse von IP67. (Schönfelder & Hering, 2018; DIN EN 60529)

2.5.2.3 Optische Triangulation

Dieses Messprinzip basiert auf der Erfassung eines vom Target reflektierten begrenzten Lichtbündels und bezeichnet ein geometrisches Messverfahren. Das von einem im Sensor integrierten Sender erzeugte Licht trifft nach Reflektion anteilig die Detektionsebene und erzeugt hier eine Lichtverteilung mit Schwerpunktposition. Verschiebt sich diese Schwerpunktposition, kann die neue Distanz des Targets zum Sensor berechnet werden. Die optische Triangulation wird aufgrund ihres einfachen Aufbaus häufig in industriellen Anwendungen wie etwa der Robotersteuerung eingesetzt. Die Genauigkeit liegt bei $<0,5$ mm bis <5 mm, ist allerdings stark von den Umgebungsbedingungen wie etwa Partikeln in der Luft abhängig. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.2.4 Optische Lichtlaufzeit

Für dieses Messprinzip gibt es verschiedene technische Lösungen wie beispielsweise das Phasen- oder Frequenzlaufzeitverfahren. Grundsätzlich wird in allen Verfahren Licht ausgesendet, am Target reflektiert und zum Empfänger zurückgesendet. Die Zeitmessung lässt dann Rückschlüsse auf die Entfernung zwischen Sensor

und Target zu. So bedeutet beispielsweise eine Verschiebung des Targets zum Sensor von 10 mm eine Laufzeit von 66,7 ps bei einem Brechungsindex $n = 1$ in Luft. Typische Anwendungsgebiete umfassen die Qualitätskontrolle, Fördertechnik oder Lagekontrolle. Die Genauigkeit des Messverfahrens liegt bei <5 mm. Auch hier hängt die Messsignalqualität vor allem von den optischen Umgebungsbedingungen ab. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.2.5 Ultraschallsensoren

Dieses Messprinzip basiert auf einem akustischen Messverfahren. Ultraschall liegt im Bereich von 20 kHz bis 1 GHz, die mit piezoelektrischen Kristallen erzeugt werden, und kann in Sensoren als Einkopf- oder Zweikopfsystem eingesetzt werden. Das Einkopfsystem sendet als Lautsprecher die Schallwellen aus und schaltet dann in den Mikrofonbetrieb um, um die reflektierten Schallwellen zu erfassen. Die detektierte Laufzeit lässt sich dann in einen Abstand umrechnen. Das Zweikopfsystem arbeitet hingegen nach einem Schrankenprinzip, wobei ein Kopf den Sender und der andere Kopf den Empfänger übernimmt. Hiermit können indes keine Abstände gemessen werden. Die Messgenauigkeit liegt bei Ultraschallsensoren im Bereich von $<0,5$ mm bis <1 mm. Eine bekannte Anwendung sind bestimmte Rückfahrsensoren in Kraftfahrzeugen. In der Regel ist dieses Messprinzip auf atmosphärische Luft konzipiert, weshalb sie als recht zuverlässig gelten. (Schönfelder & Hering, 2018)

2.5.3 Funktionsweise kapazitives Messprinzip

Aufgrund seiner späteren Nutzung in Kapitel 7 wird im Folgenden das kapazitive Messprinzip im Detail betrachtet. Das kapazitive Messprinzip basiert auf einem offenen Kondensator, wobei zwischen einer Messfläche beziehungsweise Kondensatorplatte und einer geerdeten Elektrode, also dem Target, ein elektrisches Feld aufgebaut wird. Zwischen diesen Flächen befindet sich ein Dielektrikum mit einer empirisch bestimmten Dielektrizitätszahl ϵ_r . In der Regel ist das Dielektrikum bei kapazitiven Abstands- oder Näherungssensoren die Umgebungsluft und bei kapazitiven Füllstandsanzeigen sind es Flüssigkeiten mit höherer Dielektrizitätszahl ϵ_r . Sinkt beispielsweise in einem Tank der Füllstand der zu messenden Flüssigkeit und das elektrische Feld bildet sich stärker in Luft als im Medium aus, wird durch die geringere Dielektrizitätszahl der Luft die Kapazität des Feldes verringert. Ein Abstands- oder Näherungssensor basiert auf demselben Effekt. Durch Annäherung oder Entfernen des Targets vergrößert oder verringert sich der Anteil des Mediums, beispielsweise Luft, zwischen Messfläche und Target und somit im elektrischen Feld, wodurch eine Kapazitätsänderung eintritt. Dieses Medium kann auch einen festen Aggregatzustand einnehmen und durch die Dehnung oder Stauchung eines

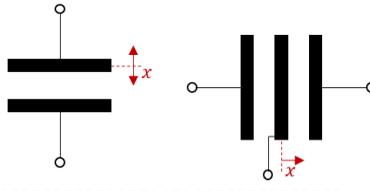
elastischen Materials dessen elektrische Feldänderung detektieren. (Schönfelder & Hering, 2018)

Die Kapazität C eines Plattenkondensators berechnet sich nach Gleichung 2-7 mit der elektrischen Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$, der materialabhängigen Dielektrizitätszahl ϵ_r sowie den geometrischen Kennwerten der Plattenfläche A_K und des Plattenabstands d_K (Schönfelder & Hering, 2018).

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A_K}{d_K} \quad 2-7$$

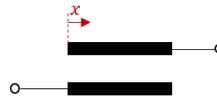
a) Änderung Plattenabstand

- $A = \text{konst.}$
- $\epsilon_r = \text{konst.}$
- $d = \text{variabel}$



b) Änderung Plattenfläche

- $\epsilon_r = \text{konst.}$
- $d = \text{konst.}$
- $A = \text{variabel}$



c) Änderung Dielektrikum

- $d = \text{konst.}$
- $A = \text{konst.}$
- $\epsilon_r = \text{variabel}$

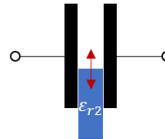


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung der Änderung der Kapazität als kapazitives Messprinzip nach (Schönfelder & Hering, 2018)

Abbildung 2.21 zeigt schematisch die unterschiedlichen Arten der Kapazitätsänderungen als kapazitives Messprinzip. Alle dargestellten Varianten eignen sich mehr oder weniger gut für eine Weg- oder Abstandsmessung. So bietet die Variante des Differentialkondensators (Abbildung 2.21 a rechts) nur einen festgelegten Messbereich, während die Änderung des Dielektrikums (Abbildung 2.21 c) ein zusätzliches

Medium, im Idealfall eine Flüssigkeit, mit der Dielektrizitätszahl ϵ_{r2} erfordert. Die Änderung des Dielektrikums als Messprinzip zur Weg- oder Abstandsmessung ist somit konstruktiv aufwendiger zu realisieren als beispielsweise zur Füllstandsmessung.

Eine mögliche Variante zur Bestimmung der Änderung des Plattenabstandes oder der Plattenfläche im Gleichstromkreis ist die Messung der kapazitiven Ladezeit. Anhand der bekannten Eigenschaften wie der bekannten Dielektrizitätszahl ϵ_r des Dielektrikums und den definierten Geometrien wie der konstanten Fläche beziehungsweise des konstanten Abstandes bei Änderung des Plattenabstandes beziehungsweise der Plattenfläche lässt sich anhand der Ladezeit des Kondensators die gesuchte geometrische Größe Plattenabstand d beziehungsweise Plattenfläche A berechnen. (Fischer R., 2019)

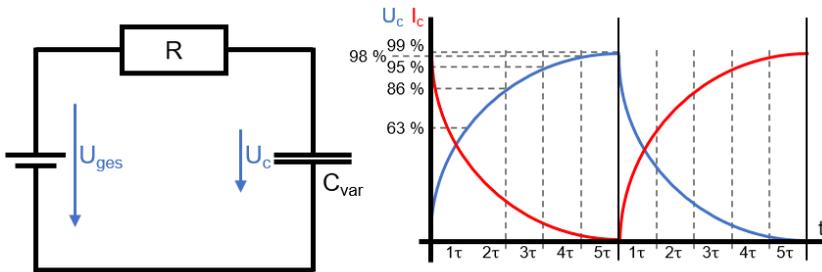


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung des Ersatzschaltbildes sowie der Lade- und Entladekurven eines Kondensators nach (Schnabel, 2017)

In Abbildung 2.22 links ist ein Ersatzschaltbild für die Veranschaulichung der Lade- und Entladezeit eines Kondensators zu erkennen. Beim Aufbringen einer Versorgungsspannung U_{ges} springt der Strom I_C auf sein Maximum und fällt exponentiell bis annähernd auf null ab. Beim Entladen verhält sich der Kondensator wie eine Spannungsquelle und entlädt sich exponentiell, während der Strom exponentiell steigt. Abbildung 2.22 rechts visualisiert einen solchen Lade- und Entladezyklus über die Zeitkonstante τ . Wie in Gleichung 2-8 zu sehen, ist diese Zeitkonstante nicht von der angelegten Spannung U_{ges} abhängig, sondern das Produkt des Widerstandes R und der Kapazität C . Die Zeitkonstante τ beschreibt damit die Zeit bis zum Erreichen von 63 % und 5τ das Erreichen von 99 % der Ladespannung. (Schnabel, 2017)

$$\tau = R \cdot C \quad 2-8$$

Sind die Dielektrizitätszahl ϵ_r , Plattenfläche A , Ladezeit 5τ und der Widerstand R eines kapazitiven Sensors bekannt, kann mittels der Gleichung 2-9 der Plattenabstand d berechnet werden.

$$d = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot \frac{R}{5 \cdot \tau} \quad 2-9$$

Wenn nun der Weg oder Abstand einer Sensorfläche zu einer nicht dem Sensor zugehörigen Targetfläche gemessen werden soll, ist darauf zu achten, die Dielektrizitätszahl ϵ_r des zwischenliegenden Mediums und die Fläche A des Targets zu kennen, um Ergebnisse hoher Güte zu erhalten.

2.5.4 Allgemeine Einflussgrößen für Messungen

Die ausgegebenen Messwerte von Sensoren können durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit oder magnetische Felder beeinflusst werden. Hier wird von sogenannten Einflussfehlern gesprochen. Da die bereits vorgestellten Messprinzipien unterschiedliche Querempfindlichkeiten gegenüber diesen Einflussgrößen besitzen, muss bei der Eigenentwicklung von Sensoren zur Mechatronisierung von Bauteilen auf die Kompensation dieser Einflussgrößen geachtet werden.

Die wohl am häufigsten auftretende Einflussgröße ist die Temperatur. Nicht nur durch die Änderung der Temperatur durch Tag-Nacht-Wechsel oder Wechsel der Jahreszeiten verändern sich die thermischen Bedingungen und damit beispielsweise auch die geometrischen Maße durch Wärmeausdehnungen für einen Sensor. Auch durch die Eigenerwärmung von elektrischen Bauteilen im Betrieb (JOULE-LENZ-GESETZ) können sich Messwerte ändern. Da die meisten physikalischen Messprinzipien temperaturabhängig sind, kann es erforderlich sein, diese thermischen Einflussgrößen durch Kompensation so weit zu reduzieren, dass die Messgenauigkeit für das Messsystem ausreichend ist. Für die Eigenerwärmung der Elektronik lässt sich dies beispielsweise durch Referenzspannungsquellen mit Referenzdioden, die mit Halbleiterdioden temperaturkompensiert sind, oder über den Einsatz von Halbleiterwiderständen mit metallischen Widerständen, deren Temperaturkoeffizienten sich ebenfalls aufheben, erreichen. (Bernstein, 2014)

Frequenzen aus nicht galvanisch getrennten Systemen, wie beispielsweise die Netzspannung mit $50 \text{ Hz} \pm 0,2 \text{ Hz}$ Netzfrequenz in Europa, können die Messsignal-

qualität beeinflussen, ungewollt verstärken oder dämpfen. Auch parasitäre Kapazitäten von Leitungen, Blindanteile von Messwiderständen oder beispielsweise frequenzabhängige Verlust- und Gütefaktoren von Kondensatoren und Spulen können sowohl in digitalen als auch in analogen Messschaltungen elektrische und magnetische Fremdfelder und dadurch frequenzabhängige Messfehler verursachen. Ist eine Grenzfrequenz bekannt, können mittels Hochpass- oder Tiefpassfilter solche Fehler reduziert werden. Je nach Messeinrichtung und -aufbau muss das Frequenzverhalten meist empirisch bestimmt werden. Geeignete Schaltungsmaßnahmen können hierbei helfen. (Bernstein, 2014)

Drift- oder Rauscherscheinungen können ebenfalls erhebliche Messfehler verursachen. Während Drifterscheinungen als stark niederfrequente, annähernd statische Änderungsvorgänge zu beschreiben sind, stellt Rauschen ein hochfrequentes, fast periodisches Springen von Spannungs- und Stromwerten dar.

Luftfeuchtigkeit führt zu Messfehlern, die die Messwerte beispielsweise optischer oder kapazitiver Messprinzipien beeinflussen können. Auch hier ist eine empirische Bestimmung des Einflusses auf ein Messsystem für die Reduzierung des Fehlers relevant und über zusätzliche Kompensationsschaltungen oder andere konstruktive Maßnahmen lösbar.

Als letzte bedeutsame Einflussgröße ist die elektromagnetische Strahlung zu nennen. Zum einen müssen elektrische Geräte, die von den Harmonisierungsrechtsvorschriften erfasst werden, eine Prüfung zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV-Prüfung) bestehen, um eine CE-Kennzeichnung (Kennzeichnung für europäische Konformität) zur Inverkehrbringung zu erhalten, zum anderen müssen Messsysteme, gerade wenn sie induktive Bauteile beinhalten, gegen elektromagnetische Strahlung von außen wie auch vom System selbst geschützt werden, um die Messsignalqualität zu gewährleisten. Von außen ist dies konstruktiv meist durch die Verwendung von Stahlgehäusen mit Dicken von 2 mm bis 20 mm (je nach Strahlungsintensität) einfach lösbar, aber oftmals nicht möglich oder gewünscht. Alternativ gilt es, Messleitungen mit geerdeten Schirmungen zu wählen und größere Abstände zwischen Messleitungen und anderen Versorgungs- und Signalleitungen sowie Bauteilen wie Relais, Transformatoren oder anderen Bauteilen mit Spulen oder vergleichbaren Bauteilen einzuhalten. (Bernstein, 2014)

2.5.5 Allgemeiner Aufbau einer Messkette

Für die Erfassung von zu messenden Größen bis zur Anzeige auf einer Benutzeroberfläche ist die Planung einer analogen Messkette erforderlich. Die oben aufgeführten Messprinzipien und Sensorsysteme wandeln die zu messende geometrische Größe, in diesem Fall ‚Verschiebung‘, in ein analoges elektrisches Signal um.

Um dies zu bewerkstelligen, ist eine Versorgungsspannung für den Sensor nötig. Der Bedarf für eine Versorgungsspannung kann dabei je nach Konzept höher oder niedriger ausfallen. So benötigen optische Messverfahren in der Regel eine höhere Versorgungsspannung als beispielsweise gängige resistive. Das Ausgangssignal dieser Sensoren ist in der Regel eine Spannung in Millivolt und muss vor der weiteren Verarbeitung bis zur Anzeige verstärkt werden. Im Zuge der Verstärkung vom Millivolt- in den Voltbereich wird auch die Abtastrate, also die Frequenz zur Aufnahme des Messsignals, eingestellt. Des Weiteren kann in diesem Schritt gegebenenfalls das Messsignal bereits gefiltert werden, um mögliche Fehler der Messung zu reduzieren, bevor diese verstärkt und weiterverarbeitet werden. (Bernstein, 2014)

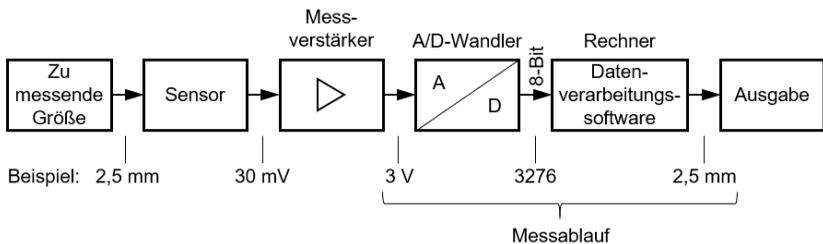


Abbildung 2.23: Abbildung einer allgemeinen Messkette mit Beispiel (überarbeitet nach (Bernstein, 2014))

Das verstärkte und gegebenenfalls bereits gefilterte Signal kann nun zur weiteren Verarbeitung, gegebenenfalls auch zur Übertragung der Daten bei kabellosen Systemen, digitalisiert werden. Hierfür wird ein Analog-Digital-Wandler benötigt. Mit diesem digitalisierten Signal kann nun die Datenverarbeitung, meist an einem PC durchgeführt oder bei der digitalen Messtechnik direkt mit einer Sieben-Segment-Anzeige dargestellt werden. Bei der Digitalisierung muss auf ein für den Sensor und die Anwendung abgestimmter A/D-Wandler eingesetzt werden, da bei jedem Wandler-Typ grundlegende oder systembedingte Fehler entstehen, die bekannt sein müssen. Wenn nötig, werden in diesem Prozess der Datenverarbeitung weitere Filter, Transformationen der Messdaten oder eine Rekonstruktion des digitalen Signals in ein analoges mittels eines Digital-Analog-Umsetzers durchgeführt. Abbildung 2.23 veranschaulicht den gesamten schematischen Aufbau einer solchen Messkette mit der Datenwandlung einer beispielhaften Wegmessung nach Bernstein (2014).

2.6 Modellbildung

Nach der allgemeinen Modelltheorie von Stachowiak (1973) stellt ein Modell ein Abbild eines Realitätsausschnittes dar. Dieser Realitätsausschnitt, auch als Urbild bezeichnet, wird nach Stachowiak (1973) vom Modell oder Abbild durch drei Eigenschaften charakterisiert:

- Abbildungsmerkmal
- Verkürzungsmerkmal
- Pragmatisches Modell

Das Abbildungsmerkmal bedeutet, dass ein Modell nur ein Abbild des Urbildes ist, und nicht identisch mit diesem. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt, dass nur die für den Konstrukteur relevanten Eigenschaften des Urbildes im Modell abgebildet werden. Bezüglich des pragmatischen Modells postuliert Stachowiak (1973) schließlich, dass Modelle immer einem speziellen Nutzen dienen, für den sie erstellt wurden.

Ostrom (1988) beschreibt in seinem Beitrag den Unterschied zwischen verbalen, mathematischen und Computersimulationsmodellen. So eignen sich verbale Modelle, um komplexe Sachlagen zu beschreiben, können jedoch in der Regel keine oder nur eine Lösung geringer Güte generieren. Mit mathematischen Modellen können nur vergleichsweise einfache Sachlagen gelöst werden und sie liefern generelle, abstrakte analytische Lösungen. Computersimulationsmodelle können dagegen hochkomplexe Zusammenhänge bearbeiten und liefern dabei numerische Lösungen für einen Zustand mit variablen Parametern (Saam N. J., 2009).

Modelle werden in allen Bereichen der Wissenschaft angewendet. Die folgenden Methoden zur Modellbildung konzentrieren sich jedoch auf eine technische Ausrichtung der Modellnutzung.

Im Folgenden werden die Methoden zur Modellbildung vorgestellt, die in der vorliegenden Arbeit angewendet wurden. Die Eliminierung der Beobachtungsbarriere ‚Beton‘ unterstützt dabei die Erkennung der tatsächlichen kontinuierlichen Schädigungsmechanismen, die beim Auszug eines Verbundankers wirken, mithilfe der SCHUBVIERECKMETHODE. Durch die Überwindung der Beobachtungsbarriere kann anschließend mit dem CONTACT&CHANNEL-ANSATZ (C&C²-A) erstmals ein C&C²-SEQUENZMODELL eines Verbundankers erstellt werden, das sowohl die Wirkflächenpaare als auch die Begrenzungsflächen eines solchen Systems identifiziert. Mit dieser Erkenntnis ist es möglich, Gestaltelemente zu konstruieren, diese in konventionelle Verbundanker zu integrieren und in einem vollfaktoriellen 3³-Versuchsplan zu

testen. Hierfür wird über die Versuchsergebnisse der Methode STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG ein Regressionsmodell erstellt, um deren Einfluss auf die Primärfunktion zu validieren.

2.6.1 Eliminierung von Beobachtungsbarrieren

Technische Systeme besitzen, beispielsweise durch die geometrische Anordnung ihrer Bauteile (Matthiesen, Grauberger & Windisch, 2020) oder aufgrund der Randbedingungen für die ablaufenden Prozesse, wie Dynamiken, Temperatur oder Druck (Matthiesen et al., 2020), eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Orte der Funktionserfüllung (Wintergerst, 2015). Um ein nicht intuitiv verständliches technisches System zu verstehen und zu analysieren, erweist es sich als hilfreich, dieses zu beobachten. Oftmals ist es hierfür zwingend notwendig, mögliche BEOBACHTUNGSBARRIEREN zu eliminieren (Wintergerst, 2015). Ist diese Eliminierung der BEOBACHTUNGSBARRIEREN nicht mit regulären Messmethoden, virtuellen Simulationen oder der Kombination dieser mit X-IN-THE-LOOP (XiL) (Albers, Düser & Ott, 2008) möglich, weil diese das System nicht ausreichend abbilden können, kann das System auch in seinen Eigenschaften verändert werden, um Funktionen sichtbar zu machen (Thau, 2013, S. 124-128). Das X-IN-THE-LOOP-FRAMEWORK ist ein Handlungssystem, das Simulation und Versuch in den Produktentstehungsprozess integriert und hierbei kontinuierlich Einflüsse des Benutzers und der Umwelt berücksichtigt (Albers et al., 2008).

Matthiesen, Hölz und Grauberger (2017) führen als Beispiel für eine solche BEOBACHTUNGSBARRIERE einen Kunststoffdübel in einer Betonwand an. Seine Verformung im Bohrloch ist auch aufgrund dessen Beschaffenheit nicht zerstörungsfrei analysierbar. Somit können die Gestaltparameter, die die Tragfähigkeit bestimmen, ohne Vorkenntnisse beispielsweise aus Auszugsversuchen nicht eindeutig identifiziert werden. Für eine Weiterentwicklung zur Erhöhung der Tragfähigkeit müssen folglich entweder die Beobachtungsbarrieren eliminiert oder die Gestaltparameter aufwendig experimentell bestimmt werden. Bei einer experimentellen Bestimmung besteht jedoch die Gefahr, funktionsrelevante Elemente nicht eindeutig zu identifizieren, da in der Regel Gestalt-Funktion-Hypothesen zur Verbesserung der Tragfähigkeit iterativ in neue Prototypen einfließen (Matthiesen et al., 2017).

Als Beispiele für die Eliminierung der BEOBACHTUNGSBARRIERE ‚Beton‘ zur Identifizierung relevanter Gestaltparameter führen Matthiesen et al. (2017) Analysemethoden mit *Spannungsoptik* (siehe Abbildung 2.24) oder *Computertomographie* an. Für das Beispiel der Computertomographie zeigt beispielsweise Zhu (2018) die Eliminierung der BEOBACHTUNGSBARRIERE mit einem Verbundanker auf Epoxidbasis, der nach Installationsvorgaben in Beton gesetzt und anschließend mittels eines Federpaketes belastet wird. Hierfür wurden zylindrische Betonprüfkörper verwendet, die,

um eine Spaltung des Betons zu vermeiden, mit Kohlefaserbändern umwickelt waren. Durch diesen Prüfaufbau konnten Verbundanker unter statischer Last im Computertomographen beobachtet werden. Diese Untersuchung ermöglichte es, die primären und sekundären Kriechphasen des Verbundankers mit Hilfe der Computertomographie aufzuzeigen (Zhu, 2018). Weitere Methoden zur Eliminierung von BEOBACHTUNGSBARRIEREN für die Untersuchung von Befestigungsmitteln sind beispielsweise Halbmodelle, wie der Versuchsaufbau für die Funktionsersatzprüfung zur Detektion der Spreizkräfte von Schwerlastankern aus Metall (Mayer, 1990) oder Auszugsversuche zur Analyse der Rissausbildung von Verbundankern (Appl, 2009), die Nutzung optischer Messverfahren, wie die Speckle-Interferometrie zur Detektion von Mikrorissen an der Oberfläche von Beton bei querbelasteten Ankern (Schmied, 2008) oder die Nutzung akustischer Messverfahren zur Detektion der Rissbildung im Beton beim Auszugsversuch (Pregartner et al., 1998). Auf die Rissausbildung beim Auszugsversuch von Verbundanker von Appl (2009) und die akustische Detektion von Rissen im Beton durch die Schallemissionsanalyse von Pregartner et al. (1998) wurde bereits in Kapitel 2.2.2 tiefer eingegangen.

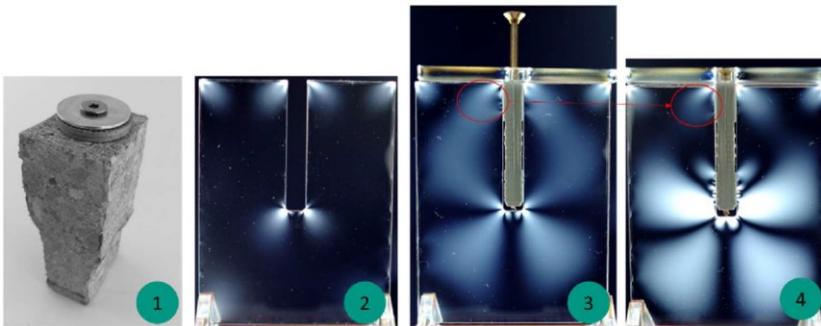


Abbildung 2.24: Modell zur Überwindung der Beobachtungsbarriere eines Spreizdübels in Polymethylmethacrylat zur Darstellung der Spreizkräfte mittels der Analysemethode Spannungsoptik (Matthiesen et al., 2017)

Matthiesen et al. (2017) weisen jedoch darauf hin, dass diese Modelle grundsätzlich verifiziert werden müssen. Weiterhin kann diese Veränderung des Systems in der Rücktransformation des Modells aufgrund der Skalierung zu fehlerhaften Interpretationen von funktionsrelevanten Gestaltparametern führen. Bei Anwendung der *Spannungsoptik* (Abbildung 2.24) kann dieser mögliche Fehler der Skalierung bei der Rücktransformation beispielsweise der Wechsel vom inhomogenen Material Beton auf das homogene Material Polymethylmethacrylat sein (Matthiesen et al., 2017;

Matthiesen et al., 2020). Eine Zusammenfassung mit Beispielen von Methoden zur Überwindung von Beobachtungsbarrieren findet sich bei Matthiesen, Kapitel 1.6.1 (2021).

2.6.2 Schubviereck nach Mattheck

Das SCHUBVIERECK ist neben den ZUGDREIECKEN und der KRAFTKEGELMETHODE eines der drei Denkwerkzeuge nach Mattheck (2010). Sie können zum einen durch einfachste Vorgehensweise und Regeln innerhalb kurzer Zeit zur Veranschaulichung von Spannungsverläufen in Bauteilen dienen und ohne erheblichen Aufwand von Konstrukteuren genutzt werden, um spannungsoptimiert zu konstruieren. Zum anderen werden sie bereits in Computermethoden wie CAD-Software integriert, um auch bei sicherheitsrelevanten Bauteilen als Optimierungswerkzeug zu dienen (Wiesner & Vajna, 2014).

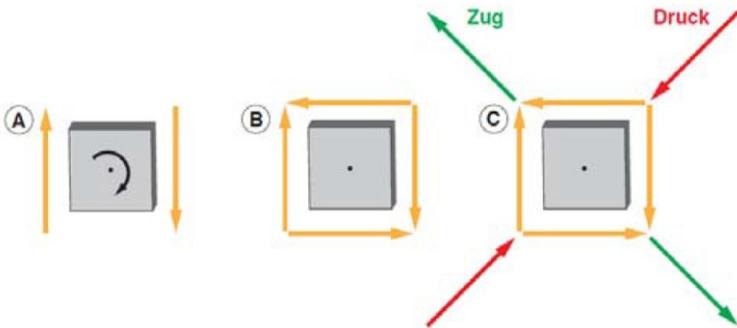


Abbildung 2.25: Beispielhafte Erstellung eines Modells der qualitativen Kraftvektoren eines vertikal belasteten, nicht rotierbaren Elementes (Achenbach et al., 2010)

Die Methode SCHUBVIERECK stellt eine Methode dar, um ein qualitatives Modell der wirkenden Kräfte innerhalb eines Bauteils zu erstellen. Abbildung 2.25 zeigt beispielhaft das Vorgehen zur Ermittlung der qualitativen Zug- und Druckkraftvektoren an einem nicht rotierbaren Element. Hierbei werden die wirkenden Kräfte auf ein nicht rotierbares Element, in diesem Fall als vertikaler Längsschub, aufgetragen (siehe Abbildung 2.25 A). Darauf reagiert das Element mit einem entgegenwirkenden, in diesem Beispiel horizontalen, Querschub des gleichen Betrages, da das System als nicht drehbar angenommen wird (siehe Abbildung 2.25 B). Diese

Schubkräfte lassen sich als ‚Viereck‘ um das Element legen, sodass sich die resultierenden, im 45°-Winkel liegenden Richtungen der Zug- und Druckkräfte (siehe Abbildung 2.25 ©) in qualitativer Form ergeben. (Haller, 2013)

In Abbildung 2.26 ist die Anwendung der Methode SCHUBVIERECK an verschiedenen Belastungsarten, wie Zugbelastung (A), schubbelasteter Riss (B) und Torsion (C), visualisiert. Beispiele zu deren Anwendung und zur Anwendung der beiden anderen methodischen Denkinstrumente, ZUGDREIECKE und KRAFTKEGELMETHODE, zur qualitativen Modellerstellung nach Mattheck und Bethge (2004) werden beispielsweise in Achenbach et al. (2010), Haller (2013) und C. Wissner (2010) dargelegt.

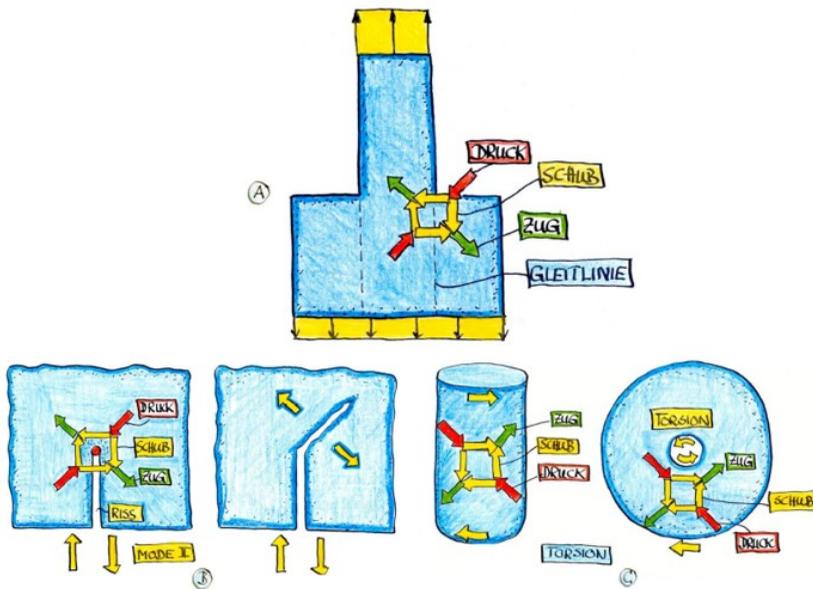


Abbildung 2.26: Beispiele für die Anwendung der Methode SCHUBVIERECK nach Mattheck (2010) am Beispiel von Zugbelastung (A), schubbelasteter Riss/Schlitz (Mode II) (B) und Torsion (C) aus C. Wissner (2010)

2.6.3 C&C²-Ansatz zum Beschreiben von Versagensvorgängen

Der C&C²-ANSATZ (CONTACT&CHANNEL-ANSATZ) ist ein Metamodell, das für die Modellbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen entwickelt wurde (Grauberger et al., 2020; Matthiesen, 2002, 2021). Es liefert keine direkte analytische Lösung, jedoch ein hohes Maß an Systemverständnis und eine Beschreibung komplexer Zusammenhänge. Der C&C²-ANSATZ kann als Denkzeug betrachtet werden, der einem Konstrukteur, einem Entwickler oder einem interdisziplinären Team ein gemeinsames ‚Vokabular‘ (Elemente) auf Basis seiner ‚Grammatik‘ (Methodenregeln) zur Verfügung stellt und mit dem ein Systemverständnis diskutier- und dokumentierbar wird. Der Nutzen des daraus entstehenden gedanklichen Modells liegt in der Produktentwicklung und -weiterentwicklung. Es unterstützt die Verbesserung bestehender Produkte oder die Integration neuer Funktionen in bestehende Produkte. Gerade bei unübersichtlichen konstruktiven Herausforderungen, auch im Team, kann das gedankliche Modell zu den relevanten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit einem expliziten C&C²-MODELL visualisiert werden. Hiermit können funktionsrelevante Gestaltparameter identifiziert und für die Verbesserung einer Produkteigenschaft genutzt werden. (Matthiesen, 2021)

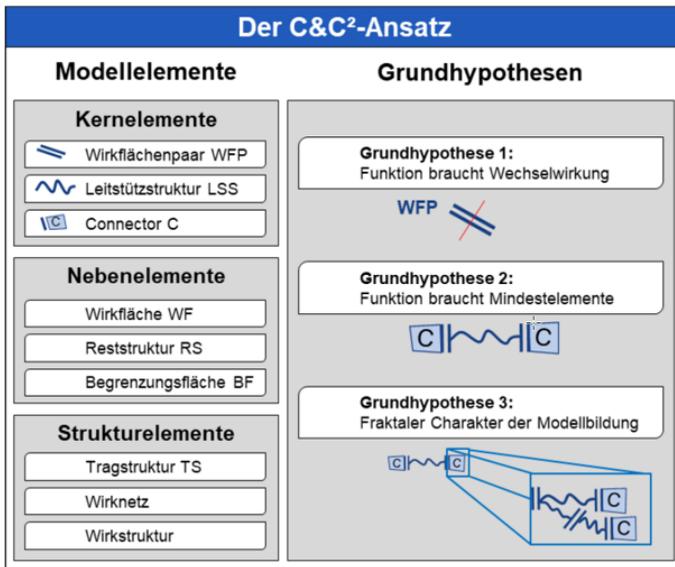


Abbildung 2.27: Übersicht der Elemente und der Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes (Matthiesen et al., 2018)

Abbildung 2.27 rechts enthält die drei grundlegenden Methodenregeln des C&C²-ANSATZES. Sie umfassen zum einen, dass eine Funktion immer eine Wechselwirkung benötigt. Des Weiteren kann eine Funktion nicht ohne Mindestelemente erfüllt werden. Die Mindestanforderungen für ein C&C²-MODELL sind nachfolgend zusammengefasst:

Zwei, mit einer Leitstützstruktur LSS verbundene, Wirkflächenpaare WFP, die wiederum über zwei Connectoren C mit der relevanten Systemumgebung des Beobachtungsraumes interagieren, erfüllen eine Funktion.

Die Mindestelemente, oder wie in Abbildung 2.27 bezeichnet KERNELEMENTE, werden im Folgenden genauer beschrieben. Die dritte Grundhypothese beschreibt, dass die Modellbildung einen fraktalen Charakter besitzt. Somit ist der Detaillierungsgrad eines Modells beliebig skalierbar, vorzugsweise der untersuchten Funktion entsprechend. (Matthiesen, 2021)

Das ‚Vokabular‘, also die Elemente dieser Methode, sind in Abbildung 2.27 dargestellt. Die Gestaltfunktionselemente (oder KERNELEMENTE Abbildung 2.27 links oben) können alle funktionsrelevanten Elemente eines technischen Systems abbilden. Dazu gehören die Flächenelemente WIRKFLÄCHENPAARE (WFP), die zwischen zwei Flächen beliebigen Aggregatzustandes gebildet werden, die einen Energie-, Stoff- und/oder Informationsaustausch im System darstellen. LEITSTÜTZSTRUKTUREN sind Volumenelemente in einem beliebigen Aggregatzustand. Sie verbinden genau zwei WIRKFLÄCHENPAARE und leiten Stoff, Energie und/oder Informationen zwischen diesen. Das letzte Kernelement ist der CONNECTOR. Dieser bildet die wirkungsrelevanten Einflüsse der Umgebung außerhalb des Beobachtungsraumes auf den Gestaltungsbereich ab. Sie integrieren abstrahiert beispielsweise Lageinformationen oder Kraftflüsse zu einem nicht im betrachteten Bereich liegenden Gehäuse des Modells und besitzen eine repräsentative Wirkfläche. (Matthiesen et al., 2018)

Zusätzlich zu den KERNELEMENTEN liefert der C&C²-ANSATZ auch NEBENELEMENTE (siehe Abbildung 2.27 links Mitte). Diese Elemente können zur Detaillierung des Modells beitragen oder bestimmte Zustände darstellen. WIRKFLÄCHEN (WF) sind, wie oben bereits im Zusammenhang mit WIRKFLÄCHENPAAREN beschrieben, Flächenelemente, die dauerhaft oder zeitweise im Kontakt zu anderen WIRKFLÄCHEN stehen und mit diesen WIRKFLÄCHENPAARE schaffen. BEGRENZUNGSFLÄCHEN (BF) sind Flächenelemente beziehungsweise Oberflächen beliebigen Aggregatzustands, die keine WIRKFLÄCHEN sind. Und schließlich RESTSTRUKTUREN (RS) die, vergleichbar antagonistisch wie BEGRENZUNGSFLÄCHEN und WIRKFLÄCHEN, den Gegensatz

zur LEISTÜTZSTRUKTUR darstellen. Reststrukturen sind Volumina beliebigen Aggregatzustandes, die keine Stoffe, Energien und/oder Informationen austauschen beziehungsweise weiterleiten. (Matthiesen, 2021)

Ein C&C²-MODELL kann nur einen ZUSTAND abbilden. Ein ZUSTAND beschreibt einen unveränderten Zustand innerhalb eines Zeitraums eines sich bei der Erfüllung seiner Funktion möglicherweise verändernden Systems. Wenn sich die Anzahl und/oder Eigenschaft der Gestaltfunktionselemente ändert, tritt somit ein neuer ZUSTAND ein. Mehrere C&C²-MODELLE beziehungsweise ZUSTÄNDE sind in einem C&C²-SEQUENZMODELL verknüpft (MATTHIESEN ET AL., 2020). Dies kann bei der Funktionsanalyse eines Systems wie auch bei der Synthese eines Lösungsansatzes zu dessen Optimierung in manchen Fällen zwingend notwendig sein, um alle Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu betrachten.

Je nach Aufgabenstellung oder Bedarf sind für die Modellbildung noch weitere Elemente zur Strukturierung notwendig. Dahingehend liefert der C&C²-ANSATZ die Elemente TRAGSTRUKTUR (TS), WIRKNETZ und WIRKSTRUKTUR. Die TRAGSTRUKTUR ist hierbei die Summe aller LEISTÜTZSTRUKTUREN und wird benötigt, wenn mehrere ZUSTÄNDE oder unterschiedliche Anwendungsfälle für die Gestaltung relevant sind. Das WIRKNETZ umfasst alle in einem C&C²-MODELL abgebildeten Gestaltfunktionselemente. Die WIRKSTRUKTUR beinhaltet hingegen alle WIRKNETZE über mehrere C&C²-MODELLE unterschiedlichsten Detaillierungsgrades und verschiedener ZUSTÄNDE und enthält somit alle Gestaltfunktionselemente. Die WIRKSTRUKTUR wird in der Regel im C&C²-SEQUENZMODELL abgebildet. (Matthiesen, 2021)

Eine Übersicht zur Verdeutlichung der Zusammenhänge aller Elemente des C&C²-Ansatzes ist in Abbildung 2.28 dargestellt.

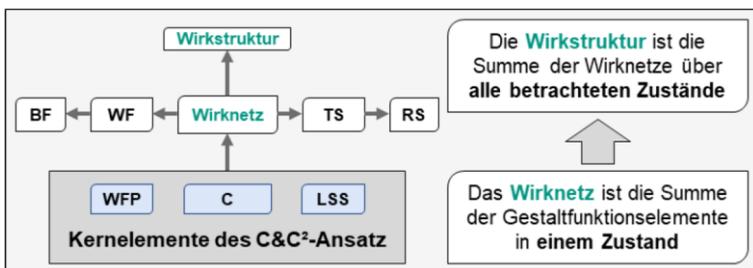


Abbildung 2.28: Darstellung aller Zusammenhänge der Elemente des C&C²-Ansatzes (Matthiesen et al., 2018)

Ein grundlegendes Vorgehen der Modellbildung zur Erfassung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs mit dem C&C²-ANSATZ besprechen Matthiesen et al. (2020).

In einem ersten Schritt der MODELLBILDUNG UND TRANSFORMATION soll über eine Systemcharakterisierung im Originalsystem, beispielsweise ein zu optimierendes Produkt, die Entwicklungssituation erfasst werden, wobei ebenfalls funktionsrelevante Eigenschaften und Anwendungsfälle zu ermitteln sind. Anschließend wird mit dem C&C²-Ansatz eine Modellbildung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge direkt im Originalsystem durchgeführt. In diesem Schritt werden die potenziell funktionsrelevanten Parameter identifiziert, daraus Ersatzsysteme abgebildet und diese für ihre Eignung in der Untersuchung bewertet. Nun wird ein Ersatzsystem ausgewählt und es werden Skalierungsmaßnahmen identifiziert (Matthiesen et al., 2020). Im entstandenen Ersatzsystem findet erneut eine Systemcharakterisierung statt, aus der danach ein C&C²-MODELL erstellt wird. Mit einem Abgleich des Modells mit dem Originalsystem wird die Modelltreue geprüft. Darauf folgt der Schritt der VERSUCHSDURCHFÜHRUNG IM ERSATZSYSTEM, die das Ziel verfolgt, die Effekte der Gestaltparameter auf das Systemverhalten zu bestimmen. Liegen die Erkenntnisse in ausreichender Qualität vor, um Lösungsmöglichkeiten für ein verbessertes Ersatzsystem abzuleiten, kann der Schritt der RÜCKTRANSFORMATION DER ERKENNTNISSE durchgeführt werden, wobei gegebenenfalls erneut Skalierungsmethoden für die Rücktransformation der Erkenntnisse angewandt werden müssen. Mit diesen Erkenntnissen ist es möglich, ein optimiertes Originalsystem zu gestalten. Falls die nötige Datenqualität nicht erreicht wurde, müssen mögliche Störgrößen identifiziert werden. Eine Überprüfung der Datenqualität ist beispielsweise über statistische Verfahren oder Methoden, wie STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG beziehungsweise DESIGN OF EXPERIMENTS, mithilfe der Bestimmung der Signifikanz, Normalverteilung der Streuung oder dergleichen möglich. (Matthiesen et al., 2020)

2.6.4 Statistische Versuchsplanung

Die Methode STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG oder DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) stellt eine Sammlung mehrerer statistischer Verfahren und Modelle dar, die vor und nach einer Versuchsreihe angewendet werden können. Sie wird in der Industrie vor allem zur Prozessoptimierung oder zur Planung von Versuchsreihen eingesetzt, um Zeit und Kosten zu sparen. So können durch exakte Definition der ZIELGRÖßEN, Identifikation der EINFLUSSGRÖßEN und geeignete Einstellung der STEUERGRÖßEN die zu testenden qualitativen oder quantitativen FAKTOREN auf ihren FAKTORSTUFEN geprüft, dabei mögliche STÖRGRÖßEN ermittelt und deren Einfluss auf die ZIELGRÖßE statistisch aus den Versuchsergebnissen getilgt werden. Demgegenüber stehen die meist zeitaufwendigeren und teureren Methoden VERSUCH UND IRRTUM (TRIAL AND ERROR) und EIN FAKTOR NACH DEM ANDEREN (ONE-FACTOR-AT-A-TIME, OFAT).

ZIELGRÖßEN beschreiben die Versuchsergebnisse, die es im Rahmen der Versuchsreihe zu optimieren gilt. Die EINFLUSSGRÖßEN beeinflussen möglicherweise die Versuchsergebnisse, also die ZIELGRÖßEN, und lassen sich in STEUER- und STÖRGRÖßEN unterteilen. Die STEUERGRÖßEN können beispielsweise konstruktiv oder durch Einstellen neuer Prozessparameter auf gewünschte Werte eingestellt werden, sodass sie als kontrollierbare EINFLUSSGRÖßEN zu betrachten sind. Dementsprechend sind STÖRGRÖßEN schlechte oder (aus technischen oder Kostengründen) nicht veränderbare EINFLUSSGRÖßEN, wie Temperaturschwankungen der Umgebung, Inhomogenitäten oder andere, nicht oder schwer erfassbare Schwankungen, die die ZIELGRÖßE beeinflussen. FAKTOREN stellen ebenfalls EINFLUSSGRÖßEN dar, die jedoch durch gezielte Variation zur Optimierung der ZIELGRÖßE beitragen sollen. Diese Variation wird als FAKTORSTUFEN definiert. Beispielsweise kann in einem thermischen Prozess ein FAKTOR die Temperatur sein. Dann wären die FAKTORSTUFEN beispielsweise eine niedrigere, eine höhere und die unveränderte Temperatur. Der FAKTOR hätte in diesem Beispiel also drei FAKTORSTUFEN, die im Rahmen der Versuchsreihe mit weiteren FAKTORSTUFEN anderer FAKTOREN auf ein optimales Ergebnis, also ZIELGRÖßE, geprüft werden. Die FAKTOREN müssen jedoch keinesfalls nur quantitativer Natur sein. Auch besteht die Möglichkeit, qualitative FAKTOREN in die Untersuchung mitaufzunehmen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn ein Bauteil bei der Versuchsreihe einerseits mitgetestet oder andererseits weggelassen wird. (Kleppmann, 2016)

Vor Beginn der eigentlichen Versuchsplanung muss die Ausgangssituation bekannt sein. Hierzu gehört die Klärung, welchen Umfang die Versuchsreihe besitzt und welche Ressourcen dafür zur Verfügung stehen. Ebenso muss das Ziel der Versuchsreihe definiert sein. Hierdurch wird bereits die ZIELGRÖßE bestimmt. Mögliche FAKTOREN und ihre FAKTORSTUFEN sollten ebenfalls bekannt sein und, je nach gewünschtem Umfang und Ressourcenaufwand, abgeprüft werden oder als STEUERGRÖßE konstant gehalten werden. Im selben Schritt sollte durch die Vorgabe des Umfangs und der Ressourcen auch die Anzahl der einzelnen FAKTORSTUFEN festgelegt werden, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Versuchsplanung und den Versuchsumfang ausüben. Wenn bereits in der Situationsanalyse bekannt ist, welche STÖRGRÖßEN auftreten könnten, sollten entsprechende Maßnahmen in der Versuchsdurchführung eingeplant werden. Die optimale Lage des Mittelwertes und tolerierbare Schwankungen der ZIELGRÖßE müssen ebenfalls bereits in der Versuchsplanung festgelegt werden. Hierdurch wird gewährleistet, dass das Untersuchungsziel stets zielführend verfolgt werden kann. Neben den Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung der STÖRGRÖßEN sollten auch alle weiteren Versuchsparameter durch technische, prozesstechnische oder organisatorische Maßnahmen so eingestellt werden, dass während der Versuchsdurchführung die

Streuung möglichst gering und die Robustheit möglichst hoch bleibt. Robustheit bedeutet hier, dass der Versuch beziehungsweise das Ergebnis möglichst wenig von STÖRGRÖßEN beeinflusst wird (Kleppmann, 2016). Sind diese Vorbereitungen getroffen, können Nullhypothesen aufgestellt werden. Diese werden adversativ zu den eigentlich aufgestellten Hypothesen ‚Mit Faktorstufe A wird das Produkt/der Prozess signifikant verbessert‘ aufgestellt. Die Nullhypothese würde in diesem Beispiel dann lauten: ‚Mit Faktorstufe A wird das Produkt/der Prozess signifikant verschlechtert‘. Dies ist nötig, da im Grundgedanken statistischer Tests von R.A. FISHER (1935) eine Hypothese niemals bestätigt, sondern nur verworfen werden kann (Siebertz, van Bebber & Hochkirchen, 2017).

Im Folgenden soll aufgrund des Umfangs der Methode der statistischen Versuchsplanung nur der 2^k -vollfaktorielle Versuchsplan kurz erläutert werden. Eine umfangreiche Erläuterung zur statistischen Versuchsplanung erfolgt bei Siebertz et al. (2017) und eine praxisorientierte Erläuterung mit begleitenden Beispielen nimmt Kleppmann (2016) vor. Hier werden beispielsweise auch $2k$ -teilkfaktorielle und mehr- oder gemischtstufige voll- beziehungsweise teilkfaktorielle Versuchspläne und Response Surface Designs, also Versuchspläne für nichtlineare Zusammenhänge, sowie der vorgestellte 2^k -vollfaktorielle Versuchsplan näher erläutert.

Ein 2^k -vollfaktorieller Versuchsplan ist ein Versuchsplan mit k Faktoren mit jeweils zwei Stufen. Die Faktorstufen werden in der Regel codiert mit +1 und -1 als obere und untere Stufe dargestellt. Der Vorteil des 2^k -vollfaktorieller Versuchsplans beispielsweise gegenüber einem mehrstufigen Design liegt darin, dass pro Faktor weniger Teilversuche erforderlich sind. Andererseits ist er aufwendiger als ein 2^k -teilkfaktorieller Versuchsplan, aber dennoch empfehlenswert, wenn aufgrund bekannter Störgrößen, wie beispielsweise Inhomogenitäten der untersuchten Materialien, die erwartete Robustheit niedriger ist. (Frank, 2019)

Für das folgende Beispiel wird ein 2^3 -vollfaktorieller Versuchsplan erstellt, also ein Versuchsplan mit drei Faktoren zu jeweils zwei Stufen. Zur Bestimmung von linearen Abhängigkeiten wird ein Center Point eingeführt. Eine Replikation und Randomisierung der Versuche ist für dieses Beispiel nicht vorgesehen. Vor Beginn der Versuche muss ein Signifikanzniveau α , meist 1 % – 5 %, festgelegt werden, das die Wahrscheinlichkeit beschreibt, ob ein Effekt nur zufällig eintritt. Zusätzlich sollte ein Konfidenzintervall festgelegt werden. Dieses liegt in vielen technischen Anwendungen bei 95 % – 99 %. Abbildung 2.29 zeigt die grafische Darstellung des 2^3 -vollfaktoriellen Versuchsplans mit den Faktoren A, B und C sowie deren dazugehörigen Stufen 1 beziehungsweise 2 im Index. Ebenfalls eingezeichnet ist der Center Point, mit dem geprüft werden kann, ob die Stufen einen linearen Einfluss auf die ZIELGRÖßE haben.

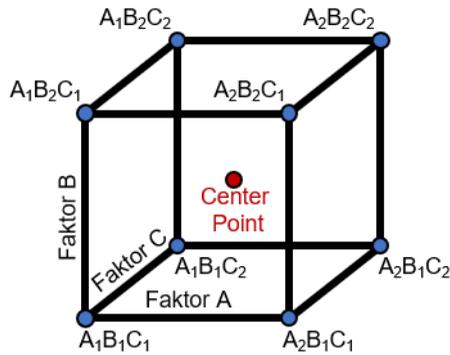


Abbildung 2.29: Grafische Darstellung des 2³-vollfaktoriellen Versuchsplans mit den Faktoren A, B und C und den jeweiligen Stufen in den Indizes sowie ein Center-Point-Versuch (Frank, 2019)

In Tabelle 2 ist der ausformulierte Versuchsplan der acht nötigen Versuche mit einem Center-Point-Versuch erkennbar. Bei diesem werden die Faktoren statt auf höchster und niedrigster Faktorstufe auf eine mittlere Faktorstufe eingestellt.

Tabelle 2: Beispielhafter nicht randomisierter 2³-Versuchsplan mit Center-Point-Versuch

Versuch	A	B	C
$A_1B_1C_1$	-1	-1	-1
$A_2B_1C_1$	+1	-1	-1
$A_1B_2C_1$	-1	+1	-1
$A_2B_2C_1$	+1	+1	-1
$A_1B_1C_2$	-1	-1	+1
$A_2B_1C_2$	+1	-1	+1
$A_1B_2C_2$	-1	+1	+1
$A_2B_2C_2$	+1	+1	+1
Center Point	0	0	0

Das mathematische Modell in diesem Beispiel kann über eine lineare Regressionsgleichung dargestellt werden. Gleichung 2-10 zeigt die lineare Regressionsgleichung für dieses Beispiel mit \bar{Y} als Mittelwert über alle Versuche und den Koeffizienten b_x , die den Effekt des jeweiligen Faktors zum Mittelwert \bar{Y} angeben.

$$Y_p = \bar{Y} + b_1 \cdot A + b_2 \cdot B + b_3 \cdot C + b_4 \cdot (A \cdot B) + b_5 \cdot (A \cdot C) + b_6 \cdot (B \cdot C) + b_7 \cdot (A \cdot B \cdot C) \quad 2-10$$

Die Koeffizienten b_x lassen sich über die Methode der KLEINSTEN FEHLERQUADRATE berechnen (Siebertz et al., 2017). Die Terme b_4 , b_5 und b_6 stellen die Effekte der Zweifachwechselwirkungen, also die Effekte der Kombination eines Faktors mit einem anderen, dar. Der Term b_7 kennzeichnet in diesem Beispiel die Dreifach-Wechselwirkung.

Zur Überprüfung des Modells gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt zum Beispiel an, wie gut das mathematische Modell den Daten angepasst ist. Berechnet wird dies aus dem Verhältnis der Summe der quadrierten Fehler, also Abweichungen, die durch das Modell nicht erklärt werden können, zur Gesamtsumme der Quadrate, also der Gesamtstreuung im Modell. Ein hohes Bestimmtheitsmaß R^2 spiegelt dabei eine hohe Modellgüte wider. Die Erstellung eines Wahrscheinlichkeitsnetzes zur Normalverteilung kann ebenfalls Aufschluss darüber geben, ob die Stichproben des Versuchs die Merkmale einer Normalverteilung aufweisen. Dabei handelt es sich um ein grafisches Verfahren, in dem bestimmt wird, ob die Messwerte, angepasst mit einer empirischen Verteilungsfunktion, auf einer Geraden der Normalverteilung liegen. (Kleppmann, 2016)

Auch wenn die Einflüsse der STEUER- und STÖRGRÖßEN auf ein Minimum reduziert werden können, entstehen im experimentellen Versuch Streuungen zwischen den einzelnen Messwerten einer Versuchsreihe. Möglichkeiten für den Nachweis eines signifikanten Effektes trotz der Streuung sind der p-Wert-Vergleich oder die Lage des Messwertes im Konfidenzintervalls der Referenz. Beim p-Wert-Vergleich werden die Signifikanzwerte der einzelnen Faktorstufen oder der Wechselwirkungen mit dem Signifikanzwert α des Modells verglichen. Ist der p-Wert einer Faktorstufe oder einer Wechselwirkung größer als der Signifikanzwert, kann der Effekt der Faktorstufe als wahrscheinlich nicht signifikant beschrieben werden. Je größer die Differenz zwischen p-Wert und Signifikanzniveau ist, desto unwahrscheinlicher ist die Signifikanz des entsprechenden Faktors. Mit der Lage des Messwertes einer Faktorstufe im Konfidenzintervall des Referenzversuches kann davon ausgegangen werden, dass es sich zu hoher Wahrscheinlichkeit nicht um einen Effekt, sondern um eine Streuung des Messwertes, also einen nicht signifikanten Effekt, handelt. Je nach Wahl des Konfidenzintervalls beeinflusst dies auch die Wahrscheinlichkeit der

Aussage über einen signifikanten oder nicht signifikanten Effekt. Werden bereits in der ersten Regressionsgleichung nicht signifikante Effekte identifiziert, können diese Faktorstufen oder Wechselwirkungen aus dem Modell entfernt werden. Dieser Vorgang wird als Anpassen des Modells oder Fitten bezeichnet. Beim Fitten eines Regressionsmodells sinkt das Bestimmtheitsmaß R^2 und das Konfidenzintervall wird konkretisiert. Diese Anpassungen an der Regressionsgleichungen werden vorgenommen, bis das Modell nur noch signifikante Effekte aufweist. Die Stärke der Effekte kann nun mit der angepassten Regressionsgleichung gegenüber dem Mittelwert der Versuchsreihe quantitativ bewertet werden. Anhand dieser lässt sich das Produkt oder der Prozess schließlich optimieren. (Kleppmann, 2016; Siebertz et al., 2017)

2.7 Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung

Verbundanker nehmen im Bereich der Befestigungstechnik eine zentrale Rolle ein. Sie besitzen im Vergleich zu anderen Befestigungsmitteln spezielle Eigenschaften, wie beispielsweise die Möglichkeit einer Installation ohne das Einbringen von Spannungen in den Untergrund oder die Montagemöglichkeit trotz geringer Achs- und Randabstände. Dies kombinieren Verbundanker bei gleichzeitigen hohen Tragfähigkeiten in verschiedene Baustoffe. Trotz ihrer vergleichsweise aufwendigeren Installation durch Reinigungs- und Applikationsvorschriften sind sie, auch dank ihrer bautechnischen Bewertung (ehemals Zulassung), aus der Befestigungstechnik nicht mehr wegzudenken. Mit modernen Befestigungsmitteln stellt oftmals der Untergrund das schwächste Glied in der Befestigungssituation dar und doch können unter Umständen, aufgrund ihrer duroplastischen Eigenschaften, auch Verbundanker über ihre Lebensdauer von 50 Jahren oder mehr partiell ihre Tragfähigkeit verlieren. Aus diesem Grund wurden für Verbundankersysteme gesonderte Berechnungen in der Bemessung und spezielle Untersuchungen für ihre Bewertung entworfen.

Die Alterung der Bausubstanz von Ingenieurbauwerken, ein wesentliches Einsatzgebiet dieser Befestigungsmittel, beschreibt ein umfangreich untersuchtes Gebiet in der Forschung. Auch herrschen raue Umgebungen und die Verbundanker sind verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt. In Anbetracht dessen müssen sie bei der gesetzlich vorgeschriebenen Prüfung von Ingenieurbauwerken ebenfalls kontrolliert werden. Dies ist jedoch oft mit großem Aufwand verbunden und nicht immer ausreichend, wie durch die Schadensfälle im Fort-Point-Channel-Tunnel und im Sasago-Tunnel deutlich wird. Hier befanden sich die Verbundanker an schwer oder nicht zugänglichen Positionen. Eine Kontrolle war hier deshalb nur schwer möglich,

sonst wäre möglicherweise rechtzeitig erkannt worden, dass es sich bei diesen Verbundankern um bautechnisch nicht zugelassene beziehungsweise falsch installierte Systeme gehandelt hat. Durch die Anwendung dieser Systeme sowie die Bemessungs- und Bewertungsvorschriften wird deutlich, dass ein Großteil der Befestigungsmittel, Verbundanker eingeschlossen, durch die axiale Verschiebung, das heißt durch die Versagensart ‚Herausziehen‘, versagen. Daher scheint die Messung der axialen Verschiebung des chemischen Befestigungsmittels aus dem Bohrloch heraus die einfachste und wirtschaftlichste Methode, um den Zustand einer Befestigungssituation kontinuierlich zu überwachen. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der großen Toleranzfelder im Bauwesen und der aufwendigen Kalibrierung eine Absolutwertmessung nicht möglich beziehungsweise nur mit hohem Aufwand realisierbar wäre. Hier eignet sich indes die Relativwertmessung, mit der die relative Veränderung zum Neuzustand, also dem Zustand direkt nach Montage, aufgenommen und quantifiziert werden kann.

Um die Wartung solch großer und umfangreicher Bauwerke wie Ingenieurbauwerke zukünftig zu erleichtern und Schadensfälle frühzeitig registrieren zu können, werden seit mehreren Jahren viele Bauwerke, vor allem Ingenieurbauwerke, mit individuell angepasster Sensorik ausgestattet. So soll in zweierlei Hinsicht der finanzielle Aufwand reduziert werden. Zum einen soll der teure Vor-Ort-Wartungsaufwand verkürzt werden und zum anderen sollen Reparaturmaßnahmen eingeleitet werden, bevor Folgeschäden die Instandsetzungskosten in die Höhe treiben. Gemeinsam mit dem in den letzten Jahren stetig weiterentwickelten BIM besteht die Möglichkeit, zukünftig ein Gebäude und seinen Zustand komplett digital in einem sogenannten DIGITALEN ZWILLING abzubilden. Hierfür sind jedoch Informationen zu sämtlichen, vor allem statisch notwendigen Bauteilen nötig. Um Verbundanker in solche DIGITALEN ZWILLINGE einzubinden und Informationen zu ihren aktuellen Befestigungssituationen liefern zu können, gibt es im Stand der Technik bereits ein breites Spektrum geeigneter Messprinzipien auf Basis der Weg- oder Abstandsmessung, mit denen der Versagensfall ‚axiale Verschiebung‘ gemessen werden könnte.

Die Integration von Sensoren in Befestigungsmittel kann, wie dargestellt, Wartungsaufwände reduzieren und gegebenenfalls sogar schwerwiegende Schäden an Strukturen verhindern und somit Menschenleben schützen. Solche Systeme sind bisher jedoch nicht erhältlich und dementsprechend nicht untersucht worden. Vor einer Integration axialer Messprinzipien in Verbundankersysteme ist es zwingend erforderlich, die kontinuierlichen Versagensmechanismen zu erkennen und zu analysieren. Die bisherigen Untersuchungen konnten bislang entweder die Lokalisierung der Schädigungen oder den zeitlichen Ablauf der Versagensmechanismen darstellen, jedoch nicht beides in ausreichender Auflösung kombiniert. Auch ist unklar, wie ein solches Messprinzip integriert werden kann, ohne die Primärfunktion des

Befestigungsmittels zu beeinflussen. Anhand der Vorstellung eines Auszugs der Bewertungsrichtlinien von chemischen Verbundankersystemen wird ersichtlich, dass eine bautechnische Bewertung ein sehr kosten- und zeitintensives Verfahren darstellt. Aus diesem Grund ist es hilfreich, dass mit Methoden zur Modellbildung, wie der Eliminierung von Beobachtungsbarrieren, dem SCHUBVIERECK, dem C&C²-ANSATZ und der STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG, die nötigen Werkzeuge zur Integration sensorischer Elemente in Verbundankersysteme zur Verfügung stehen

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Motivation und die Zielsetzung dieser Arbeit präsentiert. Hierfür dient der Stand der Forschung, um die Forschungslücke zu identifizieren und daraus eine zentrale Forschungsfrage abzuleiten.

3.1 Motivation

Die kontinuierliche Bauwerksüberwachung einzelner Komponenten oder der Tragstruktur von Bauwerken, insbesondere von Ingenieurbauwerken, gewinnt in der Forschung zunehmend an Bedeutung. Mit der Einführung des DIGITALEN ZWILLINGS in das BIM, dem Überbegriff für die Digitalisierung der Baubranche, erweitert sich das Spektrum hin zu einem gesamtheitlichen LIFE-CYCLE-MANAGEMENT von Gebäuden. Diese DIGITALEN ZWILLINGE sollen zukünftig nicht nur bei Planung und Bau, sondern auch bei der Umnutzung, bei Umbauten bis hin zum Rückbau und der Entsorgung der Baustoffe eines Gebäudes helfen. Gerade für Änderungen an der Tragstruktur dieser Gebäude sind Kenntnisse und Änderungen sämtlicher Lastenleitungen, wie beispielsweise durch Befestigungsmittel, notwendig. Die Kenntnisse über Zustände, Änderungen und Resttragfähigkeiten solcher Befestigungspunkte könnten zukünftig die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Gebäuden wesentlich verbessern.

Gerade an Beispielen, wie den Unglücken in Boston oder Sasago, lässt sich die Notwendigkeit einer sensorischen Überwachung von tragenden Elementen verdeutlichen. Bautechnisch bewertete Produkte sind durch umfassende experimentelle Untersuchungen, statistische Verfahren und die Anwendung von Sicherheitsfaktoren bei richtiger Anwendung als sehr sicher einzustufen. Jedoch kann durch bautechnische Bewertungen, Bemessungsrichtlinien und Wartungsnormen allein beispielsweise menschliches Versagen durch Installationsfehler, Planungsmängel oder Bemessungsfehler nicht vollständig verhindert werden. Diese Vorgaben bieten jedoch durch Expertisen, Gutachten und Prüfungen ein ausgezeichnetes Framework, das durch eine kontinuierliche Zustandsüberwachung, beispielsweise von Befestigungselementen, erweitert werden kann, wodurch die Sicherheit noch weiter gesteigert wird.

Verbundanker stellen durch ihre Wirkweise und Tragfähigkeit häufig verwendete Befestigungsmittel dar. Die Versagensart im zentrischen Zug ist in der Regel bei Einzelverankerungen der Stahlbruch und bei Mehrfachbefestigungen oder randnahen Befestigungen der ‚Betonausbruch‘ oder das ‚Herausziehen‘, weshalb viele Re-

ferenzversuche zum Erreichen einer bautechnischen Bewertung in der Bewertungsrichtlinie auf das Verbundversagen ausgelegt sind. Weiterhin kann das in Kapitel 2.2.1.3 vorgestellte Kriechverhalten von Verbundankern über die lange Lebensdauer ein generelles Problem sein. Somit ist ein Hauptversagensgrund, abstrahiert dargestellt, eine relative axiale Bewegung des Verbundankers beziehungsweise des Ankerbolzens (meist Gewindestange) vom Bohrlochgrund weg. Für diese Art von Bewegung liegt im Stand der Technik eine ausreichende Zahl etablierter Messprinzipien vor. Eine Kombination eines solchen Messprinzips und eines Verbundankers ist jedoch noch nicht bekannt. Ein Grund hierfür könnten die nicht ausreichenden Kenntnisse über die kontinuierlichen, also zeitlich konkretisierten und lokalisierten, Versagensmechanismen sein. Diese Kenntnisse sind indes notwendig, um ein Messprinzip in einen solchen Verbundanker integrieren zu können, ohne dessen eigentliche Primärfunktion, also die Bereitstellung der Tragfähigkeit, zu beeinflussen. Zur Analyse der Versagensmechanismen gibt es im Stand der Forschung Beiträge, die sich zum Ziel gesetzt haben, diese näher zu untersuchen. Jedoch ist eine Kombination von konkreter örtlicher und zeitlicher Abbildung dieser in ausreichender Auflösung bislang noch nicht gelungen. Ein weiterer Grund könnte das hohe Maß an Hindernissen durch viele Ungewissheiten im Befestigungssystem Verbundanker sein, weshalb noch kein Sensor mit einem dieser Messprinzipien integriert wurde. Zu diesen Ungewissheiten zählt unter anderem der exakte Kraftfluss vom zu befestigenden Element über den Stahlbolzen in den Mörtel und schließlich in den Beton. Die funktionsrelevanten Wirkflächenpaare sind nur hypothetisch oder indirekt aus Versuchsergebnissen oder Simulationen betrachtet worden. Hinzu kommen weitere Faktoren, wie das Langzeitverhalten oder das Verhalten unter rauen Umgebungsbedingungen, denen ein solcher Verbundanker ausgesetzt ist.

3.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mechatronischen Verbundankers mit integriertem Verschiebungssensor auf Basis eines bautechnisch bewerteten Verbundankersystems. Hierfür müssen zuerst die Versagensmechanismen des bestehenden Verbundankersystems verstanden werden. Um dies zu erreichen, wird mit Hilfe von Modellbildungsmethoden ein Ersatzmodell in Form eines Prüfstandes gebildet, an dem Versuche durchgeführt werden können, um die Beobachtungsbarriere ‚Beton‘ zu überwinden. Die aus den validierten Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend auf den zu entwickelnden Verbundanker, das Originalsystem, rücktransformiert.

Das Vorgehen zur Entwicklung dieses mechatronischen Verbundankers kann als neue Entwicklungsmethode betrachtet werden, die sich aus den angewandten Schritten zusammensetzt, die sich in dieser Arbeit als zielführend herausgestellt haben. Ein weiteres Ziel liegt somit in der Beschreibung des methodischen Vorgehens

und der Reflektion, ob diese Entwicklungsmethode auch auf andere bautechnisch bewertete Befestigungsmittel anwendbar ist.

Die Zielsetzung dieser Arbeit lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Ziel dieser Arbeit ist die Mechatronisierung eines bautechnisch bewerteten Verbundankersystems auf Vinylesterbasis, ohne dessen Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu verschlechtern. Durch die Mechatronisierung des Verbundankers soll die Befestigungssituation kontinuierlich überwachbar sein.

Ein weiteres Ziel besteht in der begleitenden Beschreibung der hierbei angewendeten neuen Entwicklungsmethode sowie deren Reflektion zur Anwendung auf andere bautechnisch bewertete Befestigungssysteme.

Hierfür müssen Versagensmechanismen, Designräume und geeignete Messprinzipien identifiziert und verifiziert werden.

Der Begriff der Mechatronisierung orientiert sich hierbei an der ursprünglichen Prägung von Ko Kikuchi (1969) aus der Kombination von mechanischen mit elektrischen Komponenten, die 1972 als Marke ‚Mechatronics‘ von der japanischen Patentorganisation geschützt wurde (Lüdeke, 2016).

Aus dieser Zielsetzung ergibt sich die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit, die über mehrere Teilziele, also die einzelnen Schritte der Entwicklungsmethode, beantwortet werden soll:

Ist es möglich, ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungsmittel mit einer geeigneten Entwicklungsmethode für die kontinuierliche Überwachung der Befestigungssituation zu mechatronisieren, ohne dabei seine Primärfunktion zu verschlechtern?

4 Vorgehensweise und Forschungsdesign

In Kapitel 3 wurde mit der Formulierung der zentrale Forschungsfrage das Ziel dieser Arbeit festgesetzt. Für die Beantwortung dieser Frage ist es indes notwendig, diese in Teilforschungsfragen aufzuteilen. Diese müssen mithilfe spezifischer zur Problemlösung ausgewählter Methoden sukzessive beantwortet werden, um alle nötigen Voraussetzungen zur Beantwortung der übergeordneten zentralen Forschungsfrage zu schaffen.

Das Vorgehen dieser Arbeit ist an den methodischen Ansatz zum Erkenntnisgewinn nach Matthiesen (2021) angelehnt. Dabei wird ein bestehendes etabliertes System über ein Ersatzsystem mittels Modellbildung und experimentellem Nachweis in ein optimiertes System, in diesem Fall ein mechatronisiertes System, überführt.

4.1 Forschungsfragen

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel 3 erläutert und im Stand der Forschung dargestellt, liegt der Bedarf eines mechatronisierten chemischen Befestigungsmittels nahe. Dennoch ist trotz der vorhandenen Technologie kein System erhältlich, das genau diesen Bedarf abdeckt. Somit ergibt sich für diese Arbeit folgende zentrale Forschungsfrage:

Ist es möglich, ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungsmittel mit einer geeigneten Entwicklungsmethode für die kontinuierliche Überwachung der Befestigungssituation zu mechatronisieren, ohne dabei seine Primärfunktion zu verschlechtern?

Um diese umfangreiche Forschungsfrage beantworten zu können, bedarf es eines sukzessiven Vorgehens. Daher unterteilt sich die zentrale Forschungsfrage in drei Teilforschungsfragen, die methodisch unterstützt in dieser Arbeit beantwortet werden, um letztendlich die zentrale Forschungsfrage beantworten zu können.

Da die bestehende Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ des Verbundankers nicht verändert werden soll, muss herausgefunden werden, welche Gestaltungsbereiche des Verbundankers an der Primärfunktion mitwirken und welche nicht. Flächen, die bisher nicht an der Erfüllung der Primärfunktion beteiligt sind, könnten

einen möglichen Designraum für die zusätzlichen mechatronischen Funktionen darstellen. Aus diesem Grund muss in einem ersten Schritt herausgefunden werden, wo sich diese nichtfunktionsrelevanten Flächen, also Begrenzungsflächen, am Verbundanker befinden. Daraus ergibt sich die erste Teilforschungsfrage:

1. Können durch einen In Situ-Erkenntnisprüfstand die Versagensvorgänge chemischer Befestigungsmittel auf Vinylesterbasis analysiert werden und lassen sich dadurch Begrenzungsflächen identifizieren?

Dies geschieht über die Beobachtung des Versagens des Verbundankers, also des Auflösens der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘. Dafür müssen jedoch vorher die Versagensmechanismen identifiziert werden. Für die Identifikation wird ein In Situ-Erkenntnisprüfstand benötigt, anhand dessen analysiert werden soll, welche Mechanismen für das Versagen eine Rolle spielen, wie diese entstehen und wie der zeitliche Verlauf des Versagensvorgangs zu gliedern ist. Hierdurch sollen als Ergebnis dieser Teilforschungsfrage potenzielle Begrenzungsflächen identifiziert werden.

Daran schließt sich die zweite Teilforschungsfrage an, die die Ergebnisse der ersten Teilforschungsfrage aufgreift:

2. Können in ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungselement auf Vinylesterbasis zusätzliche Gestaltelemente eingebracht werden, ohne dabei die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen?

Diese Teilforschungsfrage soll mit der statistischen Methode DOE untersucht werden. Hierfür werden mittels Rapid-Prototyping-Verfahren bewusst die potenziellen Begrenzungsflächen und Wirkflächenpaare durch das Einbringen neuer Elemente überdeckt und die vermuteten Leitstützstrukturen durch Elemente geringer Festigkeit ersetzt. Das Ergebnis dieser Teilforschungsfrage ist die Identifikation von Designräumen an funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen, die bei der Erfüllung der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ keine Rolle spielen.

Die dritte und letzte Teilforschungsfrage adressiert die *Synthese* der Ergebnisse aus der vorangegangenen zweiten Teilforschungsfrage:

3. Können in einem chemischen Befestigungsmittel integrierte Sensoren zur Zustandsüberwachung der Befestigungssituation genutzt werden?

Hierfür wird basierend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und den Ergebnissen der Schädigungsmechanismen im zentrischen Zug, die kontinuierlich über die Lebensdauer voranschreiten, ein geeignetes Messprinzip ausgewählt, das als speziell entworfenes Sensorelement im identifizierten Designraum integriert und experimentell verifiziert wird. Das Ergebnis dieser Teilforschungsfrage ist ein verifizierter mechatronisierter Verbundanker zur kontinuierlichen Überwachung von Befestigungssituationen auf Vinylesterbasis.

Anhand der Bearbeitung der drei Teilforschungsfragen kann abschließend die zentrale Forschungsfrage beantwortet werden. Die in diesen Teilforschungsfragen entwickelten Modelle, Versuchsergebnisse und Prototypen sind die Ergebnisse der übergeordneten Forschungsfrage.

4.2 Forschungsvorgehen

Wie aus der Motivation und der Zielsetzung ersichtlich, fehlen viele für die Mechatronisierung erforderliche Kenntnisse, etwa zu den kontinuierlichen Versagensvorgängen beim zentrischen Auszug eines Verbundankers oder möglichen Designräumen von Verbundankersystemen, um Elemente für neue Funktionen einzubringen. Um diese Kenntnisse zu generieren, werden speziell hierfür Systeme konstruiert und Versuche mit diesen durchgeführt. Diese extra konstruierten Systeme beschreiben mittels Modellbildungsmethoden erstellte Ersatzsysteme. Die Abbildung 4.1 fasst das gesamte Forschungsvorgehen der vorliegenden Arbeit grafisch zusammen.

Die erste Teilforschungsfrage bildet die *Analyse* des Systems. So wird zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage ein In Situ-Erkenntnisprüfstand entwickelt, anhand dessen die Beobachtungsbarriere ‚Beton‘ überwunden wird. Durch die *Analyse* des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs (GFZ) wird das notwendige Systemverständnis über die wirkenden Kraftvektoren und die funktionsrelevanten Wirkflächenpaare sowie nicht funktionsrelevante Begrenzungsflächen erzeugt. Hierdurch ergeben sich für die erste Teilforschungsfrage als Ergebnisse mögliche Designräume in den Bereichen um die Begrenzungsflächen sowie die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen beim zentrischen Auszug. Diese Ergebnisse bilden die Voraussetzung für die Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage.

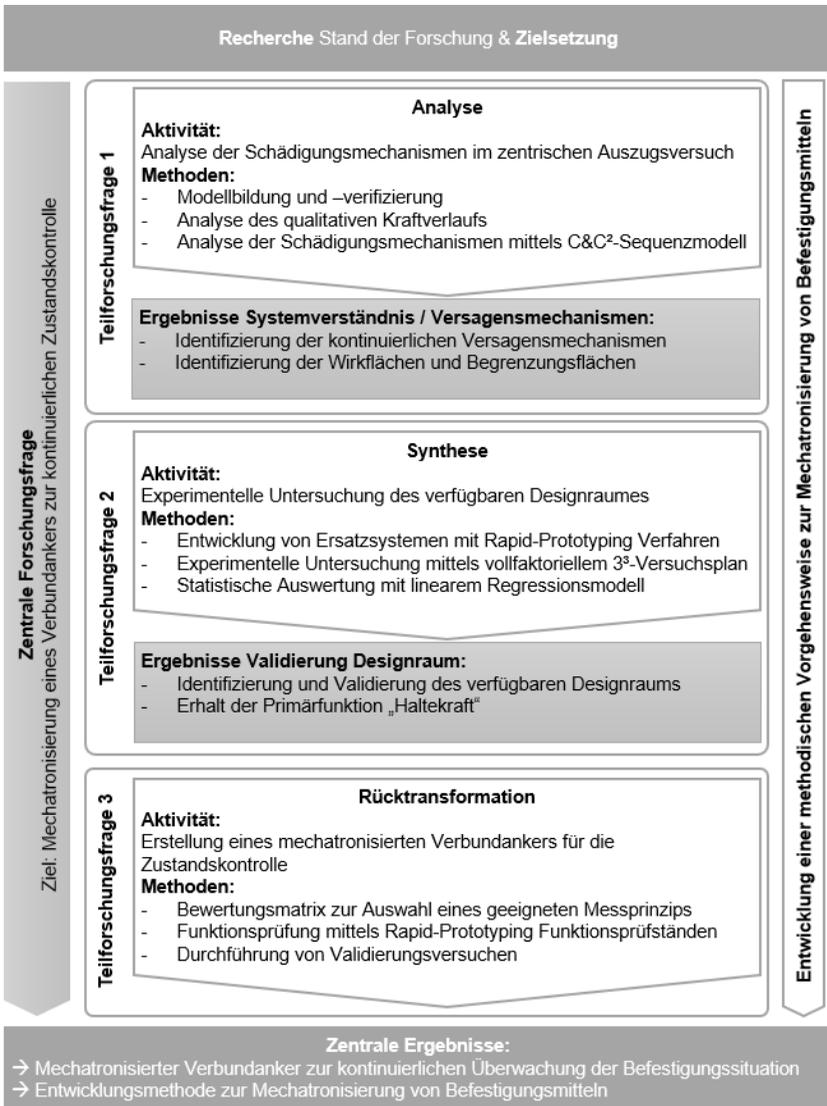


Abbildung 4.1: Forschungsvorgehen

Die zweite Teilforschungsfrage bildet die *Synthese* der Erkenntnisse. Hierfür werden in die vorher identifizierten Designräume Gestaltelemente eingebracht. Diese werden mittels Rapid-Prototyping-Verfahren erstellt und in konventionelle Verbundankersysteme eingebracht. Um deren Effekt auf die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu quantifizieren, wird mittels statistischer Versuchsplanung ein Versuchsplan und mit den Ergebnissen dieses Versuchsplans ein Regressionsmodell erstellt. Als Ergebnis hieraus lassen sich die vorher identifizierten Designräume validieren, in die sensorische Gestaltelemente integriert werden können, ohne die Primärfunktion zu beeinflussen. Diese Ergebnisse bilden die Basis für die dritte Teilforschungsfrage.

Die dritte Teilforschungsfrage ist die *Rücktransformation* der gesammelten Erkenntnisse. Hierfür wird über eine Bewertungsmatrix ein geeignetes Messprinzip ausgewählt, konstruktiv im vorhandenen Designraum umgesetzt und über Versuche auf die Funktion validiert. Die Ergebnisse dieser Teilforschungsfrage sind Funktionsprototypen zweier verschiedener mechatronisierter Verbundanker mit sensorischer Funktion und beantworten schließlich auch die zentrale Forschungsfrage.

Anhand des dargestellten Forschungsvorgehens soll eine methodische Vorgehensweise zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln mithilfe von Erkenntnis-Ersatzsystemen entwickelt werden. Diese neue Entwicklungsmethode ASTRA (*ANALYSE-SYNTHESE-TRANSFORMATION*) gliedert sich in die drei Entwicklungsschritte *Analyse*, *Synthese* und *Rücktransformation* und wird begleitend zur Beantwortung der drei Teilforschungsfragen am Beispiel eines Verbundankers entwickelt. Anschließend soll diese Entwicklungsmethode auf Befestigungsmittel allgemein abstrahiert und diskutiert werden. Die Entwicklung des methodischen Vorgehens ist in Abbildung 4.1 rechts, über die Bearbeitung der drei Teilforschungsfragen verlaufend, dargestellt.

5 Versagensmechanismen und Gestalt-Funktion-Zusammenhänge eines Verbundankers

Dieses Kapitel enthält Ergebnisse und Erkenntnisse, die aus der Veröffentlichung „Experimentelle Untersuchung von Versagensvorgängen an Verbundankern mit einem In-Situ-Versuchsmodell“ (Horn, Hölz, Schwabe & Matthiesen, 2020) und der durch den Autor co-betreuten T2000-Projektarbeit „Ermittlung der Wirkflächenpaare einer chemischen Verankerung mit dem C&C²-Ansatz (Contact&Channel-Ansatz) und deren Änderung im Auszugsversuch“ (Schwabe, 2018) stammen. Zur Übersichtlichkeit werden Zitate aus diesen Vorveröffentlichungen nicht gesondert gekennzeichnet.

Zur Identifikation möglicher Positionen für sensorische Elemente müssen die kontinuierlichen Versagensmechanismen des Systems Verbundanker auf Vinylesterbasis analysiert und verstanden werden. Die bereits vorgestellte (EAD 330499-00-0601) BONDED FASTENERS FOR USE IN CONCRETE zeigt exemplarisch, dass für das Erreichen einer Bewertung eines Befestigungsmittels primär die Haltewerte, vor allem im zentrischen Zug, ausschlaggebend sind (siehe Unterkapitel 2.2.1). Bei Verbundankern im Speziellen ist auch das Kriechverhalten des Mörtels unter Dauerlast und Temperatureinwirkung ein ausschlaggebender Faktor, um das Langzeitverhalten vorherzusagen. Besonders nach den bereits erläuterten Schadensfällen von Boston (Rosenker et al., 2007) und Sasago (Shirato, 2014) rückte das Kriechverhalten dieser Systeme in den Vordergrund vieler Forschungsaktivitäten. Aktuelle Untersuchungen und Modellbildungen hierzu sind in Unterkapitel 2.2 dargestellt. Jedoch werden die Systeme auch hier hauptsächlich über das Gesamtbruchbild dieser Verbundanker betrachtet. Die kontinuierlichen Veränderungen des Verbundankers durch die Erhöhung der zentrischen Belastung des Systems, also die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen, werden indes nicht berücksichtigt.

In diesem Kapitel werden die Entwicklung und der Aufbau des In Situ-Erkenntnisprüfstandes zur kontinuierlichen Beobachtung der Schädigungsmechanismen bei steigender zentrischer Last, was im Rahmen dieses Beitrags erarbeitet wurde, vorgestellt. Anhand der Versuche mit diesem In Situ-Erkenntnisprüfstand werden die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen beobachtet. Mit Hilfe der Methode SCHUBVIERECKE nach Mattheck und Bethge (2004) werden die qualitativen Kraftvektoren ermittelt, woraufhin mit dem CONTACT&CHANNEL-ANSATZ (C&C²-A) nach

Matthiesen (2021) CONTACT&CHANNEL-MODELLE (C&C²-MODELLE) mehrerer kontinuierlich ablaufender Schädigungszustände erstellt und über das C&C²-SEQUENZ-MODELL zusammengefasst und beschrieben werden. Mit dem C&C²-SEQUENZMODELL werden die funktionsrelevanten und -irrelevanten Gestaltparameter analysiert, um darauf aufbauend eine Identifikation des verfügbaren Designraums für sensorische Elemente zu ermöglichen.

5.1 Vorstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes

Wie bereits in Unterkapitel 2.2.2 erläutert, haben Pregartner et al. (1998) gezeigt, dass es möglich ist, die Entstehung der Risse durch Schallemissionsmessungen zu detektieren. Die Lokalisierung ist jedoch mit einer Messgenauigkeit von ± 10 mm nicht ausreichend, um die Schädigungsmechanismen zu erklären. Bei dem Modell von Appl (2009) hingegen lassen sich die Risse bei gewünschten Laststufen exakt lokalisieren. Eine kontinuierliche Messung der Rissbildung kann mit diesem Modell allerdings nicht erfolgen, da sich der Versuch nach Erfassen der Risse nicht fortsetzen lässt. Es lassen sich somit nur Momentaufnahmen bei einzelnen Laststufen, also momentane Schädigungszustände, erfassen. Bedingt durch eine relativ hohe Streuung in der Betonzusammensetzung ergibt sich somit für die aussagekräftige Erfassung selbst für wenige Zustände ein hoher Versuchsaufwand.

Für ein besseres Verständnis der kontinuierlichen Versagensmechanismen ist es folglich notwendig, ein Modell in Form eines Prüfstandes zu verwenden, bei dem die Rissentstehung und das Risswachstum kontinuierlich erfasst werden können. Hierfür wird ein In Situ-Erkenntnisprüfstand entwickelt, mit dem die Möglichkeit besteht, diese mittels hochauflösender Kamera zu erfassen.

5.1.1 Erstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes

Mit einem In Situ-Erkenntnisprüfstand können Beobachtungsbarrieren direkt überwunden werden. In diesem Fall stellt der Beton diese Beobachtungsbarriere dar, der, sofern erforderlich, entfernt wird, um die relevanten Funktionselemente eines Verbundankers optisch sichtbar zu machen. Der In Situ-Erkenntnisprüfstand kann dadurch einen Blick direkt auf den Ort des Geschehens der Versagensmechanismen bieten. Der Begriff ‚In Situ‘ (lat. ‚am Ort‘) eignet sich hierfür, da die Mechanismen durch diesen Prüfstand unmittelbar am Ort der Schädigung beobachtet werden können. Mit diesem In Situ-Erkenntnisprüfstand lassen sich die beim zentrischen Auszugsversuch relevanten Schadensmechanismen, wie die Rissentstehung und das Risswachstum, bei dazugehörig wirkender Kraft durch kontinuierliche Beobachtung lokalisieren.

Abbildung 5.1 zeigt den entwickelten In Situ-Erkenntnisprüfstand in schematischer Darstellung mit einer Detailaufnahme des Beobachtungsraumes aus dem realen Versuch mit horizontalen Markierungen, um Risse und Verschiebungen leichter detektieren zu können. Die Grundlage für den In Situ-Erkenntnisprüfstand bildet ein Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm, der nach DIN EN 206 (DIN EN 206:2017-01) gefertigt wird. Die typische Verwendung solcher Würfel ist die Ermittlung der Betondruckfestigkeit größerer Betonelemente mittels zerstörender Prüfung (siehe Unterkapitel 2.1.3). Da es sich bei dem zu betrachtenden System um das Verbundankersystem FIS V 360 S mit FIS A (M12 160 mm, FESTIGKEITSKLASSE 8.8, GALVANISCH VERZINKT der Firma FISCHERWERKE GMBH & CO. KG handelt, kann für die Montage des Systems die dazugehörige Bewertung (ETA-02/0024) verwendet werden. Für die Erstellung des In Situ-Prüfstandes wird zuerst in eine Fläche des Würfels zentrisch ein Loch des Durchmessers $d = 14$ mm mit der gewünschten Verankerungstiefe gebohrt. Die Verankerungstiefe muss laut Bewertung zwischen $h_{ef,min} = 70$ mm und $h_{ef,max} = 240$ mm liegen, wobei hierbei die Bohrlochtiefe h_0 der effektiven Verankerungstiefe h_{ef} entspricht. Zusätzlich müssen für dieses Verbundankersystem ein minimaler Achs- und Randabstand von $s_{min} = c_{min} = 55$ mm und eine Mindestdicke des Betonbauteils von $h_{min} = h_{ef} + 30$ mm (≥ 100 mm) eingehalten werden.

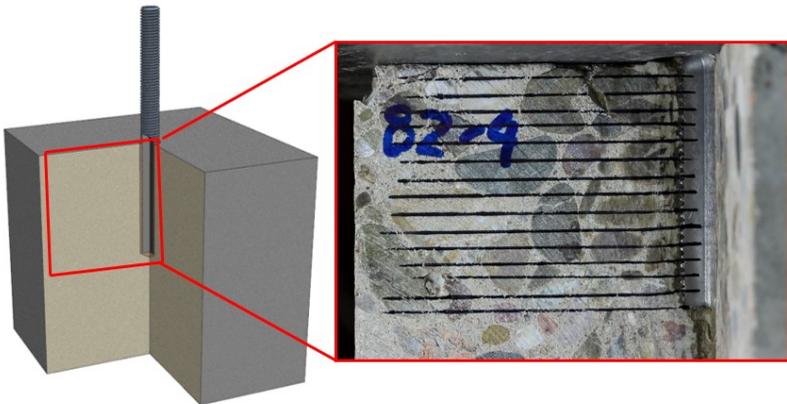


Abbildung 5.1: Darstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Detailaufnahme des Beobachtungsraumes mit Rastermarkierung

Die Bohrung in den Betonwürfel wird mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 50$ mm, also 20 mm unter der angegebenen Verankerungstiefe, festgelegt. Im Hinblick auf

die weitere Präparation des Würfels ist diese Reduzierung notwendig, um ein Spalten des Würfels beim Auszugsversuch mit enger Abstützung zu verhindern. Dies folgt aus der Überlegung, dass durch das Entfernen eines Viertels des Betonprüfkörpers die Spannungen, die beim Auszugsversuch zum Spalten führen können, lokal ansteigen könnten und somit den Würfel zerstören würden. Durch die Kantenlänge der verwendeten Betonwürfel von 150 mm liegt bei einer zentrischen Bohrung der Randabstand zwischen Verbundankerachse und Kante bei 75 mm und damit 20 mm über dem geforderten Abstand. Auch die Mindestdicke des Bauteils, im Fall des In Situ-Prüfstandes von $h_{min,In\ situ} = 80\text{ mm}$, wird durch die Höhe von 150 mm des Würfels mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 50\text{ mm}$ erfüllt.

Die Bohrlochreinigung wird, wie in der Montageanleitung der Bewertung (ETA-02/0024) vorgegeben, mit viermaligem händischem Ausblasen, viermaligem Bürsten und erneutem viermaligem händischem Ausblasen durchgeführt. Die Genauigkeit der Bohrtiefe bei allen Bohrungen, bedingt durch die Ungenauigkeit des Schlagbohrers, liegt bei $\pm 3\text{ mm}$, gemessen an drei Punkten des Bohrlochrands mit einem digitalen Messschieber.

Nach Erstellung des Bohrlochs wird anschließend senkrecht zu zwei angrenzenden Betonwürfeloberflächen mit einer Steintrennmaschine parallel zur Bohrlochachse hin gesägt. Somit wird dem Betonprüfkörper ein Viertel seines Volumens entfernt und es wird ein senkrechter Blick auf die Schnittfläche und die spätere Verbundfläche geschaffen. In Abbildung 5.2 ist der Prüfkörper mit Bohrung und entferntem Viertel zur Generierung der Sichtfläche zu erkennen.



Abbildung 5.2: Betonprüfkörper nach Erstellung des Bohrlochs und anschließendem Aussägen eines Viertels des Würfels

Als Stahlelement wird eine Gewindestange FIS A mit einem M12-Gewinde und einer Länge von 160 mm gewählt. Die ausgewählte Gewindestange besitzt die Festigkeitsklasse 8.8 und ist zum Schutz vor Korrosion galvanisch verzinkt. An dieser wird mittels Fräsen über eine Länge von 50 mm, dem Bohrloch entsprechend, ebenfalls ein Viertel parallel zur Gewindestangenachse spanend entfernt (Abbildung 5.3). Dies ist aus optischen Gründen notwendig, um eine uneingeschränkte Beobachtung der Versagensmechanismen zu ermöglichen.

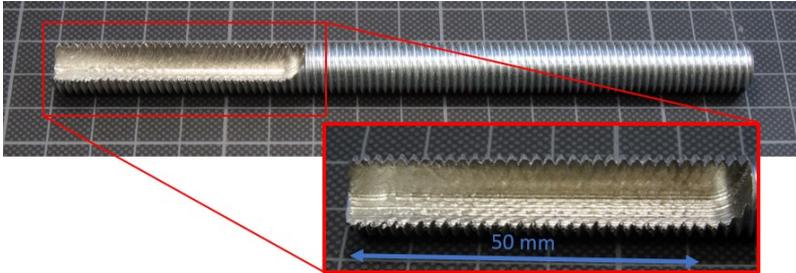


Abbildung 5.3: Präparierte Gewindestange mit entferntem Viertel über eine Länge von 50 mm parallel zur Gewindestangenachse

In das Bohrloch wird eine der Bohrtiefe entsprechende Menge FIS V 360S eingebracht. Durch die Verarbeitungszeit von $t_{work} = 4-5$ min bei Raumtemperatur ist es möglich, die beiden gefrästen Flanken der präparierten Gewindestange ohne Luftinschlüsse an den beiden gesägten Betonflächen jeweils plan auszurichten. Überschüssiges Material wird vorsichtig mit einem staubfreien Tuch entfernt. Der Vinyilestermörtel FIS V benötigt zur Aushärtung eine Mindestzeit von $t_{cure} = 45-60$ min. Nach dieser Zeit können mithilfe eines drehenden Multifunktionswerkzeuges eventuell überflüssige Mörtelreste, die nicht per Tuch entfernt werden konnten, polierend entfernt werden. Gerade im Bereich des Mörtels hin zum Beton beziehungsweise zur präparierten Gewindestange, aber auch im Bereich des im Sichtfeld liegenden Betons ist dies von besonderer Relevanz, um eine ungehinderte Sicht auf den Beobachtungsraum zu gewährleisten. Die gesetzten präparierten Gewindestangen haben nun eine Verankerungstiefe von $50 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. In Abbildung 5.4 ist die in den Betonprüfkörper gesetzte und gereinigte präparierte Gewindestange mit ausgehärtetem Mörtel dargestellt.

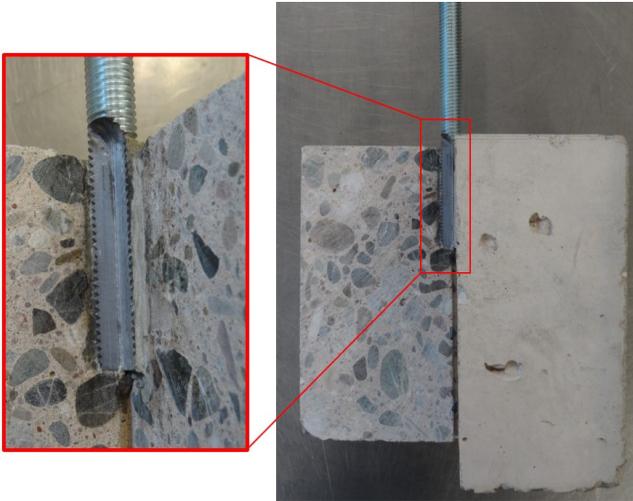


Abbildung 5.4: Eingeklebte und gereinigte Gewindestange in Betonprüfkörper

Für die Gestaltung des Beobachtungsraumes werden verschiedene Varianten geprüft. Die Varianten umfassen zum einen ein Epoxidfenster, das auf den Beobachtungsraum gegossen wird, ein aufgetragenes Rissprüfspray im Verbundbereich, ein aufgezeichnetes Raster auf die Betonschnittfläche und einen unpräparierten Beobachtungsraum.

Die erste Variante des In Situ-Erkenntnisprüfstandes soll mit einem Epoxidsichtfenster versehen werden, um die Sicht auf die Versagensmechanismen freizugeben, ohne den rotationssymmetrischen Verbundspannungsverlauf negativ zu beeinflussen. Bei ersten Versuchen zeigt sich jedoch, dass das Epoxidsichtfenster durch Ablösen und einen sich ändernden Brechungsindex trüb wird, wenn mechanische Spannungen entstehen. Im Folgenden wird die Erstellung des Epoxid-Sichtfensters im Detail erläutert und die Ablösung des Sichtfensters veranschaulicht.

Der Beobachtungsraum soll in dieser ersten Variante mit einem Epoxidharz „EP-GIEßHARZ + HÄRTER ‚WASSERKLAR‘ 300“ der Firma R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH der Stärke 25 mm vergossen werden, um dadurch ein Sichtfenster zum Beobachtungsraum zu generieren. Die zu vergießende Fläche muss dazu präpariert werden. Um zu gewährleisten, dass das niedrigviskose Epoxidharz nur im gewünschten Bereich aushärtet, wurde der Betonkörper mit PTFE-Elementen aus-

reichend verschalt und die Stoßkanten sowie die Bohrung wurden für die herausgeführte Gewindestange mit Haftmasse zum Mikroskopieren abgedichtet. Da das Epoxid nur mit dem vom Verbundanker entfernten Beton und nicht mit der präparierten Gewindestange, dem mit FIS V gefüllten Ringspalt und dem Beton im Randbereich des Verbundmörtels verbunden sein darf, da dies die Versuchsergebnisse im zentrischen Auszugsversuch verfälschen könnte, werden diese verbundankernahen Bereiche mit einem silikonfreien Trennmittel behandelt. Als Trennmittel wird das ‚TRENNSPRAY TRS‘ der Firma R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH verwendet, indem dieses in eine Schale gesprüht und vor dem Aushärten mit einem Pinsel auf die zu schützenden Elemente aufgetragen wird. Dieser Vorgang wird dreimal wiederholt, während nach jedem Vorgang mit einem weichen fusselfreien Tuch die Oberfläche poliert wird, um Streifenbildung im Sichtbereich zu vermeiden. Solche Streifen an der Oberfläche des Trennwachses können zu einer ungewollten Lichtbrechung im Epoxid führen und somit die Rissbeobachtung beeinflussen. Nach erfolgter Vorbereitung des Gießbereiches wird die zu vergießende Fläche der Prüfkörper waagrecht ausgerichtet. Abbildung 5.5 a) zeigt die vorbereitete Gussform für das Sichtfenster mit einer Verschalung aus PTFE-Platten.

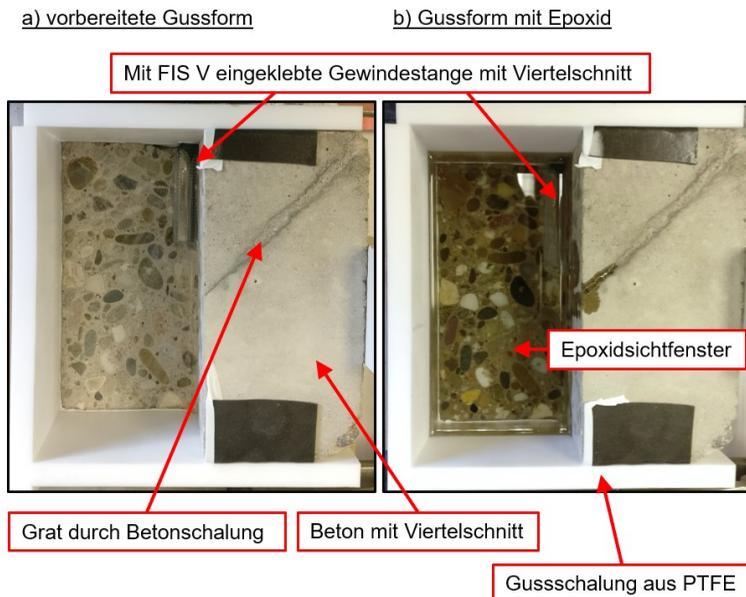


Abbildung 5.5: Erstellung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit vorbereiteter Gussform links (a) und eingegossenem Epoxidsichtfenster rechts (b)

Das Gießharz wird mit dem Härter im Mischungsverhältnis 100:37 Gew.-% homogen durchmischt und in die Form gegeben. Hierfür steht bei dem verwendeten Harz eine ausreichend lange Verarbeitungszeit von $t_{work} = 300$ min zur Verfügung. In Abbildung 5.5 b) ist die Gussform mit dem eingefüllten, noch flüssigen Epoxidharz zu erkennen. In dieser Zeit werden durch vorsichtiges Rühren mit einem Holzspatel die Luftblasen aus dem flüssigen Epoxid entfernt. Da der Prüfkörper für den zur Verfügung stehenden Vakuumraum zu groß ist, können nicht alle Luftblasen aus dem Epoxid entfernt werden. Zusätzlich entstehen aufgrund des exothermen Aushärtens des vergleichsweise hohen Volumens Epoxid weitere kleine Luftblasen, die wegen der steigenden Viskosität bei der Vernetzung nicht entweichen können. Aufgrund des hohen Volumens wird trotz herrschender Raumtemperatur die maximale Aushärtezeit von $t_{cure} = 48$ Stunden zum Aushärten vor der Entschalung des Prüflings abgewartet. Abbildung 5.6 zeigt einen fertiggestellten In Situ-Erkenntnisprüfstand mit Epoxidsichtfenster über dem Beobachtungsraum.



Abbildung 5.6: Fertiger In Situ-Erkenntnisprüfstand mit Epoxidsichtfenster für den Auszugsversuch mit enger Abstützung

In drei folgenden Tastversuchen wird die Variante des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Epoxidsichtfenster in einen zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung

zung in Anlehnung an (ETAG 001 - Part 5) getestet. Ein beispielhafter Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.7 aus der (ETAG 001 - Part 5): VERBUNDANKER entnommen. Der in Abbildung 5.7 unten dargestellte Betonprüfkörper wird beim In Situ-Erkenntnisprüfstand durch den präparierten Betonwürfel ersetzt, in dem der Verbundanker montiert ist. Für die Stahlplatte wird eine 30 mm starke Stahlscheibe mit einem Außendurchmesser von $d_a = 300$ mm und einer zentrischen Bohrung von $d_i = 20$ mm verwendet. Durch diese wird der Verbundanker, wie in Abbildung 5.7 ersichtlich, durchgeführt. An der Stahlplatte wird der krafterzeugende Hydraulikzylinder abgestützt. Dieser und die damit verbundene Kraftmessdose sind, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, axial kraftleitend zur Erfassung der Kräfte mit dem Verbundanker verbunden.

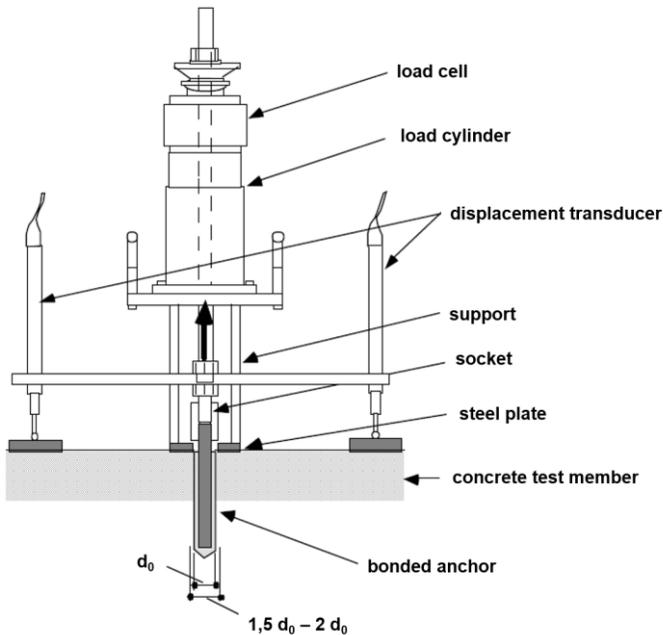


Abbildung 5.7: Beispielhafter Versuchsaufbau für einen zentralen Auszugsversuch mit enger Abstützung nach (ETAG 001 - PART 5)

Bereits bei geringen Kräften weisen der Beton und das Epoxid unterschiedliche Spannungszustände auf, aus deren Folge sich das Epoxid von der Betonoberfläche

stellenweise löst. Dieses spannungsinduzierte Lösen des Epoxids von Beton an deren Trennfläche hat zur Folge, dass sich der Brechungsindex des Systems ändert und die Oberfläche deutlich getrübt bis opak wirkt. Die bei der Erstellung entstandenen kleinen Luftblasen behindern zusätzlich die Sicht auf den Beobachtungsraum, was die Beobachtung entsprechend erschwert. Abbildung 5.8 veranschaulicht exemplarisch an einem Auszugstastversuch die Veränderung des Beobachtungsraumes zu Beginn des Versuches (Abbildung 5.8 a)) bis zum Erreichen der Auszugskraft (Abbildung 5.8 b)). Deutlich zu erkennen sind die kleinen Luftblasen, die sich nicht aus dem Epoxid entfernen lassen und dadurch während des Aushärteprozesses in den äußeren Bereich des Beobachtungsraumes (Abbildung 5.8 a) und b) jeweils links) bewegt wurden. Abbildung 5.8 a) offenbart erste Ablösungen des Epoxides im Bereich zwischen Gewindestange und Mörtel sowie im Grenzbereich zwischen Mörtel und Beton bei bereits geringen Kräften. In Abbildung 5.8 b) ist zu erkennen, dass nach Erreichen der Auszugskraft ein deutliches Wachstum der abgelösten Fläche in radialer und axialer Richtung von der Gewindestange weg stattgefunden hat. Im Bereich dieser abgelösten Flächen ist der Zustand des darunterliegenden Mörtels und des Betons nicht erkennbar. Eventuelle Risse können nicht beobachtet werden. Dieses Schadensbild ist bei allen drei Tastversuchen aufgetreten. Da bei diesen Versuchen primär Mikrorisse bei geringen Kräften beobachtet werden sollen, ist die Variante des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Epoxid-sichtfenster, wie oben bereits erwähnt, nicht für weitere Untersuchungen geeignet.

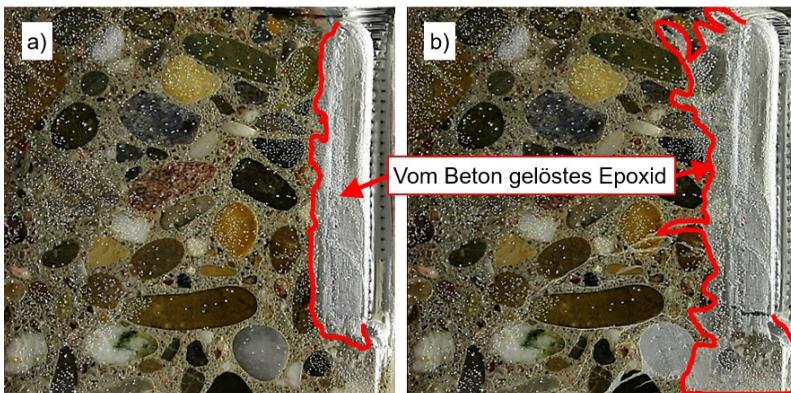


Abbildung 5.8: Änderung des Brechungsindex am In Situ-Erkenntnisprüfstand mit Epoxid durch spannungsinduziertes Ablösen an der Trennfläche bei geringer Last (links, a)) und beim Erreichen der Auszugskraft (rechts, b)) (bearbeitet, mit Schärfekorrektur)

Für die weiteren Varianten des In Situ-Erkenntnisprüfstandes wurde auf das Epoxidsichtfenster verzichtet, da eine uneingeschränkte Sicht auf den Beobachtungsraum für die Untersuchung der Schadens- und Versagensmechanismen zwingend notwendig ist. Hierfür wird in einem Tastversuch die Hypothese überprüft, ob eine Epoxidschicht über dem Beobachtungsraum zum Übertragen des rotationssymmetrischen Verbundspannungsverlaufs erforderlich ist. Dieser Tastversuch wird mit einem Betonprüfkörper vergleichbar mit dem oben beschriebenen durchgeführt. Im Unterschied zu diesem wird hierbei, wie bereits erwähnt, auf die 25 mm starke Epoxidschicht im Beobachtungsraum verzichtet. Abbildung 5.9 zeigt den erstellten In Situ-Erkenntnisprüfstand ohne Epoxidsichtfenster.



Abbildung 5.9: Beispielhaft einer der verwendeten In Situ-Erkenntnisprüfstände ohne Epoxidsichtfenster

An diesen Versuchskörpern werden die kontinuierlichen Versagensvorgänge der präparierten Verbundanker mittels einer hochauflösenden Kamera mit hoher Bildfrequenz in einem zentralen Versuch mit einem Versuchsaufbau, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, durchgeführt. Um die Rissbildung und das Risswachstum besser beobachten zu können, werden die In Situ-Erkenntnisprüfstände mit Tageslichtlampen ausgeleuchtet. Zusätzlich wird mit einer Variante versucht, an einem Teil der

In Situ-Erkenntnisprüfstände mittels aufgezeichneter Raster (vgl. Beobachtungsraum Abbildung 5.1 rechts) die Risse besser beobachtbar zu machen. Tastversuche mit der Variante des aufgetragenen Rissprüfsprays liefern aufgrund der fehlenden Duktilität des Betons und vermutlich aufgrund seiner hohen Porosität keine verwertbaren Ergebnisse. Abbildung 5.10 lässt den Beobachtungsraum eines Tastversuches eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Rastermarkierung und Rissprüfspray erkennen. In Abbildung 5.10 links ist der unbelastete Zustand und rechts der Zustand nach Erreichen der Auszugskraft ersichtlich. Es lassen sich zwar Risse im Rissprüfspray erkennen, diese entstehen jedoch erst kurz vor Erreichen der maximalen Kraft, während das Rissprüfspray selbst das Entstehen von kleineren Rissen verdeckt. Aus diesem Grund ist die Variante mit aufgetragtem Rissprüfspray, wie auch schon die Variante mit einem Epoxidsichtfenster, zur Beobachtung der Versagensmechanismen nicht geeignet, da bei beiden Methoden die Beobachtung der Rissbildung zu stark behindert wird. Demzufolge wird der In Situ-Erkenntnisprüfstand ohne Epoxidsichtfenster und ohne Rissprüfspray, jedoch teilweise mit aufgezeichnetem Raster für die Versuche verwendet, da hier keine Beeinträchtigung des Sichtfeldes zu beobachten ist.



Abbildung 5.10: Tastversuch eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit Rastermarkierung und Rissprüfspray bei keiner Belastung (links) und beim Erreichen der Auszugskraft (rechts)

Die Entfernung eines Viertels des Betons und der Gewindestange inklusive deren Verbundfläche dort kann negative Einflüsse auf die tatsächlichen Versagensmechanismen verursachen. Zu den markantesten negativen Einflüssen eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes zählt der direkte Eingriff in das zu untersuchende System, der das zu untersuchende System und dessen Funktionsweise erheblich beeinflussen kann. Aus diesem Grund muss vor der Auswertung der Ergebnisse und möglichen

Erkenntnissen ein solches Modell, hier der In Situ-Erkenntnisprüfstand, anhand von Referenzversuchen verifiziert werden. Weitere mögliche Nachteile sind beispielsweise die Schaffung neuer Funktionselemente oder die Möglichkeit, nur einen ebenen Spannungszustand zu betrachten.

5.1.2 Verifikation des In Situ-Erkenntnisprüfstandes

Um die in Unterkapitel 5.1.3 folgenden Versuchsergebnisse analysieren und daraus Erkenntnisse für die kontinuierlichen Versagensmechanismen ableiten zu können, muss der In Situ-Erkenntnisprüfstand verifiziert werden. Andernfalls kann nicht gewährleistet werden, dass er die Versagensmechanismen eines unpräparierten Verbundankersystems widerspiegelt. Da es sich bei diesem Erkenntnisprüfstand nicht um ein geläufiges Modell handelt, wurden für seine Verifizierung drei verschiedene Nachweiskriterien gewählt. Diese werden aufzeigen, dass der In Situ-Erkenntnisprüfstand die Versagensmechanismen eines unveränderten Verbundankers auf Vinyllesterbasis realitätsnah abbildet. Die gewählten Nachweiskriterien umfassen das Versagensbild, das Last-Verschiebungsverhalten und den Vergleich der Verbundspannung, jeweils mit den Ergebnissen aus Referenzversuchen. Die Nachweiskriterien werden durch Versuche mit zwölf In Situ-Versuchen und sechs Referenzversuchen untersucht. Die sechs Referenzversuche teilen sich in drei Versuche in C20/25 und drei in C50/60 auf. Die Versuchsanzahl orientiert sich hierbei an Tabelle 3.1 der (EAD 330499-00-0601) für die Eigenüberwachung der Produzenten von Verbundankersystemen. Die Versuchsanzahl der In Situ-Versuche wird auf sechs Versuche pro Betonfestigkeitsklasse erhöht, da hier aufgrund der Installation der Verbundankersysteme mit einem höheren Variationskoeffizienten gerechnet werden kann. Für die Referenzversuche werden unveränderte Gewindestangen derselben Charge in einen unveränderten Betonwürfel nach (DIN EN 206:2017-01) gesetzt, wobei die Bohrlochtiefe mit ± 3 mm Toleranz und die Bohrlochreinigungsverfahren wie bei den In Situ-Prüfständen eingehalten werden.

Das erste zu bewertende Nachweiskriterium ist das Versagensbild des ausgezogenen Verbundankers nach dem zentrischen Auszug mit enger Abstützung nach (ETAG 001 - PART 5). Das Versagensbild weist bei beiden Gewindestangen ein Versagen nach Herausziehen („pull-out“) auf. Die nähere Einschränkung nach Elgehausen et al. (2004) entspricht dem Versagen zwischen Gewindestange und Mörtel. Charakteristisch hierfür ist bei beiden Verbundankern das Abscheren des Mörtels an den Gewindeflanken der Gewindestange, sodass Mörtelreste im Gewindegrund zurückbleiben. Ein weiteres charakteristisches Anzeichen ist ein kleiner Ausbruchkegel des Betons, bedingt durch den nicht abgestützten Bereich der engen Abstützung. Dies zeigt sich durch einen umlaufenden Betonkragen an der Oberfläche des Betons mit einem Durchmesser von $d_i = 20$ mm der Bohrung der Platte für die enge Abstützung und einer Ausbruchneigung zur Gewindestange hin mit einem Winkel

von etwa 35 °, wie für Verbundanker üblich. Die Versagensbilder der In Situ-Versuche werden anschließend mit denen der Referenzversuche verglichen. Die Gemeinsamkeiten der Versagensbilder beider Versuche liegen in den Scherebenen auf Höhe der Gewindeflanken und der Ausbildung des Ausbruchkegels beziehungsweise Betonkragens mit einem Winkel von etwa 35 °. Als einziger signifikanter Unterschied ist bei den In Situ-Versuchen der fehlende Teil des Betonkragens im Bereich des gefrästen Bereichs der Gewindestange zu nennen. Das qualitative Schadensbild der Referenzversuche und der In Situ-Versuche ist somit vergleichbar.

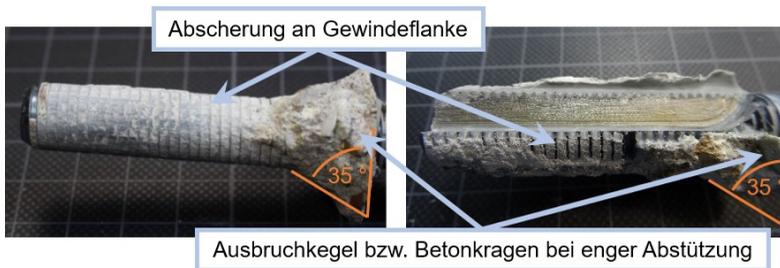


Abbildung 5.11: Versagensbild der ausgezogenen Verbundanker nach zentrischem Auszug mit enger Abstützung nach (ETAG 001 - PART 5) des Referenzversuchs (links) und des In Situ-Versuchs (rechts) mit einem Ausbruchkegelwinkel von ca. 35 °

Das zweite Nachweiskriterium stellt ein vergleichbares Last-Verschiebungsverhalten beim zentrischen Auszugsversuch dar. Da der In Situ-Erkenntnisprüfstand eine verringerte Verbundfläche aufweist, müssen für eine Vergleichbarkeit die betrachteten Auszugsversuche zuerst auf die Verbundfläche normiert werden, um darauffolgend die Verläufe der Verbundspannung über den Auszugsweg der Referenzversuche mit den In Situ-Versuchen vergleichen zu können. Dafür wird die Auszugskraft durch die tatsächliche Verbundfläche geteilt. Mit den daraus resultierenden Verbundspannungsverläufen lassen sich die Ergebnisse der In Situ-Versuche mit denen der Referenz normiert vergleichen. Da sich bei den In Situ-Erkenntnisprüfständen nur drei Viertel der Fläche der Referenzversuche im Verbund befinden, lässt sich nach Gleichung 5-1 die Verbundfläche berechnen.

$$A_{3/4} = \left(\pi \cdot \frac{3}{4} d - \ddot{U}_L - \ddot{U}_R \right) \cdot h_{ef} \quad 5-1$$

Hierbei ist $A_{3/4}$ die Verbundfläche des In Situ-Erkenntnisprüfstandes, d der Durchmesser der Gewindestange, h_{ef} die effektive Verankerungstiefe und \ddot{U}_L bzw. \ddot{U}_R der gemessene Korrekturwert des Überstandes der gefrästen Gewindestangenfläche zur Betonoberfläche links bzw. rechts zur Frontsicht.

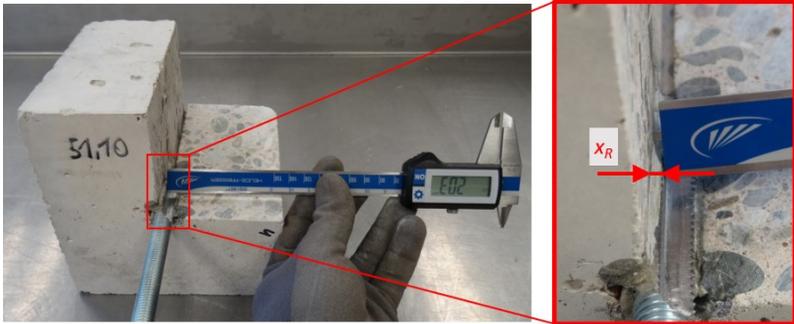


Abbildung 5.12: Darstellung zur Messung des Überstandes am Beispiel des Überstandes rechts zur Berechnung des Korrekturfaktors

Die Überstände werden, wie beispielhaft in Abbildung 5.12 für den Überstand ‚rechts‘ x_R gezeigt, mit einem digitalen Messschieber gemessen, bevor anschließend die gemessenen Überstände x_L beziehungsweise x_R näherungsweise mit der Gleichung 5-2 in den jeweiligen Kreisbogen umgerechnet werden. Die einzelnen gemessenen Überstände der In Situ-Erkenntnisprüfstände sind in Tabelle Anhang 1 aufgeführt. Der Index k ist hierbei entweder mit L oder R zu substituieren. Dieser näherungsweise bestimmte Korrekturwert wird daraufhin, wie in Gleichung 5-1 ersichtlich, abgezogen.

$$\ddot{U}_k = 0,0144 \cdot x_k^2 + 0,9524 \cdot x_k + 0,0394 \quad \text{mit } k = L \text{ bzw. } R \quad 5-2$$

Die Verbundfläche der Referenzversuche lässt sich simultan hierzu berechnen (vgl. Gleichung 5-3).

$$A = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \quad 5-3$$

Durch die gemessenen Werte der tatsächlichen effektiven Verankerungstiefe h_{ef} und der dazugehörigen Auszugskraft F_U kann die jeweilige Verbundspannung $\tau_{3/4}$

beziehungsweise τ der Referenzversuche und der In Situ-Versuche verglichen werden (vgl. Gleichung 5-4).

$$\tau_{3/4} = \frac{F_U}{A_{3/4}} \text{ bzw. } \tau = \frac{F_U}{A} \quad 5-4$$

In Abbildung 5.13 ist exemplarisch die Verbundspannung, aufgetragen über den Auszugsweg eines In Situ-Versuches und eines Referenzversuches, zu erkennen. Die Kurven verlaufen zunächst auf einem ähnlichen Niveau. Bei 0,96 mm bis 1,48 mm Auszugsweg weist der Verlauf der Referenz indes eine höhere Wegänderung bei Spannungserhöhung auf. Ab einer Verschiebung von 1,48 mm verläuft die Spannung des Referenzversuches wieder parallel zum Verlauf des In Situ-Versuchs bis zum Erreichen eines vergleichbaren Maximalwertes von knapp über 20 MPa.

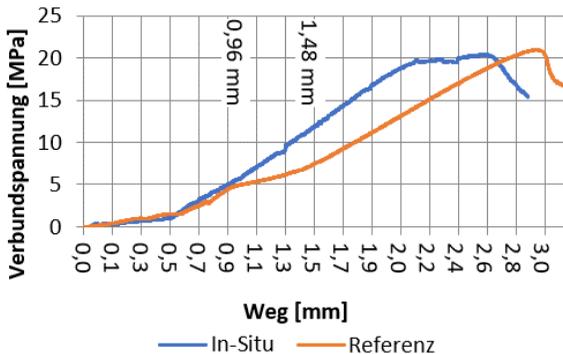


Abbildung 5.13: Verbundspannung über den Weg, exemplarisch für einen In Situ-Versuch und einen Referenzversuch (Horn, Hölz et al., 2020)

Dieses Verhalten wird exemplarisch für einen Versuch dargestellt, ist jedoch mit den anderen durchgeführten Versuchen vergleichbar. Die Ergebnisse aller Versuche sind in Anhang A aufgeführt. Die Verbundanker zeigen alle einen vergleichbaren Verlauf der Verbundspannung über den Weg.

Das dritte Nachweiskriterium zur Verifizierung des In Situ-Erkenntnisprüfstandes ist der tatsächliche Vergleich der Verbundspannung, die die Versuche am In Situ-Erkenntnisprüfstand im Vergleich zu den Referenzversuchen erreichen. Hierfür werden die In Situ-Versuche wie auch die Referenzversuche in C20/25- und C50/60-Betonwürfel gesetzt, um daraufhin die maximale Verbundspannung zu ermitteln. Für

den In Situ-Erkenntnisprüfstand werden jeweils sechs Versuche je Betonhärte durchgeführt, bei den Referenzversuchen jeweils drei Versuche in C20/25 und C50/60.

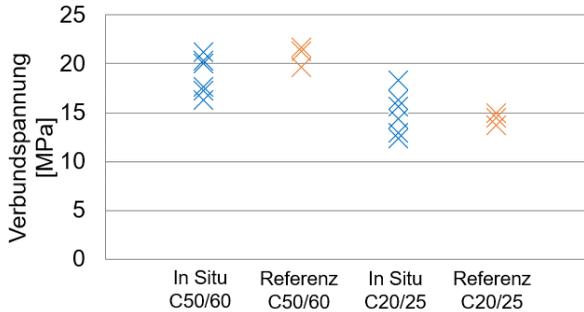


Abbildung 5.14: Vergleich der maximalen Verbundspannung der jeweils sechs In Situ-Versuche und der jeweils drei Referenzversuche in C20/25 und C50/60

Abbildung 5.14 zeigt die erreichte Verbundspannung der In Situ- und der Referenzversuche in C20/25 und C50/60, dargestellt durch ein Kreuz pro Versuchsergebnis. Als Kriterium für die Verifizierung der Ergebnisse werden Referenz-Variationskoeffizienten nach Appl (2009) verwendet. In dessen Auszugsversuchen von Gruppen- und randnahen Einzelbefestigungen erreichten Verbundanker Variationskoeffizienten von 15,7 % beziehungsweise 18,4 % bei $n = 139$ beziehungsweise $n = 133$ (Appl, 2009). Die Referenzversuche in der Versuchsreihe der vorliegenden Arbeit erreichen bei C50/60 bei einem Mittelwert von 20,88 MPa und einer Standardabweichung von 1,06 MPa einen Variationskoeffizienten von 5,08 % und bei C20/25 bei einem Mittelwert von 14,36 MPa und einer Standardabweichung von 0,65 MPa einen Variationskoeffizienten von 4,53 %. Die Versuchsergebnisse der In Situ-Versuche streuen erwartungsgemäß deutlicher. Bei einem Mittelwert von 18,8 MPa und einer Standardabweichung von 1,98 MPa besitzt der In Situ-Erkenntnisprüfstand bei C50/60 einen Variationskoeffizienten von 10,56 %. Die Versuche mit dem In Situ-Erkenntnisprüfstand mit C20/25 besitzen bei einem Mittelwert von 14,98 MPa und einer Standardabweichung von 2,23 MPa einen Variationskoeffizienten von 14,88 %. Wie zu erwarten, liegt der Variationskoeffizient der In Situ-Versuche deutlich über dem der Referenzversuche. Dennoch liegen die Variationskoeffizienten unterhalb der Referenzwerte, die Appl (2009) für Verbundanker mit $n = 139$ beziehungsweise $n = 133$ Versuchen ermittelt hat.

Die Ergebnisse der Nachweiskriterien Verbundspannung, Versagensbild und Last-Verschiebungsverhalten offenbaren eine Vergleichbarkeit des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit den Ergebnissen der Referenzversuche. Der In Situ-Erkenntnisprüfstand bildet demnach die Versagensmechanismen des unpräparierten Verbundankers nach. Da in allen aufgezeigten Verifizierungsschritten keine relevante Abweichung der Ergebnisse vorliegt, kann der In Situ-Erkenntnisprüfstand für die Untersuchung der realen kontinuierlichen Schädigungsmechanismen angewendet werden.

5.1.3 Versuchsergebnisse des In Situ-Erkenntnisprüfstandes

Da die Tragfähigkeit des Untergrundes für die Haltekraft des Verbundankers essenziell ist, soll im Folgenden insbesondere auf die Rissentstehung und den Rissverlauf im Beton eingegangen werden.

Durch den freiliegenden Beobachtungsraum ist es möglich, die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen beim zentrischen Auszug eines Verbundankers mit enger Abstützung zu betrachten. Bei steigender Last können die entstehenden Risse lokalisiert werden, ebenfalls lässt sich das Risswachstum nachverfolgen. Hierbei kann durch die Rotationssymmetrie der Verbundspannung auf eine Beobachtung der zweiten freiliegenden Fläche verzichtet werden. Dementsprechend werden im Folgenden die Ergebnisse des linken Beobachtungsraumes ausgewählt, bei denen die Gewindestange rechts im Bild liegt. Abbildung 5.15 zeigt die Verteilung der entstandenen Risse aller Versuche gesammelt in einer Grafik. Der blaue Pfeil stellt eine Referenzmarkierung als erster vollständig eingemörtelter Gewindegang dar, von der aus die Risse zugeordnet werden. Die Risse werden in dieser Darstellung als Raute dem jeweiligen Gewindegang zugeordnet. Die Anzahl der Rissentstehungen über alle Versuche wird so grafisch aufaddiert.

Mit einer Gewindesteigung von 1,75 mm bei einer M12-Gewindestange ergeben sich bei einer Setztiefe von $h_{ef} = 50$ mm 28 vollständig eingemörtelte Gewindegänge. Über alle zwölf Versuche treten bis zum Erreichen der Auszugskraft insgesamt 33 Risse auf. Wie die Darstellung in Abbildung 5.15 erkennen lässt, verteilen sich die Risse ungleichmäßig über die gesamte Setztiefe der Gewindestange. Häufungen der Risse treten vor allem im Bereich nahe der Betonoberfläche, in der oberen Hälfte der Gewindestange sowie im unteren Zehntel der Gewindestange auf. Die Häufungen nahe der Betonoberfläche deuten die Ausbildung des Betonkragens durch die Versagensart ‚Herausziehen‘ bei enger Abstützung an.

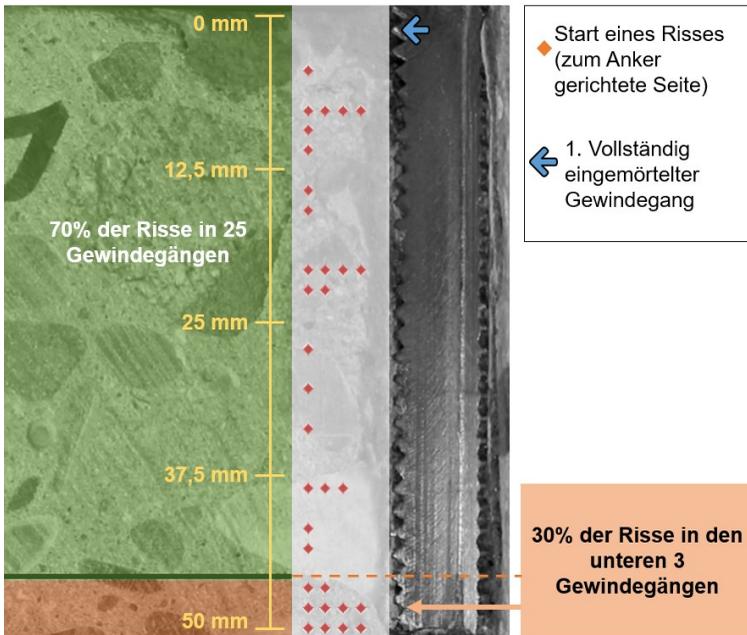


Abbildung 5.15: Verteilung der Rissbildungen aller Versuche (mit Raute markiert) über die Einbindetiefe

In Abbildung 5.16 sind exemplarisch die Aufnahmen des Beobachtungsraumes bei etwa 35 % der Auszugskraft (Bildreihe oben) und nach Versagen des Verbundankers (Bildreihe unten) sichtbar. Für eine deutlichere Darstellung der entstehenden Risse wurden diese in der jeweilig linken Darstellung mithilfe von durchgängigen beziehungsweise gestrichelten Linien hervorgehoben. Die durchgezogenen Linien stellen hierbei die Initialrisse bei bereits geringen Lasten dar. Die gestrichelten Linien in Abbildung 5.16 unten zeigen indes, dass diese Risse bis zum Versagen des Verbundankers sowohl in Richtung Gewindestange durch den Mörtel als auch in Richtung Betonoberfläche weiterwachsen. Die frühe Rissbildung bei durchschnittlich 35 % der Auszugskraft tritt bei allen getesteten In Situ-Versuchen auf. Bei neun der zwölf In Situ-Versuchen treten fast zeitgleich zwei Initialrisse auf. Bei diesen neun Versuchen entsteht der erste dieser Initialrisse in den unteren 10 % der Gewindestange (vgl. Abbildung 5.15), während der zweite Initialriss unsystematisch in den oberen 90 % der Gewindestange auftritt. Die Initialrisse im unteren Bereich entstehen hier durchschnittlich bei etwa 35 % und die oberen Initialrisse bei etwa 38 %

der Auszugskraft F_U . Örtlich ergeben sich alle Initialrisse, entfernt von Gewindestange und Mörtel, an Zuschlagstoffen im Beton. Gerade an der Trennschicht zwischen zementöser Matrix und dem Zuschlagstoff Kieselstein bilden sie sich aus. Daraufhin wachsen die Risse mit steigender Last weiter, bis der Verbund im Bereich Mörtel/Gewindestange versagt und sich der Verbundanker aus dem Beton löst (Abbildung 5.16 unten). Tabelle 3 fasst die Beobachtungen der Rissbildung am In Situ-Erkennnisprüfstand zusammen.

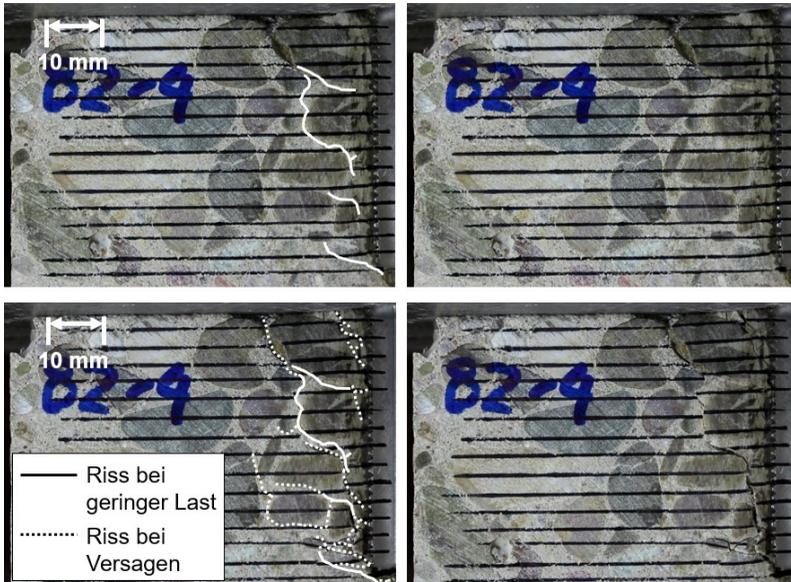


Abbildung 5.16: Exemplarische Darstellung der Versagensvorgänge bei etwa 35 % der Auszugskraft (oben) und nach Versagen des Verbundankers (unten)

Tabelle 3: Beobachtungen der Rissbildung am In Situ-Erkennnisprüfstand

Bei allen 12 Versuchen:	Risse bereits bei durchschnittlich $0,35 \cdot F_U$
Bei 75 % der Versuche: (n = 9)	Zwei Initialrisse: <ol style="list-style-type: none"> 1. Riss auf Höhe der unteren 3 Gewindegänge bei $0,35 \cdot F_U$ 2. Riss unsystematisch im oberen Bereich der Gewindestange bei $0,38 \cdot F_U$

5.1.4 Rissentstehung und -verlauf

Durch die In Situ-Versuche kann ein bisher nur vermuteter Schädigungsmechanismus beobachtet werden. Dabei handelt es sich um das annähernd gleichzeitige Entstehen zweier Risse im Beton im oberen Bereich der Gewindestange und auf der Höhe der unteren 10 % der Gewindestange. Die Rissentstehung im oberen Bereich der Gewindestange konnten bereits Pregartner et al. (1998) mittels der Schallemissionsanalyse und Appl (2009) mit Auszugsversuchen aus Halbmodellen bei einem Lastniveau von 30 – 40 % der Auszugskraft als sogenannte energiereiche Events detektieren. Die Rissentstehung im unteren Bereich der Gewindestange konnte durch Pregartner et al. (1998) aufgrund der geringen Energieintensität der Rissevents mit der verwendeten technischen Ausstattung nur vermutet, aber nicht nachgewiesen werden. Beim In Situ-Erkenntnisprüfstand entstehen die Risse im oberen Bereich der Gewindestange bereits bei durchschnittlich 38 % der Auszugskraft F_U im Beton in der Nähe des Verbundankers, also einem vergleichbaren Ursprung und Niveau wie in den Untersuchungen von Pregartner et al. (1998). Allerdings konnten diese bisher aufgrund der Messungenauigkeit des Verfahrens nicht so exakt lokalisiert werden, wie es nun mit dem In Situ-Erkenntnisprüfstand möglich ist. Allgemein lässt sich sagen, dass diese Risse in der oberen Hälfte der Gewindestange durch einen sich verändernden Spannungszustand bei steigender Last entstehen, da die Gewindestange durch die tiefere Verankerung im Beton in diesem Bereich die größte elastische Dehnung aufweist. Im unteren Zehntel der eingemörtelten Gewindgänge treten 30 % aller Risse auf. Eine solche Häufung in diesem Bereich deutet auf eine Tiefenverankerung mit hohen Spannungen im Beton und Mörtel hin, wie sie bei chemischen Systemen gewünscht ist. Die Rissentstehung in den unteren 10 % der Gewindestange bei bereits durchschnittlich 35 % der Auszugskraft F_U wurde bisher in der Literatur bei Verbundankersystemen noch nicht näher beschrieben. Lediglich für Kopfbolzen beschreiben Ozbolt und Eligehausen (1990) die Beobachtung von Rissbildung im Beton ab 30 % der Auszugskraft. Die Kohärenz zu den Ergebnissen von Pregartner et al. (1998) spricht dafür, dass es sich hierbei um tatsächliche Effekte handelt, auch wenn der Einfluss des Aufbaus des In Situ-Erkenntnisprüfstands nicht ganz auszuschließen ist. Diese Ergebnisse der Rissentstehung sind ferner ein Indiz dafür, dass es sich hierbei um weitestgehend unbekannte Schädigungsmechanismen handelt. Die Risse entstehen nicht, wie zu erwarten, in der Zone mit der vermeintlich höchsten Spannung im System direkt an der Gewindestange, sondern etwas entfernt in radialer Richtung im Beton, da die materialspezifischen Zugfestigkeiten des Mörtels und des Stahls weit über dem des Betons liegen. Die Initialrisse treten an der Verbundfläche beziehungsweise der Grenzschicht zwischen der zementösen Matrix und den eingebetteten Zuschlagstoffen des Betons, den Kieselsteinen, auf. Ob diese Versagensmechanismen auch bei anderen Befestigungsmittelarten auftreten, muss näher untersucht werden. Gerade bei Spreiz- oder Bolzenankern spricht vieles dafür, dass diese den Betonuntergrund

bereits bei der Installation, also durch das Aufbringen von Spannungen beim Verspreizen, schädigen können.

5.2 Identifikation funktionsrelevanter Gestaltelemente

Mit den im In Situ-Versuch beobachteten Schädigungsmechanismen können Rückschlüsse auf die funktionsrelevanten Gestaltelemente eines Verbundankers gezogen werden. Um diese Gestaltelemente identifizieren zu können, müssen die Schädigungsmechanismen analysiert werden. Zur ersten Analyse des Schädigungsbildes und somit der Identifikation der Spannungsverläufe wird die SCHUBVIERECK-METHODE von Mattheck und Bethge (2004) angewendet. Abbildung 5.17 veranschaulicht den Beobachtungsraum eines In Situ-Versuchs mit einem hervorgehobenen entstandenen Riss (gestrichelte Linie). Hierüber wurde das SCHUBVIERECK nach MATTHECK gelegt. Die vertikale Scherung wird durch die anliegende Auszugskraft am Verbundanker und die entgegenwirkende Kraft, hervorgerufen durch das Niederhalten des Betonprüfkörpers, erzeugt. Diese Funktion des Niederhaltens wird, bedingt durch den Versuchsaufbau (vgl. Abbildung 5.7), durch eine Stahlplatte mit einer zentrischen Bohrung von $d_i = 20 \text{ mm}$ für die sogenannte enge Abstützung erfüllt. Im mechanischen Gleichgewicht entsteht eine horizontale Scherung im Betrag der vertikalen Scherung. Diese horizontale Scherung wird durch die Spreizkraft, die in der Befestigungstechnik bekannt ist, hervorgerufen. Die Spreizkraft entsteht hierbei durch die anliegende Zugkraft. Durch den Winkel der Gewindeflanken wird die vertikal wirkende Zugkraft in eine Kraft mit horizontal wirkender Komponente, der Spreizkraft, umgewandelt. Diese kann je nach Befestigungsmittel variieren. Im Falle des Verbundankers wird von einer mit steigender Verankerungstiefe progressiv ansteigend wirkenden Spreizkraft unter Last ausgegangen (vgl. Mészáros (2002)). Die Druck- und Zugstrebe bilden im mechanischen Gleichgewicht die Diagonalen des SCHUBVIERECKS im 45° -Winkel zu den Scherungen.

Die in Abbildung 5.17 dargestellte Druckstrebe zeichnet den Kraftfluss zwischen dem Verbundanker und der engen Abstützung des Versuchsaufbaus ab. Die entlang der Zugstrebe wirkende Zugkraft orthogonal zur Druckstrebe stellt einen Hauptversagensgrund für Verbundanker dar. Erhöht sich die vertikale Scherung durch eine steigende Zuglast am Verbundanker, resultiert dies in einer erhöhten Zugkraft entlang der Zugstrebe und der Beton versagt entlang der dargestellten Druckstrebe. Der in Abbildung 5.17 nachgezeichnete Riss bestätigt, mit schwachstellenbedingten Abweichungen des inhomogenen Betons, dieses Betonversagen. Erklären lässt sich dieses Verhalten durch die wesentlich geringere Zugfestigkeit des Betons von $2 - 5 \text{ N/mm}^2$ im Vergleich zur Druckfestigkeit (Stark & Wicht, 2013, S. 332).

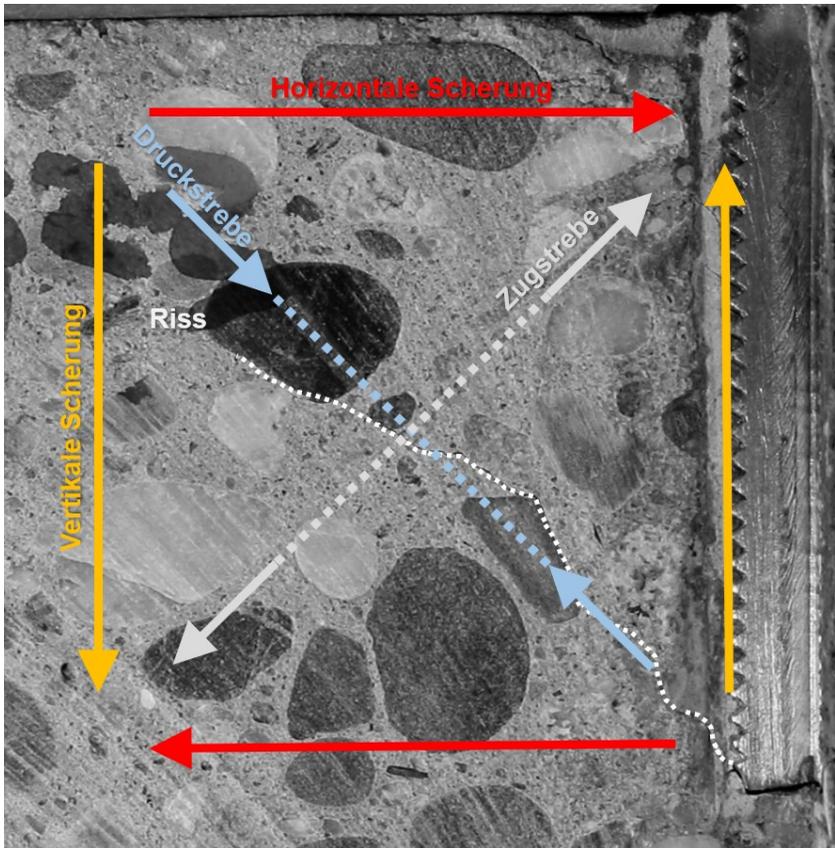


Abbildung 5.17: Darstellung eines SCHUBVIERECK-Modells nach (Mattheck & Bethge, 2004) mit der horizontalen und vertikalen Scherspannung mit resultierender Druck- und Zugstrebe über den Riss aus dem Beobachtungsraum eines In Situ-Versuchs

Die Zugfestigkeit von reinem Vinylesterharz ohne Zuschlagstoffe hingegen kann bis zu 80 N/mm^2 erreichen und gängige Gewindestangen der Festigkeitsklasse 5.8 oder 8.8 besitzen eine Mindestzugfestigkeit von 500 N/mm^2 oder 800 N/mm^2 . Die schwachstellenbedingte Abweichung der Risse im Beton wird durch eine zusätzliche Schwächung der Betonzugfestigkeit hervorgerufen. Der Verbund zwischen Kieselstein und zementöser Matrix des Betons hält den steigenden Zugspannungen im

Beton nicht Stand. Durch die Spannungsspitzen an den Grenzschichten Kieselstein und zementöse Matrix entstehen dort Risse, die von hier aus weiterwachsen. Durch diese lokale Kraffflussunterbrechung einerseits und die steigende Zuglast an der Gewindestange andererseits steigen die Spannungen weiter an, bis der Riss schließlich den Mörtel erreicht. Mit der Überschreitung der Zug- und Scherfestigkeit des Mörtels wandert der Riss schließlich zur richtungsentsprechenden Gewindeflanke. In entgegengesetzter Richtung wächst der Riss nach bekanntem Versagensbild zur Betonoberfläche. Hieraus resultiert bei der sogenannten weiten Abstützung der Betonausbruchkegel mit der charakteristischen Steigung von etwa 35° , während es bei enger Abstützung zu der in Abbildung 5.11 dargestellten Betonkragenausbildung an der Gewindestange kommt. Nach der Beobachtung aus den In Situ-Versuchen entstehen jedoch auch hierbei Risse in Richtung Betonoberfläche mit einer Steigung von etwa 35° .

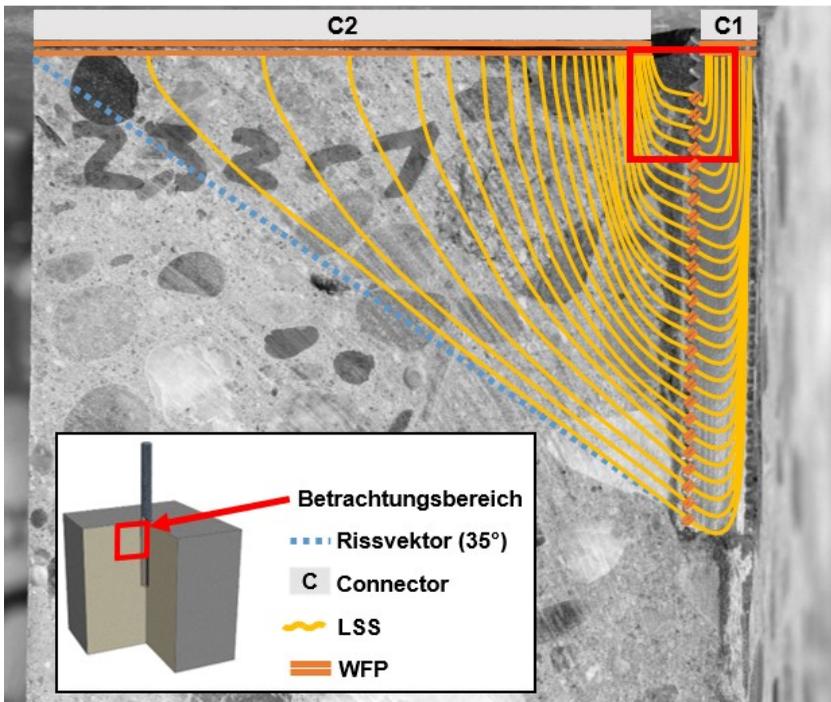


Abbildung 5.18: Darstellung des C&C²-Modells aus den Beobachtungen des In Situ-Prüfstandes mit eingezeichnetem Betrachtungsbereich für das C&C²-Sequenzmodell

Abbildung 5.18 enthält die Gesamtdarstellung des C&C²-MODELLS des In Situ-Erkenntnisprüfstandes. Hierin sind die Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaare, die für die Kraftübertragung beim zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung nötig sind, eingetragen. Die Connectoren C1 und C2 stellen die Krafteinleitung über die Gewindestange und die enge Abstützung durch die Stahlplatte dar. Die blau gestrichelte Linie zeigt schematisch die Rissrichtung von 35°. Das rote Quadrat stellt den Betrachtungsbereich für das im Folgenden erläuterte C&C²-SEQUENZMODELL dar.

Diese zeitlich veränderlichen Versagensmechanismen lassen sich mithilfe des C&C²-A veranschaulichen. Dazu wird ein C&C²-SEQUENZMODELL mit den für das Versagen als relevant erachteten Wirkflächenpaaren (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) für die ermittelten Versagenszustände im oben dargestellten Beobachtungsraum (Abbildung 5.18) erstellt. Des Weiteren lassen sich hierdurch die funktionsrelevanten Gestaltelemente identifizieren, um den Gestaltungsraum für sekundäre Funktionselemente, also die innersystemischen, nicht funktionsrelevanten Begrenzungsflächen (BF) des Verbundankers, festzulegen. Der Versagensprozess im C&C²-SEQUENZMODELL des Verbundankers lässt sich in fünf Zustände, also fünf C&C²-MODELLE, unterteilen:

1. Zustand: Aufbringen des Installationsmomentes (Abbildung 5.19)
2. Zustand: Rissentstehung an Zuschlagstoffen im Beton (Abbildung 5.20)
3. Zustand: Risswachstum zur Gewindeflanke (Abbildung 5.21)
4. Zustand: Partielle Unterbrechung der Leitstützstruktur (Abbildung 5.22)
5. Zustand: Auszug/Versagen des Verbundankers (Abbildung 5.23)

Abbildung 5.19 bis Abbildung 5.23 enthalten die vereinfachte Darstellung des C&C²-SEQUENZMODELLS am In Situ-Erkenntnisprüfstand in diesen fünf Zuständen. Die Vereinfachung beschränkt das Modell auf die zwei WFP1 und WFP2 zwischen der Oberseite der Gewindeflanke und dem Mörtel. WFP1 und WFP2 stehen beispielhaft für alle Kontakte zwischen nach oben gerichteten Gewindeflanken und Mörtel, die nicht eingezeichnet sind. Das WFP ‚Mörtel und Beton‘ wird zur besseren Übersichtlichkeit des Modells ebenfalls nicht eingezeichnet. Das WFP ‚Unterseite der Gewindeflanke und Mörtel‘ kann aufgrund der Eigenschaften von Vinylestersystemen vernachlässigt werden. Vinylestersysteme basieren primär auf Formschluss und besitzen geringere Adhäsionsfähigkeiten gegenüber Stahl als beispielsweise Epoxidsysteme. Aus diesem Grund ist an der Unterseite der Gewindeflanken keine Kraftübertragung beim Aufbringen einer Zuglast an der Gewindestange zu erwarten.

Abbildung 5.19 zeigt den ersten Zustand nach Aufbringen des Installationsmomentes nach Herstellerangaben. Hierbei wird eine vergleichsweise kleine Kraft in das

System eingeleitet, um den Verbundanker vorzuspannen. In diesem Zustand wird die Kraft über ein Anzugsmoment in den Connector C1 der Gewindestange eingeleitet. Über LSS1 beziehungsweise LSS2 wird die einwirkende Kraft auf die nach oben gerichteten Gewindeflanken über WFP1 beziehungsweise WFP2 an Gewindeflanke/Mörtel über den Mörtel in den Beton eingeleitet. Die Kraft wird hier vom Beton über die dort verlaufenden LSS3 beziehungsweise LSS4 über den Connector C2 in die enge Abstützung abgeleitet. Da die Spannungen in diesem Zustand bis zu einer Last von etwa 30 % der Auszugskraft F_U lokal noch keine materialzugehörigen Zugkraft F_U überschreiten, sind keine sichtbaren Schäden zu erkennen.

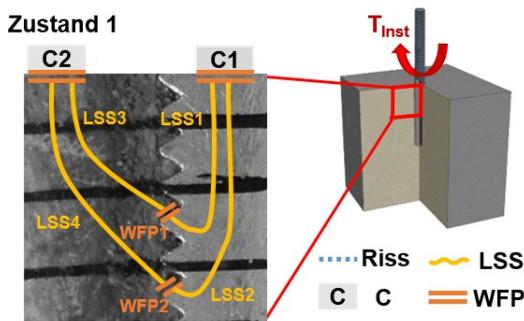


Abbildung 5.19: Darstellung des C&C²-MODELLS nach Aufbringen des Installationsmomentes

Der zweite Zustand des In Situ-Erkenntnisprüfstandes ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Diese zeigt das C&C²-MODELL der bereits erwähnten ersten Rissbildung bei geringen Lasten zwischen 30 % und 40 % der Auszugskraft F_U . Diese zentrisch auf den Verbundanker eingeleitete Zugkraft wird über C1 eingeleitet. Über LSS1 und LSS2 der Gewindestange wird sie dann an WFP1 und WFP2 an Gewindeflanke/Mörtel abgeleitet und von dort aus über LSS3 und LSS4 des Mörtels und des Betons in C2 der engen Abstützung eingeleitet. Hierbei lässt sich jedoch erkennen, dass durch die erste Rissbildung die Kraft nicht mehr den direkteren Pfad über LSS3 und LSS4 zu C2 verläuft, sondern von diesen Initialrissen abgelenkt wird. LSS3 und LSS4 verlaufen nun abgeleitet im Beton weiter, wodurch zusätzlich die lokalen Spannungen an diesem Initialriss, der als Kerbe wirkt, steigen, bis die materialzugehörigen Zug- und Druckfestigkeiten an dieser Stelle erreicht und überstiegen werden. Hierdurch wachsen die Risse weiter.

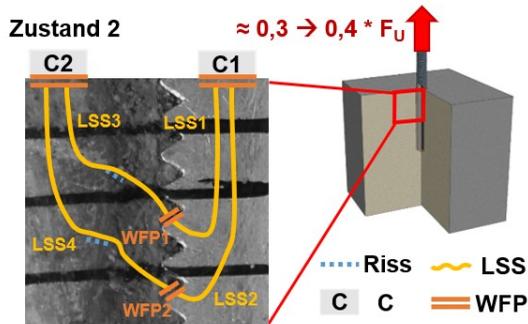


Abbildung 5.20: Darstellung des C&C²-MODELLS bei erster Rissbildung zwischen 30 % und 40 % der Auszugskraft F_U

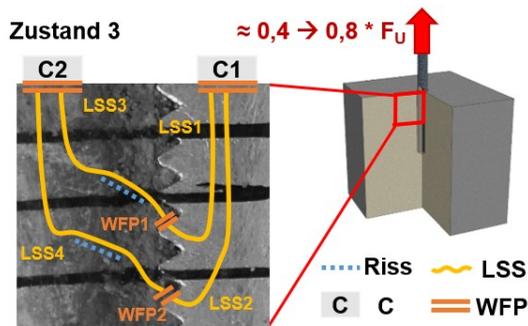


Abbildung 5.21: Darstellung des C&C²-MODELLS bei Risswachstum zwischen 40 % und 80 % der Auszugskraft F_U

Auch beim dritten Zustand in Abbildung 5.21 wird die anliegende zentrische Kraft, analog wie bei Zustand 1 und 2 beschrieben, in C1 eingeleitet. Jedoch verändert sich hier der Pfad von LSS3 und LSS4 zwischen den WFP1 beziehungsweise WFP2 und C2 weiter, wodurch auch der Kraftfluss im System ein anderer ist. Die Risse sind hierbei deutlich in Richtung Gewindestange gewachsen und berühren teilweise bereits die Gewindespitzen. Trotz der großen Risse kann das System durch die Umleitung der Kraftflüsse beziehungsweise LSS3 und LSS4 den hohen Kräften jedoch weiterhin widerstehen. Zu beachten ist dahingehend gleichwohl, dass ein Teil der eingebetteten Gewindestange in diesem Zustand nicht mehr direkt über Form-

schluss an der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ des Verbundankers beteiligt ist, sondern primär über Reib- beziehungsweise Kraftschluss, was zu lokalen Spannungssteigerungen an den weiteren beteiligten Gewindeflan- ken führt.

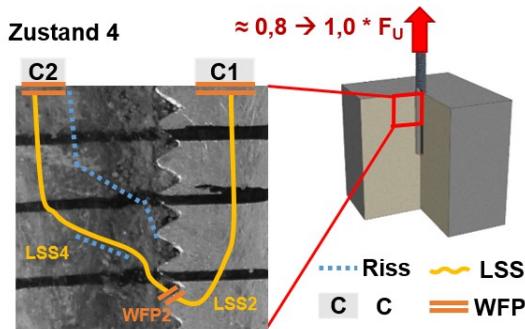


Abbildung 5.22: Darstellung des C&C²-MODELLS bei lokalem Versagen zwischen 80 % und bis zum Erreichen der Auszugskraft F_U

Der vierte Zustand des C&C²-SEQUENZMODELLS stellt den Lastbereich von 80 % der Auszugskraft F_U bis zum Erreichen der Auszugskraft F_U dar. Der Kraftfluss über C1 und über LSS2 der Gewindestange bleibt dabei unverändert, in Zustand 4 ändert sich jedoch die Anzahl der WFPs. Durch die wachsenden Risse sind Teile der Gewindestange und die dazugehörigen Bereiche des Mörtels und des Betons nicht mehr am Kraftfluss beteiligt. WFP1, zusammen mit LSS1 und LSS3, existieren nicht mehr. In Abbildung 5.22 findet sich eine Darstellung des C&C²-MODELLS in diesem Zustand 4. Durch den oben eingezeichneten Riss besteht keine Möglichkeit, zwischen der Gewindestange und C2 der engen Abstützung die LSS3 für den Kraftfluss auszubilden. Alle Bereiche oberhalb des durchgehenden Risses sind nicht mehr an der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ beteiligt. Lediglich Reibung zwischen den losen Fragmenten leitet noch Spannungen in das System und behindert so weitere Bewegung bis zum Erreichen der Auszugskraft F_U .

Der fünfte und letzte Zustand dieses C&C²-SEQUENZMODELLS stellt den Fall des Auszugs nach Verbundversagen bei enger Abstützung in Abbildung 5.23 dar. Durch die fehlende Kraftübertragung liegen keine LSS und WFP mehr vor. Die Risse bilden nun im Bereich der Gewindespitzen radial in Richtung Bohrlochgrund eine die Gewindestange umlaufende Trennebene im Mörtel. Im Bereich der Betonoberfläche münden alle Risse zur inneren Kante der Stahlplatte, der engen Abstützung, und bilden so den bereits vorgestellten Betonkragen am Versagensbild (siehe Abbildung

5.11). Diese Platte zum Abstützen der Kräfte ist als C2 in der Darstellung in Abbildung 5.23 zu erkennen, wobei der Durchmesser ihrer Durchgangsbohrung, also ihrer inneren Kante, mit $\varnothing d_i$ beschrieben ist.

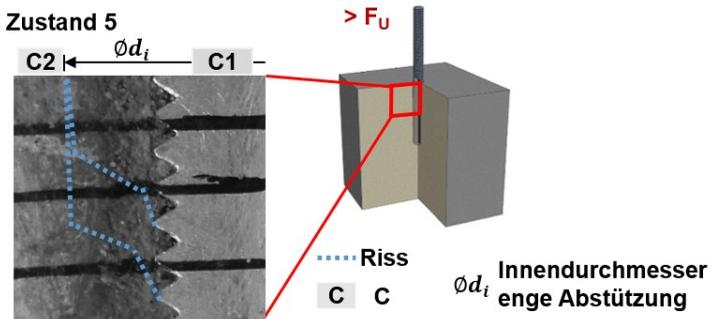


Abbildung 5.23: Darstellung des C&C²-MODELLS bei Erreichen der Auszugskraft F_U und Verbundversagen des Ankers

Aus den Beobachtungen der kontinuierlichen Versagensmechanismen der Verbundanker mithilfe der In Situ-Versuche konnten ein Schubviereck- und ein C&C²-Sequenzmodell abgeleitet werden. Während sich die Versagensmechanismen wie Rissentstehung und -wachstum, bezogen auf die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ bei zentrischen Zuglasten und enger Abstützung, mit dem Schubviereck-Modell erklären lassen, können mit dem C&C²-Sequenzmodell die funktionsrelevanten Wirkflächen identifiziert werden. Andererseits ist es mit dem C&C²-Sequenzmodell nicht möglich, die Rissentstehung und das Risswachstum zu beschreiben, da hier nur die wirkenden Druckkräfte im Mörtel und Beton beschrieben werden können, jedoch nicht die orthogonal wirkenden Zugstreben. Hierfür werden die materialspezifischen Eigenschaften des Stahls der Gewindestange, des Betons und des Vinylestermörtels aufgrund von Mindestnormen und Herstellerwerten als bekannt angenommen. Nach den Erkenntnissen aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich folgern, dass primär die umlaufenden, nach oben gerichteten Gewindeflanken (Abbildung 5.24 ①), also das im C&C-Sequenzmodell dargestellte WFP ‚Gewindestange/Mörtel‘, für die Primärfunktion bei dieser Belastung relevant ist. Dies beruht unter anderem auf der Eigenschaft des Vinylestersystems, primär Formschluss auszubilden. Der Stoffschluss, also die Adhäsionsfähigkeit gegenüber beispielsweise Stahl, ist dabei weniger stark als bei beispielsweise Epoxidsystemen. Die Gewindestange bildet bei Zuglast mit der umlaufenden oberen Gewindeflanke den funktionserfüllenden Formschluss aus. Ein weiteres Indiz hierfür ist die Bildung

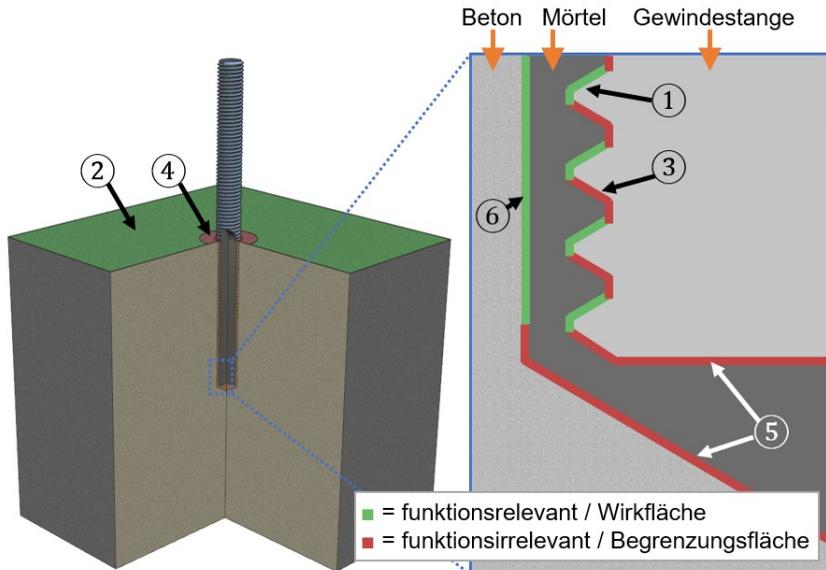
einer Gleit- beziehungsweise Scherebene auf Höhe der Gewindespitzen (auch Abbildung 5.24 ①). Diese scheint aus den Beobachtungen heraus ebenfalls eine Rolle bei der Erfüllung der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu spielen, da Risse im Beton häufig in einem Winkel von 30° – 35° , auf eine Gewindespitze zulaufen. Eine weitere wesentliche Funktion erfüllt die Auflagefläche der engen Abstützung auf der Betonoberfläche (Abbildung 5.24 ②). Ohne diese wäre der Kraftfluss im Prüfaufbau unterbrochen und der Verbundanker ließe sich nicht belasten. In der realen Anwendung wird diese Funktion von der strukturellen Tragfähigkeit des Bauwerks und der zu befestigenden Anbauteile übernommen. Diese Gestaltelemente zusammengefasst können als funktionsrelevante Wirkflächen bezeichnet werden.

Durch die In Situ-Versuche lässt sich außerdem schlussfolgern, dass in der untersuchten Belastungsart die umlaufende in Richtung Bohrlochgrund gerichtete untere Gewindeflanke sowie der Gewindegrund keinen signifikanten Beitrag zur Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ leisten (Abbildung 5.24 ③). Auch dies lässt sich durch die vergleichsweise schwachen Adhäsionskräfte von Vinylester gegenüber Stahl erklären. Des Weiteren lässt sich beobachten, dass in axialer Richtung die nichtkraftübertragenden Elemente weder an der Betonoberfläche (Abbildung 5.24 ④) noch an der Stirnfläche der Gewindestange im Bohrlochgrund (Abbildung 5.24 ⑤) eine funktionserfüllende Rolle spielen. Diese Gestaltelemente werden im Folgenden als Begrenzungsfläche bezeichnet.

Wie bereits durch die Verifikation des In Situ-Erkenntnisprüfstandes deutlich wurde, hat das Entfernen eines Viertels des Prüflings und des damit unterbrochenen rotationssymmetrischen Spannungsverlaufs des belasteten Verbundankers nur einen geringfügigen Einfluss auf die Auszugskräfte F_U . Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass durch eine geringfügige partielle Unterbrechung des rotationssymmetrischen Spannungsverlaufs die Primärfunktion nicht signifikant beeinflusst wird. Dies kann beispielsweise durch kleine Bereiche nicht vorhandenen Verbundes im Mörtel (Abbildung 5.24 ⑥) der Fall sein. Somit zählt auch die Verbundfläche zwischen Mantelfläche des Bohrlochs und Mörtel zu den funktionsrelevanten Wirkflächen.

Eine grafische Zusammenfassung der identifizierten funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen am In Situ-Erkenntnisprüfstand ist in Abbildung 5.24 dargestellt. Die funktionsrelevanten Wirkflächen (obere Gewindeflanke mit Gewindespitze ①, Auflagefläche der engen Abstützung ② und Verbundfläche ⑥) sind hierbei in Grün dargestellt, die identifizierten funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen (untere Gewindeflanke und Gewindegrund ③), nicht

abgestützte Betonoberfläche (④), Stirnfläche der Gewindestange und Bohrlochgrund (⑤) in Rot.



- ① obere Gewindeflanke und Gewindespitze
- ② Auflagefläche der engen Abstützung
- ③ untere Gewindeflanke und Gewindegrund
- ④ freie Betonoberfläche (nicht abgestützt)
- ⑤ Stirnfläche der Gewindestange und Bohrlochgrund
- ⑥ Verbundfläche

Abbildung 5.24: Darstellung der identifizierten funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen aus den In Situ-Versuchen

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Der entwickelte In Situ-Erkenntnisprüfstand kann zur kontinuierlichen Betrachtung der Versagensvorgänge bei zentrischer Zugbelastung von chemischen Verbundankersystemen mit enger Abstützung verwendet werden. Ein Epoxidsichtfenster zur Übertragung der rotationssymmetrischen Spannungsverläufe ist nach ersten Erkenntnissen nicht nötig und behindert die Beobachtung. Auch das Aufbringen von

Rissprüfspray erweist sich als nachteilig für die Beobachtung der Rissvorgänge. Eine Verifizierung mit drei Nachweiskriterien hat gezeigt, dass die Ergebnisse der zwölf Versuche mit dem In Situ-Erkenntnisprüfstand vergleichbar mit denen der sechs Referenzversuche sind. Die Nachweiskriterien umfassen das Versagensbild, das Last-Verschiebungsverhalten und den Vergleich der Variationskoeffizienten der Verbundspannung.

Die ermittelten Rissverläufe im Beton und das Versagensbild der Verbundanker gleichen den Ergebnissen, die Appl (2009) bereits für einzelne Versagenszustände gewinnen konnte. Die Versagensereignisse, die im In Situ-Erkenntnisprüfstand beobachtet werden können, spiegeln die Messergebnisse wider, die Pregartner et al. (1998) erhalten haben. Demnach kombiniert der In Situ-Erkenntnisprüfstand den zeitlichen Verlauf der Rissentstehung von Pregartner et al. (1998) mit dem örtlichen Verlauf von Appl (2009). Die Risse verteilen sich mehrheitlich etwa gleichmäßig in der oberen Hälfte und im unteren Zehntel der eingemörtelten Gewindestange. Hierbei kann festgestellt werden, dass alle Initialrisse entfernt von der Gewindestange im Beton an den Kontaktflächen zwischen der zementösen Matrix und den Zuschlagstoffen bereits bei 30 % bis 40 % der Auszugskraft F_{ij} entstehen. Bei drei Vierteln der durchgeführten Versuche tritt in diesem Lastbereich fast zeitgleich ein Riss auf Höhe des oberen wie auch des unteren Bereiches der eingemörtelten Gewindestange im Beton auf. Diese Risse wandern bei Erhöhung der Zuglast zum einen im bekannten 35 °-Winkel zur Betonoberfläche, zum anderen auf eine Gewindepitze zu, bis der Verbundanker schließlich versagt.

Wie die Versuche von Appl (2009) oder Pregartner et al. (1998) kann auch dieser In Situ-Versuch durch die aufwendige Präparierung des Betons und der Gewindestange Standardversuche zur Bewertung von Befestigungsmitteln nicht ersetzen. Durch seine bisher einzigartige Möglichkeit, Versagensvorgänge von FIS V-Verbundankern kontinuierlich zu beobachten und hieraus Erkenntnisse zu gewinnen, eignet sich der In Situ-Erkenntnisprüfstand jedoch sehr gut für die Grundlagenforschung oder die Weiterentwicklung dieser Art von Befestigungssystemen. Im Weiteren muss geprüft werden, wie sich andere Befestigungsmittelarten, wie etwa Stahlanker oder Kunststoffdübel, aber auch andere chemische Systeme hiermit beobachten lassen.

Mit den vorliegenden Versuchsergebnissen konnte mithilfe der SCHUBVIERECKMETHODE nach Mattheck und Bethge (2004) ein Modell erzeugt werden, das das Risswachstum erklärt. Mithilfe des C&C²-ANSATZES nach Matthiesen (2021) konnte ein weiteres Modell, ein C&C²-SEQUENZMODELL, erstellt werden. Mit diesem lassen sich die sich verändernden Lastzustände und die damit verbundenen sich ändernden

Leitstützstrukturen aufgrund der Rissbildung in fünf Zustände aufteilen. Diese Zustände umfassen das Aufbringen des Installationsmoments, die Initialrissbildung im Beton, das Risswachstum zur Gewindeflanke hin, die partielle Unterbrechung der Leitstützstruktur und letztendlich das Versagen des Verbundankers. Dank dieses Modells lässt sich die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ des Verbundankers über die gesamten Versagensvorgänge beschreiben und ebenso können die funktionsrelevanten Gestaltelemente identifiziert werden. Als funktionsrelevante Wirkflächen können hierbei die umlaufende obere Gewindeflanke mit dazugehöriger Gewindespitze, die Auflagefläche der engen Abstützung und die Verbundfläche des Mörtels identifiziert werden. Nicht funktionserfüllend hingegen sind die Begrenzungsflächen, wie die umlaufende untere Gewindeflanke mit Gewindegrund, die nicht abgestützte Betonoberfläche und die Stirnfläche der Gewindestange im Bohrlochgrund, sowie dieser selbst. Dank der Ergebnisse des C&C²-SEQUENZMODELLS wird deutlich, dass an diesen Positionen Gestaltänderungen ohne Verlust der Funktionsfähigkeit möglich sind, beziehungsweise dass dort Designräume existieren. Ein partieller Verlust der Verbundfläche beeinflusst den Ergebnissen zufolge das Gesamtsystem nur wenig, wie bei den Verifizierungsversuchen des In Situ-Erkenntnisprüfstandes mit fehlendem Viertel im Verbund beobachtet werden konnte.

5.4 Entwicklungsmethode ASTRA: Analyseschritt

Am Vorgehen zur Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage soll sich der erste Schritt der zum Ziel gesetzten ASTRA-Methode zur Mechatronisierung orientieren. Da zu Beginn Erkenntnisse über die Versagensmechanismen, nämlich die Rissentstehung und die kontinuierliche Rissausbreitung, nur unzureichend vorliegen, wird die Beobachtungsbarriere ‚Beton‘ durch die Entwicklung eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes überwunden. Dieser In Situ-Erkenntnisprüfstand wird nach den drei Kriterien Verbundspannung, Auszugscharakteristik und Schadensbild im standardisierten zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung bewertet und verifiziert. Anschließend können durch Versuche mit diesem In Situ-Erkenntnisprüfstand Beobachtungen durchgeführt werden, um die Rissentstehung und das kontinuierliche Risswachstum zu erfassen und mittels einer geeigneten Methode, der SCHUBVIERECKMETHODE, schließlich zu erklären. Hieraus leitet sich ein C&C²-SEQUENZMODELL ab, das bei der Identifizierung der funktionsrelevanten und nicht funktionsrelevanten Flächen hilft und Hypothesen zu Designräumen ermöglicht. Folgende Aktivitäten sind in diesem Entwicklungsschritt somit zusammenzufassen:

- Überwindung von Beobachtungsbarrieren
- Methodische Analyse des GFZs
- Identifizierung von Designräumen mithilfe von Modellbildungsmethoden

Zu den Ergebnissen dieses Entwicklungsschrittes *Analyse* zählen ein besseres Systemverständnis zu den kontinuierlichen Schädigungsmechanismen eines Verbundankers, die Identifikation der funktionsrelevanten und nicht funktionsrelevanten Gestaltelemente und die Identifikation von Designräumen zur Mechatronisierung.

5.5 Zwischenfazit

Mit dem entwickelten In Situ-Erkenntnisprüfstand ist es möglich, die Beobachtungsbarriere ‚Beton‘ erfolgreich zu überwinden. Dadurch kann erstmals eine örtliche und zeitliche Untersuchung der Versagensvorgänge von Vinylester-basierenden Verbundankern durchgeführt werden. Zur Erklärung der Lasteinleitung wurden mithilfe eines SCHUBVIERECK-Modells die resultierenden Druck- und Zugspannungsrichtungen sowie die daraus resultierenden Schubspannungsrichtungen qualitativ bestimmt. Hieraus konnte mit einem C&C²-SEQUENZMODELL der zeitliche Ablauf dieser Schädigungsmechanismen bis zum Erreichen der Auszugskraft F_U erklärt werden. Die sich verringernde Leitstützstruktur und die anwachsende Reststruktur des Systems durch die Entstehung und das Wachstum der Risse im Beton bis hin zur Gewindestange lassen sich hiermit erklären.

Mit den Ergebnissen aus den Beobachtungen der Versuchsdurchführung und den beiden Modellen können Wirkflächen und Begrenzungsflächen identifiziert werden. Diese Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel verifiziert.

Die erste Teilforschungsfrage

Können durch einen In Situ-Erkenntnisprüfstand die Versagensvorgänge chemischer Befestigungsmittel auf Vinylesterbasis analysiert werden und lassen sich dadurch Begrenzungsflächen identifizieren?

kann insofern positiv beantwortet werden, als mit dem erarbeiteten In Situ-Erkenntnisprüfstand zur Eliminierung der BEOBACHTUNGSBARRIERE und den daraus generierten qualitativen SCHUBVIERECK- und C&C²-SEQUENZMODELLEN der GFZ für die Analyse der kontinuierlichen Versagensmechanismen ermöglicht wird und daraufhin Begrenzungsflächen identifiziert werden können.

Die einzelnen Aktivitäten zur Beantwortung dieser Teilforschungsfrage lassen sich als *Analyseschritt* der Entwicklungsmethode ASTRA zusammenfassen. Die hieraus abstrahierten Aktivitäten und Ergebnisse können gegebenenfalls auch für die Analyse anderer Befestigungsmittelsysteme angewendet werden.

6 Haltekrafteinfluss zusätzlicher Gestaltelemente

Dieses Kapitel enthält Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Veröffentlichung „Ermittlung eines Designraums zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln am Beispiel von Verbundankern“ (Horn, Zimprich, Gwosch & Matthiesen, 2020). Zur Übersichtlichkeit werden Zitate aus dieser Vorveröffentlichung nicht gesondert gekennzeichnet.

Ziel dieses Kapitels ist es, den zur Verfügung stehenden Designraum für sensorische Gestaltelemente zu definieren. Im vorangegangenen Kapitel wurden die Versagensvorgänge und Schädigungsmechanismen eines Verbundankers mit Hilfe eines In Situ-Erkenntnisprüfstandes analysiert. Diese werden anschließend mit einem SCHUBVIERECK-Modell und einem C&C²-SEQUENZMODELL abgebildet und beschrieben. Mit Hilfe der Zustände können daraufhin die funktionsrelevanten Wirkflächen und die funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen ermittelt werden. Inwieweit diese Elemente jedoch tatsächlich zur Funktionserfüllung beitragen können, soll mit Hilfe von Versuchen verifiziert werden. Der methodisch unterstützte Versuch kann bei der Ermittlung der Effekte von Gestaltelementen in den identifizierten Designräumen helfen. Diese werden in diesem Kapitel beschrieben und ausgewertet. Für die Versuchsdurchführung wird ein vollfaktorierter 3³-Versuchsplan erstellt, mit dem die Haupteffekte und die Wechselwirkungen der Haupteffekte anhand der Versuchsergebnisse statistisch bestimmt werden sollen. Mit diesem Versuchsplan ist es möglich, den Versuchsaufwand möglichst gering zu halten und Erkenntnisse hoher Aussagekraft zu erhalten.

Die Faktoren für diesen Versuchsplan werden aus den zum Ende des vorherigen Kapitels ermittelten funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen über die Bildung von Hypothesen abgeleitet. Die Hypothesen hierzu lauten, dass die funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen wie auch ein geringfügiger Teil des Verbundes genutzt werden können, um weitere Gestaltelemente für Sekundärfunktionen, wie etwa die Integration von Sensorik, einzubringen. Diese Gestaltelemente an Begrenzungsflächen sollen die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ nicht signifikant beeinflussen, während das Einbringen von Gestaltelementen an den funktionserfüllenden Wirkflächen diese signifikant negativ beeinflusst.

Die Hypothesen lauten zusammengefasst:

- Gestaltelemente in den drei Bereichen der funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen beeinflussen das Verbundankersystem nicht:
 - Untere Gewindeflanke und Gewindespitze (Abbildung 5.24 ③)
 - Freie Betonoberfläche (Abbildung 5.24 ④)
 - Stirnfläche der Gewindestange und Bohrlochgrund (Abbildung 5.24 ⑤)
- Gestaltelemente in den zwei Bereichen der funktionsrelevanten Wirkflächen beeinflussen das Verbundankersystem stark:
 - Obere Gewindeflanke und Gewindespitze (Abbildung 5.24 ①)
 - Auflagefläche der engen Abstützung (Abbildung 5.24 ②)
- Kleine Gestaltelemente in der Verbundfläche beeinflussen das Verbundankersystem kaum:
 - Verbundfläche (Abbildung 5.24 ⑥)

Um den zur Verfügung stehenden Designraum für sensorische Gestaltelemente zu definieren, wird die Struktur dieser Hypothesen für die vollfaktorielle Versuchsplanung in drei Faktoren mit jeweils drei Stufen unterteilt und neu gegliedert. Anschließend werden sie in Nullhypothesen umgewandelt. Dies ist nötig, da mittels statistischer Verfahren Hypothesen beziehungsweise Nullhypothesen nur verworfen, aber nicht bestätigt werden können. Vorerst werden die drei Hypothesen in drei Faktoren gegliedert: in radiale Anordnung (Abbildung 5.24 ① und ③), axiale Anordnung (Abbildung 5.24 ②, ④ und ⑤) und Verbundfläche (Abbildung 5.24 ⑥). Diese werden weiterhin jeweils in drei Stufen untergliedert. Die Stufen der axialen Anordnung besitzen dabei qualitativen Charakter, während die Stufen der Faktoren radiale Anordnung und Verbundfläche quantitativen Charakter besitzen. Durch die Wahl von drei Stufen für die Faktoren mit quantitativem Charakter kann ermittelt werden, ob diese Faktoren einen linearen Zusammenhang oder einen Zusammenhang einer polynomialen Funktion in Bezug auf die Auszugskraft F_U aufweisen, ohne einen Center-Point-Versuch durchzuführen. Die drei Nullhypothesen für die drei Faktoren werden antagonistisch zu den zwei Hypothesen formuliert, damit das Verwerfen der Nullhypothese die Hypothese bestätigt. Die drei Nullhypothesen lauten:

1. Axial angeordnete Gestaltelemente beeinflussen die Tragfähigkeit signifikant.
2. Eine Abdeckung des Gewindeganges beeinflusst die Tragfähigkeit nicht signifikant.
3. Eine großflächige Abdeckung der Verbundfläche beeinflusst die Tragfähigkeit nicht signifikant.

Anhand dieser Nullhypothesen werden nun im Folgenden Gestaltelemente und der dazugehörige vollfaktorielle 3^3 -Versuchsplan erstellt.

6.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Für die Verifizierung der identifizierten funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen sollen mittels Rapid-Prototyping-Verfahren herkömmliche Verbundanker so abgewandelt werden, dass diese über die Verwerfung der Nullhypothesen die vorher aufgestellten Hypothesen bestätigen. Außerdem soll hiermit statistisch geklärt werden, ob die Effekte einen linearen Einfluss auf die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ ausüben. Für die Versuchsplanerstellung mit DoE werden die Nullhypothesen, wie bereits erläutert, für den Verbundanker abstrahiert in drei verschiedene Faktoren eingeteilt:

1. Gestaltelement in axialer Anordnung
2. Gestaltelement in radialer Anordnung
3. Unterbrechung der Verbundfläche (Mantelfläche)

Experimentell sollen diese drei Faktoren mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit jeweils drei Stufen randomisiert geplant, durchgeführt und mögliche Wechselwirkungen in der Auswertung erkannt werden. Die drei Stufen werden, wie bereits erwähnt, gewählt, da auch trotz Rapid-Prototyping-Verfahren die Erstellung der Versuchsmuster und dadurch die Durchführung von Center-Point-Versuchen schwer möglich sind. Hierdurch lässt sich in der Versuchsauswertung erkennen, ob die einzelnen Stufen einen linearen oder polynomialen Einfluss auf die Haltekraft haben und wie sie mit den Stufen der anderen variierenden Faktoren wechselwirken.

Tabelle 4: Übersicht der Faktoren und der jeweiligen Stufen des vollfaktoriellen 3³-Versuchsplans

	Faktor 1: Axiale Anordnung	Faktor 2: Radiale Anordnung	Faktor 3: Verbundfläche
Stufe 1	Kein Element	Kein Element	Kein Element
Stufe 2	Element im Bohrlochgrund	Abdeckung des Gewindegrundes	Geringfügige Abdeckung
Stufe 3	Element an Betonoberfläche	Abdeckung des Gewindegangs	Großflächige Abdeckung

Eine Übersicht aller Faktoren und der jeweiligen Faktorstufen zeigt Tabelle 4 und deren Positionen in Verbundankersystem Abbildung 6.1. Wie dort zu sehen, sind die drei Stufen für den ersten Faktor ‚Gestaltelemente in axialer Anordnung‘: kein Element, Element im Bohrlochgrund (vgl. Abbildung 6.1 ⑤) und Element an der

Tabelle 5: Versuchsplan der Versuche des GFZs

Ver-suchsmuster	Codierung (x:y:z)	Axiale Anordnung x	Radiale Anordnung y	Verbundfläche z	Ver-suchsreihenfolge
N01	(1:1:1)	Kein Element	Kein Element	Kein Element	19
N02	(1:2:1)	Kein Element	Gewindegrund	Kein Element	6
N03	(1:3:1)	Kein Element	Gewindegang	Kein Element	15
N04	(1:1:2)	Kein Element	Kein Element	geringfügig	26
N05	(1:2:2)	Kein Element	Gewindegrund	geringfügig	17
N06	(1:3:2)	Kein Element	Gewindegang	geringfügig	13
N07	(1:1:3)	Kein Element	Kein Element	großflächig	21
N08	(1:2:3)	Kein Element	Gewindegrund	großflächig	14
N09	(1:3:3)	Kein Element	Gewindegang	großflächig	5
N10	(2:1:1)	Bohrlochgrund	Kein Element	Kein Element	24
N11	(2:2:1)	Bohrlochgrund	Gewindegrund	Kein Element	16
N12	(2:3:1)	Bohrlochgrund	Gewindegang	Kein Element	2
N13	(2:1:2)	Bohrlochgrund	Kein Element	geringfügig	7
N14	(2:2:2)	Bohrlochgrund	Gewindegrund	geringfügig	20
N15	(2:3:2)	Bohrlochgrund	Gewindegang	geringfügig	8
N16	(2:1:3)	Bohrlochgrund	Kein Element	großflächig	12
N17	(2:2:3)	Bohrlochgrund	Gewindegrund	großflächig	9
N18	(2:3:3)	Bohrlochgrund	Gewindegang	großflächig	18
N19	(3:1:1)	Betonoberfläche	Kein Element	Kein Element	27
N20	(3:2:1)	Betonoberfläche	Gewindegrund	Kein Element	22
N21	(3:3:1)	Betonoberfläche	Gewindegang	Kein Element	10
N22	(3:1:2)	Betonoberfläche	Kein Element	geringfügig	23
N23	(3:2:2)	Betonoberfläche	Gewindegrund	geringfügig	4
N24	(3:3:2)	Betonoberfläche	Gewindegang	geringfügig	1
N25	(3:1:3)	Betonoberfläche	Kein Element	großflächig	11
N26	(3:2:3)	Betonoberfläche	Gewindegrund	großflächig	25
N27	(3:3:3)	Betonoberfläche	Gewindegang	großflächig	3

Der letzte Faktor ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ (vgl. Abbildung 6.1 ⑥) bildet das Einbringen von Elementen in die Verbundfläche des Mörtels ab. Hierbei sind die drei Stufen ‚keine Abdeckung‘, ‚geringfügige Abdeckung‘ und ‚großflächige Abdeckung‘ vertreten. Die erste Stufe ‚keine Abdeckung‘ zeigt erneut die Referenz. Die Stufen ‚geringfügige Abdeckung‘ und ‚großflächige Abdeckung‘ sollen wiederum Aufschluss darüber geben, wie stark das Verbundsystem bei linear steigender Verbundunterbrechung und gleichbleibender Verankerungstiefe in seiner Primärfunktion beeinflusst wird und ob überhaupt eine Linearität bei axialer Abdeckung der Verbundfläche vorliegt.

Zur Unterstützung der Versuchsmatrixerstellung und der späteren statistischen Versuchsauswertung wird das DoE- und Statistikmodul der Software MINITAB 19 der Firma MINITAB GMBH verwendet. Mit Eingabe der aufgestellten Faktoren und Stufen und ohne Replikationen der Versuche ermittelt die Software den vollfaktoriellen 3^3 -Versuchsplan beziehungsweise die notwendigen 27 Versuche. Der nichtrandomisierte Versuchsplan mit allen gewünschten Kombinationen zur Ermittlung der Wechselwirkungen ist in Tabelle 5 dargestellt. Ebenfalls sind die tatsächliche Versuchsreihenfolge sowie die für die vereinfachte Darstellung genutzte Codierung (x:y:z) hierin aufgeführt. Der x-Wert dieser Codierung steht für die Faktorstufe des ersten Faktors und kann von 1 für Stufe 1 bis 3 für Stufe 3 variieren. Der y-Wert und der z-Wert der Codierung sind dementsprechend gleichgeartet.

6.2 Erstellung der GFZ-Versuchsmuster

Die festgelegten Gestaltelemente sollen auf ihren GFZ in GFZ-Versuchsmustern experimentell untersucht werden. Hierfür werden die festgelegten Gestaltelemente in die GFZ-Versuchsmuster integriert und dienen so als Ersatzsysteme. Vor den Versuchen müssen die Gestaltelemente jeder Faktorstufe erstellt werden. Für die Faktoren 1 und 3 kam ein FORMIGA P 110 3D-Drucker der Firma EOS GMBH beziehungsweise eine Unterlegscheibe aus Stahl zum Einsatz, die einen Innendurchmesser von $d_i = 12$ mm, einen Außendurchmesser von $d_a = 28$ mm und eine Dicke von $t = 5$ mm besitzt. Die im CAD erstellten Geometrien wurden mit dem gewählten 3D-Drucker mit einer Schichtdicke von 0,1 mm erstellt und mittels UV-aushärtendem Sekundenkleber, UV-KLEBER der Firma fischerwerke GmbH & Co. KG (Cyanoacrylat mit Photoinitiator), auf M12-Gewindestangen mit der Länge $l = 120$ mm und der Festigkeitsklasse 12.9 geklebt, um eine Verschiebung bei der Installation der GFZ-Versuchsmuster zu verhindern. Für die Gestaltelemente des Faktors 2, der radialen Anordnung, wurden Kupferlackdrähte um die Gewindestange in den Gewindegang gewickelt und an den Enden jeweils mit dem UV-KLEBER verklebt. Klebeversuche mit dem ausgehärteten Cyanoacrylat und dem Vinylestermörtel haben ergeben, dass keine Inhibition der Vernetzung stattfindet.

Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft eine der verwendeten M12-Gewindestangen mit der Länge 160 mm und der Festigkeitsklasse 12.9, wie sie für die Referenzversuche und als Rohling für die Gestaltelemente verwendet wird.



Abbildung 6.2: Darstellung einer als Referenz und Rohling der GFZ-Versuchsmuster, verwendeten M12-Gewindestange der Länge 160 mm und der Festigkeitsklasse 12.9

Für die erste Stufe des Faktors 1 ‚Gestaltelemente in axialer Anordnung‘ (1:y:z) werden keine axialen Gestaltelemente eingebracht. Für die zweite Stufe des Faktors 1 (2:y:z) wird ein weißes Element mit dem Außendurchmesser $d_a = 12$ mm und der Dicke $t = 5$ mm an der unteren Stirnfläche der Gewindestange aufgeklebt. Abbildung 6.3 enthält das fertige Versuchsmuster. Rot eingekreist ist hier das weiße, aufgeklebte Kunststoff-Gestaltelement zu erkennen. Das graue CAD-Element dient zur Veranschaulichung der Geometrie.



Abbildung 6.3: Gewindestange mit aufgeklebtem weißem Gestaltelement an der Gewindestangenstirnfläche mit dem Außendurchmesser $d_a = 12$ mm und der Dicke $t = 5$ mm zur Darstellung der Faktorstufe (2:y:z)

Eine schematische Darstellung dieses Versuchsmusters im eingebauten Zustand ist in Abbildung 6.4 zu erkennen. Das Gestaltelement der zweiten Faktorstufe des Faktors 1 ist hierbei in blau eingefärbt.

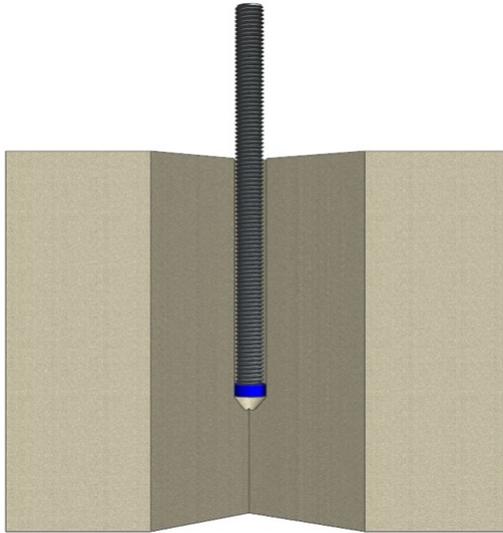


Abbildung 6.4: Darstellung der zweiten Faktorstufe des Faktors 1 (2:y:z) als blaues Element im Einbauzustand

Für die dritte Stufe des Faktors 1 (3:y:z) wird eine angefertigte Unterlegscheibe aus Stahl so an die Gewindestange fixiert, dass sie nach der Installation des Verbundankers direkt auf der Betonoberfläche liegt. Abbildung 6.5 zeigt die Gewindestange mit angeklebtem Element für den direkten Kontakt mit der Betonoberfläche und Abbildung 6.5 schematisch den Einbauzustand mit dem grün eingefärbten Gestaltelement. Die Stahlunterlegscheibe hat die folgenden Maße: Innendurchmesser $d_i = 12$ mm, Außendurchmesser $d_a = 28$ mm und Dicke $t = 5$ mm.



Abbildung 6.5: Gewindestange mit axialem Element, einer Stahlunterlegscheibe zur Darstellung der Faktorstufe (3:y:z) mit Innendurchmesser $d_i = 12$ mm, Außendurchmesser $d_a = 28$ mm und Dicke $t = 5$ mm

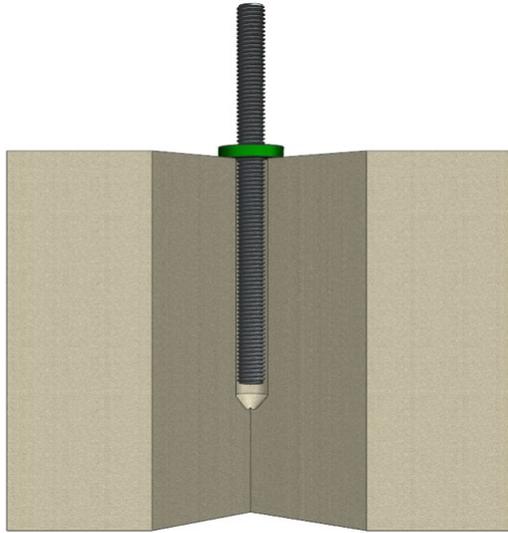


Abbildung 6.6: Einbauzustand der dritten Faktorstufe des ersten Faktors (3:y:z) schematisch als grünes Element dargestellt

Die Versuche der ersten Stufe des zweiten Faktors ‚Gestaltelemente in radialer Anordnung‘ (x:1:z) werden ebenfalls mit der Referenz, also ohne zusätzliches Gestaltelement in radialer Anordnung, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, abgebildet.

Für die zweite Stufe, die Abdeckung des Gewindegundes (x:2:z), wird ein 0,2 mm dicker Kupferlackdraht um die Gewindestange in den Gewindegund über die komplette Einbindetiefe mit etwas Überstand in axialer Richtung aus dem Bohrloch heraus gewickelt. In Abbildung 6.7 lässt sich das Versuchsmuster für die Abdeckung des Gewindegundes mit eingezeichneter Einbindetiefe und einer schematischen Schnittdarstellung durch einen Gewindegang zur Darstellung der Abdeckung mit dem 0,2 mm dicken Kupferlackdraht erkennen. Abbildung 6.8 veranschaulicht schematisch dieses Versuchsmuster im Einbauzustand über die komplette Länge des Versuchsmusters mit Rot eingefärbtem Gestaltelement.

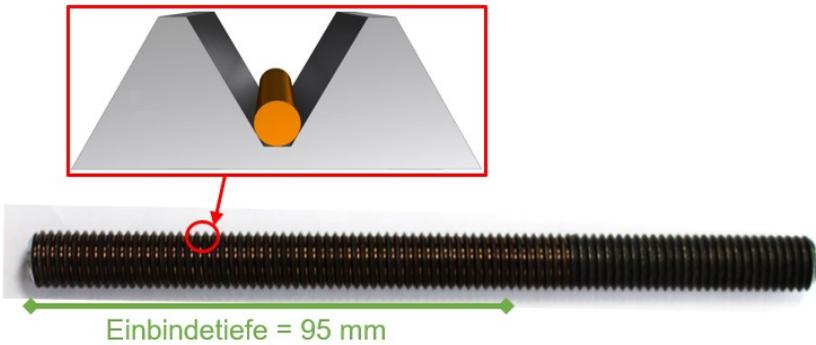


Abbildung 6.7: Foto der Gewindestange mit 0,2 mm Kupferlackdraht im Gewindegrund zur Abbildung der Faktorstufe (x:2:z) des Versuchsplans sowie eine Skala für die Einbindetiefe und eine schematische Darstellung des Kupferlackdrahtes im Gewindegrund

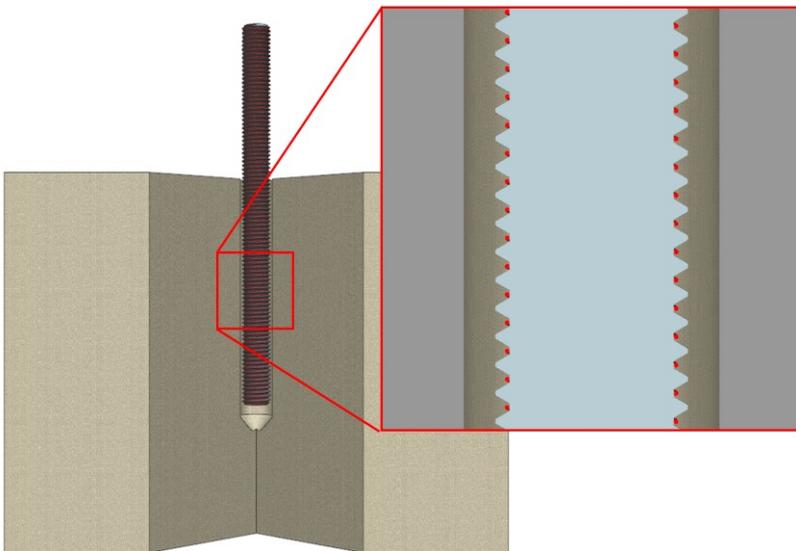


Abbildung 6.8: Darstellung der in Rot gekennzeichneten zweiten Faktorstufe des Faktors 2 (x:2:z) im Einbauzustand mit Detaildarstellung des Gestalteleementes im Gewindegrund

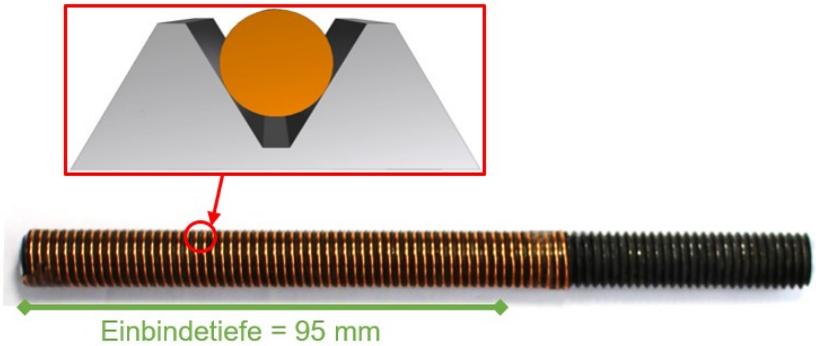


Abbildung 6.9: Foto der Gewindestange mit 0,75 mm Kupferlackdraht im Gewindegang zur Abbildung der Faktorstufe (x:3:z) des Versuchsplans sowie eine Skala für die Einbindetiefe und eine schematische Darstellung des Kupferlackdrahtes im Gewindegrund

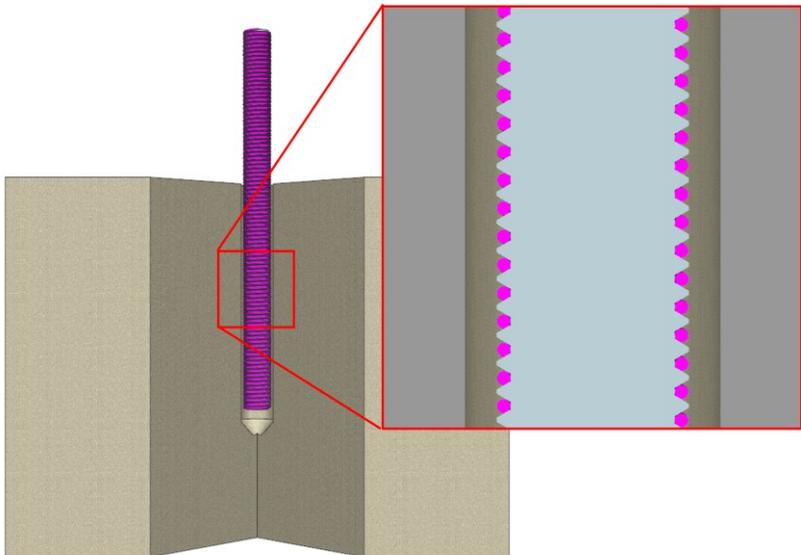


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung des Einbauzustandes der dritten Faktorstufe des Faktors 2 (x:3:z) in Magenta gekennzeichnet mit Detaildarstellung im Schnittbild

Die dritte Stufe des Faktors 2 (x:3:z) zur Überprüfung des Auffüllens des Gewindengangs wird mit Wickeln eines 0,75 mm dicken Kupferlackdrahtes in den Gewindengang realisiert. Dieser wird über die komplette Einbindetiefe mit etwas Überstand in axialer Richtung aus dem Bohrloch heraus an beiden Enden mittels UV-KLEBER fixiert. Abbildung 6.9 enthält ein Foto eines Versuchsmusters mit eingezeichneter Einbindetiefe. Zusätzlich ist eine schematische Schnittdarstellung durch einen Gewindengang abgebildet, die die Befüllung des Gewindengangs durch den 0,75 mm dicken Kupferlackdraht zeigt. In Abbildung 6.10 findet sich eine schematische Darstellung des Einbauzustandes des Versuchsmusters mit Detailansicht zur Lage des Gestaltelementes über die gesamte Länge in Pink eingefärbt.

Der letzte Faktor 3 soll den Einfluss der Unterbrechung der Verbundfläche auf die Haltekraft des Verbundankers darstellen. Hierfür wird in der ersten Stufe (x:y:1) die in Abbildung 6.2 dargestellte Gewindestange als Referenzversuchsmuster verwendet.

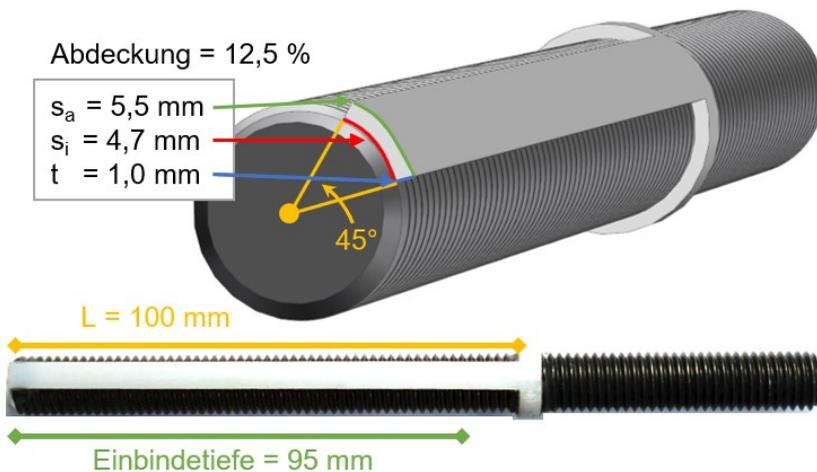


Abbildung 6.11: Darstellung der 3D-gedruckten Steggeometrie und Foto des Versuchsmusters der Faktorstufe (x:y:2) für eine 12,5-prozentige Verbundabdeckung mit den relevanten Maßen

Für die zweite Stufe des Faktors 3 (x:y:2) wird ein 3D-gedruckter Steg an die Gewindestange angebracht. Hierfür wird über die komplette Länge der Einbindetiefe

von $h_{ef} = 95$ mm ein 3D-gedruckter Steg unten an der Gewindestange mit UV-KLEBER fixiert. Dieser Steg hat eine Gesamtlänge von $l = 100$ mm und einen Ring zur oberen Fixierung an der Gewindestange. Somit befinden sich die oberen 5 mm des Stegs und der Ring nach der Installation des Verbundankers außerhalb des Bohrlochs. Der Steg soll geringfügig den Verbund unterbrechen und hierfür 12,5 % des Ringspaltes zwischen Bohrlochwand und Gewindestange ausfüllen. Dazu besitzt der Steg eine Dicke von $t = 1$ mm, einen Innenradius an der Gewindestange von $s_i = 4,7$ mm und einen Außenradius zur Bohrlochwand hin von $s_a = 5,5$ mm. Abbildung 6.11 veranschaulicht das Versuchsmuster und das CAD-Modell mit allen relevanten Maßen und Abbildung 6.12 die schematische Darstellung des Versuchsmusters über die gesamte Länge im Einbauzustand mit in Gelb eingefärbtem Gestaltelement ohne Ring.

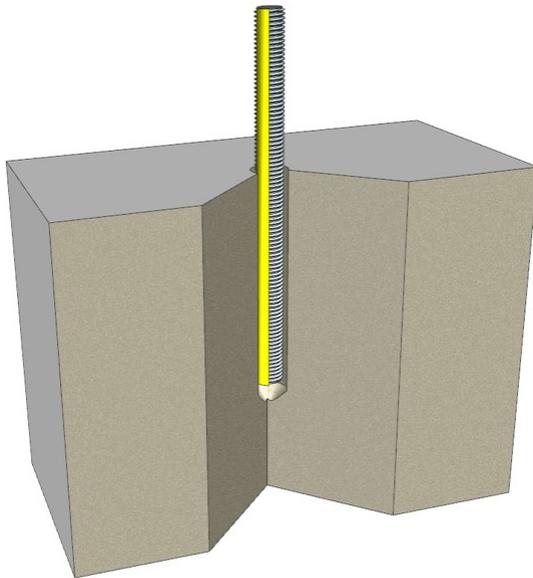


Abbildung 6.12: Darstellung der in Gelb dargestellten zweiten Faktorstufe des Faktors 3 (x:y:2) mit 12,5-prozentiger Abdeckung der Verbundfläche im Einbauzustand

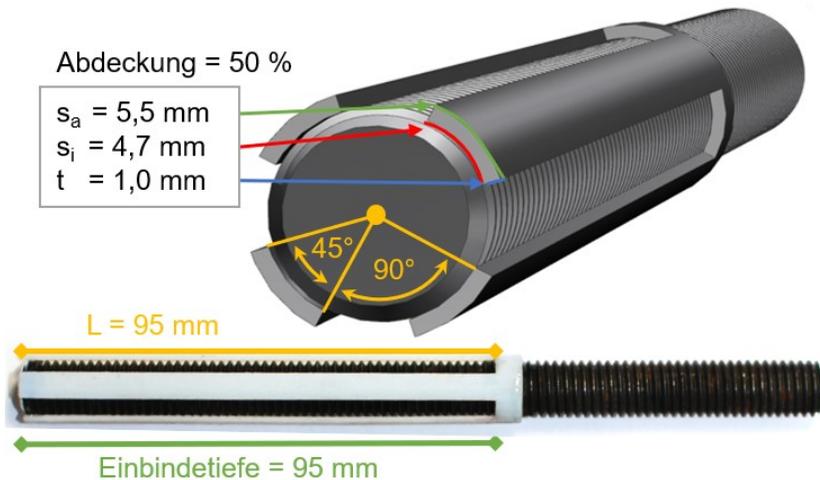


Abbildung 6.13: Abbildung der Faktorstufe (x:y:3) zur großflächigen Abdeckung der Verbundfläche von 50 %, aufgeteilt in vier rotationssymmetrisch angeordnete Elemente mit allen relevanten Maßen

Die dritte Stufe des Faktors 3 (x:y:3) soll für die Versuche zur großflächigen Abdeckung des Verbundes im Versuchsplan genutzt werden. Hierfür wird eine 3D-gedruckte geschlitzte Hülse verwendet, wie sie in Abbildung 6.13 dargestellt ist, und am unteren Ende der Gewindestange mit UV-KLEBER fixiert. Am oberen Ende befindet sich, wie bei der vorherigen Variante mit Steg, ein Ring zur Fixierung am oberen Ende. Die vier Stege der geschlitzten Hülse sind rotationssymmetrisch angeordnet, wobei jeder Steg der Geometrie der Variante mit individuellem Steg entspricht. Hierdurch erreicht dieses Versuchsmuster eine Verbundflächenabdeckung von 50 %. Aus Stabilitätsgründen bei der Installation dieser Versuchsmuster wird die Gesamtlänge der Stege auf die Bohrlochtiefe von 95 mm reduziert. Somit liegt der Ring direkt auf Höhe der Betonoberfläche.

Abbildung 6.14 zeigt schematisch die Anordnung der Stege des Gestaltelementes ohne Ring über die gesamte Länge des Versuchsmusters. Die Stege des Versuchsmusters sind hierbei in Orange eingefärbt.

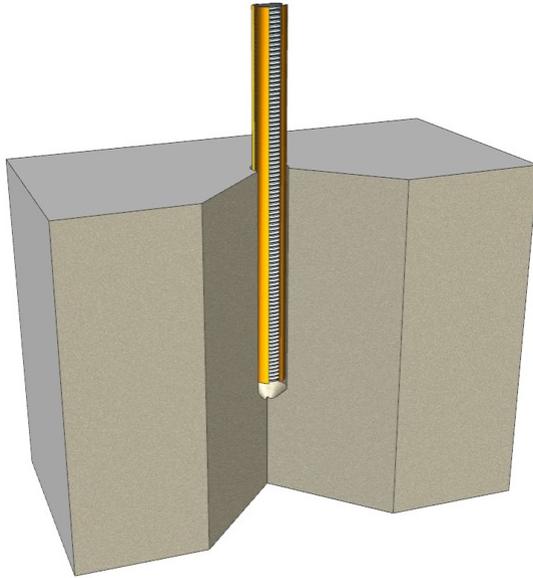


Abbildung 6.14: Schematische Darstellung des Einbauzustandes der dritten Faktorstufe des Faktors 3 (x:y:3) in Orange dargestellt mit einer Abdeckung von 50 % der Verbundfläche

Wie aus Tabelle 5 zu entnehmen, sollen die vorgestellten Stufen der drei Faktoren für eine statistische Auswertung ihres Einflusses und möglicher Wechselwirkungen kombiniert werden.

Für den Faktor 1 ‚Gestaltelemente in axialer Anordnung‘ der ersten Stufe ohne axiales Element verbleiben somit noch die vier Kombinationen (1:2:2), (1:2:3), (1:3:2) und (1:3:3), wie in Abbildung 6.15 dargestellt. Abbildung 6.15 a und b zeigen (1:2:2) und (1:2:3) mit dem eingelegten 0,2 mm dicken Draht mit geringfügiger und großflächiger Abdeckung des Verbundes. Die Darstellungen in Abbildung 6.15 c und d enthalten (1:3:2) und (1:3:3) ebenfalls mit geringfügiger (c) und großflächiger Abdeckung (d) des Verbundes, hierbei jedoch in Kombination mit der Abdeckung des Gewindegangs.



Abbildung 6.15: Kombinationen aus dem Versuchsplan mit der ersten Stufe des Faktors 1 mit geringfügiger (12,5 %) bzw. großflächiger (50 %) Abdeckung des Verbundes, jeweils mit Gewindegrundabdeckung (a (1:2:2) und b (1:2:3)) bzw. Auffüllen des Gewindegangs (c (1:3:2) und d (1:3:3))

Die Kombinationen der Faktorstufen (x:y:2) und (x:y:3) ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ mit der Faktorstufe (2:y:z) ‚Bohrlochgrund‘ und der Faktorstufe (x:1:z) ‚kein Element‘ ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Dabei verlaufen die Stege für die geringfügige und großflächige Abdeckung der Verbundfläche (vgl. Abbildung 6.11 und Abbildung 6.13) an der unveränderten Gewindestange ohne Abdeckung des Gewindegrunds und des Gewindegangs an das in Abbildung 6.3 vorgestellte Element der Bohrlochgrundabdeckung (zweite Stufe des Faktor 1) und sind hiermit verbunden.



Abbildung 6.16: Versuchsmuster mit der Faktorzusammensetzung mit geringfügiger (12,5 %) (2:1:2) (a) und großflächiger (50 %) (2:1:3) (b) Abdeckung des Gewindegrundes und ‚Element im Bohrlochgrund‘

In Abbildung 6.17 sind die Faktorstufen des Faktors 3 ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ mit der Faktorstufe (2:y:z), der Abdeckung des Bohrlochgrundes, und (x:2:z), der Abdeckung des Gewindegrundes, erkennbar. Hierbei zeigt Abbildung 6.17 (a) (2:2:1) mit keiner Abdeckung, (b) (2:2:2) mit geringfügiger Abdeckung und (c) (2:2:3) mit großflächiger Abdeckung.



Abbildung 6.17: Variation der Unterbrechung der Verbundfläche z mit der Faktorzusammensetzung (2:2:z) ‚Abdeckung des Bohrlochgrundes‘ und ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘



Abbildung 6.18: Darstellung der Versuchsmuster mit (2:y:z), Abdeckung des Bohrlochgrundes, und (x:3:z), Abdeckung des Gewindeganges, mit den verschiedenen Stufen des Faktors 3: keine Unterbrechung der Verbundfläche (0 %) (x:y:1) (a), geringfügige (12,5 %) Abdeckung der Verbundfläche (x:y:2) (b) und großflächige (50 %) Abdeckung der Verbundfläche (x:y:3) (c)

Die Variationen der Faktorstufen des Faktors 3 sind in Abbildung 6.18 dargestellt. Konstant sind hierbei bei allen Versuchsmustern die Faktorstufen (2:y:z) ‚Abdeckung des Bohrlochgrundes‘ und (x:3:z) ‚Abdeckung des Gewindeganges‘. Variiert wird die Unterbrechung der Verbundfläche mit keiner Abdeckung (x:y:1) (a), geringfügiger Abdeckung (x:y:2) (b) und großflächiger Abdeckung (x:y:3) (c).

Synchron zu den dargestellten Variationen der Faktorzusammenstellung mit (2:y:z) werden die Stufen der Faktoren 2 und 3 mit der Faktorstufe (3:y:z), des axialen Elementes an der Betonoberfläche, variiert (siehe Abbildung 6.5).

6.3 Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Für die 27 Auszugsversuche des Versuchsplans werden jeweils neun Löcher pro Betonplatte gebohrt. Um die Toleranz der Verankerungstiefe bei ± 1 mm einzuhalten, werden die zu tiefen Bohrlöcher als Fehlbohrungen gekennzeichnet und nicht verwendet; zu flache Bohrungen werden nachgebohrt. Aus diesem Grund müssen vier Betonplatten für die 27 Versuche verwendet werden. Diese vier verwendeten Betonplatten besitzen die Maße 800 mm x 800 mm x 300 mm und eine Festigkeitsklasse von C20/25. Zum Zeitpunkt des Auszugs liegt die aus den Werten vorangegangener Druckfestigkeitsmessungen näherungsweise berechnete Betondruckfestigkeit bei $f_{c,150} = 34$ N/mm². Die Bohrungen werden mit einer Tiefe von $h_{ef} = 95$ mm ± 1 mm beziehungsweise $h_{ef} = 100$ mm ± 1 mm für die neun Versuchsmuster mit der Faktorstufe (2:y:z) ‚Abdeckung des Bohrlochgrundes‘ mit einem Zweischneider-Bohrer mit einem Bohrreckmaß von $d_{cut} = 14,48$ mm bis $d_{cut} = 14,46$ mm und einem 2 kg-Bohrhammer im Bohrständler, für ein möglichst vertikales Bohrloch, gebohrt. Für eine gleichmäßige Verteilung mit ausreichend Achs- und Randabstand werden die Vorgaben der (ETA-02/0024) eingehalten. Der Mindestachs- und Randabstand beträgt laut Bewertung $s_{min} = c_{min} = 55$ mm, während für die vorliegenden Versuche Achs- und Randabstände von $s_{min} = 225$ mm und $c_{min} = 175$ mm vorliegen. Anschließend werden die Bohrlöcher nach Vorgaben der Bewertung durch jeweils viermaliges Ausblasen, Ausbürsten und erneutes Ausblasen gereinigt. Die Verbundanker werden auf kombinierten Auszug mit einem zentralen Auszugsversuch, angelehnt an das Versuchsprogramm R1 „Verbundfestigkeit mit enger Abstützung“ der (EAD 330499-00-0601) (siehe Abbildung 5.7), durchgeführt. Um den Einfluss der nicht abgestützten Betonoberfläche (siehe Abbildung 5.24 ④) besser sichtbar zu machen, wird der Abstützungsdurchmesser in Anlehnung an (ETAG 001 - PART 5) mit $d_{conf} = 28$ mm größer gewählt. Die Verbundspannungen werden aus den tatsächlich am ausgezogenen Verbundanker gemessenen Verankerungstiefen und der Auszugskraft berechnet (vgl. Gleichungen 5-3 und 5-4). Die berechnete Verbundspannung dient dabei als Bewertungskriterium der Gestaltelemente verglichen mit den Referenzwerten.

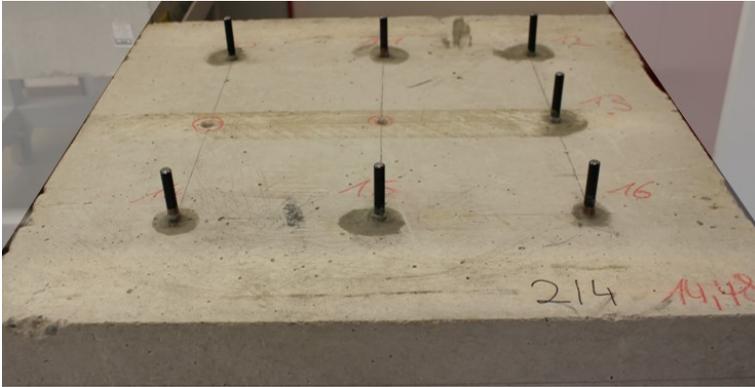


Abbildung 6.19: Beispielhafte Darstellung eines vorbereiteten Betonprüfkörpers mit installierten Versuchsmustern und zwei zu tiefen Fehlbohrungen

Um trotz möglicher umweltbedingter Störgrößen während der Versuche eine hohe statistische Sicherheit zu gewährleisten, werden die 27 Versuche des vollfaktoriellen Versuchsplans, wie bereits erwähnt, randomisiert durchgeführt. Die Versuchsreihenfolge aufgrund der Randomisierung ist in Tabelle 5 aufgeführt. Abbildung 6.19 zeigt beispielhaft den zweiten Betonprüfkörper mit sieben installierten Versuchsmustern und zwei zu tiefen, markierten Fehlbohrungen. Die Versuchsmuster wurden mit FIS V nach dem randomisierten Versuchsplan gesetzt und für die spätere statistische Auswertung nach diesem Versuchsplan durchnummeriert.

Die Versuche werden unter Aufzeichnung der Kraft mittels Kraftmessdose und der Verschiebung mittels Messung des Kolbenweges direkt axial am ausreichend steifen Hydraulikkolben durchgeführt. Zur Erfassung und Speicherung der Daten wird die Software DIADEM von NATIONAL INSTRUMENTS verwendet. Die ausgezogenen Versuchsmuster werden optisch bewertet und die tatsächliche Verbundfläche wird kontrolliert und gemessen.

6.4 Ergebnisse der Versuche

Eine Auswahl der Versuchsmuster aus den Versuchen vor und nach dem Auszugsversuch sind in Abbildung 6.20 dargestellt. Die Codierung beschreibt, wie bereits erwähnt, die genaue Faktorzusammensetzung der Versuchsmuster. Offensichtlich ist, dass die an den Versuchsmustern N10 (2:1:1) und N18 (2:3:3) stirnseitig angebrachten Gestaltelemente nach dem Auszugsversuch im Bohrloch verblieben sind.

Auch das Gestaltelement ‚Bettoberfläche‘ am Versuchsmuster N19 (3:1:1) hinterlässt abgesehen von dem vergleichsweise ausgeprägten Betonausbruchkragen keine sichtbaren Einflüsse auf das Versuchsmuster.

Unauffällig in Abbildung 6.20 sind die Bruchbilder der Versuchsmuster N01 (1:1:1), N02 (1:2:1), N10 (2:1:1) und N19 (3:1:1). Sie zeigen qualitativ die für Auszugsversuche mit enger Abstützung üblichen Bruchbilder auf Höhe der Scherebene der Gewindespitzen. An den Positionen der Gestaltelemente ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘ der Versuchsmuster N18 (2:3:3) und N03 (1:3:1) lassen sich Bereiche erkennen, an denen scheinbar kein Verbund stattfand. Die 3D-gedruckte Stege für die Gestaltelemente ‚geringfügige‘ und ‚großflächige Unterbrechung der Verbundfläche‘ der Versuchsmuster N04 (1:1:2), N05 (1:2:2), N07 (1:1:3) und N18 (2:3:3) sind wie die Gestaltelemente ‚Bohrlochgrund‘ beim Auszugsversuch ebenfalls im Bohrloch verblieben. An deren Positionen kann aufgrund des fehlenden Mörtels davon ausgegangen werden, dass in diesen Bereichen der Verbund unterbrochen war.

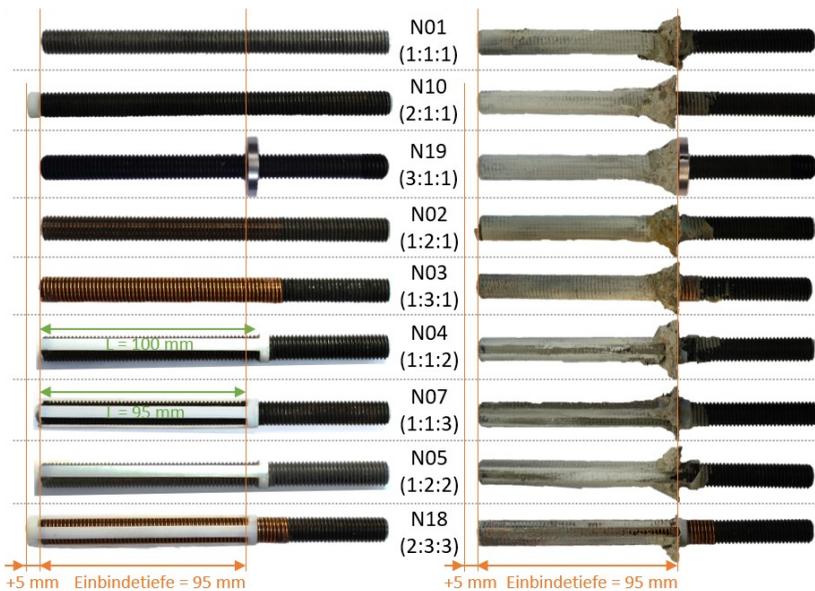


Abbildung 6.20: Beispielhafte Darstellung von Versuchsmustern mit verschiedenen Faktorstufen (siehe Codierung) vor und nach dem Auszugsversuch

Die Kraft-Weg-Diagramme der ersten neun Versuche in der Durchführungsreihenfolge des randomisierten Versuchsplans sind in Abbildung 6.21 mit den jeweiligen Auszugskräften F_T dargestellt. Der Versuch wurde nach Erreichen der Auszugskraft beendet. N24 (3:3:2) erreicht nach 1,3 mm Weg eine Kraft von 54,0 kN, N12 (2:3:1) erreicht bis zur Auszugskraft von 68,6 kN einen Weg von 1,9 mm. Die Versuchsmuster N27 (3:3:3) und N09 (1:3:3) erzielen mit 43,4 kN beziehungsweise 43,5 kN bei einem Weg von 1,0 mm beziehungsweise 1,3 mm die niedrigsten Auszugskräfte in diesem Diagramm. N23 (3:2:2) und N02 (1:2:1) hingegen besitzen bei einem Weg von jeweils 2,7 mm die höchsten Auszugskräfte dieses Diagramms mit 96,9 kN beziehungsweise 95,1 kN. N13 (2:1:2) hingegen erreicht mit einer Auszugskraft von 86,3 kN bei einem Weg von 2,5 mm einen etwa zehn Prozent geringeren Auszugswert. Die Versuchsmuster N15 (2:3:2) und N17 (2:2:3) erreichen mit 57,8 kN beziehungsweise 60,8 kN Auszugskräfte auf einem ähnlichen Niveau bei Verschiebungen von 1,5 mm beziehungsweise 1,9 mm.

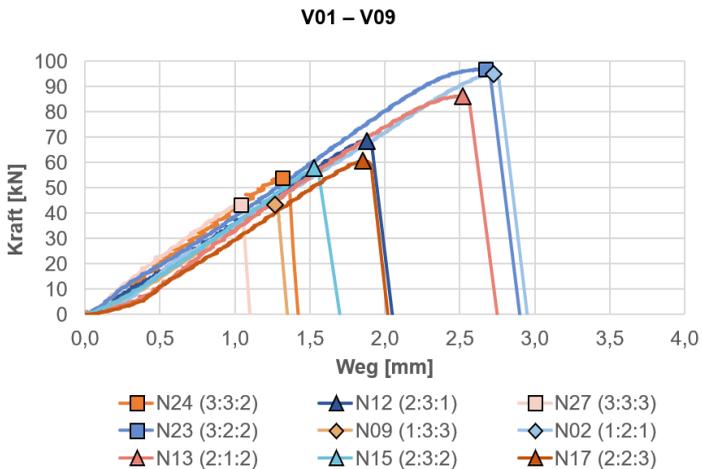


Abbildung 6.21: Kraft-Weg-Diagramm der Auszugsversuche 1 bis 9 nach randomisiertem Versuchsplan jeweils mit eingezeichneter Auszugskraft

Die Kraft-Weg-Diagramme der Versuche 10 bis 18 sind mit ihren jeweiligen Maximalwerten in Abbildung 6.22 ersichtlich. Das Versuchsmuster N21 (3:3:1) erreicht im zentrischen Auszugsversuch einen Weg von 1,9 mm und eine Auszugskraft von 72,2 kN. N25 (3:1:3), N06 (1:3:2) und N08 (1:2:3) erzielen mit Auszugskräften von 58,2 kN, 60,7 kN und 61,6 kN ein vergleichbares Niveau bei Wegen von 1,5 mm,

1,8 mm und 1,9 mm. N16 (2:1:3) und N03 (1:3:1) besitzen mit 66,2 kN beziehungsweise 64,6 kN bei einem Weg von 1,8 mm beziehungsweise 1,7 mm eine ähnliche Laststufe. N11 (2:2:1) und N05 (1:2:2) zeigen die höchsten Auszugskräfte dieses Diagramms mit 92,6 kN und 94,8 kN sowie die größten Verschiebungen mit einem Weg von 2,9 mm und 2,6 mm. Die geringste Auszugskraft des gesamten Versuchsplans erzielt N18 (2:3:3) mit einer Auszugskraft von 39,5 kN und einem Weg von 1,2 mm.

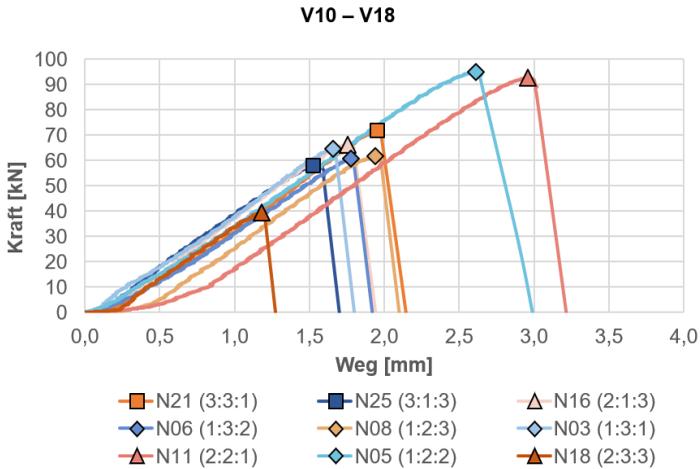


Abbildung 6.22: Darstellung des Kraft-Weg-Diagrammes mit den jeweiligen Maximalwerten der Versuche 10 bis 18 in der randomisierten Reihenfolge des Versuchsplans

Abbildung 6.23 enthält die Kraft-Weg-Diagramme der Versuche 19 bis 27 des randomisierten Versuchsplans. Den höchsten Wert der Auszugskraft und des Weges der gesamten Versuchsreihe erreicht das Versuchsmuster N01 (1:1:1) mit 99,3 kN und einem Weg von 3,3 mm. Eine vergleichbar hohe Auszugskraft erzielt das Versuchsmuster N20 (3:2:1) mit 98,2 kN bei einem Weg von 2,7 mm, gefolgt vom Versuchsmuster N10 (2:1:1) mit einer Auszugskraft von 96,3 kN bei einem Weg von 2,8 mm. Die Versuchsmuster N14 (2:2:2), N22 (3:1:2) und N19 (3:1:1) befinden sich mit Auszugskräften von 94,3 kN, 95,8 kN und 94,6 kN sowie Wegen von 2,6 mm, 2,3 mm und 2,3 mm auf einem ähnlichen Niveau. Mit 61,3 kN bei einem Weg von 1,8 mm liegt N07 (1:1:3) genau wie N26 (3:2:3) mit einer Auszugskraft von 65,3 kN

bei 1,6 mm Weg unterhalb des Mittelwertes von 74,3 kN der gesamten Versuchsreihe. Das Versuchsmuster N04 (1:1:2) erreicht eine Auszugskraft von 85,41 kN bei einem Weg von 2,1 mm.

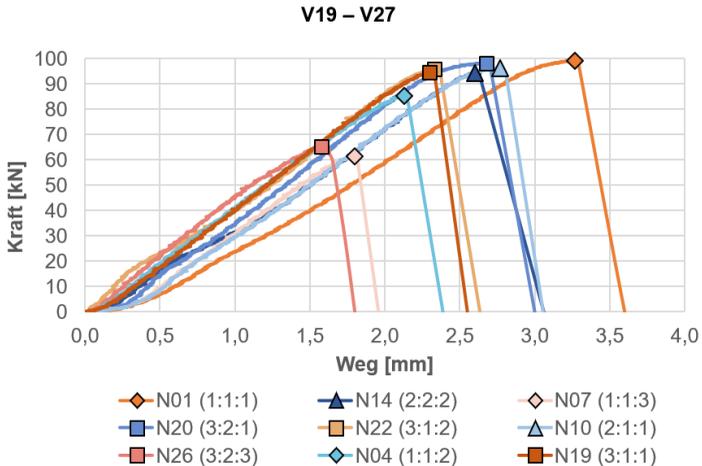


Abbildung 6.23: Kraft-Weg-Diagramme der Versuche 19 bis 27 der randomisierten Versuchsreihenfolge mit der jeweiligen maximalen Auszugskraft

Alle Versuchsmuster offenbaren die für FIS V üblichen Kraft-Weg-Diagramme beim zentrischen Auszugsversuch, jedoch mit variierenden Auszugskräften und Verschiebungen. Abbildung 6.24 zeigt beispielhaft die separierten Verläufe der minimalsten und eine der maximalsten Auszugskräfte der Versuchsreihe, die Versuchsmuster N18 (2:3:3) und N20 (3:2:1). Das Versuchsmuster N20 (3:2:1) setzt sich aus einem ‚Element an der Betonoberfläche‘ und der ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘ zusammen. Dieses Versuchsmuster erzielt die Auszugskraft $F_U = 98,2$ kN bei einem Weg von 2,7 mm. Das Versuchsmuster N18 (2:3:3) besitzt die Merkmale ‚Element im Bohrlochgrund‘, ‚Auffüllen des Gewindegangs‘ und ‚großflächige Gewindeabdeckung‘ (vgl. Abbildung 6.18 c)). Das Versuchsmuster N18 (2:3:3) weist, wie in Abbildung 6.24 dargestellt, die geringste Auszugskraft F_U auf. Die Kraft steigt hierbei über die Verschiebung mit der charakteristischen Steigung solcher Auszugsversuche an, bis bei 1,2 mm die Auszugskraft $F_U = 39,5$ kN erreicht wird.

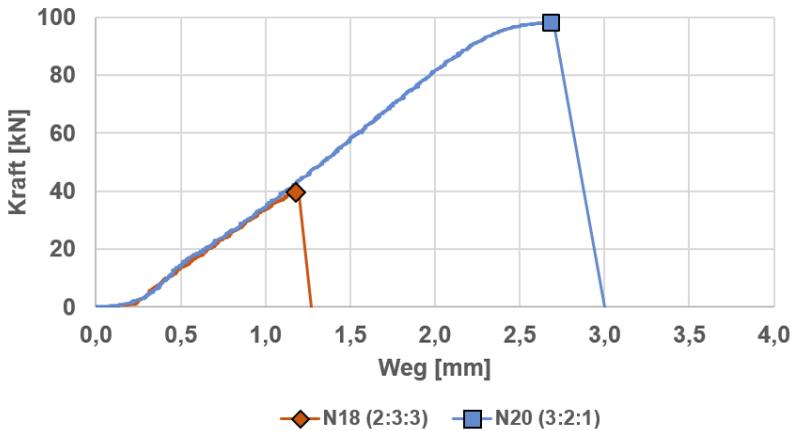


Abbildung 6.24: Verlauf der Auszugskraft über den Weg am Beispiel der Versuchsmuster N18 (2:3:3) und N20 (3:2:1) aus den Versuchen

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse, umgerechnet in ihre Verbundspannung, findet sich in Abbildung 6.25. Dabei ist die Verbundspannung τ über die geordneten Faktoren und Faktorstufen aufgetragen. Eine Übersicht, geordnet nach randomisiertem Versuchsdurchlauf, ist in Anhang A (Abbildung Anhang 5) einsehbar. Die Verbundspannung wurde mit Gleichung 6-1 berechnet aus der Auszugskraft F_U und der tatsächlichen, am ausgezogenen Versuchsmuster gemessenen Verbundfläche A_{ef} , bestimmt durch die tatsächliche Verankerungstiefe $h_{ef,gemessen}$ und den nominalen Gewindestangendurchmesser d . Ebenfalls dargestellt ist die tatsächliche Versuchsmusterbezeichnung N01 (1:1:1) – N27 (3:3:3) in ihrer randomisierten Reihenfolge mit den jeweiligen Stufenzusammensetzungen.

$$\tau = \frac{F_U}{A_{ef}} = \frac{F_U}{\pi \cdot d \cdot h_{ef,gemessen}} \quad 6-1$$

In Abbildung 6.25 ist die deutliche Varianz der Verbundspannung der geprüften Versuchsmuster in Abhängigkeit von deren Stufenzusammensetzung der einzelnen Faktoren zu erkennen. Der Mittelwert der Verbundspannung aller 27 Versuche liegt bei 20,74 MPa. Wie bereits in Abbildung 6.24 zu erkennen, besitzt das Versuchsmuster N18 (2:3:3) die geringste Auszugskraft F_U und somit auch die geringste Verbundspannung τ von 10,69 MPa. Die Versuchsmuster N27 (3:3:3) und N09 (1:3:3)

zeigen mit 11,93 MPa beziehungsweise 12,03 MPa ebenfalls sehr geringe Verbundspannungen. Alle diese Versuchsmuster besitzen die Faktorstufen ‚Abdeckung des Gewindengangs‘ und ‚großflächige Abdeckung‘. Angesichts dieser Beobachtung liegt die Vermutung nahe, dass diese Faktorstufen einen negativen Effekt auf die Verbundspannung haben.

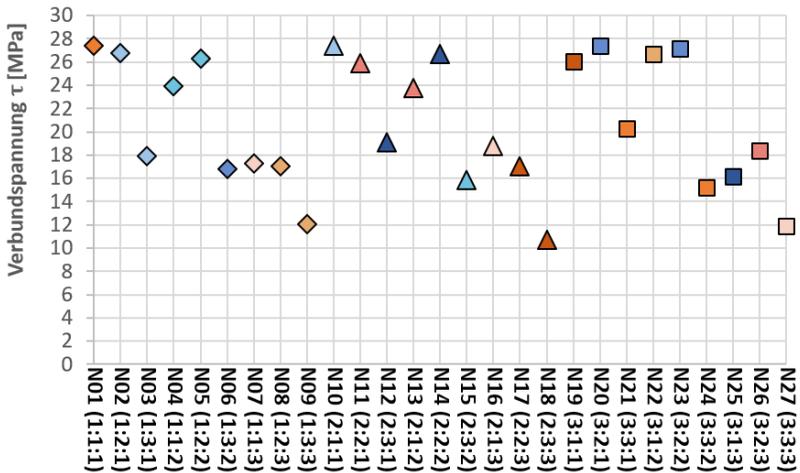


Abbildung 6.25: Übersicht aller Verbundspannungen, geordnet über die Faktoren und Faktorstufen mit Versuchsmusterbezeichnung und dazugehöriger Stufenzusammensetzung der jeweiligen Faktoren

Das Versuchsmuster mit der höchsten Verbundspannung mit der Faktorstufe (x:y:3) ist das Versuchsmuster N16 (2:1:3), das außerdem die Faktorstufe ‚Element im Bohrlochgrund‘ besitzt. Es erreicht hierbei eine Verbundspannung von 18,75 MPa. Die Faktorstufe (2:y:z) ist sowohl bei Versuchsmuster N16 (2:1:3) als auch bei Versuchsmuster N18 (2:3:3) vorhanden. Dennoch besitzt beispielsweise auch das Versuchsmuster N10 (2:1:1) das ‚Element im Bohrlochgrund‘ bei einer Verbundspannung von 27,38 MPa, die also vergleichsweise so hoch ist wie die höchste erreichte Verbundspannung des Versuchsmusters N01 (1:1:1) in diesem Versuchsplan mit $\tau = 27,40$ MPa. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass sich ohne statistische Unterstützung keine eindeutigen Erkenntnisse ableiten lassen, sondern lediglich Tendenzen erkennbar sind. Des Weiteren muss trotz sorgfältiger Versuchsvorbereitung und -durchführung davon ausgegangen werden, dass sich Streuungen, also

Störgrößen, mit den eigentlichen Effekten der Gestaltelemente vermischen und somit die Bewertbarkeit der Versuchsergebnisse einschränken. Aus diesem Grund wird mit den Ergebnissen ein lineares Regressionsmodell in MINITAB 19 gefittet.

6.5 Statistische Darstellung der Versuchsergebnisse

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen wird ein lineares Regressionsmodell erstellt, das aufgrund der Haupteffekte sowie Zweifach- und Dreifachwechselwirkungen initial aus einer Konstante mit 26 Koeffizienten besteht. Die Konstante liegt bei $\bar{\tau} = 20,74$ MPa und stellt die mittlere Verbundspannung der Versuchsergebnisse dar. Aus geometrischen beziehungsweise physikalischen Gründen sind die Dreifachwechselwirkungen in diesem Modell unplausibel und können vernachlässigt werden. Durch das Entfernen der Terme der Dreifachwechselwirkung reduziert sich das Modell auf eine Konstante mit nur noch 18 Koeffizienten. Bedingt hierdurch reduziert sich das Bestimmtheitsmaß R^2 von 100 % auf 98,2 % mit acht neuen Freiheitsgraden. Die Standardabweichung sinkt dabei von 5,47 MPa auf 4,09 MPa. Für die Auswertung des Modells wird ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ gewählt.

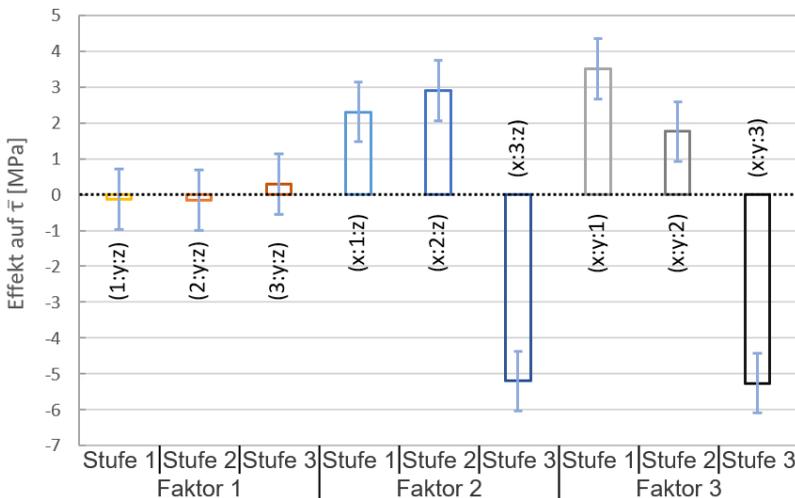


Abbildung 6.26: Haupteffektediagramm der ersten Anpassung der Regressionsgleichung mit den Faktorstufen 2 und 3 der Faktoren 1 bis 3 mit der jeweiligen Faktorstufe als Referenzwert und dem 95 %-Konfidenzintervall

Das Haupteffektediagramm der ersten Anpassung der Regressionsgleichung ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Gezeigt werden die Effekte der Faktorstufen 1 bis 3 der jeweiligen Faktoren 1 ‚Gestaltelement in axialer Anordnung‘, 2 ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ und 3 ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ in Bezug auf die mittlere Verbundspannung \bar{x} . Die dargestellten Whisker zeigen das 95 %-Konfidenzintervall, das bei den Haupteffekten $\pm 0,84$ MPa beträgt.

Die Effekte der Faktorstufen ‚Bohrlochgrund‘ (2:y:z) und ‚Betonoberfläche‘ (3:y:z) liegen mit -0,02 MPa beziehungsweise +0,43 MPa im Konfidenzintervall der als Referenz repräsentierten Faktorstufe (1:y:z), die -0,14 MPa beträgt. Die p-Werte, also die Signifikanzwerte, der Nullhypothese liegen bei 0,68 (2:y:z) beziehungsweise 0,45 (3:y:z). Somit lässt sich anhand dieser Werte bereits bestätigen, dass die Gestaltelemente des Faktors ‚axiale Anordnung‘ keinen signifikanten Effekt auf die Verbundspannung des Verbundankersystems besitzen.

Die Referenz für den Faktor ‚radiale Anordnung‘ zeigt (x:1:z) mit einem Wert von 2,30 MPa deutlich über der mittleren Verbundspannung \bar{x} dieser Versuchsreihe. Die Faktorstufen ‚Gewindegrund‘ (x:2:z) und ‚Gewindegang‘ (x:3:z) unterscheiden sich zur Referenz um +0,59 MPa (x:2:z) und -7,50 MPa. Der Effekt der Faktorstufe (x:2:z) liegt damit im Konfidenzintervall der Referenz, der der Faktorstufe (x:3:z) weit außerhalb des Konfidenzintervalls. Werden jedoch die p-Werte verglichen, zeigen beide Faktorstufen mit $4,40 \times 10^{-5}$ (x:2:z) und $5,48 \times 10^{-7}$ (x:3:z) und wären somit als signifikante Effekte einzustufen. Um also eine eindeutige Aussage über die Signifikanz des Effektes (x:2:z) treffen zu können, muss das Konfidenzintervall konkretisiert werden. Hierfür ist gleichwohl eine weitere Anpassung des Regressionsmodells notwendig.

Für den Faktor 3 ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ liegt die Referenz (x:y:1) bei 3,51 MPa. Die Effekte der Faktorstufen ‚geringfügige Abdeckung‘ (x:y:2) und ‚großflächige Abdeckung‘ (x:y:3) gegenüber der Referenz liegen bei -1,75 MPa (x:y:2) und -8,77 MPa (x:y:3) und damit außerhalb des Konfidenzintervalls der Referenz, was auf signifikante Effekte dieser Faktorstufen hindeutet. Die p-Werte von 0,0013 (x:y:2) und $5,01 \times 10^{-7}$ (x:y:3) bestätigen die Signifikanz.

Das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm der ersten Anpassung der Regressionsgleichung ist in Abbildung 6.27 zu erkennen. Das 95 %-Konfidenzintervall der Zweifachwechselwirkungen beträgt $\pm 1,18$ MPa. Durch das vergleichsweise große Konfidenzintervall liegen die Effekte zumindest bei den Wechselwirkungen der Faktoren 1 und 2 beziehungsweise 1 und 3 in den Konfidenzintervallen der jeweiligen Referenzen. Die p-Werte dieser Faktorzusammensetzungen liegen im Bereich von 0,45

bis 0,95. Durch die Lage der Effekte in den Konfidenzintervallen der jeweiligen Referenzen und die p-Wertvergleiche können die Zweifachwechselwirkungen in Kombination mit den Faktorstufen des Faktors 1, wie schon die Haupteffekte des Faktors 1, als nicht signifikante Effekte festgehalten werden.

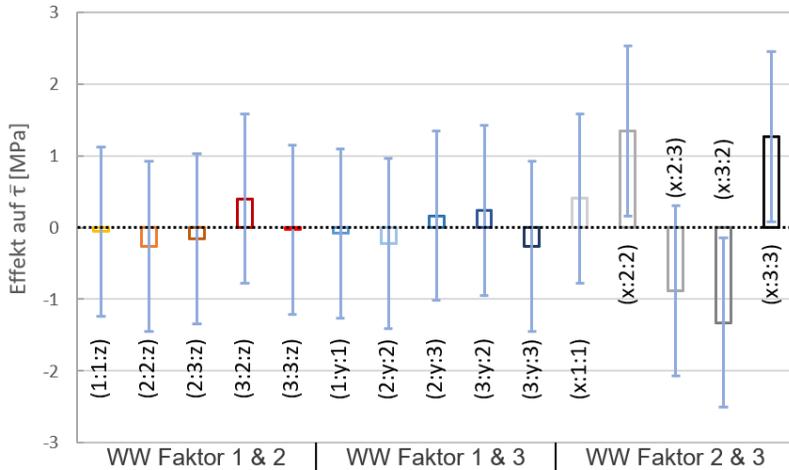


Abbildung 6.27: Diagramm der Zweifachwechselwirkungen der ersten Anpassung der Regressionsgleichung mit den Referenzwerten (1:1:z), (1:y:1) und (x:1:1) und Konfidenzintervall von $\pm 1,18$ MPa

Die Zweifachwechselwirkungen der Faktorkombinationen der Faktoren 1 und 2 mit ihrer Referenz (x:1:1) mit einem Wert von 0,404 MPa verhalten sich hingegen inhomogener. So besitzen die Faktorkombinationen (x:2:2) und (x:3:3) tendenziell positive Werte gegenüber der mittleren Verbundspannung $\bar{\tau}$, während es keine Überschneidung des Konfidenzintervalls mit dieser gibt. Im Vergleich zur Referenz weisen diese Faktorkombinationen einen Effekt von +0,94 MPa (x:2:2) beziehungsweise +0,86 MPa (x:3:3) auf. Die Faktorkombinationen (x:2:3) und (x:3:2) zeigen einen negativen Effekt der Zweifachwechselwirkungen, sowohl gegenüber der mittleren Verbundspannung $\bar{\tau}$ als auch der Referenz (x:1:1). Der Effekt gegenüber der Referenz (x:1:1) liegt bei -1,28 MPa (x:2:3) beziehungsweise -1,73 MPa (x:3:2). Es existiert keine Schnittmenge zwischen dem Konfidenzintervall der Faktorzusammensetzung (x:3:2) und der Referenz (x:1:1) beziehungsweise der mittleren Verbundspannung $\bar{\tau}$. Der Konfidenzintervall der Faktorzusammensetzung (x:2:3) hingegen schließt die mittlere Verbundspannung ein und kommt auf ein ähnliches

Niveau wie der Wert der Referenz ($x:1:1$). Eine Konkretisierung des Konfidenzintervalls, wie es auch für den Haupteffekt ($x:2:z$) zur Klärung seiner Signifikanz notwendig ist, kann hier ebenfalls eine eindeutige Aussage ermöglichen.

Da keine signifikanten Effekte der Faktorstufen des Faktors 1 nachgewiesen werden konnten und die Haupteffekte von ($x:2:z$) sowie die Zweifachwechselwirkung von ($x:2:3$) eine Konkretisierung des Modells erfordern, findet eine zweite Anpassung des Regressionsmodells statt. Hierfür werden die Terme des Faktors 1 aus dem Modell genommen, wodurch sich die Koeffizienten der Regressionsgleichung auf 8 und das Bestimmtheitsmaß R^2 auf 97,74 % mit 18 Freiheitsgraden reduzieren. Mit 4,90 MPa erhöht sich die Standardabweichung der Ergebnisse.

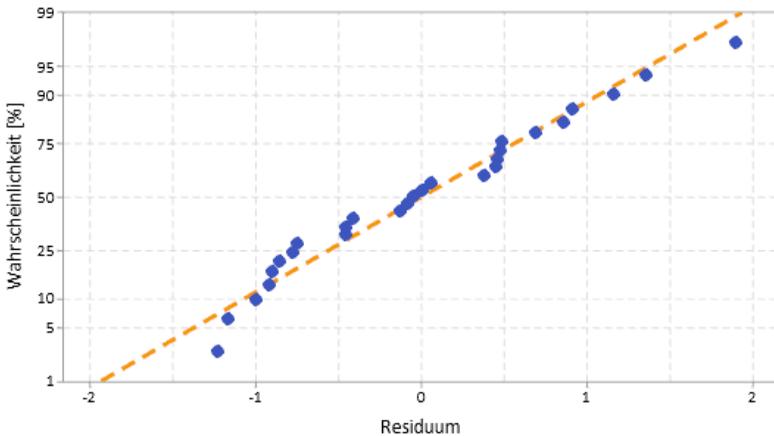


Abbildung 6.28: Wahrscheinlichkeitsnetz für die Normalverteilung der zweiten Anpassung des Regressionsmodells

In Abbildung 6.28 ist das Wahrscheinlichkeitsnetz für die Normalverteilung des Regressionsmodells in der zweiten Anpassung erkennbar. Aufgetragen ist hierbei die Wahrscheinlichkeit in Prozent über die Residuen. Wie dargestellt, folgen die Ergebnisse der Verbundspannung der angepassten Regressionsgleichung, was den Schluss zulässt, dass die Ergebnisse normalverteilt sind.

Die Haupteffekte bezüglich der mittleren Verbundspannung $\bar{\tau}$ der zweiten Anpassung des Regressionsmodells für die Faktorstufen der Faktoren 2 und 3 sind in Ab-

Abbildung 6.29 zusammen mit den Referenzen (x:1:z) und (x:y:1) dargestellt. Das Konfidenzintervall konkretisiert sich aufgrund der Erhöhung der Freiheitsgrade auf $\pm 0,57$ MPa. Wie zu erwarten, verändern sich die Haupteffekte der Faktorstufen durch das erneute Fitten nicht. Die Signifikanz der Effekte wird auch durch die Reduktion aller p-Werte auf $< 4,34 \cdot 10^{-6}$ verdeutlicht. Mit der zweiten Anpassung des Regressionsmodells kann nun auch der Effekt von (x:2:z) als eindeutig signifikant identifiziert werden.

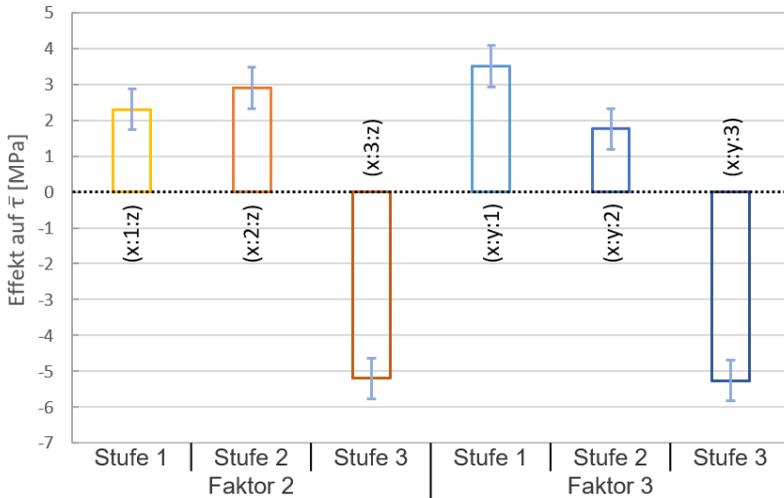


Abbildung 6.29: Haupteffektediagramm der zweiten Anpassung des Regressionsmodells für die Faktorstufen der Faktoren 2 und 3 mit jeweiliger Referenz (x:1:z) beziehungsweise (x:y:1) und dem 95 %-Konfidenzintervall

Durch die zweite Anpassung des Regressionsmodells konkretisiert sich auch das 95 %-Konfidenzintervall der Zweifachwechselwirkungen der Faktoren 2 und 3, wodurch sich zudem die Aussagekraft ihrer Effekte erhöht. Das Konfidenzintervall reduziert sich auf $\pm 0,81$ MPa. Die Faktorstufen (x:2:2), (x:2:3), (x:3:2) und (x:3:3) sowie die dazugehörige Referenz (x:1:1) sind in Abbildung 6.30 dargestellt. Die neuen p-Werte von 0,002 (x:2:2), 0,033 (x:2:3), 0,003 (x:3:2) und 0,004 (x:3:3) bestätigen die signifikanten Effekte der Zweifachwechselwirkungen der Faktorstufen. Des Weiteren liegen durch das konkretisierte Konfidenzintervall nun alle Effekte außerhalb des Referenzwertes. Dementsprechend kann durch die zweite Anpassung

des Regressionsmodells nun auch die Zweifachwechselwirkung von (x:2:3) als eindeutig signifikanter Effekt identifiziert werden.

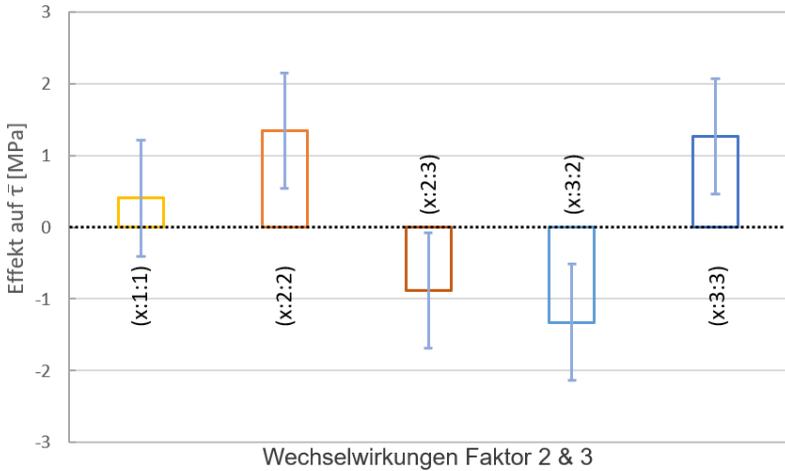


Abbildung 6.30: Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm der zweiten Anpassung des Regressionsmodells mit der Referenz (x:1:1) und dem 95 %-Konfidenzintervall

6.6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Basierend auf den Erkenntnissen des C&C²-SEQUENZMODELLS des vorangegangenen Kapitels wurden Hypothesen zu funktionsrelevanten Wirkflächen und funktionsirrelevanten Begrenzungsflächen aufgestellt. Aus diesen Hypothesen wurden Nullhypothesen abgeleitet, mit dem Ziel, die Hypothesen durch Verwerfung der Nullhypothesen zu bestätigen. Um die Nullhypothesen auf Richtigkeit zu überprüfen, wurden die Wirk- und Begrenzungsflächen mit entworfenen Gestaltelementen geringer Festigkeit bedeckt und somit gezielt Reststrukturen in das Verbundankersystem eingebracht. Diese Methode hat zum Ziel, die Effekte der einzelnen Gestaltelemente auf die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ sichtbar zu machen. Hierfür wurden die Gestaltelemente im Rapid-Prototyping-Verfahren erstellt und, wie entworfen, in die konventionellen Verbundankersysteme integriert, um sogenannte GFZ-Versuchsmuster zu erstellen.

Zur experimentellen Bestimmung der Effekte wurde ein vollfaktorieller 3^3 -Versuchsplan aufgestellt und randomisiert durchgeführt. Eine Bewertung der Bruchbilder der ausgezogenen Versuchsmuster sowie der Verlauf der Kraft-Weg-Diagramme haben keine signifikanten Unterschiede zu regulären Auszugsversuchen ergeben. An den Bruchbildern der verschiedenen Versuchsmuster konnten jedoch die jeweiligen Einflüsse der Gestaltelemente beobachtet werden. So gab es optisch beispielsweise im Bereich der Stege der Faktorstufen ‚geringfügig‘ (x:y:2) und ‚großflächig‘ (x:y:3) des Faktors ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ deutliche Bereiche eines unterbrochenen Verbundes im Vergleich zu deren Referenz ‚kein Element‘ (x:y:1). Die Stege der Gestaltelemente (x:y:2) und (x:y:3) verblieben nach Auszug des Versuchsmusters im Bohrloch. Der Faktor ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ wies in seiner Faktorstufe ‚Gewindegang‘ (x:3:z) optisch einen inhomogen verteilt Vinylestermörtel auf als die Faktorstufen ‚Gewindegrund‘ (x:2:z) oder die Referenz (x:1:z). Beim ersten Faktor ‚Gestaltelement in axialer Anordnung‘ veränderte sich zur Referenz (1:y:z) lediglich bei der Faktorstufe ‚Betonoberfläche‘ (3:y:z) der ausgebildete Betonkragen, während bei der Faktorstufe ‚Bohrlochgrund‘ (2:y:z) das Gestaltelement im Bohrloch verblieb. Die Kraft-Weg-Diagramme zeigten, bis auf unterschiedlich hohe erreichte Auszugskräfte F_U und dementsprechend variierende Verschiebungen der Verbundanker, keine auffälligen Kurvenverläufe.

Um die Effekte in ihrer Ausprägung zu bewerten und etwaige Störgrößen zu eliminieren, wurde ein lineares Regressionsmodell mit den Versuchsergebnissen erstellt. Hierfür wurden im Vorfeld die Ergebnisse auf die Verbundspannung normiert, um auch minimale Streuungen in der Verankerungstiefe in den Berechnungen auszublenzen. Mit Hilfe des linearen Regressionsmodell konnten die signifikanten Effekte der verschiedenen Gestaltelemente in axialer und radialer Anordnung sowie im Bereich der Verbundfläche identifiziert werden. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ gewählt. Durch das Entfernen des Terms für eine Dreifachwechselwirkung aus physikalischen Gründen ergab sich so eine Regressionsgleichung mit 18 Koeffizienten und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 98,2 \%$ bei acht Freiheitsgraden als erste durchgeführte Anpassung der Regressionsgleichung. Bereits mit dieser ersten Anpassung des Modells konnte gezeigt werden, dass Elemente in axialer Anordnung keinen signifikanten Effekt auf die Verbundspannung ausüben. Für eine eindeutige Aussage über die Signifikanz der Effekte der Faktorstufen der anderen Faktoren ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ und ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ wurde eine zweite Anpassung des Regressionsmodells vorgenommen, in der alle Terme des Faktors 1 und der axialen Anordnung sowie die Zweifachwechselwirkungen mit den zugehörigen Faktorstufen aus dem Modell genommen wurden. Die Koeffizienten der Regressionsgleichung reduzierten sich hierdurch auf acht mit 18 Freiheitsgraden und das Bestimmtheitsmaß reduzierte sich auf $R^2 = 97,74 \%$. Durch

diese Anpassung konnte das 95 %-Konfidenzintervall konkretisiert werden und somit ließen sich auch die Effekte der Faktoren 2 ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ und 3 ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ eindeutig bewerten.

Die Effekte der Faktorstufen ‚Element im Bohrlochgrund‘ (2:y:z) und ‚Element an Betonoberfläche‘ (3:y:z) haben gegenüber der Referenz ‚kein Element‘ (1:y:z) mit 0,02 MPa (2:y:z) und 0,42 MPa (3:y:z) bei einem Konfidenzintervall von $\pm 0,84$ MPa und dem p-Wert-Vergleich keinen signifikanten Effekt auf die Verbundspannung. Dementsprechend haben auch die Zweifachwechselwirkungen des Faktors 1 und seiner jeweiligen Faktorstufen trotz des höheren Konfidenzintervalls von $\pm 1,18$ MPa keinen Effekt auf die Verbundspannung. Angesichts dieser Ergebnisse kann die Nullhypothese 1 ‚Axial angeordnete Gestaltelemente beeinflussen die Tragfähigkeit signifikant‘ verworfen werden.

Zur Bewertung der Faktoren 2 ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ und 3 ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ wurde eine zweite Anpassung der Regressionsgleichung durchgeführt. Das Konfidenzintervall der Haupteffekte konkretisiert sich durch die zweite Anpassung der Regressionsgleichung auf $\pm 0,57$ MPa. Die Faktorstufe ‚Gewindegrund‘ (x:2:z) des Faktors 2 ‚Gestaltelement in radialer Anordnung‘ weicht von der Referenz (x:1:z) um 0,59 MPa ab, während die Faktorstufe ‚Gewindengang‘ (x:3:z) eine Abweichung von -7,50 MPa aufweist. Die Abweichungen liegen knapp (x:2:z) und weit (x:3:z) außerhalb des Konfidenzintervalls. Folglich offenbaren diese Gestaltelemente signifikante Effekte. Die p-Werte von $3,19 \cdot 10^{-9}$ (x:2:z) und $2,01 \cdot 10^{-13}$ (x:3:z) bestätigen eine Signifikanz der Faktorstufen gegenüber der Referenz.

Die Abweichung von der Referenz ‚kein Element‘ (x:y:1) des dritten Faktors ‚Unterbrechung der Verbundfläche‘ beträgt für die Faktorstufe ‚geringfügig (12,5 %)‘ (x:y:2) 1,75 MPa und für ‚großflächig (50 %)‘ (x:y:3) sogar -8,77 MPa. Beide Abweichungen liegen somit nicht im Konfidenzintervall und mit p-Werten von $4,35 \cdot 10^{-6}$ (x:y:2) und $1,64 \cdot 10^{-13}$ (x:3:z) bestätigt sich die Signifikanz der Faktorstufen 2 und 3 des dritten Faktors.

Die Zweifachwechselwirkungen (x:2:2), (x:2:3), (x:3:2) und (x:3:3) der Faktoren 2 und 3 weichen unterschiedlich stark von der Referenz (x:1:1) ab. Unter Berücksichtigung der Haupteffekte der Faktoren 2 und 3 in der Regressionsgleichung weicht die Zweifachwechselwirkung (x:2:2) lediglich um -0,22 MPa von der Referenz ab. Mit einem Konfidenzintervall von $\pm 0,81$ MPa liegt hier kein signifikanter Wert vor. Die Zweifachwechselwirkungen (x:2:3) und (x:3:2) lassen mit -9,46 MPa und -10,98 MPa starke Abweichungen von der Referenz (x:1:1) erkennen. Die Zweifachwechselwirkung von (x:3:3) weist mit -15,40 MPa eine noch höhere Abweichung von

der Referenz auf. Alle Abweichungen der Zweifachwechselwirkungen mit einer 3. Faktorstufe liegen somit außerhalb des Konfidenzintervalls. In Anbetracht dieser Ergebnisse sind die Nullhypothese 2 ‚Eine Abdeckung des Gewindeganges beeinflusst die Tragfähigkeit nicht signifikant‘ und die Nullhypothese 3 ‚Eine großflächige Abdeckung der Verbundfläche beeinflusst die Tragfähigkeit nicht signifikant‘ zu verwerfen. Die Faktorstufen (x:2:z) und (x:y:2) beeinflussen die Verbundspannung laut diesen Ergebnissen gegenüber der jeweiligen Referenz minimal und sogar positiv. Die Zweifachwechselwirkung (x:2:2) zeigt keinen signifikanten Effekt.

6.7 Entwicklungsmethode ASTRA: Syntheseschritt

Anhand des Vorgehens zur Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage kann der zweite Schritt der angestrebten ASTRA-Methode zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln abgeleitet werden. Nach der Identifikation möglicher Designräume im vorangegangenen *Analyseschritt* in Kapitel 5 folgte in diesem Kapitel 6 der *Syntheseschritt*. Hierfür wurden aus den Hypothesen zu Designräumen Gestaltelemente konstruiert und mittels Rapid-Prototyping-Verfahren in das Ursprungssystem integriert, wobei ebenfalls erste GFZ-Testobjekte generiert wurden. Diese GFZ-Testobjekte werden in dieser Arbeit als GFZ-Versuchsmuster bezeichnet. Zur Bestimmung der Wechselwirkung der einzelnen Gestaltelemente unter- und miteinander wurden diese, soweit möglich, kombiniert und damit weitere GFZ-Versuchsmuster erstellt. Diese GFZ-Versuchsmuster wurden daraufhin nach einem vollfaktoriellen 3^3 -Versuchsplan im zentrischen Auszugsversuch geprüft. Anhand der Versuchsergebnisse wurde ein lineares Regressionsmodell erstellt, durch dessen Auswertung die Effekte der einzelnen Gestaltelemente und deren Wechselwirkung quantitativ bestimmt wurden. Die Designräume der GFZ-Versuchsmuster beziehungsweise deren einzelner Gestaltelemente, die keinen negativen Effekt auf die Primärfunktion besitzen, können demnach genutzt werden, um das Ursprungssystem mit einer Sekundärfunktion zu mechatronisieren. Aus diesem Vorgehen lassen sich für die allgemeine Entwicklungsmethode ASTRA folgende Aktivitäten abstrahieren:

- Synthese der Ergebnisse durch das Konstruieren von GFZ-Testobjekten
- Validierung der GFZ-Testobjekte bezüglich ihrer Effekte auf die Primärfunktion
- Quantitative Bestimmung der Effekte der validierten Designräume auf die Primärfunktion

Das Ergebnis dieses *Synthese*-Entwicklungsschrittes ist die quantitative Kenntnis der Effekte der identifizierten Designräume ohne Beeinflussung der Primärfunktion.

6.8 Zwischenfazit

Die statistische Untersuchung der Effekte der entworfenen Gestaltelemente auf die Primärfunktion hat ergeben, dass Gestaltelemente bei geeigneter Anordnung und Ausprägung eingebracht werden können. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann sogar bedingt die These aufgestellt werden, dass verschiedene Gestaltelemente die Haltekraft von chemischen Befestigungsmitteln auf Vinylesterbasis verbessern könnten. Hierfür müssen jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Aus den gewonnenen Ergebnissen können jedoch die Erkenntnisse abgeleitet werden, dass an der Betonoberfläche, im Bohrlochgrund, im Gewindegrund und geringfügig auch im Bereich der Verbundfläche Gestaltelemente eingebracht werden können, ohne dabei die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen. Sogar die Kombination dieser Gestaltelemente ist laut statistischer Auswertung der Zweifachwechselwirkungen ohne weiteres möglich. Somit kann diese Erkenntnis die zweite Teilforschungsfrage

Können in ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungselement auf Vinylesterbasis zusätzliche Gestaltelemente eingebracht werden, ohne dabei die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen?

positiv beantworten, da mithilfe der Versuche mit den Rapid-Prototyping-Versuchsmustern und durch das lineare Regressionsmodell die Effekte von zusätzlichen Gestaltelementen an Begrenzungsflächen bewertet werden konnten.

Die spezifischen Aktivitäten zur Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage lassen sich für die Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln als *Syntheseschritt* zusammenfassen und könnten sich auch bei der Mechatronisierung anderer Befestigungsmittel unterstützend einsetzen lassen.

7 Gestaltelemente zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung

Dieses Kapitel enthält Ergebnisse und Erkenntnisse, die aus der Veröffentlichung „Entwicklung eines sensorintegrierten Verbundankers zur Überwachung der Befestigungssituation“ (Horn, Gwosch & Matthiesen, 2021) stammen. Zur Übersichtlichkeit werden Zitate aus diesen Vorveröffentlichungen nicht gesondert gekennzeichnet.

Mit den Erkenntnissen aus dem vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, dass in chemischen Befestigungsmitteln ein Designraum vorhanden ist, um zusätzliche Gestaltelemente einzubringen, ohne die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ im zentrischen Zug mit enger Abstützung zu beeinflussen. Als Designraum stehen also zusammengefasst folgende Positionen zur Mechatronisierung chemischer Befestigungsmittel auf Vinylesterbasis, also beispielsweise zum Einbringen sensorischer Gestaltelemente in diese, zur Verfügung:

- Betonoberfläche
- Bohrlochgrund
- Gewindegrund
- Geringfügige Abdeckung/geringfügiger Bereich des Verbundes
- Kombinationen aus diesen Designräumen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Mechatronisierung von chemischen Befestigungsmitteln auf Vinylesterbasis. Ziel der Mechatronisierung ist das Einbringen von Sensoren, um Verschiebungen des Verbundankers in der späteren Anwendung detektieren zu können. Die Verschiebung eines Befestigungsmittels stellt ein wesentliches Kriterium für die Qualität und Sicherheit einer Befestigung dar. Für die Sensorintegration zur Verschiebungsmessung liegen, wie in Unterkapitel 2.5 erläutert, verschiedene Sensorprinzipien zur Weg- oder Abstandsmessung vor, die anhand verschiedener Bewertungskriterien auf ihre Eignung hierfür untersucht werden. Daher werden zuerst die relevanten Schadensfälle von chemischen Befestigungsmitteln für die Integration von Sensoren mit den Erkenntnissen der Analyse des C&C²-Modells (Kapitel 5) eingegrenzt und die für die Zustands- und Montagekontrolle notwendigen Messgrößen definiert. Anschließend werden Messverfahren identifiziert und auf den identifizierten Designraum (Kapitel 6) angepasst. Für die Verifizierung

und Kalibrierung der Verfahren wird ein Prüfstand aufgebaut. Nach erfolgreichen Versuchen werden die geeigneten Entwürfe weiterentwickelt und erste Funktionsprototypen vorgestellt, die daraufhin in Beton installiert und in realitätsnahen Belastungen verifiziert werden. Ausgewählte umweltbedingte Einflüsse auf das Messsignal, wie Feuchtigkeit, Temperatur und korrosives Medium, sollen daraufhin unter Laborbedingungen weitere Entwicklungspotentiale aufzeigen und mögliche Schwächen der Systeme darstellen.

7.1 Relevante Versagensmechanismen für die Zustandsüberwachung

Für die Zustandsüberwachung und Montagekontrolle sind die Hauptbelastungsarten und Schädigungsmechanismen von großer Bedeutung. Wie bereits im Stand der Forschung durch die Bewertung aufgeführt, bilden die zentrische Belastung von chemischen Befestigungsmitteln und eine daraus folgende Verschiebung den relevantesten Versagensfall. Ebenfalls beschreibt die (EAD 330499-00-0601), dass ab gewissen axialen Verschiebungen eines chemischen Befestigungsmittels aus dem Bohrloch heraus ein chemisches Befestigungsmittel als versagt gilt und nicht weiter statische oder dynamische Lasten aufnehmen darf. Für den Untersuchungsgegenstand eines fischer FIS V-Injektionssystems mit M12-Gewindestange (ETA-02/0024) gilt beispielsweise eine maximale auftretende Verschiebung von 1,10 mm unter Zugbelastung und normalen Umgebungsbedingungen in ungerissenem Beton (vgl. Tabelle 7). Die Ursache für eine axiale Verschiebung liegt in diesem Schädigungsfall beispielsweise in der falschen Dimensionierung des Befestigungspunktes, einer statischen Überbelastung in der Anwendung durch bautechnische Fehler zur Lasteinleitung oder durch die Einwirkung einer unvorhergesehenen Last, wie beispielsweise durch Unfälle oder seismische Einwirkungen. Aber auch ein Brandfall kann gerade bei chemischen Befestigungsmitteln bereits mit einer geringfügigen Temperaturerhöhung von 60 °C bis 80 °C die Tragfähigkeit teilweise drastisch reduzieren. Für diesen Fall sind Grenzlaster dieser Systeme für die kurz- und langzeitige Temperatureinwirkung in der jeweiligen ETA angegeben. Des Weiteren besitzen die meisten Systeme Feuerwiderstandsklassen, die durch Gutachten nach Vorgaben des TECHNICAL REPORTS 020 der EOTA (TR 020) erstellt werden.

Für die Messung der axialen Verschiebung muss eine Position gefunden werden, an der die relative Bewegung zwischen einem auch bei Versagen unbeweglichen Bereich zu einem beweglichen Bereich gemessen werden kann. Der unbewegliche Bereich wird zur leichteren Differenzierung demnach als Inertialbereich bezeichnet. Die definierten Designräume ‚Betonoberfläche‘, ‚geringfügige Abdeckung‘, ‚Gewindgrund‘ und ‚Bohrlochgrund‘ werden im Folgenden anhand der Versagensarten bei

zentrischer Zugbelastung auf ihre Tauglichkeit für die Einbringung von sensorischen Elementen in Kürze diskutiert.

Betonoberfläche:

Der identifizierte Designraum ‚Betonoberfläche‘ ist in Abbildung 7.1 als grünes Gestaltelement dargestellt. Da es bei zentrischer Zugbelastung zu Bewegungen ganzer Betonbruchstücke kommen kann (vgl. Abbildung 2.8 a *Betonausbruch*) und somit die Designräume an der Betonoberfläche eine vergleichbare Verschiebung aufweisen wie das chemische Befestigungsmittel zusammen mit einem größeren Fragment des Untergrundes selbst, ist der Designraum ‚Betonoberfläche‘ für die Verschiebungsmessung ungeeignet. Ebenfalls ungeeignet, aufgrund unvorhersehbarer Schädigungsmechanismen im Bereich des sich bei Auszug ausbildenden Betonkragens, sind die Versagensarten *Herausziehen* (Abbildung 2.8 b – d). Für die Versagensart *Stahlbruch* (Abbildung 2.8 e) könnte sich dieser Designraum jedoch besonders eignen, da sich dieser direkt im Bereich des versagenden Kraftflusses befindet und hier relative Situationsveränderungen erfassen kann. Ein drucksensitives Messverfahren oder auch eine relative Wegmessung können hier sinnvoll sein. Dies könnte im Speziellen die Qualität der Montage sicherstellen, da chemische Befestigungsmittel, ähnlich wie Metallanker, selten auch über ein Drehmoment bei der Installation vorgespannt werden können.

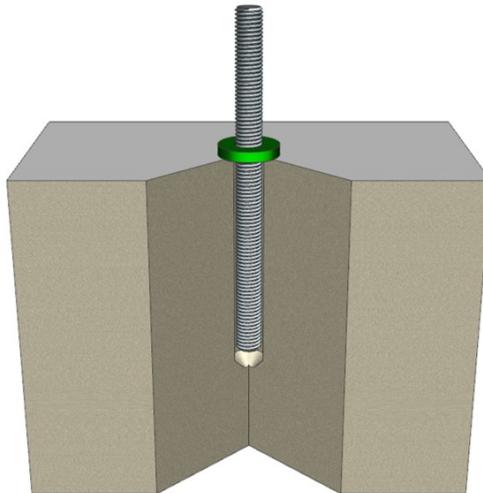


Abbildung 7.1: Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ‚Betonoberfläche‘ (grün)

Geringfügige Abdeckung:

Bei ‚geringfügige Abdeckung‘, dargestellt als gelbes Gestaltelement in Abbildung 7.2, kann ein *Betonausbruch* (Abbildung 2.8 a) gegebenenfalls nicht eindeutig erkannt werden. Auch das *Herausziehen* (Abbildung 2.8 b und c) kann nicht mit absoluter Sicherheit detektiert werden. Insbesondere bei *Mischversagen* (Abbildung 2.8 d) besteht die Gefahr, dass ein undefinierter Zustand der Relativbewegung auftritt. Dies bedeutet ein Mitrutschen des Inertialbereichs mit dem zu messenden beweglichen Bereich. Ein *Stahlbruch* (Abbildung 2.8 e) lässt sich hiermit schlecht bis gar nicht messen. Dieser Designraum kann durch seine durchgängige axiale Anordnung von Bohrlochgrund bis zu Betonoberfläche jedoch beispielsweise zur Führung von Messleitungen dienen.

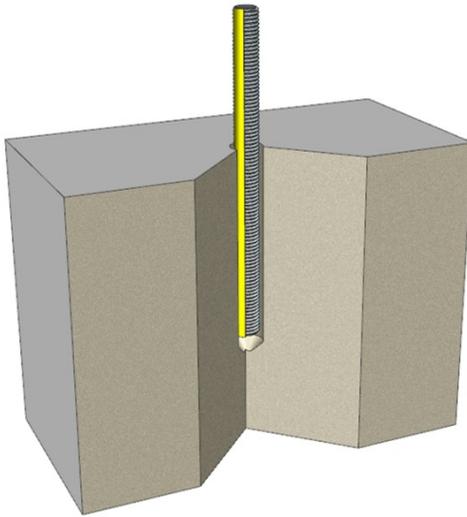


Abbildung 7.2: Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ‚geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (gelb)

Gewindegrund:

Im Designraum ‚Gewindegrund‘ ist das sich bewegende Teilelement des chemischen Befestigungssystems das Inertialsystem, also die Gewindestange. Der De-

signraum ist beispielhaft in Abbildung 7.3 als rotes Element mit Detailansicht dargestellt. Hier bewegt sich aus Sicht der Gewindestange der Untergrund, also der Beton, relativ dazu und kann damit eindeutig messtechnisch erfasst werden. Hierfür könnte sich aufgrund des Abstands zur Bohrlochwandung und seiner Translationsbewegung ein elektrisches Feld als messtechnisch und wirtschaftlich relevant herausstellen. Die Versagensart *Betonausbruch* (Abbildung 2.8 a) könnte beispielsweise mit einem ausreichend großen elektrischen Feld ebenfalls damit überwacht werden. Durch ein elektrisches Feld könnten sich auch alle Versagensvorgänge *Herausziehen* (Abbildung 2.8 b – d) über die sich verändernde Umgebung (beispielsweise Rissentstehung, Wassereinlagerung oder Materialverdichtung) bei Translationsbewegungen und das sich dadurch wandelnde elektrische Feld darstellen lassen. Die Versagensart *Stahlbruch* (Abbildung 2.8 e) könnte sich beispielsweise über die Längenänderung des Designelementes vorhersagen lassen. Hierbei könnte sich jedoch durch die spiralförmige Anordnung des Designraumes eine Dehnung relativ spät im Versagensmechanismus bemerkbar machen. Zusätzlich kann dieser Gestaltraum, wie schon der Designraum ‚geringfügige Abdeckung‘, durch seine durchgängige axiale Anordnung vom Bohrlochgrund bis zur Betonoberfläche zur Führung von Messleitungen dienen.

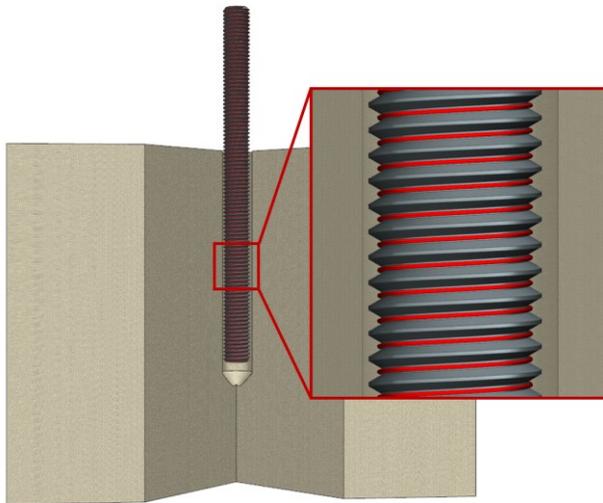


Abbildung 7.3: Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘ (rot) mit Detailvergrößerung

Bohrlochgrund:

Der Designraum ‚Bohrlochgrund‘ eignet sich sowohl für die Versagensart *Betonausbruch* (Abbildung 2.8 a) als auch für die Versagensart *Herausziehen* (Abbildung 2.8 b – d), da hierbei der Initialbereich ein durch alle diese Versagensarten konstant bleibender Bereich ist. In jeder dieser Versagensarten bewegt sich das chemische Befestigungsmittel relativ zu diesem Bereich. Von diesem Designraum aus ist beispielsweise auch eine direkte axiale Weg- beziehungsweise Verschiebungsmessung zur Gewindestange hin möglich. Eine Herausforderung ergibt sich jedoch bei der Herausführung des Messsignals aus diesem Designraum. Hier kann eine Kombination mit den Designräumen ‚Gewindegrund‘ oder ‚geringfügige Abdeckung‘ sinnvoll sein, die dank der Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel 6 auch ohne Effekte auf die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ möglich wäre. Eine wesentliche Überlegung für die Versagensart *Stahlbruch* (Abbildung 2.8 e) ist, ob es konstruktiv und elektrisch möglich ist, direkt oder indirekt ausgehend vom Designraum ‚Bohrlochgrund‘ auf eine Einschnürung der Gewindestange vor *Stahlbruch* schließen zu können. Der Designraum ist beispielhaft in Abbildung 7.4 als blaues Element im Gesamtsystem und als Detailansicht dargestellt.

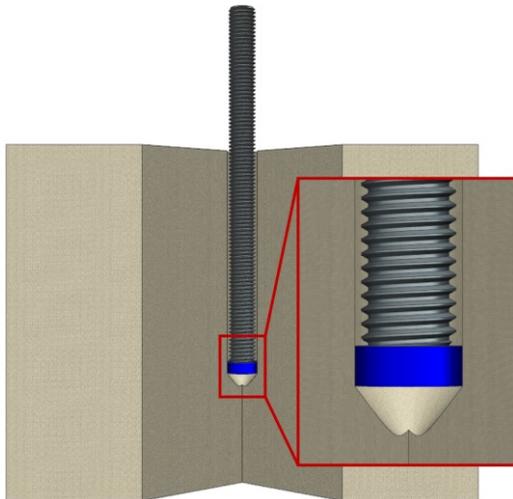


Abbildung 7.4: Beispielhafte Darstellung des identifizierten Designraumes ‚Bohrlochgrund‘ (blau) mit Detailvergrößerung

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, zusätzlich zur kontinuierlichen Messung der Befestigungssituation auch die Montagequalität des chemischen Befestigungsmittels mitaufzunehmen. Die falsche Montage stellt ebenfalls eine große Fehlerquelle für das Versagen dieser Art von Befestigungssystemen dar (vgl. Unterkapitel 2.3.4). Nach den vorangegangenen Überlegungen wäre dies durch Sensoren im Bereich des Designraums ‚Betonoberfläche‘ am sinnvollsten. Diese Position eignet sich jedoch nicht für die alterungsbedingten, fehlbelasteten oder unvorhergesehenen Schädigungen, die ein chemisches Befestigungsmittel über seine Lebensdauer erfahren kann. Hieraus folgend erweist es sich aus technischer und wirtschaftlicher Sicht als sinnvoll, eine Messung der Montagequalität über die Designräume ‚Gewindegrund‘ oder ‚Bohrlochgrund‘ zu realisieren.

Tabelle 6: Qualitative Bewertungsmatrix zur Eignung der Designräume bezogen auf die unterschiedlichen Versagensarten für die Integration einer axialen Verschiebungsmessung

Versagensart		Betonoberfläche	Geringfügige Abdeckung	Gewindegrund	Bohrlochgrund
Betonausbruch		---	-	+	++
Herausziehen	Versagen Mörtel/Beton	--	-	++	++
	Versagen Gewindestange/Mörtel	--	-	++	++
	Mischversagen	--	--	++	++
Stahlbruch		+	--	+	0

Mit der Bewertung der identifizierten Designräume für die Mechatronisierung der chemischen Befestigungsmittel in Bezug auf die Hauptversagensarten können folglich die Designräume ‚Gewindegrund‘ und ‚Bohrlochgrund‘ als vielversprechendste Positionen für eine messtechnische Erfassung von axialen Verschiebungen festgehalten werden. Tabelle 6 stellt zusammenfassend das Potenzial der Designräume zur Erfassung der Versagensarten qualitativ gegenüber. Der Designraum ‚geringfügige Abdeckung‘ kann hierbei eine unterstützende Rolle, beispielsweise zur Messleitungsführung oder Energieversorgung, einnehmen. Der Designraum ‚Betonoberfläche‘ kann für die Erfassung der Montagequalität genutzt werden, soll aber im Folgenden nur nebensächlich betrachtet werden. Die Versagensart ‚Stahlbruch‘ soll

aufgrund der vergleichsweise hohen Bemessungsgüte und der homogenen Eigenschaften von Stahl in den Hintergrund der folgenden Untersuchung treten. Hier spielen oft spezielle Anwendungsfälle oder außergewöhnliche Belastungen wie dynamische Einwirkungen, stoßartige Belastungen, unzulässige Querlasten, unvorhergesehene korrosionsfördernde Medien oder eine unwissentliche Überbelastung auf das Befestigungsmittel eine Rolle.

Im Folgenden sollen nun geometrisch mögliche und über die Lebensdauer geeignete Messverfahren ermittelt und untersucht werden.

7.2 Anforderungen an die Mechatronisierung eines chemischen Befestigungsmittels

Die Auswahlkriterien für Messprinzipien zur Erfassung der axialen Verschiebung auf Basis von Weg- und Abstandssensoren zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln lassen sich aus einfachen Überlegungen ableiten:

- Absolute Genauigkeit
- Messbereich
- Geringer Energieverbrauch
- Kleiner Bauraum
- Keine beweglichen Teile oder entsprechendes Gehäuse gegen Staub
- Langlebiges Messprinzip (korrosions- und witterungsbeständig)
- Robust (gegenüber Umwelteinflüssen, bspw. Temperatur, Feuchtigkeit)
- Einfache Montage und Handhabung

Absolute Genauigkeit:

Für das beispielhaft untersuchte System fischer FIS V lassen sich aus der dazugehörigen (ETA-02/0024) maximale Verschiebungen mit der Gleichung 7-1 für Kurzzeit- (Index 0) oder Langzeitbelastung (Index ∞) berechnen.

$$\delta_{N0} = \delta_{N0\text{-Faktor}} \cdot \tau_{Ed} \quad \text{bzw.} \quad \delta_{N\infty} = \delta_{N\infty\text{-Faktor}} \cdot \tau_{Ed} \quad 7-1$$

Statt des Bemessungswertes der einwirkenden Zugspannung τ_{Ed} kann hier die charakteristische Zugtragfähigkeit $\tau_{Rk,ucr}$ für ungerissenen Beton beziehungsweise $\tau_{Rk,cr}$ für gerissenen Beton des Mörtelsystems mit dem zugehörigen Gewindestangendurchmesser eingesetzt werden, um die maximal auftretende Verschiebung und damit den notwendigen Messbereich zu ermitteln und eine geeignete Genauigkeit festzulegen. Für die Faktoren $\delta_{N0-Faktor}$ (Temperaturbereich I) und $\delta_{N\infty-Faktor}$ (Temperaturbereich II) gibt es ebenfalls die Unterscheidung ‚ungerissener Beton‘ und ‚gerissener Beton‘. Demzufolge ergeben sich für das untersuchte Befestigungsmittel FIS V mit M12-Gewindestange die in Tabelle 7 ersichtlichen Werte zu den maximal auftretenden Verschiebungen bei Zugbelastung.

Tabelle 7: Werte für die maximal auftretende Verschiebung eines chemischen Befestigungsmittels FIS V mit M12-Gewindestange für unterschiedliche Anwendungen im trockenen oder nassen Beton gesetzt und auf Zug beansprucht nach (ETA-02/0024)

Beton	Temperaturbereich	τ_{Rk} [N/mm ²]	$\delta_{N-Faktor}$ [mm/(N/mm ²)]	Verschiebung δ_N [mm]
Ungerissen	I (50 °C / 80 °C)	11,0	0,10	1,10
	II (72 °C / 120°C)	9,0	0,12	1,08
Gerissen	I (50 °C / 80 °C)	6,0	0,12	0,72
	II (72 °C / 120°C)	5,0	0,30	1,50

Das Messprinzip zur Bestimmung einer Relativbewegung zwischen den Objekten, dem Untergrund und mindestens einem relevanten Teilelement des chemischen Befestigungssystems sollte demnach aufgrund der geringen maximal zulässigen Verschiebungen, wie in Tabelle 7 aufgeführt, eine Genauigkeit von mindestens $\pm 0,1$ mm, besser $\pm 0,05$ mm abbilden können, um ausreichende Aussagen zur Bewertung des Zustandes der Befestigungssituation zu liefern.

Messbereich:

Für die kontinuierliche Überwachung der Verschiebung eines chemischen Befestigungsmittels ist ein geeigneter Messbereich erforderlich. Wie aus Tabelle 7 entnommen werden kann, liegt bei gerissenem Beton im Temperaturbereich II die höchste auftretende Verschiebung mit $\delta_{N\infty} = 1,50$ mm vor. Da davon auszugehen ist, dass

sich das chemische Befestigungsmittel, gerade in einem spontanen Vorfall, weiter verschieben kann, sollte der Messbereich des zukünftigen Messprinzips diesen mit etwas Puffer ausgleichen.

Batteriebetrieb:

Das Messsystem sollte ohne aufwendige Verkabelung möglichst autark montierbar sein und funktionieren. Das heißt, der Energieaufwand zur Datenerfassung sollte möglichst gering gehalten werden, sodass gegebenenfalls auf eine Batterielösung oder sogar ein Energy-Harvesting-System für die Energieversorgung des Sensors basierend auf dem ausgewählten Messprinzip ausreicht. Hier sind jedoch aufgrund der Neuheit eines mechatronisierten Befestigungsmittels keine verwendbaren Informationen vorhanden. Somit wird im Weiteren von einer kostengünstigen und gängigen Batterielösung ausgegangen.

Bauform/-größe:

Auch wenn die Energieversorgung und die datenverarbeitende Elektronik durch Verbindungsleitungen außerhalb des Bohrlochs angebracht werden können (vgl. Designraum ‚geringfügige Abdeckung‘), müssen die Sensoren in den Designräumen ‚Gewindegrund‘ und ‚Bohrlochgrund‘ unterzubringen sein. Die ermittelten Geometrien im vorangegangenen Kapitel sollen im Folgenden als Orientierungshilfe dienen.

Keine beweglichen Teile/Schutz vor Staub:

Das Messprinzip sollte keine beweglichen Teile benötigen, die durch baustellen- oder alterungstypischen Staub in ihrer Bewegung blockiert werden könnten, oder ferner in einem ausreichend schützenden Gehäuse der Schutzklasse IP6KX nach (DIN EN 60529) hiervoor geschützt sein. Messprinzipien mit unbeweglichen Teilen sind vorzuziehen.

Langlebiges Messprinzip (bspw. korrosions- und witterungsbeständig):

Da Befestigungspunkte in der Regel mehrere Jahrzehnte genutzt und über diesen Zeitraum auch gewartet werden, ist es für ein sensorisches Element des zu verwendenden Messprinzips zwingend erforderlich, dass es über die gesamte Lebensdauer des chemischen Befestigungsmittels nicht altert oder an Messqualität verliert. Relevante Zeiträume hierfür sind mit ungefähr 50 Jahren und mehr anzusetzen, da die Langzeitbelastung chemischer Befestigungssysteme in der (EAD 330499-00-0601) für diesen Zeitbereich mit dem FINDLEY-Ansatz extrapoliert werden. Dies ist für Elektronik natürlich nicht realisierbar, da durch physikalische Effekte wie die

Elektromigration integrierte Schaltkreise früher oder später versagen (Stahlmecke, 2008). Dementsprechend ist darauf zu achten, dass integrierte Schaltkreise in regelmäßigen Abständen, beispielsweise zeitgleich mit vorgeschriebenen Wartungsintervallen von Ingenieursbauwerken, wechselbar sind. Dies ist möglich, wenn sich die Messelektronik außerhalb der lastleitenden Befestigungssituation befindet, um Befestigungssituationen zum Wechsel der Elektronikeinheiten nicht aufwendig lösen zu müssen.

Robust (gegenüber Umwelteinflüssen, bspw. Temperatur, Feuchtigkeit):

Das Messprinzip muss aufgrund der unterschiedlichen weltweiten Anwendungsfälle und der daraus resultierenden verschiedenen Ansprüche möglichst robust gegenüber den in diesen Regionen auftretenden Umwelteinflüssen sein. Dies bedeutet beispielsweise eine Robustheit gegenüber geringer relativer Luftfeuchtigkeit bis hin zu übersättigter relativer Luftfeuchtigkeit, also Dampf oder Nebel. Auch Wasser, sei es Kondenswasser oder stehendes Wasser, darf sich nicht negativ auf die Qualität des Messergebnisses auswirken. Für die Robustheit gegenüber Temperaturen können die Gebrauchstemperaturbereiche der jeweiligen ETA des chemischen Befestigungsmittels entnommen werden. Der obere Wert des Temperaturbereichs II (Temperaturbereich mit geminderten Lasten) des fischer FIS V-Injektionssystems (ETA-02/0024) liegt beispielsweise bei 120 °C. Der obere Wert des Temperaturbereichs I (ohne Lastminderung), also die häufigste Anwendung, liegt bei 80 °C. Die untere Temperaturgrenze beträgt bei chemischen Befestigungsmitteln in der Regel -40 °C. Diese beispielhaften Umwelteinflüsse sollte das Messprinzip von sich aus oder durch geeignete konstruktive Verfahren kompensieren.

Einfache Montage und Handhabung/Einfaches Handling:

Das Messprinzip sollte, wenn möglich, selbsterklärend und einfach sein, am besten in sich geschlossen, sodass der Einbau dieses Systems in der harschen Umgebung einer Baustelle ohne Fehler erfolgen kann. Hierbei sollte konstruktiv darauf geachtet werden, dass dieses System von Handwerkern und Bauarbeitern installiert werden kann, ohne aufwendige Schulung oder Weiterbildung im Bereich der Messtechnik. Nur so lässt sich eine Fehlmontage und später der sichere Einsatz gewährleisten.

Die oben erläuterten Kriterien werden nun mit der MoSCoW-Methode (MUST-SHOULD-COULD-WON'T) in eine Anforderungsliste gegliedert:

MUSS-Kriterien:

- Absolute Genauigkeit (min. $\pm 0,1$ mm, besser $\pm 0,05$ mm)
- Messbereich ($> 1,5$ mm für M12 (siehe Tabelle 7))
- Langlebigkeit
- Robustheit

SOLL-Kriterien:

- Batteriebetrieb
- Bauform/-größe

KANN-Kriterien:

- Schutz der beweglichen Teile oder vor Staub
- Einfaches Handling

Ein WIRD NICHT-Kriterium wird für die Auswahl des Messprinzips nicht als notwendig erachtet. Diese Kriterien sollen als Anforderungen für die Auswahl eines geeigneten Messprinzips dienen. Die Überlegungen hierzu und die Auswahl des Messprinzips werden im folgenden Unterkapitel besprochen.

7.3 Auswahl der geeigneten Messprinzipien für chemische Befestigungsmittel

Mit den gestellten Anforderungen an das Messprinzip lassen sich die technisch relevantesten Weg- und Abstandsmessprinzipien zur Verschiebungsmessung eingrenzen und bewerten. In Tabelle 8 sind diese Anforderungen über die verschiedenen Messprinzipien übereinander aufgetragen, wobei ebenfalls die jeweiligen Eigenschaften der Messprinzipien zu den Anforderungen dargestellt sind. Die Informationen zu den einzelnen Messprinzipien entstammen der Literatur, einer Marktrecherche zu den Eigenschaften marktüblicher Systeme und eigenen Überlegungen. Diesbezüglich wurde darauf geachtet, die Eigenschaften marktüblicher robuster Produkte in die Bewertung miteinfließen zu lassen. Die Eigenschaften von Sonderlösungen oder zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch in Forschungs- und Entwicklung befindlichen Systemen sind in der Bewertung indes nicht berücksichtigt worden.

Tabelle 8: Vergleich der Messprinzipien zu den Anforderungen für die Integration der Verschiebungsmessung in den identifizierten Designräumen aus Schönfelder und Hering (2018) und Recherche kommerzieller Sensoren

	Wegmessung						Abstandsmessung				
	Induktiv (LVDT)	Opt. interferometr.	Fotoelektr. Abtasten	Magnetostruktiv	Induktiv (IWS)	Potenzio-metrisch	Induktiv (INS)	Kapazitätiv	Opt. triangulieren	Lichtlaufzeit messen	Ultraschall messen
Absolute Genauigkeit	<10 µm bis <50 µm	<1 µm bis <10 µm	<50 µm bis <100 µm	<100 µm bis <50 µm	<100 µm bis <50 µm	<100 µm bis <50 µm	<100 µm bis <50 µm	<100 µm bis 50 µm	<5 mm bis <500 µm	<5 mm	<500 µm bis <1 mm
Messbereich max.	2 mm bis 1.000 m	0 mm bis 10.000 m	25 mm bis 8.000 m	25 mm bis 300 mm	0 mm bis 1.000 m	0 mm bis 100 mm	0 mm bis 20 mm	20 mm bis 5.000 mm	0 mm bis 10.000 m	25 mm bis 8.000 m	unbekannt
Langlebigkeit (50 a)	Nein	Nein	Nein	Nein	Bedingt	Nein	Bedingt	Bedingt	Nein	Nein	Nein
Robustheit	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Batteriebetrieb	Ggf.	Nein	Nein	Nein	Ggf.	Ja	Ggf.	Ja	Nein	Nein	Nein
Bauform/Größe	Längliche Bauform notwendig	Größere Apparatur	Filigraner Aufbau	Längliche Bauform	Kompakte Bauweise	Längliche Bauform notwendig	Kompakte Bauweise	Kompakte Bauweise	Ext. Apparat mit Abstand notwendig	Ext. Apparat mit Abstand notwendig	Kompakte Bauweise
Bewegl. Teile/ Staub	Bewegl. Teile	Bewegl. Teile/ Staub	Nein	Nein	Nein	Bewegl. Teile	Nein	Nein	Staub	Staub	Nein
Einfaches Handling	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
	Muss		Soll		Kann						

Angefangen bei dem MUSS-Kriterium *absolute Genauigkeit* erfüllen, bis auf *Lichtlaufzeit messen*, alle Messprinzipien die nötige Genauigkeit von mindestens $<0,1 \text{ mm}$, also $<100 \text{ }\mu\text{m}$. Einige Messprinzipien besitzen sogar eine weit höhere Auflösung als gefordert.

Das MUSS-Kriterium *Messbereich* wird von allen dargestellten Messprinzipien für die Weg- und Abstandsmessung eingehalten. Auch wenn es beispielsweise für Ultraschall, optisch messende oder induktive Sensoren notwendig ist, einen Mindestabstand zwischen Sensorelement und Target einzuhalten, ist dieser meist so gering, dass diese Messprinzipien über konstruktive Lösungen in den identifizierten Designraum integrierbar wären.

Bedingt durch die hohe Lebensdauer eines chemischen Befestigungssystems müssen Messprinzipien, deren sensorisches Element sich im Bohrloch befindet, ebenfalls das MUSS-Kriterium *Langzeitbeständigkeit* aufweisen. Laut den Langzeitbelastungstests R6, B14 und B15 der (EAD 330499-00-0601) sollen diese eine Beständigkeit von über 50 Jahren besitzen. Aufgrund physikalischer Effekte wie der Elektromigration von elektrischen Komponenten oder des Verlusts der magnetischen Eigenschaften von ferromagnetischen Bauteilen, zum Beispiel begünstigt durch Temperaturschwankungen, können auch optische Messprinzipien, die beispielsweise auf Halbleiterbauteile wie Dioden im Designraum angewiesen wären, wie *interferometrisch*, *fotoelektrisch*, *triangulieren* oder *Lichtlaufzeit messen*, ebenso wenig eingesetzt werden, wie Messprinzipien, deren Sensoren auf ferromagnetische Bauteile angewiesen sind, wie beispielsweise *magnetostruktiv*, *induktiv (LVDT)* oder bestimmte Bauarten von *induktiv (IWS)* und *induktiv (INS)*. Für die Messprinzipien *induktiv (IWS)* und *induktiv (INS)* besteht jedoch die Möglichkeit, die Bauart durch die abschirmende Wirkung des Betons konstruktiv so zu gestalten, dass sie auf ferromagnetische Bauteile verzichten könnten. Die Lebensdauer des Messprinzips *potenziometrisch* ist durch den Verschleiß seines Schleifkontaktes beziehungsweise die Gefahr des Festsetzens begrenzt, wenn über einen längeren Zeitraum, wie zu erwarten, keine Verschiebung stattfindet. Die Ultraschallwellen des Messprinzips *Ultraschall messen* werden meist mit sehr beständigen Piezokeramiken erzeugt. Da jedoch über die Lebensdauer von Piezokeramiken, eingebettet in ein Gehäuse im Mörtel beziehungsweise Beton, keine Erfahrungswerte vorliegen, lässt sich hierzu keine eindeutige Bewertung abgeben.

Das MUSS-Kriterium *Robustheit* spiegelt die Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse der Messprinzipien im Einsatzgebiet chemischer Befestigungsmittel wider, bedingt durch die harsche Umgebung, wie beispielsweise Frost-/Tauwechsel, Temperaturen von $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $80 \text{ }^\circ\text{C}$, stehendes Wasser oder einfach Staub. Hierfür eig-

nen sich optische Messprinzipien nicht. Auch Messprinzipien mit beweglichen Teilen, wie *induktiv (LVDT)* oder *potenziometrisch*, sind diesbezüglich nicht empfehlenswert.

Ein *Batteriebetrieb* gilt als SOLL-Kriterium, um möglichst wartungsarme und kabellose, quasi-autarke Sensoren in die chemischen Befestigungsmittel zu integrieren. Dementsprechend sind energieaufwendige Messprinzipien wie die meisten optischen oder *Ultraschall messen* ungeeignet. Induktive Messprinzipien hingegen lassen sich gegebenenfalls durch konstruktive Maßnahmen oder geeignete Abtast- und Abrufraten der Signale auf den Batteriebetrieb ausrichten. Messprinzipien, deren Sensoren bereits als Serienprodukte mit Batteriebetrieb zur Weg- oder Abstandsmessung erhältlich sind, sind *fotoelektrisches Abtasten*, *potenziometrisch* oder *kapazitiv*.

Weiterhin soll der definierte Designraum eingehalten werden, weshalb *Bauformgröße* der Messprinzipien in diesem umsetzbar sein soll. Dieses SOLL-Kriterium wird nur von den Messprinzipien *induktiv (IWS)*, *induktiv (INS)*, *kapazitiv* und *Ultraschall messen* erfüllt.

Als KANN-Kriterien sind *Schutz der beweglichen Teile oder vor Staub* und *einfaches Handling* definiert worden. Bis auf wenige Messprinzipien, wie etwa *magnetrostriktiv*, *induktiv (IWS)*, *induktiv (INS)*, *kapazitiv* und *Ultraschall messen*, erfüllen die Messprinzipien das Kriterium *Schutz der beweglichen Teile oder vor Staub* nicht. Dies lässt sich jedoch in den meisten Fällen durch geeignete Gehäuse und Abschirmung konstruktiv lösen. Das Kriterium *einfaches Handling* ist schwer zu beurteilen, wenn der zu integrierende Sensor für das chemische Befestigungsmittel in Aufbau und Funktion zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt ist. Die Bewertung in Tabelle 8 ist aus Überlegungen und der Bewertung von marktüblichen Sensorsystemen entstanden. Daher stellt dieses Kriterium ein schwaches Kriterium dar, soll jedoch für das weitere Vorgehen, die konstruktive Ausarbeitung, mitbeachtet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die optischen Messprinzipien, vor allem bedingt durch Langlebigkeit und Robustheit sowie Energieaufwand, für die Verschiebungsmessung einzelner chemischer Befestigungsmittel ungeeignet sind. Die vorgestellten induktiven Messprinzipien hingegen wären grundsätzlich geeignet, jedoch aufgrund der nötigen Magnetfelder zu anfällig gegenüber dem Verlust des Magnetismus bei Permanentmagneten, beziehungsweise wäre der Energieverbrauch beim Einsatz der Spule zu hoch. Das potenziometrische Messprinzip gilt in der industriellen Anwendung zwar als äußerst robust, kann sich jedoch unter den harschen Bedingungen von Befestigungsmitteln als zu anfällig gegenüber Umwelt-

einflüssen erweisen. Der Ultraschallsensor weist einen sehr hohen Energieverbrauch auf. Hinzu kommen fehlende Kenntnisse über die Lebensdauer aktueller Ultraschallgeneratoren, wie zum Beispiel Piezokeramiken. Als geeignetes Messprinzip hat sich ‚kapazitiv‘ herausgestellt. Durch eine relative Abstandsmessung können auch eventuelle Toleranzschwankungen bei der Herstellung und Montage im Vergleich zu einer totalen Wegmessung kompensiert werden. Durch langjährige Erfahrung im industriellen Einsatz, beispielsweise als Näherungssensor, und bei Endverbrauchern, beispielsweise als Bedienelement, könnte hieraus ein wirtschaftlicher und den Anforderungen angepasster Sensor entwickelt werden, der chemische Befestigungsmittel mechatronisieren kann.

7.4 Aufbau der sensorischen Elemente

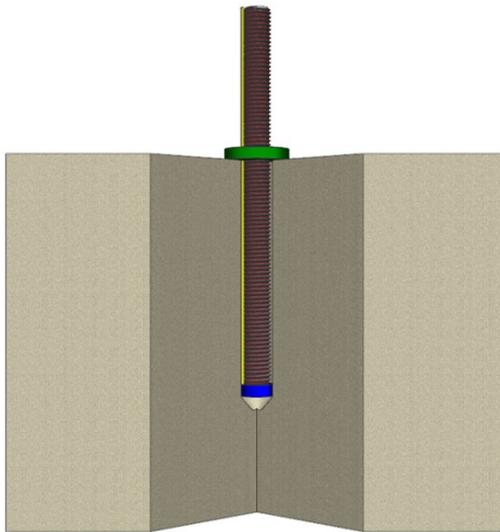


Abbildung 7.5: Zusammenfassung der zur Verfügung stehenden Designräume ‚Betonoberfläche‘ (grün), ‚geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (gelb), ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘ (rot) und ‚Element im Bohrlochgrund‘ (blau)

Das ausgewählte Messprinzip der kapazitiven Abstandsmessung soll so entworfen werden, dass es in die identifizierten Designräume eingepasst werden kann. Durch die Erkenntnisse über nicht signifikante Effekte der Zweifachwechselwirkungen bei

der Kombination zweier Designräume besteht die Möglichkeit, diese für eine sensorische Funktion zu koppeln. Die vier identifizierten Designräume sind mit farblicher Kennzeichnung in Abbildung 7.5 dargestellt. Die Designräume umfassen: Betonoberfläche (grün), geringfügige Abdeckung der Verbundfläche (gelb), Abdeckung des Gewindegrundes (rot) und Elemente im Bohrlochgrund (blau).

Die Funktionsweise des kapazitiven Messprinzips wurde bereits in Unterkapitel 2.5.3 beschrieben. Die drei vorgestellten Varianten zur Detektion von Veränderungen des Plattenabstandes, der Plattenfläche und des Dielektrikums eignen sich nach ersten Überlegungen nicht für alle Designräume. Eine Änderung des Plattenabstandes kann beispielsweise im Designraum ‚Bohrlochgrund‘ oder ‚Betonoberfläche‘ integriert werden, konstruktiv jedoch nur aufwendig bis gar nicht im Gewindegrund oder an der Verbundfläche. Die Änderung der Plattenfläche wiederum könnte im Bohrlochgrund oder an der Verbundfläche umgesetzt werden, wobei sich die Verbundfläche aus geometrischen Aspekten besser dafür eignen würde. Eine Änderung des Dielektrikums zu detektieren, ohne das Einbringen einer zusätzlichen Flüssigkeit, wie dies technisch meist gelöst wird, widerspricht einer technisch einfachen Lösung, wenn die Lebensdauer des sensorischen Elementes von etwa 50 Jahren in Betracht gezogen wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der ausgehärtete Verbundmörtel und der umgebende Beton als konstantes Dielektrikum angenommen werden. Entstehen nun Risse, könnten die Trennung der Polymerketten und die Entstehung von Luftspalten durch Risse die Änderung des Dielektrikums hervorrufen. Diese vorgestellten Überlegungen sollen im Folgenden konstruktiv ausgearbeitet werden, wobei die Konstruktion der sensorischen Elemente im Vordergrund steht. Auf die Elektronik und die Messauswertung soll nur so weit wie nötig eingegangen werden.

7.4.1 Kapazitiver Abstandssensor im Bohrlochgrund

Die konstruktive Ausarbeitung des sensorischen Elementes im Bohrlochgrund (Abbildung 7.5 blau) stellt sich aufgrund der geometrischen Randbedingungen als vergleichsweise einfach dar. In den Designraum ‚Bohrlochgrund‘ lässt sich problemlos eine Kondensatorfläche, also Messelektrode, einbringen. Als Gegenelektrode kann die dem Bohrlochgrund zugewandte Stirnfläche der Gewindestange genutzt werden, woraus sich ein prinzipieller Aufbau des kapazitiven Abstandssensors wie in Abbildung 2.21 a) links dargestellt ergibt. Diese Position ist für die Aufnahme der ganzheitlichen Verschiebung des Verbundankersystems besonders geeignet, da sie außer bei der Versagensart *Stahlbruch* die durch die anderen Versagensarten verursachte relative Bewegung weg vom Bohrlochgrund detektieren kann.

In Abbildung 7.6 wird ein Entwurf aus den folgenden Überlegungen präsentiert. Da sich dieses Element im tiefsten Punkt der Verankerung befindet, muss das Sensor-signal dieses Abstandssensors zu einer signalverarbeitenden Messelektronik aus dem Bohrloch geführt werden. Dies schafft zum einen die Problematik, dass eine vergleichsweise lange und möglicherweise für Störgrößen anfällige Signalleitung nötig ist. Zum anderen ergibt sich jedoch der Vorteil, dass ein alterungsbedingter Defekt der integrierten Schaltung über die Lebensdauer von 50 Jahren, beispielsweise durch Elektromigration, problemlos möglich ist. Bei der Integration der Elektronik in den Bohrlochgrund könnte ein Austausch der defekten Elektronik nicht ohne Beschädigung der Verankerung vorgenommen werden.

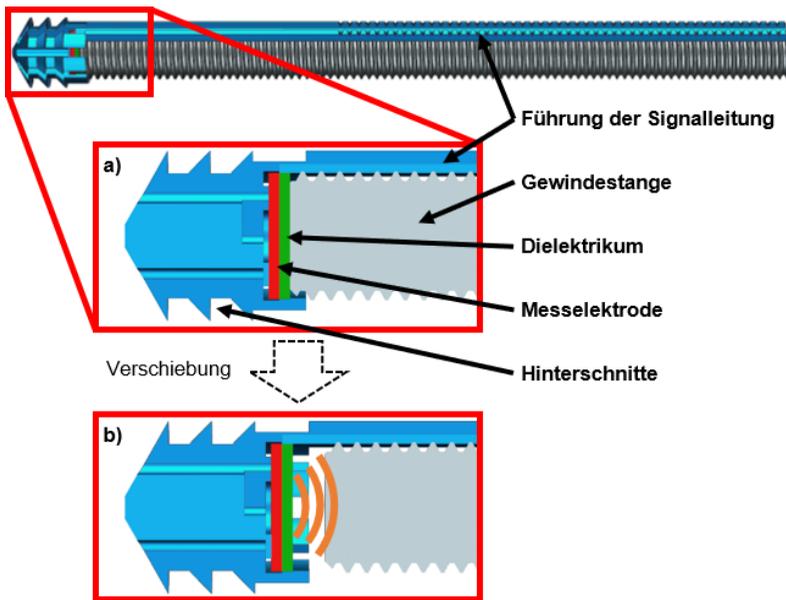


Abbildung 7.6: Entwurf eines kapazitiven Abstandssensors für Verbundankersysteme im Designraum ‚Bohrlochgrund‘ mit Nutzung des Designraumes ‚geringfügige Abdeckung Verbundfläche‘

Zum Schließen des elektrischen Kreises und zur Herausführung der Messsignale kann zum einen die Gewindestange selbst und zum anderen der Designraum ‚geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (Abbildung 7.5 gelb dargestellt) genutzt werden. Mit diesem Designraum ist eine Führung der Signalleitung möglich. Die

Problematik der Störgrößenanfälligkeit muss dabei konstruktiv berücksichtigt werden. Diesbezüglich eignen sich beispielsweise geschirmte Leitungen. Eine weitere relevante Randbedingung für dieses Messprinzip ist ein konstantes und isolierendes Dielektrikum, wobei aufgrund der geschützten Position im Bohrlochgrund beispielsweise ein flexibles Polymer verwendet werden kann (in Abbildung 7.6 grün dargestellt). Um eine Verfälschung des Messwertes zu vermeiden, darf die Sensorfläche im Bohrlochgrund möglichst keinerlei Verschiebung erfahren, und muss daher konstruktiv im Bohrlochgrund fixiert werden. Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, dass der Bohrlochgrund eine Begrenzungsfläche darstellt. Dennoch kann es durch die Alterung des Betons oder Schädigungen an dieser Position zu Relativbewegungen kommen. Dies gilt es für die Fixierung im Bohrlochgrund zu berücksichtigen. Die Fixierung ist im Entwurf durch Hinterschnitte dargestellt, die im Bohrloch mit Verbundmörtel umschlossen werden und aufgrund des fehlenden Kraftflusses die Messelektrode im Bohrlochgrund bewegungslos verankern. Dies begünstigt die Messung der axialen Relativverschiebung wie in Abbildung 7.6 dargestellt. Die Darstellung a) zeigt hierbei den Grundzustand nach Montage des Verbundankers und b) die Verschiebung nach Belastung mit ausgebildetem elektrischem Feld (orange angedeutet).

Die Vorteile dieser Lösung liegen in der direkten Messung der axialen Verschiebung bei gleichzeitig einfachem Aufbau. Die Langlebigkeit kann in diesem einfachen Aufbau durch die Wahl geeigneter Materialien garantiert werden. Der Verzicht von Elektronik im Bohrloch erhöht die Lebensdauer des Sensorelementes auf die Lebensdauer des Verbundankersystems. Nachteile dieser Lösung sind zum einen die erhöhte notwendige Verankerungstiefe h_{ef} , die um den nicht an der Kraftleitung beteiligten Bereich h_{sensor} bei Erstellung des Bohrlochs erweitert werden muss. In den vorangegangenen Untersuchungen (Unterkapitel 6.2) betrug dieser Wert 5 mm. Ein weiterer Nachteil besteht in der Einbringung von Störgrößen durch die im Vergleich zur Sensorfläche lange Signalleitung. Diese kann, ohne konstruktive Gegenmaßnahmen, nicht quantifizierbare parasitäre Kapazitäten ausbilden. In Abbildung 7.7 oben ist ein erster 3D-gedruckter Funktionsprototyp mit eingeklebtem Kupferblech als Messelektrode mit Polyurethanbeschichtung als Dielektrikum und einem handelsüblichen geschirmten Signalkabel als Signalleitung dargestellt.

Als Basis für den ersten Funktionsprototypen der Messelektronik wird die Physical-Computing-Plattform ARDUINO UNO REV 3 mit einem 8-bit ATMEL ATMEGA328-Mikrokontroller verwendet. Über die integrierte Entwicklungsumgebung wird ein Programm in der an C- beziehungsweise C++ angelehnten Programmiersprache zur Berechnung des relativen Abstandes durch Messung der Ladezeit erstellt. Hierfür wird eine Schaltung mit vorgeschaltetem 10 M Ω Widerstand und parallel geschaltetem 100 pF Referenzkondensator aufgebaut. Zusätzlich werden drei Leuchtdioden

(LED) und eine Flüssigkristallanzeige (LCD) für die Ausgabe des Zustandes angeschlossen. Der Prototyp ist mit Gehäuse in Abbildung 7.7 unten dargestellt. Der Quelltext mit Beschreibung des Programms ist in Anhang B zu finden. Eine Verschiebung ist mit diesem ersten Funktionsprototypen zwar detektierbar, jedoch werden nicht die gewünschte Robustheit und Genauigkeit erreicht. Grund hierfür sind die elektrischen Störgrößen, die durch die nicht genutzten elektrischen Komponenten der ARDUINO-Plattform erzeugt werden.

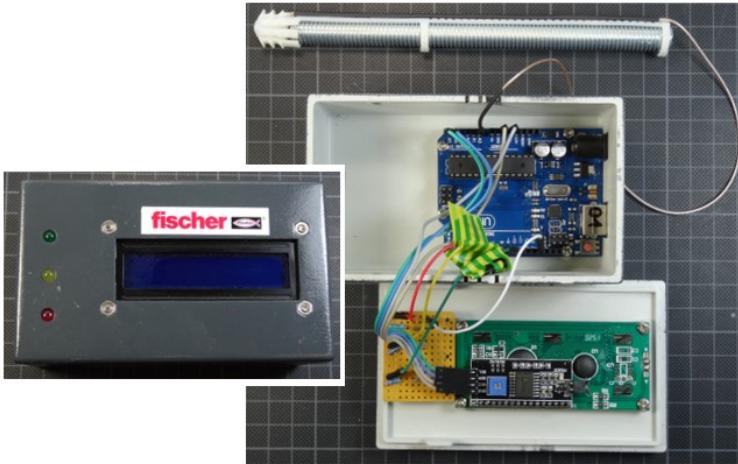


Abbildung 7.7: 3D-gedruckter Prototyp des Sensorhalters mit Gewindestange (oben) und der Messelektronik mit Gehäuse (unten)

Zur Erhöhung der Robustheit und der Genauigkeit ist es nötig, sowohl das Sensorelement als auch die Messelektronik weiterzuentwickeln. Hierfür wird das Sensorelement für die Herstellung im Spritzgussverfahren optimiert. Die Messelektrode aus Kupfer und die Signalleitung werden durch ein im Spritzgussverfahren eingelegtes und umspritztes Edelstahlblech (Werkstoffbezeichnung 1.4310) ersetzt. Als Kunststoff wird Polyethylen gewählt. Durch diese Prototypen können die Anforderungen bezüglich der Langzeitbeständigkeit gewährleistet werden. Abbildung 7.8 präsentiert ein Foto dieses Prototyps mit Detailaufnahme des Sensorhalters mit den Hinterschnitten und dem Edelstahlblech.

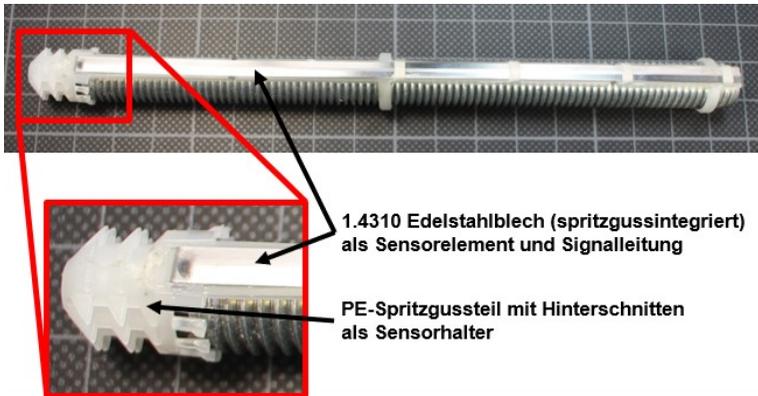


Abbildung 7.8: Prototyp aus Polyethylen-Sensorhalter mit spritzgussintegriertem Edelstahlblech als Messelektrode und Signalleitung

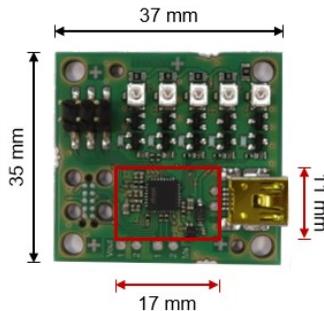


Abbildung 7.9: Messelektronik Prototyp der Firma LNT Automation GmbH für den kapazitiven Abstandssensor

Die Messelektronik wurde aus den Vorgaben des ersten Funktionsprototypen von der Firma LNT AUTOMATION GMBH für eine höhere Genauigkeit und Versuche mit Datenaufzeichnung weiterentwickelt. Kern der Messelektronik ist, wie bereits im ersten Prototyp, ein ATMEL-Mikrokontroller der Firma MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Zusätzlich besitzt die Elektronik eine Entwicklungsschnittstelle zur Anpassung der Software und einen Mikro-USB-Typ-B-Anschluss für die Spannungsversorgung mit 5 V. Das Programm entspricht im Kern dem des Funktionsprototypen, jedoch ohne

Berechnung des Plattenabstandes zwischen Messelektrode und Gewindestange. Stattdessen erfolgt die Signalausgabe über einen analogen Ausgang mit 0 V bis 3,3 V und zusätzlicher optischer Anzeige mit fünf LEDs. Abbildung 7.9 zeigt die Leiterplatte mit den geometrischen Abmessungen. In Rot eingezeichnet ist die für die eigentliche Messung erforderliche Elektronik. Weiterhin sind darüber liegend die Pins der Entwicklungsschnittstelle (links) und die fünf LEDs (rechts, in weiß) dargestellt. Rechts der Messelektronik ist die Mikro-USB-Buchse zur Energieversorgung und unterhalb dieser sind die Kontakte für den Signaleingang sowie der analoge Ausgang angeordnet.

7.4.2 Kapazitiver Impedanzsensor in der Verbundfläche

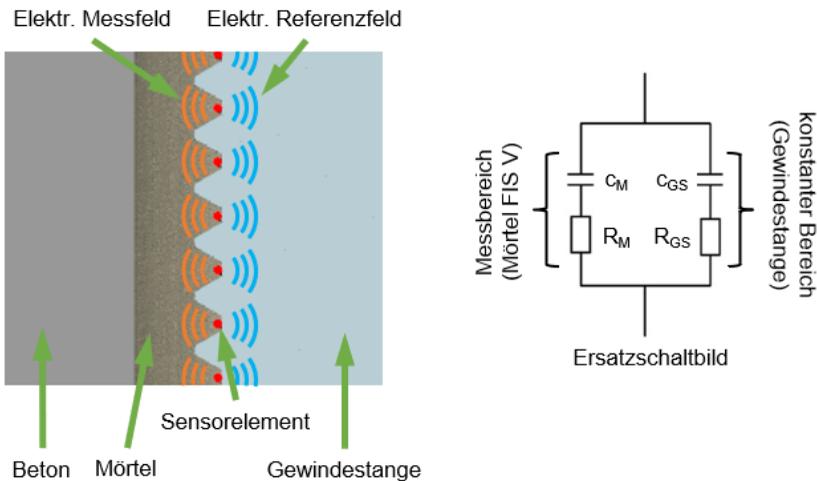


Abbildung 7.10: Darstellung des Messprinzips des kapazitiven Impedanzsensors (links) mit Messfeld (orange) und Referenzfeld (blau) und dem vereinfachten Ersatzschaltbild (rechts)

Der Designraum ‚Abdeckung des Gewindegrundes‘ (Abbildung 7.5, in Rot dargestellt) eignet sich ebenfalls für die Integration eines sensorischen Elementes. Durch seine Position direkt an der Verbundfläche liegt er in unmittelbarer Nähe des direkten Kraftflusses. Zur Erfassung der Zustandsänderung des Verbundankersystems

in dieser Position eignet sich das kapazitive Messverfahren zur Änderung des Dielektrikums (siehe Abbildung 2.21 c)). Die Messelektrode ist ein im Gewindegrund eingelegter Kupferlackdraht der Dicke 0,2 mm. Die Gegenelektrode ist die Gewindestange. Durch das Anlegen eines Wechselspannungssignals an die Messelektrode und der Gewindestange an Masse bildet sich ein elektrisches Feld mit kapazitivem Charakter aus. Das sich verändernde Dielektrikum dieses Messprinzips stellt der ausgehärtete Vinylestermörtel dar (Abbildung 7.10 links, in Orange). Ein konstantes Referenzfeld bildet sich in Richtung Gewindestange aus (Abbildung 7.10 links, in Blau). Abbildung 7.10 rechts enthält ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für die messtechnische Bestimmung der Veränderung im System.

Durch eine Veränderung des Vernetzungszustands ändert sich der kapazitive Blindwiderstand. Dies lässt sich über die Änderung des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung ermitteln. Die hierfür erforderliche Messelektronik und der Auswertalgorithmus wurden von der Firma SENSOSURF GMBH (ehemals WINKELMANN MIKROSYSTEME) entwickelt. Abbildung 7.11 zeigt den konstruierten Prototypen der Gewindestange mit integriertem Impedanzsensor und die dazugehörige Messelektronik mit integrierter BLUETOOTH-LOW-ENERGY-Datenübertragung der Firma SENSOSURF. Die Verbindung zwischen dem Sensorelement und der Gewindestange zur Messelektronik ist bei diesen Prototypen mit einem BNC-Stecker realisiert worden.



Abbildung 7.11: Prototyp des konstruierten Impedanzsensors mit Messelektronik der Firma SENSOSURF mit integrierter Messdatenübertragung mittels BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE)

7.4.3 Verbleibende Designräume

Der Designraum ‚geringfügige Abdeckung der Verbundfläche‘ (Abbildung 7.5, in Gelb dargestellt) eignet sich nur bedingt für die Integration des kapazitiven Messprinzips. Grundsätzlich wäre vor allem die Detektion der veränderten Plattenfläche (siehe Abbildung 2.21 b)) dafür passend, jedoch ist das Verhältnis zwischen veränderlicher und konstanter Fläche sehr gering. Eine relative Verschiebung könnte nicht detektiert werden, da die Kapazitätsänderung kleiner wäre als das Messrauschen.

Der Designraum ‚Betonoberfläche‘ (Abbildung 7.5, in Grün dargestellt) kann, wie bereits erläutert, je nach Versagensart nicht mit hundertprozentiger Sicherheit eine Verschiebung detektieren. Er kann jedoch als geeignete Position für die Messelektronik dienen, da der Designraum außerhalb einer Leitstützstruktur und somit außerhalb des Kraftflusses liegt.

7.5 Verifizierung der sensorischen Systeme

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel entworfenen mechatronisierten Verbundankersysteme im Versuch verifiziert. In einem ersten Schritt wird hierzu die grundsätzliche Messfunktion überprüft und anschließend in Versuchen, angelehnt an die (EAD 330499-00-0601), verifiziert.

7.5.1 Funktion des kapazitiven Abstandssensors

Um das Gesamtsystem Sensorhalter und Messelektronik auf seine grundsätzliche Funktion zu überprüfen und die Ausgangsspannung auf den Weg der axialen Verschiebung abzugleichen, wird ein Kalibrierprüfstand aufgebaut. Durch diesen sind auch schnelle Kontrollen der Softwareanpassungen für die Feinjustage des Systems möglich. Der Kalibrierprüfstand ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Hierfür wurde eine Messelektrode in ein Bohrloch eines Betonprüfkörpers eingeklebt. Die Messleitung der Elektrode führt direkt zu einer Messelektronik wie in Abbildung 7.9 veranschaulicht. Über eine analoge Messschraube kann die eingespannte Gewindestange mit einer Genauigkeit von $10\ \mu\text{m}$ axial verschoben werden. Zur Aufzeichnung der Verschiebung ist auf dieser Messschraube ebenfalls axial ein digitaler Wegtaster angeordnet. Die Ausgangssignale des Wegtasters und der Messelektronik werden mittels DIADEM aufgezeichnet.

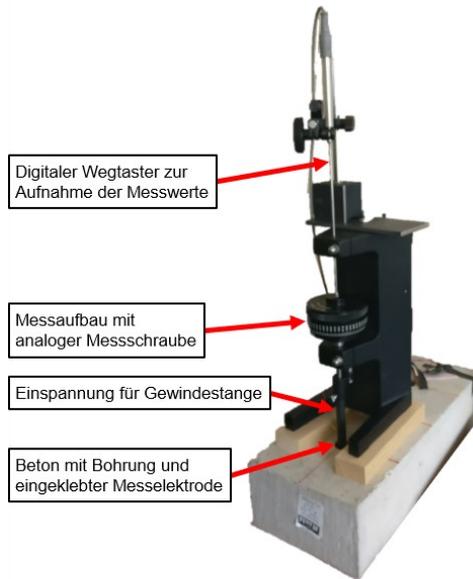


Abbildung 7.12: Kalibrierprüfstand für die Zuordnung der Ausgangsspannung zur zugehörigen Verschiebung

Der abgestimmte Messsignal-Verschiebungs-Verlauf ist in Abbildung 7.13 ersichtlich. Die minimale und die maximale Signalspannung sind dabei in Grün beziehungsweise Rot dargestellt. Der gemittelte Verlauf des Messsignals ist in Blau gekennzeichnet, die Streuung beträgt 0,04 V und ist nicht abgebildet. Durch den degressiven Kurvenverlauf ist bereits bei geringen Verschiebungen ein deutlicher Spannungsanstieg messbar. Dies begünstigt schon im frühen Stadium die Detektion von Systemveränderungen durch eine axiale Verschiebung. Weiterhin sind mit dem gestrichelten Bereich beispielhaft die relevanten Messbereiche für die maximale auftretende Verschiebung eines FIS V-Verbundankers mit M12-Gewindestange von 0 mm bis 1,1 mm (vgl. Tabelle 7) in ungerissenem trockenem beziehungsweise nassem Beton bei Temperaturen für Langzeitbelastung von 50 °C sowie Kurzzeitbelastung von 80 °C dargestellt.

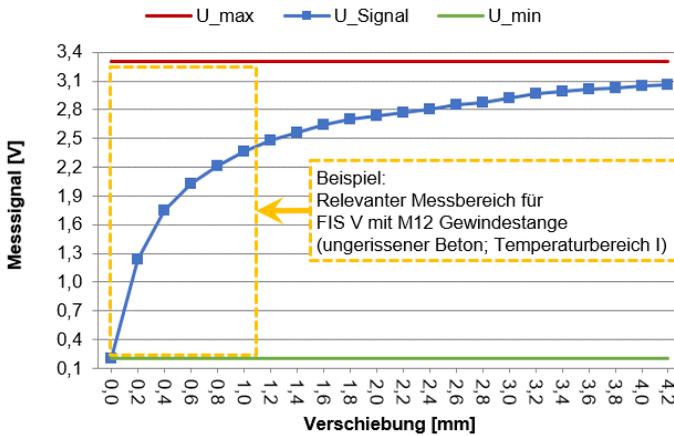


Abbildung 7.13: Messsignal-Verschiebung-Verlauf des Abstandssensors aus dem Kalibrierprüfstand mit beispielhaft eingezeichneten relevanten Messbereichen für verschiedene Anwendungen des Verbundankers FIS V mit M12-Gewindestange

Zur anwendungsnahen Überprüfung des Messsignals werden Prototypen des Verbundankers mit kapazitivem Abstandssensor (vgl. Abbildung 7.8) mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 70$ mm in einem bereits vorgestellten zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung geprüft, wobei das Messsignal aufgezeichnet wird. Da es sich bei dem mechatronisierten Verbundankersystem um ein System zur Aufnahme der axialen Verschiebung handelt, ist die Aufnahme des Weges relevant. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Messsignal dem gemessenen Maschinenweg gegenübergestellt. Zur Erläuterung des Messsignalverlaufs wird dieser im Kraft-Weg-Diagramm der Auszugsversuche anschließend dem Kraftverlauf gegenübergestellt.

Abbildung 7.14 zeigt den ersten Auszugsversuch eines mechatronisierten Verbundankers auf Basis eines kapazitiven Abstandssensors. Der erste Anstieg des Messsignals ist nach etwa 175 Sekunden des Auszugsversuchs bei einem Maschinenweg von 1,4 mm erkennbar. Der Sprung des Maschinenweges bei etwa 240 Sekunden von 1,7 mm auf 2,2 mm deutet sich im Messsignal durch einen überproportionalen Anstieg bereits früher an. Ebenso verhält es sich bei dem stärkeren Anstieg des Maschinenweges bei etwa 370 Sekunden und 2,6 mm. Den Grund für den ersten Sprung des Maschinenweges ist durch Abbildung 7.15 zu erklären. Bei 2,2 mm Weg erreicht der Verbundanker eine erste Spannungsspitze. Darauf folgend erhöht

sich die Steigung des Messsignals erneut auf ein höheres Niveau, bis bei 3,6 mm der Verbundanker versagt. Hierbei sinkt das Messsignal kurzzeitig in Abbildung 7.15 und Abbildung 7.14 deutlich sichtbar und pendelt sich auf ein neues Niveau ein.

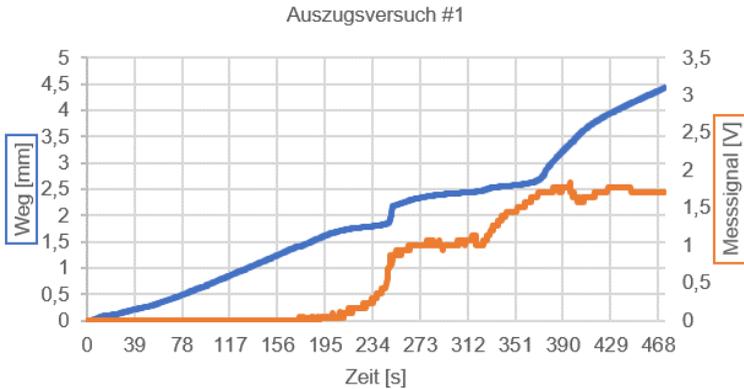


Abbildung 7.14: Maschinenweg und Messsignal über den Messverlauf des ersten Auszugsversuches



Abbildung 7.15: Kraft-Weg-Verlauf des ersten Auszugsversuches mit eingezeichnetem Messsignal

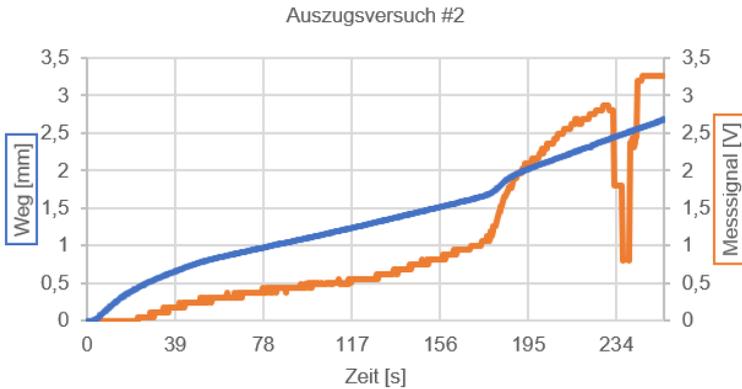


Abbildung 7.16: Verlauf des Messsignals und des Maschinenweges im zweiten Auszugsversuch über die Zeit



Abbildung 7.17: Verlauf der Kraft und des Messsignals über den Maschinenweg des zweiten Auszugsversuches

Der Verlauf des Maschinenweges und des Messsignals des zweiten Auszugsversuches ist in Abbildung 7.16 dargestellt. Mit einer Verzögerung beginnt der Anstieg

des Messsignals bei etwa 23 Sekunden und verläuft etwa bis zu Sekunde 178 parallel. Dann erhöht sich die Steigung bei einem Maschinenweg von circa 1,7 mm beider Kurven und das Messsignal steigt überproportional zum Maschinenweg an. Wie in Abbildung 7.17 zu erkennen, ist dies der Moment des Verbundankerversagens. Daraufhin steigen das Messsignal und der Maschinenweg in Abbildung 7.16 weiter an, bis das Messsignal, wie in Abbildung 7.17 ersichtlich, bei Versuchsende einen Einbruch hat und auf die maximale Ausgangsspannung von 3,3 V der Elektronik springt.

Abbildung 7.18 zeigt den Verlauf des Maschinenweges und das Messsignal über die Versuchszeit. Auch hier ist, wie in vorangegangenen Versuchen bereits erläutert, eine Verzögerung zwischen tatsächlichem Maschinenweg und Messsignal festzustellen. Der Anstieg des Messsignals wird durch eine Spitze des Messsignals initiiert. Daraufhin steigt das Messsignal stetig mit ändernden Steigungen bis zum spontanen Abfall des Messsignals bei 4,4 mm Maschinenweg von 2,8 V auf 0,8 V bis zum Ende des Auszugsversuchs. Zum Verlauf des Kraft-Weg-Diagramms in Abbildung 7.19 lässt sich kein direkter Zusammenhang mit dem Messsignal erkennen. Weder die anfängliche Spitze des Messsignals noch der spontane Abfall des Messsignals zum Ende des Auszugsversuchs lassen einen Zusammenhang erkennen. Dennoch ist die zunehmende Verschiebung des Verbundankersystems im Messsignal durch einen annähernd konstanten Anstieg zu beobachten.

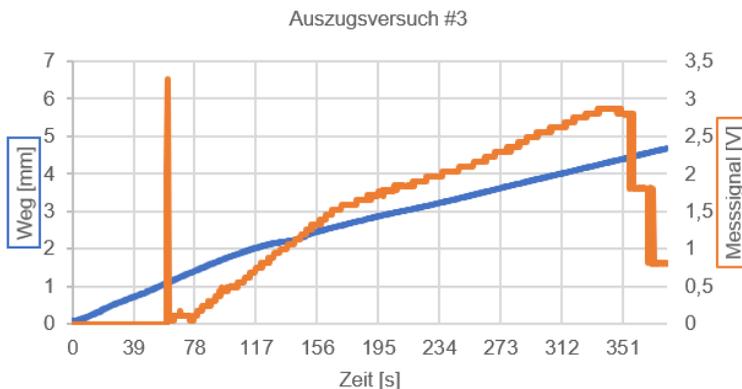


Abbildung 7.18: Darstellung des Maschinenweges und des Messsignals über den dritten Auszugsversuch

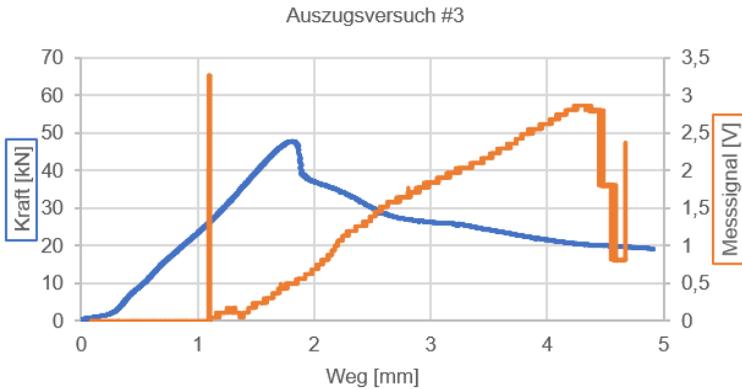


Abbildung 7.19: Kraft-Weg-Diagramm des dritten Auszugversuchs mit Darstellung des Messsignals über die Verschiebung

Die grundsätzliche Funktionsweise des kapazitiven Abstandssensors integriert in einen Verbundanker auf Basis eines Vinylesters lässt sich somit bestätigen. Die späte Reaktion des Messsignals auf den gemessenen Maschinenweg kann dabei verschiedene Gründe haben. Der naheliegendste ist die unterschiedliche Steifigkeit der Komponenten und einzelner Bereiche des Systems. Für die Prüfapparatur sind in der (EAD 330499-00-0601) Mindeststeifigkeiten vorgegeben. Der nicht eingemörtelte Teil des Verbundankers, also die freie Gewindestange, besitzt hingegen eine wesentlich geringere Steifigkeit. Durch die unterschiedlichen Positionen der Messpunkte des Maschinenwegs und des kapazitiven Abstandssensors kann der Wegsensor des Maschinenwegs die Dehnung des freien Gewindestangenabschnitts sowie eine gewisse Elastizität des Prüfaufbaus, wie beispielsweise am Auszugsadapter, aufnehmen, während der kapazitive Abstandssensor im Bohrlochgrund noch keinerlei Dehnung oder Verschiebung erfährt. Die Spitze des Messsignals im Auszugversuch 3 kann auf ein Losbrechen, also eine Art Stoß, zwischen der Sensorfläche und der Stirnfläche der Gewindestange deuten. Die Messergebnisse zeigen jedoch, dass das Signal eindeutig die Verschiebung widerspiegelt und nicht den Kraftverlauf. Zwar lassen sich vereinzelt kraftverursachte Ereignisse im Messsignal erkennen, dennoch ist dies nicht die Regel. Für die zur Überwachung gewählten Versagensarten erweist sich dies als unkritisch, wenn nicht sogar vorteilhaft. Dadurch können vor allem kraftunabhängige Verschiebungen detektiert werden, die auch beim Einsatz falscher Mörtelsysteme oder falscher Montage auftreten, weit vor der erwarteten Versagenslast. Dennoch müssen für reproduzierbare Aussagen und

ein allgemein robusteres System weitere Untersuchungen und Entwicklungsschritte abgeschlossen werden, bis ein solches mechatronisiertes Verbundankersystem eingesetzt werden kann. Eine erste Untersuchung im Hinblick auf die Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen soll in Unterkapitel 7.6 behandelt werden.

7.5.2 Funktion des kapazitiven Impedanzsensors

Genau wie bereits die mechatronisierten Verbundanker mit integriertem kapazitivem Abstandssensor werden Auszugsversuche mit den kapazitiven Impedanzsensoren durchgeführt. Dabei wird ebenfalls ein Auszugsversuch mit enger Abstützung, hier jedoch mit einer reduzierten Verankerungstiefe von $h_{ef} = 50 \text{ mm}$, durchgeführt. Durch die geminderte Verankerungstiefe sollen frühzeitige Schäden des Mörtels erreicht werden.

Abbildung 7.20 enthält die Kraft-Weg-Diagramme der drei durchgeführten Auszugsversuche der Verbundankersysteme mit den kapazitiven Impedanzsensoren. In Abbildung 7.21 sind die dazugehörigen Messsignale über die Versuchszeit, ausgewertet von der Firma SENSOSURF, ersichtlich.

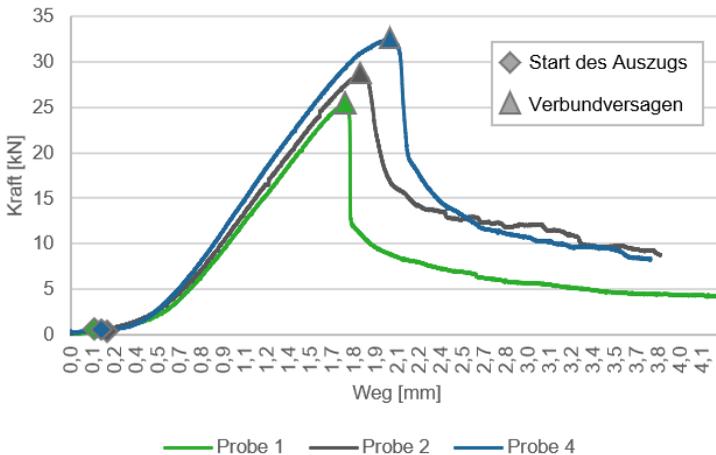


Abbildung 7.20: Kraft-Weg-Verlauf der Auszugsversuche mit drei Impedanzsensoren für den Funktionstest

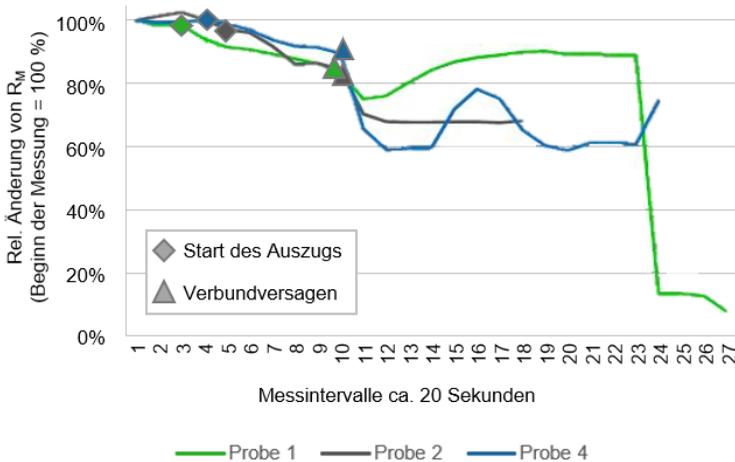


Abbildung 7.21: Auswertung der Messsignale aus dem Auszugsversuch der drei Impedanzsensoren (überarbeitet nach Firma SENSOSURF)

Bereits vor dem Start der Auszugsversuche variiert die Steigung der Messsignale aufgrund des messprinzipbedingten Rauschens. Nach dem Start der Auszugsversuche sinken jedoch alle drei Messsignale mit vergleichbaren Steigungen ab. Beim Erreichen des Verbundversagens und somit der Höchstlast fallen die Messwerte stark ab. Etwas nach dem Verbundversagen steigt das Messsignal von Probe 1 und Probe 4 nochmals temporär an. Im Fall von Probe 1 erreicht das Messsignal sogar ein Niveau vor dem Verbundversagen.

Grundsätzlich lässt sich demnach konstatieren, dass der mechatronisierte Verbundanker mit integriertem kapazitivem Impedanzsensor eine Veränderung seiner Umgebung detektieren kann. Jedoch ist die Änderung des Messsignals bis zum Erreichen des Verbundversagens nicht eindeutig identifizierbar beziehungsweise zu gering, um eine zeitliche Vorhersage über das Eintreten des Verbundversagens treffen zu können. Der plötzliche Abfall des Messsignals bei Verbundversagen bietet in der Praxis keinen Nutzen. Auch das Ansteigen der Messsignale nach Verbundversagen bestätigt den Prototypenstand dieses Systems. Um diese Lösung praxistauglich zu gestalten, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden und es muss eine Weiterentwicklung der Messelektronik erfolgen, damit eine sensiblere Detektion ermöglicht wird. Dennoch werden im Folgenden erste Untersuchungen

zur physischen Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen des sensorischen Elementes durchgeführt.

7.6 Einfluss der Umweltbedingungen

Zur Abbildung der Einflüsse der Umweltbedingungen auf die Messsignale der beiden mechatronisierten Verbundanker sollen diese unter den verschiedenen Umweltbedingungen Temperatur, Feuchtigkeit und korrosive Medien geprüft werden. Der Fokus dieser Versuchsreihe liegt auf der Untersuchung der Beständigkeit des Messsignals der sensorischen Elemente unter für Befestigungsmittel gängigen, rauen Umgebungsbedingungen. Die Messelektroniken sollen in dieser Versuchsreihe hingegen nicht getestet werden. Hierfür werden die mechatronisierten Verbundanker in Betonwürfel der Festigkeitsklasse C20/25 mit einer Kantenlänge von 150 mm mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 70$ mm gesetzt. Die genannte Verankerungstiefe wurde gewählt, da diese laut (ETA-02/0024) die minimal zulässige Verankerungstiefe für Verbundankersysteme FIS V mit M12-Gewindestange darstellt. Für den kapazitiven Abstandssensor wurden Bohrlöcher mit einer Tiefe von $h_{ges} = 84$ mm gebohrt (siehe Gleichung 7-2).

$$h_{ges} = h_{ef} + h_{sensor} \quad 7-2$$

Die Bohrlöcher wurden mit Vierschneider-Bohrern mit einem Bohrereckmaß von 14,25 mm erzeugt. Die Bohrlochreinigung und die Installation der Verbundanker wurden mit den sensorischen Elementen nach (ETA-02/0024) durchgeführt. (Neumayer, 2019)

Anschließend wurde für die Verbundankersysteme, angelehnt an die Frost/Tau-Wechselprüfung *B16* der (EAD 330499-00-0601), die Dauerlast $N_{sust} = 13,82$ kN für die Versuche unter Einwirkung der Umweltbedingungen nach Gleichung 7-3 berechnet. Der Montagesicherheitsfaktor γ_{inst} wird hierbei mit 1 angenommen. Diesbezüglich wurde aufgrund der hohen Ungewissheiten dieser neuen mechatronisierten Verbundankersysteme explizit auch für die Versuche zur Temperaturbeständigkeit das konservative N_{sust} der Prüfung *B16* und nicht das N_{sust} der Prüfungen *B14* beziehungsweise *B15* gewählt.

$$N_{sust} = \frac{\tau_{Rk,ucr} \cdot d \cdot \pi \cdot h_{ef}}{1,5 \cdot 1,4 \cdot \gamma_{inst}} \quad 7-3$$

Die mechatronisierten Verbundanker wurden daraufhin jeweils mit einem Federpaket auf $N_{sust} = 13,82$ kN \pm 0,3 kN vorgespannt. Die Federpakete wurden hierfür vorher an einer Anlage für Auszugsversuche auf die entsprechende Kraft gestaucht

und daraufhin auf dem Verbundanker montiert. Abbildung 7.22 zeigt den mit Federpaket vorgespannten Verbundanker in einem Betonwürfel, wie er für die Versuche aufgebaut wurde. (Neumayer, 2019)



Abbildung 7.22: Vorgespannter mechatronisierter Verbundanker mit Federpaket in Betonwürfel (Neumayer, 2019)

Für die Umweltbedingung ‚Temperatur‘ soll die Änderung des Messsignals bei 50 °C und 80 °C über mindestens zwölf Stunden untersucht werden. Diese Temperaturen ergeben sich aus dem Temperaturbereich I der (ETA-02/0024) des untersuchten fischer FIS V-Injektionssystems. Die Temperaturversuche wurden in einer klimatisch regelbaren Kammer und einem Ofen durchgeführt. Die Prüfkörper wurden, in Anlehnung an die (EAD 330499-00-0601), mit einer Aufheizgeschwindigkeit $< 20 \frac{K}{h}$ aufgeheizt. Die Oberflächentemperatur während des Versuchs darf maximal $\pm 2 K$ um die Prüftemperatur schwanken. In Abbildung 7.23 lassen sich zwei der vorgespannten Prüfkörper im Ofen erkennen. (Neumayer, 2019)



Abbildung 7.23: Zwei vorgespannte Prüfkörper im Ofen (Neumayer, 2019)

Für die Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Feuchtigkeit und korrosiver Umgebung wurde eine Salzsprühnebelkammer verwendet. Abbildung 7.24 zeigt zwei Prüfkörper in der Salzsprühnebelkammer. Für die Feuchtigkeitsversuche wurde kein Salz in die Kammer gegeben. Die Feuchtigkeit wurde auf 50 % relative Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur von 35 °C für acht Stunden gehalten und danach acht Stunden bei 35 °C getrocknet. Dieser Zyklus wurde insgesamt dreimal durchgeführt. Daraufhin wurde die relative Luftfeuchtigkeit auf 75 % erhöht und es wurden ebenfalls drei Durchgänge mit acht Stunden Feuchtigkeit und acht Stunden Trocknung bei jeweils 35 °C durchlaufen. Anschließend wurden die Versuche noch mit drei Durchläufen des Zyklus bei 98 % relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Ein Versuchsdurchlauf dauerte somit insgesamt 144 Stunden. (Neumayer, 2019)

Für die Versuche in korrosiver Umgebung wurde ein neutraler Salzsprühtest (NSS-Test) nach (DIN EN ISO 9227:2017-07) mit Natriumchloridlösung mit neutralem pH-Wert durchgeführt. Hierbei wird das zu prüfende Bauteil bei 35 ± 2 °C einer $50 \pm 5 \frac{g}{l}$ Natriumchloridlösung für insgesamt 48 Stunden, aufgeteilt in drei Durchläufe, ausgesetzt. Ein Durchlauf beinhaltet hierbei das Besprühen des Prüflings für acht Stunden mit dieser NaCl-Lösung und 35 °C Temperatur bei anschließenden acht Stunden Trocknung bei 25 °C. (Neumayer, 2019)



Abbildung 7.24: Prüfkörper in der Salzsprühnebelkammer zur Ermittlung des Einflusses von Feuchtigkeit oder korrosiver Medien auf die mechatronisierten Verbundanker (Neumayer, 2019)

Pro Prüfung wurden jeweils drei Verbundanker mit kapazitiven Abstandssensoren und drei Verbundanker mit kapazitiven Impedanzsensoren geprüft. Mit den vier vorgestellten Prüfungen wurden somit insgesamt 24 Versuche durchgeführt. In jedem Versuch befand sich, wie bereits erwähnt, die Messelektronik aufgrund ihres Prototypenzustands außerhalb des Prüfraumes. Die Länge der Signalleitung wurde in allen Versuchen konstant gehalten. Zusätzlich wurden bei jedem Versuch drei Temperatursensoren angebracht. Um die Oberflächentemperatur des Betonwürfels und somit des Verbundankersystems zu erfassen, wurde in etwa 1 cm Entfernung vom Verbundanker ein Temperaturfühler angebracht. Ein weiterer wurde in jedem Versuch in der Prüfkammer und ein weiterer außerhalb der Prüfkammer angebracht. Hiermit sollte die Möglichkeit geschaffen werden, potenzielle Störgrößen zu erkennen. Aufgezeichnet wurde in jedem Versuch das Spannungssignal über die Zeit, um Einflüsse der geprüften Umgebungsbedingungen auf das Sensorsignal sichtbar zu machen. (Neumayer, 2019)

7.6.1 Signaländerung kapazitiver Abstandssensor

Für die Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Sensorelement des kapazitiven Abstandssensors werden drei belastete Verbundankersysteme für 16 beziehungsweise 20 Stunden bei 50 °C im Ofen belassen, wobei der Verlauf des Messsignals aufgezeichnet wird.

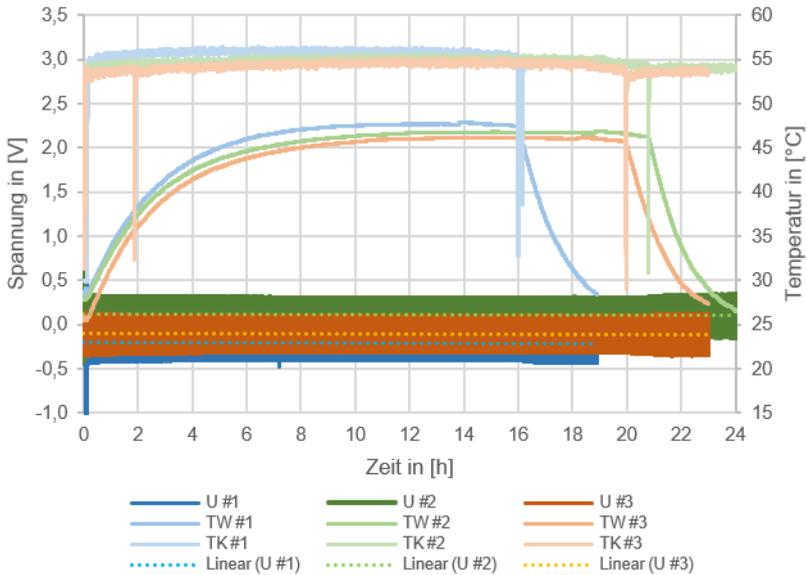


Abbildung 7.25: Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors integriert im belasteten Verbundanker bei 50°C für 16 beziehungsweise 20 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Abbildung 7.25 präsentiert den Verlauf des Messsignals über die Dauer der Versuche sowie die Verläufe der Temperaturen im klimatisierten Raum und an der Betonoberfläche, direkt am Verbundanker. Für jedes Messsignal ist zur besseren Übersichtlichkeit eine Trendkurve eingefügt. Wie an dieser zu erkennen ist, bleibt das Messsignal über die gesamte Zeit konstant. Abbildung 7.26 zeigt den Verlauf des Messsignals in drei Versuchen über 18 Stunden bei 80 °C. Dargestellt ist die Temperatur des Ofens wie auch der Betonoberfläche direkt am Verbundanker. Anhand der Trendlinie lässt dieses Diagramm erkennen, dass sich das Messsignal über diesen Zeitraum bei 80 °C nicht verändert.

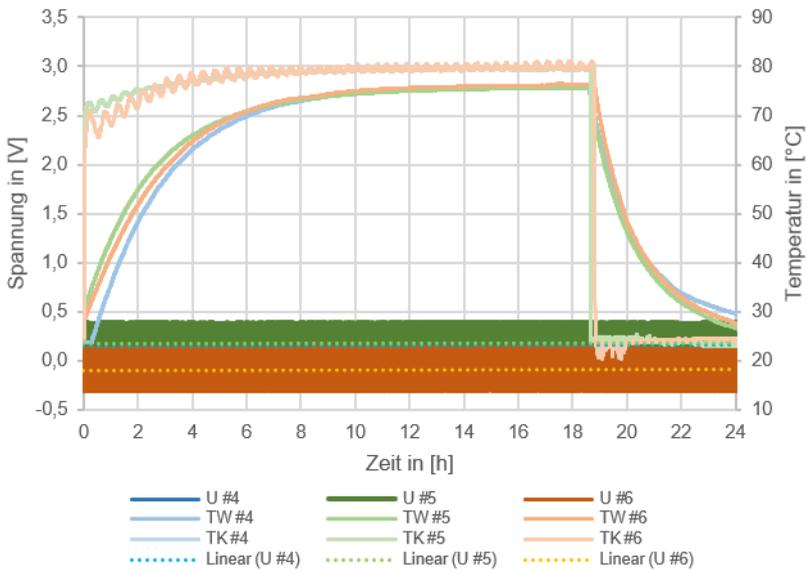


Abbildung 7.26: Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors integriert im belasteten Verbundanker bei 80°C für 18 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Der Einfluss von Feuchtigkeit auf das Messsignal bei 35 °C ist in Abbildung 7.27 dargestellt. Hierbei wurden, wie bereits in der Versuchsbeschreibung erläutert, drei Durchläufe der drei verschiedenen Zyklen mit drei belasteten Verbundankersystemen mit integriertem kapazitivem Abstandssensor untersucht. In den ersten drei Feuchtigkeitsdurchläufen wurde eine relative Feuchtigkeit von 50 % eingestellt. Darauf folgten drei Durchgänge mit 75 % und drei Durchgänge mit 98 % relativer Luftfeuchtigkeit. Erkennbar ist dies am Aufheiz-, Abkühl- und Trocknungsverlauf der Temperatur. Diese ist, wie bei bisherigen Versuchen, ebenfalls in Abbildung 7.27 dargestellt. Die Temperatur wurde direkt in der Kammer und an der Betonoberfläche in direkter Nähe zum Verbundanker gemessen und liegt auf demselben Niveau. Die Messsignale sind zur Übersichtlichkeit zusätzlich als Trendlinie dargestellt und zeigen über die gesamte Versuchsdauer von 140 Stunden mit unterschiedlichen relativen Feuchtegraden keine Veränderung.

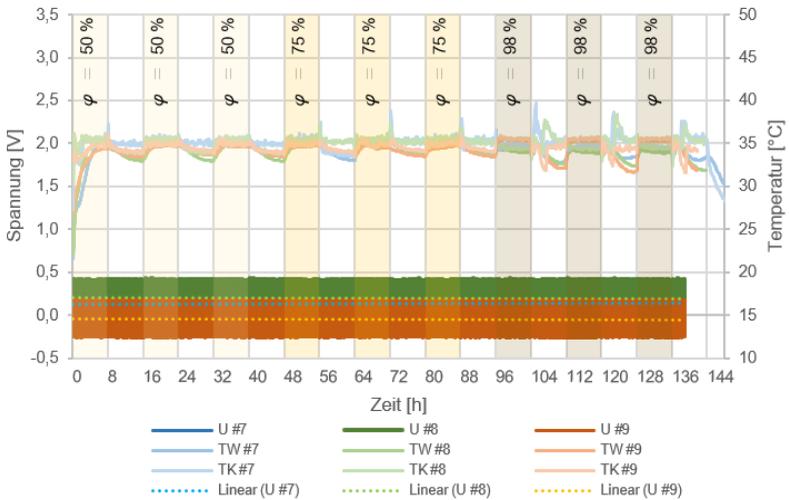


Abbildung 7.27: Einfluss der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Für die Untersuchung des Einflusses korrosiver Umgebungsbedingungen wurden drei Verbundanker mit kapazitivem Abstandssensor unter Last in drei Durchläufen einer Kochsalzlösung mit anschließender Trocknung ausgesetzt. Die Kochsalzlösung wurde über acht Stunden bei 35 °C in den Versuchsraum gegeben, bevor die Proben danach acht Stunden getrocknet wurden. Der gesamte Versuch dauerte somit insgesamt 48 Stunden. In Abbildung 7.28 ist der Temperaturverlauf sowohl in der Salzsprühnebelkammer als auch direkt am Verbundanker auf der Betonoberfläche ersichtlich. Das Messsignal zeigt auch hierbei keine Veränderung über den Beobachtungszeitraum. Zur Verdeutlichung wurde auch hier eine Trendlinie der Messsignale in die Darstellung eingefügt.

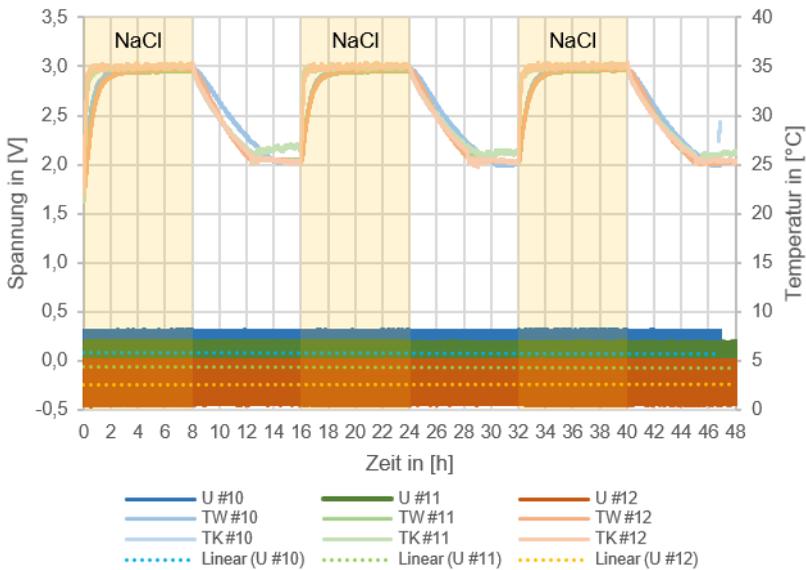


Abbildung 7.28: Einfluss einer korrosiven Atmosphäre auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors in der Salzsprühkammer (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Aus den Ergebnissen dieser ersten Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass das Sensorelement mit seinem gewählten Messverfahren in der vorliegenden Konstruktion zumindest in vergleichsweise kurzen Versuchsabläufen keine Beeinflussung von den gewählten simulierten Umgebungsbedingungen erfährt. Um die angestrebte Lebensdauer zu erreichen und den Einfluss weiterer Umweltbedingungen zu bestimmen, ist es jedoch erforderlich, weitere Untersuchungen durchzuführen. Besonders sollte hierbei eine finalere Version der Messelektronik in die Untersuchungen miteingeschlossen werden. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen lag noch kein Konzept für eine robuste Messelektronik mit Schutzgehäuse gegen Umwelteinflüsse vor.

7.6.2 Signaländerung kapazitiver Impedanzsensor

Auch mögliche Störgrößen auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors, verursacht durch Temperatureinwirkung, Feuchtigkeit oder korrosive Umgebung, werden im Folgenden untersucht. Hierbei werden, wie bereits beim kapazitiven Abstandssensor, drei Verbundankersysteme mit integriertem Sensorelement unter Last mehrere Stunden dem entsprechenden Einfluss ausgesetzt.

Abbildung 7.29 zeigt den Verlauf der Messsignale der drei untersuchten Verbundanker im Einfluss von 50 °C. Die Darstellung enthält sowohl die Temperatur in der temperierten Kammer als auch die Temperatur auf der Betonoberfläche direkt am Verbundanker. Es lässt sich erkennen, dass die Temperatur von 50 °C über 16 beziehungsweise 20 Stunden keinen Einfluss auf das Messsignal hat. Die zur Übersichtlichkeit eingefügte Trendlinie bestätigt diese Aussage. Sie bleibt über die gesamte Messdauer konstant.

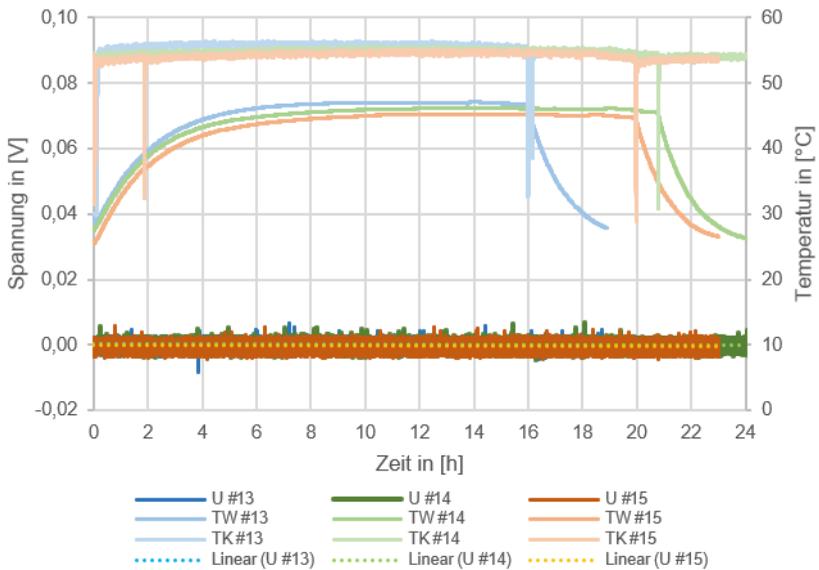


Abbildung 7.29: Einfluss auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors integriert im belasteten Verbundanker bei 50°C für 16 beziehungsweise 20 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Der Temperatureinfluss von 80 °C auf das Messsignal ist in Abbildung 7.30 dargestellt. Auch hier zeigt das Diagramm die Temperaturverläufe in der Kammer selbst und am Betonwürfel auf dessen Oberfläche in unmittelbarer Nähe zum Verbundanker. Die Messsignale in dieser Untersuchung bleiben nicht konstant. Während das Messsignal des Verbundankers #16 nach einem initialen Anstieg auf 2,3 V langsam wieder sinkt, fällt er nach etwa drei Stunden spontan auf einen Wert von -0,2 V und verbleibt bis zum Ende des Versuchs auf diesem Niveau. Das Messsignal des Verbundankers #17 bleibt die ersten Stunden konstant auf einem Niveau von 0 V, bis es einen spontanen Ausreißer nach etwa 14,3 Stunden auf -2,5 V erfährt. Daraufhin steigt es wieder auf sein Niveau von 0 V und beginnt danach schwach abzusinken, bis es kurz vor Abschaltung der Kammer wieder stark absinkt und dieses niedrige Niveau mit Schwankungen für etwa 1,5 Stunden hält. Nach 19,5 Stunden steigt es wieder auf 0 V und verbleibt dort bis Versuchsende. Das Messsignal von Verbundanker #18 hingegen fällt direkt zu Beginn der Versuchsreihe regressiv von 0 V auf -2,5 V, wo es bis zur Abschaltung der Heizung der Kammer verbleibt. Erst nach Abschaltung des Ofens steigt das Messsignal von -2,5 V degressiv auf einen Wert von etwa -1 V zum Ende des Versuchs.

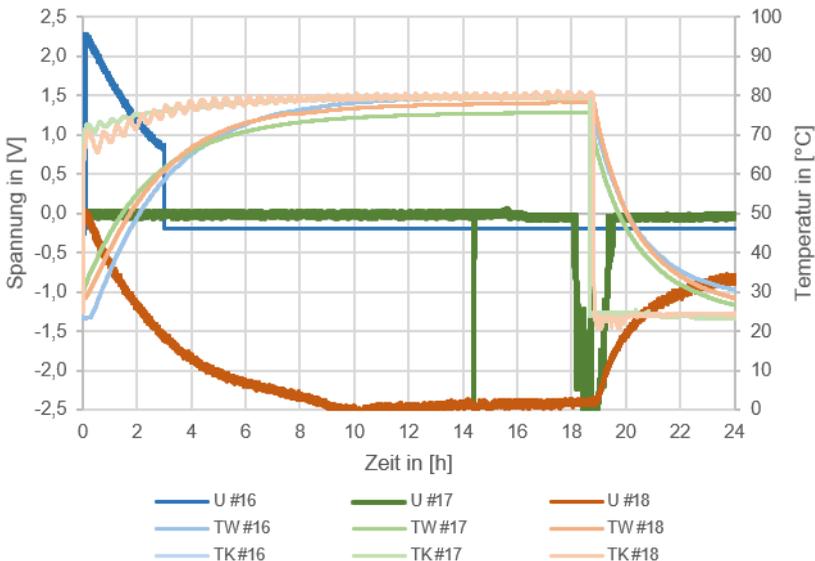


Abbildung 7.30: Temperatureinfluss auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzssensors integriert im belasteten Verbundanker bei 80°C für 18 Stunden (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Wie bereits beim Verbundanker mit integriertem kapazitivem Abstandssensor wurde auch das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors in drei Zyklen mit jeweils drei Durchläufen auf den Einfluss der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % untersucht. In Abbildung 7.31 ist der Verlauf der Temperatur in der Kammer sowie direkt am Verbundanker an der Betonoberfläche ersichtlich. Wie zu erkennen, sind die drei Durchläufe bei 35 °C der jeweiligen relativen Feuchtigkeit getrennt von unbeheizten Trocknungsphasen. Jeder dieser Durchläufe dauert insgesamt 16 Stunden, je acht Stunden unter Einfluss der jeweiligen relativen Feuchtigkeit und acht Stunden Trocknungszeit. Das Messsignal des Verbundankers #19 schwankt hierbei stark und zeigt die Charakteristik des Temperaturverlaufs mit steigender Amplitude, bis das Signal nach etwa 96 Stunden zu Beginn des ersten Durchlaufs mit 98 % relativer Feuchtigkeit abfällt und auf einem Niveau von -2,3 V verbleibt. Das Messsignal des Verbundankers #20 zeigt die Charakteristik der Aufheiz- und Abkühlphasen hingegen nicht. Sein Messsignal verläuft unregelmäßig zwischen -0,8 V und 1,1 V beziehungsweise 1,7 V über den gesamten Versuch. Das Messsignal des Verbundankers #21 weist ebenfalls wie Verbundanker #19 die Charakteristik des Temperaturverlaufs der Kammer mit steigender Amplitude auf. Beginnend bei etwa 0,2 V steigt und fällt das Messsignal invers zum Temperaturverlauf und erhöht bei jedem Durchlauf die Signalamplitude, bis es bei Versuchsende auf dem Wert von 0 V verbleibt.

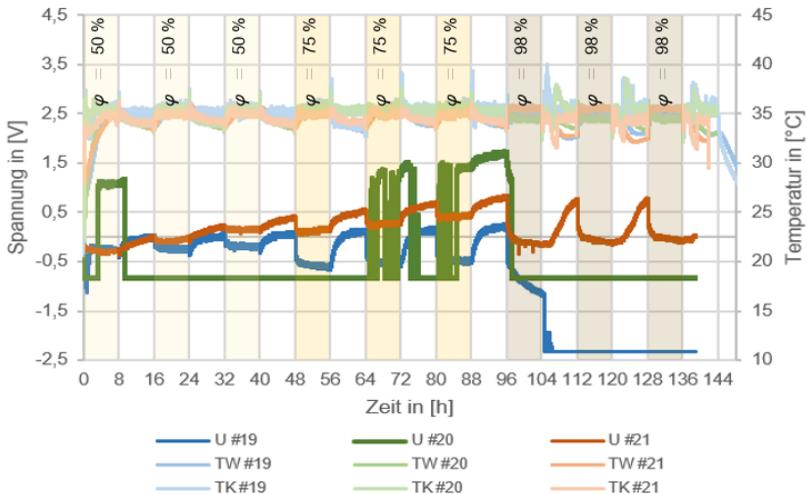


Abbildung 7.31: Einfluss der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Abbildung 7.32 zeigt den Verlauf des Messsignals des kapazitiven Impedanzsensor-Elementes in korrosiver Umgebung. Die Salzsprühnebelkammer läuft hierbei drei Durchläufe mit jeweils acht Stunden in einem Nebel von NaCl-Lösung bei 35 °C ab, gefolgt von jeweils einer achtstündigen Trocknung der geprüften Verbundanker bei 25 °C. Die Darstellung veranschaulicht die Temperaturverläufe in der Kammer und direkt auf der Oberfläche der Betonwürfel direkt am Verbundanker. Die Messsignalverläufe offenbaren direkt nach Beginn des Versuches einen starken Abfall des Signals von 0 V auf -0,7 V (Verbundanker #23), -0,95 V (Verbundanker #24) und, nach starken Signalschwankungen, auf -2,2 V (Verbundanker #22). Dass die Messsignale auf diesem Niveau verbleiben, spricht für eine Zerstörung des Sensorelementes bereits zu Beginn des ersten Durchlaufs nach zwei beziehungsweise acht Stunden.

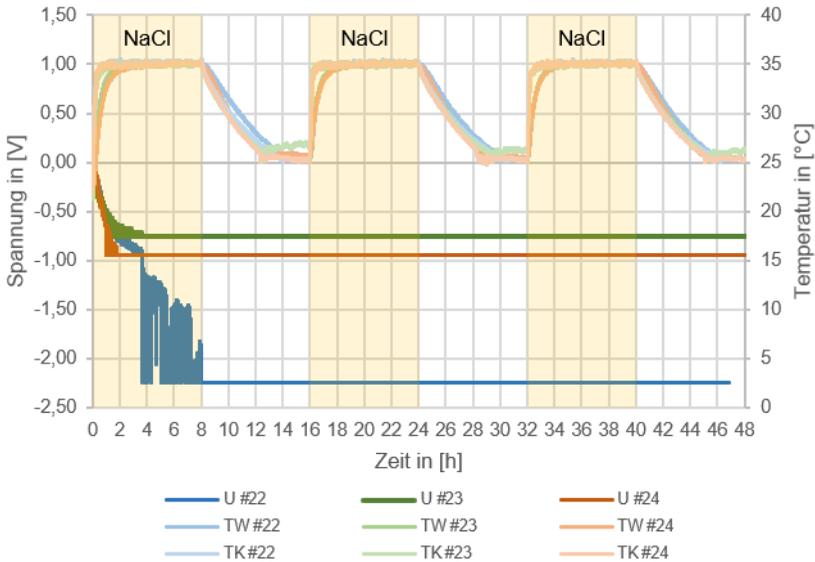


Abbildung 7.32: Einfluss einer korrosiven Atmosphäre auf das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors in der Salzsprühkammer (überarbeitet nach Neumayer (2019))

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass das Sensorelement des kapazitiven Impedanzsensors sensibel auf äußere Einwirkungen durch sich verändernde Umweltbedingungen reagiert. Während Temperaturen bis 50 °C

nach ersten Erkenntnissen keinen Einfluss auf das Messsignal haben, stellen höhere Temperaturen und Feuchtigkeit nicht zu vernachlässigende Störgrößen für diese Konstruktion und das Messprinzip dar. Die Versuche in korrosiver Umgebung haben gezeigt, dass das Sensorelement in der vorliegenden Ausarbeitung nicht geeignet ist. Weitere Untersuchungen müssen folglich Lösungsansätze finden, die die Integration von kapazitiven Impedanzsensoren bei gleichzeitiger Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen verbessern.

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit den im vorangegangenen Kapitel identifizierten Designräumen und der Identifikation der axialen Verschiebungsmessung als relevante Größe zur kontinuierlichen Überwachung von Befestigungssituationen wurden die Designräume auf ihre Eignung zur Erfassung axialer Verschiebung bewertet. Anschließend wurden aus den Anforderungen an das mechatronisierte Verbundankersystem für die Lebensdauer von 50 Jahren und den harschen Umgebungsbedingungen MUSS-, SOLL-, und KANN-Kriterien festgelegt, die das Sensorelement und die Messelektronik erfüllen müssen. Mit diesen festgelegten Kriterien wurden über eine Bewertungsmatrix die in Unterkapitel 2.5 vorgestellten Messprinzipien gegenübergestellt. Durch diese Bewertungsmatrix hat sich das kapazitive Messverfahren für die Abstandsmessung als geeignetes Messverfahren konkretisiert. Anschließend wurden Sensorelemente auf Basis dieses kapazitiven Messprinzips ausgearbeitet und vorgestellt. Als geeignete Sensorelemente wurden ein kapazitiver Abstandssensor im Bohrlochgrund und ein kapazitiver Impedanzsensor im Gewindegrund vorgestellt.

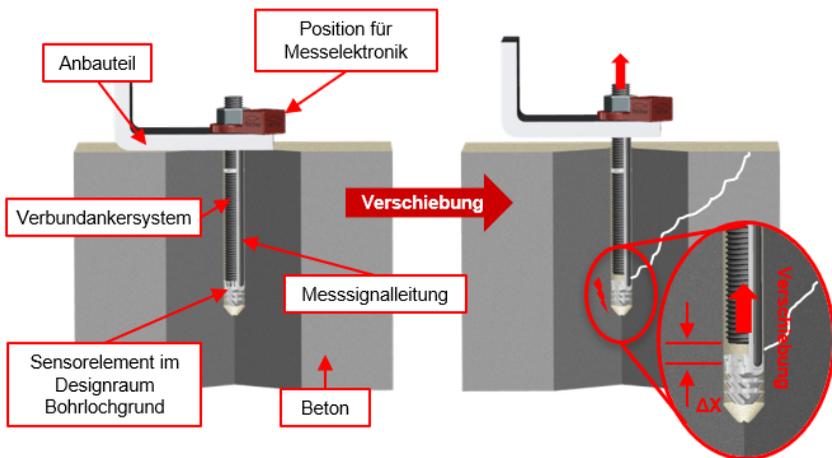


Abbildung 7.33: Mechatronisierter Verbundanker mit kapazitivem Abstandssensor

Der kapazitive Abstandssensor im Bohrlochgrund eignet sich aufgrund seiner Position zur Vorhersage aller Schädigungsmechanismen im zentrischen Zug, abgesehen vom *Stahlbruch*. Er ist in Abbildung 7.33 schematisch mit Wirkprinzip im Versagenszustand dargestellt. Durch die kraftfreie Verbindung mit dem Verbundanker und seine formschlüssige Verbindung zum nicht belasteten Bohrlochgrund kann er zuverlässig die axiale Relativbewegung, sowohl beim Versagensfall *Herausziehen* als auch *Betonausbruch* bereits in früheren Stadien detektieren. Das eigentliche Sensorelement verbleibt hierbei bewegungsfrei im Bohrlochgrund fixiert.

Der kapazitive Impedanzsensor wurde mit der Firma SENSOSURF entwickelt und soll über die Ausbildung eines kapazitiven Impedanzfeldes die nähere Umgebung des eingemörtelten Verbundankers überwachen. Seine Funktionsweise ist schematisch in Abbildung 7.34 dargestellt. Durch eine Änderung des Dielektrikums, beispielsweise durch entstehende Risse im Mörtel und im umgebenden Beton, ändert sich der Phasenwinkel. Eine Messung des Widerstandes kann somit Änderungen detektieren.

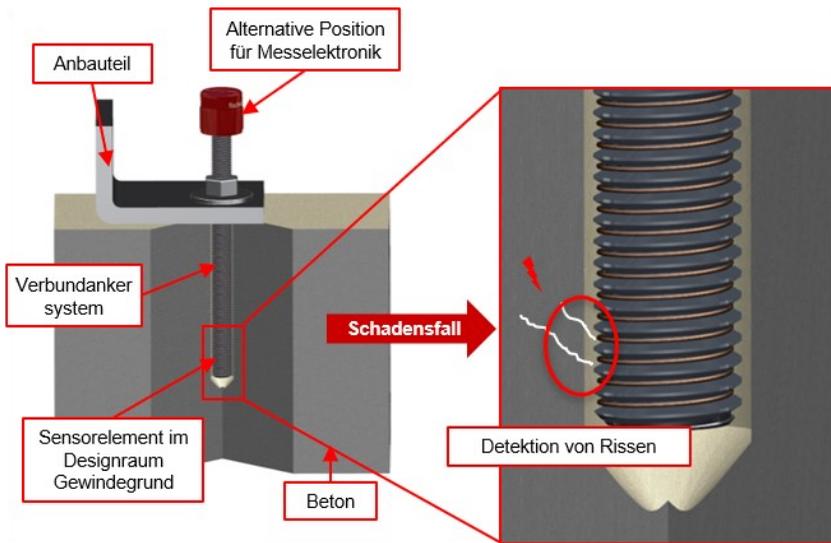


Abbildung 7.34: Mechatronisierter Verbundanker mit kapazitivem Impedanzsensor

Weitere identifizierte Designräume, wie die geringfügige Abdeckung der Verbundfläche oder die Betonoberfläche, können anderweitig genutzt werden. So kann eine

geringfügige Abdeckung der Verbundfläche verwendet werden, um das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors aus dem Bohrloch heraus zu einer Auswerteelektronik zu leiten. Der Designraum ‚Betonoberfläche‘ wiederum eignet sich als Position der Mess- und Auswertelektronik.

Anschließend wurden die beiden entworfenen Sensorelemente in den Verbundanker integriert und auf ihre Funktionsweise untersucht. Der kapazitive Näherungssensor wurde vor zentrischen Auszugsversuchen im Gesamtsystem Verbundanker in einem eigens konstruierten Kalibrierprüfstand untersucht. Hierbei offenbart das Sensorelement eine hohe Reproduzierbarkeit. Im darauffolgenden zentrischen Zugversuch sinkt diese Reproduzierbarkeit geringfügig. Grund hierfür sind die bei der Montage auftretenden Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Bohrlochgeometrie, die die zukünftige Messung beeinflussen können. Diese Störgrößen sind jedoch vernachlässigbar, da das mechatronisierte Verbundankersystem dennoch konkrete Messwerte im relevanten Verschiebungsbereich liefert. Der kapazitive Impedanzsensor hingegen liefert im Auszugsversuch keinen konkreten Messsignalverlauf, der es ermöglichen könnte, eine Vorhersage zum drohenden Versagen des Verbundankersystems zu treffen. Das Verbundversagen tritt hier plötzlich ohne zuverlässig identifizierbare Änderung des Messsignals auf.

Um einen Ausblick auf die Robustheit bezüglich Umweltbedingungen zu geben, wurden die Messsignale beider Systeme anschließend in ausgewählten simulierten Umweltszenarien getestet. Dabei wurde untersucht, ob sich das Messsignal unter dem Einfluss verschiedener Umweltbedingungen stark ändert oder konstant bleibt. Simuliert wurden für diesen Zweck die Temperaturen 50 °C und 80 °C über mindestens 16 Stunden sowie die Variation der relativen Feuchtigkeit von 50 %, 75 % und 98 % über insgesamt 140 Stunden und eine korrosive Umgebung mittels Salzsprühnebeltest über 48 Stunden. Ein Einfluss der simulierten Umweltbedingungen auf das Messsignal des kapazitiven Abstandssensors konnte hierbei nicht beobachtet werden. Er eignet sich nach ersten Erkenntnissen somit auch für den Einsatz unter diesen Bedingungen. Weiterführende Untersuchungen diesbezüglich müssen zukünftig noch durchgeführt werden. Das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors wurde von 50 °C Temperatur ebenfalls nicht beeinflusst. Jedoch zeigte es bei den Versuchen mit 80 °C und der relativen Feuchtigkeit starke Messsignalchwankungen. Im korrosiven Umfeld ist sogar das Sensorelement innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit zerstört worden.

7.8 Entwicklungsmethode ASTRA: Rücktransformation

Das Vorgehen zur Beantwortung der dritten Teilforschungsfrage kann abschließend als dritter Entwicklungsschritt der neuen ASTRA-Methode zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln abgeleitet werden. Nach der Validierung der identifizierten Designräume folgt die *Rücktransformation* durch die Einbringung mechatronischer Elemente in die Designräume des Ursprungssystems. Zuerst wurden in diesem Schritt die Kriterien und Randbedingungen für die gewünschte Sekundärfunktion ‚Verschiebungsmessung‘ anhand der relevanten Versagensmechanismen definiert. Anhand dieser Kriterien wurden danach geeignete Messprinzipien zur Verschiebungsmessung ausgewählt und konstruktiv in den identifizierten Designraum eingebracht. Die hieraus entstandenen Funktionsprototypen wurden verifiziert und der optionale Schritt der Abbildung der Umgebungsbedingungen wurde beispielhaft mit unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit, Temperatur und korrosiver Umgebung abgeprüft. Als allgemeine Aktivitäten für die Entwicklungsmethode ASTRA lassen sich aus dem Vorgehen folgende Aktivitäten abstrahieren:

- Identifikation geeigneter mechatronischer Gestaltelemente für die Sekundärfunktion
- Integration der mechatronischen Gestaltelemente in die identifizierten Designraum
- Prüfung der Funktionsprototypen auf die Erfüllung der Sekundärfunktion
- Optional: Prüfung des Umwelteinflusses auf die Sekundärfunktion anhand des Funktionsprototypen

Das Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes ist gleichzeitig das Ergebnis der abgeleiteten gesamten ASTRA-Methode, nämlich der Funktionsprototyp als Grundlage für die Serienentwicklung.

7.9 Zwischenfazit

Der vorgestellte mechatronisierte Verbundanker mit kapazitivem Impedanzsensor eignet sich in der vorliegenden Version nicht für die kontinuierliche Zustandsüberwachung von Befestigungssituationen. Wesentlich bessere Ergebnisse liefert indes der mechatronisierte Verbundanker mit kapazitivem Abstandssensor. Durch seine Positionierung eignet er sich, bis auf die Versagensart *Stahlbruch*, zur Vorhersage aller gängigen Versagensarten bei zentrischer Zugbeanspruchung von Verbundankersystemen. Die generierten Messsignale sind für die Überwachung ausreichend und eine erste Untersuchung auf die gängigsten Umweltbedingungen für Verbundankersysteme ließen keinen Einfluss derer auf das Messsignal erkennen. Demnach kann diese Erkenntnis die dritte Teilforschungsfrage

Können in einem chemischen Befestigungsmittel integrierte Sensoren zur Zustandsüberwachung der Befestigungssituation genutzt werden?

positiv beantworten, da nachgewiesen werden konnte, dass mit Nutzung der vorhandenen Designräume und Beachtung verschiedener Randbedingungen ein mechatronisierter Verbundanker konstruiert werden kann, der axiale Verschiebungen relativ zum Bohrlochgrund detektieren und somit zur Überwachung angewendet werden kann.

Die aus dem Vorgehen zur Beantwortung der dritten Teilforschungsfrage abgeleiteten Aktivitäten lassen sich für den Entwicklungsschritt der *Rücktransformation* der Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln zusammenfassen. Anhand derer könnte es möglich sein, auch mechatronisierte Funktionsprototypen anderer Befestigungsmittel zu entwickeln.

8 Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung

Das Vorgehen zur Beantwortung der drei Teilforschungsfragen wird als neue Entwicklungsmethode ASTRA (ANALYSE-SYNTHESE-TRANSFORMATION) zur Mechatronisierung von bestehenden Befestigungsmitteln zusammengefasst. Begleitend zur Beantwortung der einzelnen Teilforschungsfragen wurde die methodische Vorgehensweise anhand des jeweiligen Schrittes im dazugehörigen Kapitel in dieser Arbeit erläutert, um daraus Aktivitäten abzuleiten. Da dies im Rahmen der Arbeit bisher nur für ein Verbundankersystem auf Vinylesterbasis vorgestellt wurde, werden diese Aktivitäten hier für die Anwendbarkeit dieser Entwicklungsmethode für andere Befestigungsmittel allgemein formuliert. Zusätzlich werden die erreichbaren Ziele und Ergebnisse für die Mechatronisierung von Befestigungsmitteln im Allgemeinen erörtert. Die Anwendbarkeit dieser Entwicklungsmethode für andere bautechnisch bewertete Befestigungssysteme wird abschließend diskutiert.

Die Kernelemente dieser Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung lassen sich in drei Entwicklungsschritte gliedern:

1. Schritt: **Analyse** – Beobachtungsbarrieren überwinden
2. Schritt: **Synthese** – Ergebnisse mit GFZ-Testobjekten validieren
3. Schritt: **Rücktransformation** – Funktionsprototyp ableiten

Das Ziel des *Analyseschrittes* besteht darin, ein besseres Verständnis des GFZ zu schaffen. Dieses bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen und ist zwingend erforderlich, um bestehende Annahmen zu Schädigungsmechanismen zu bestätigen oder zu überarbeiten. Aus den hierbei gewonnenen Ergebnissen und Beobachtungen sollen für den *Syntheseschritt* Hypothesen zu möglichen Designräumen abgeleitet werden. Das Ziel des *Syntheseschrittes* ist es, diese Hypothesen zu möglichen Designräumen quantitativ durch Versuche zu validieren. Zu diesem Zweck werden mit speziell konstruierten GFZ-Testobjekten Erkenntnisersatzsysteme gebildet, um die gewünschten Erkenntnisse möglichst schnell und ressourcensparend zu erlangen. Abschließend wird im *Rücktransformationsschritt* mindestens ein erster Funktionsprototyp mit der gewünschten mechatronischen Sekundärfunktion erzeugt und verifiziert, bevor aus diesem eine Konstruktion für das finale Produkt abgeleitet wird.

Eine grafische Darstellung des Ablaufs der entworfenen Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln sowie der Ziele der jeweiligen Entwicklungsschritte und deren zugehörigen Aktivitäten kann Abbildung 8.1 entnommen werden.

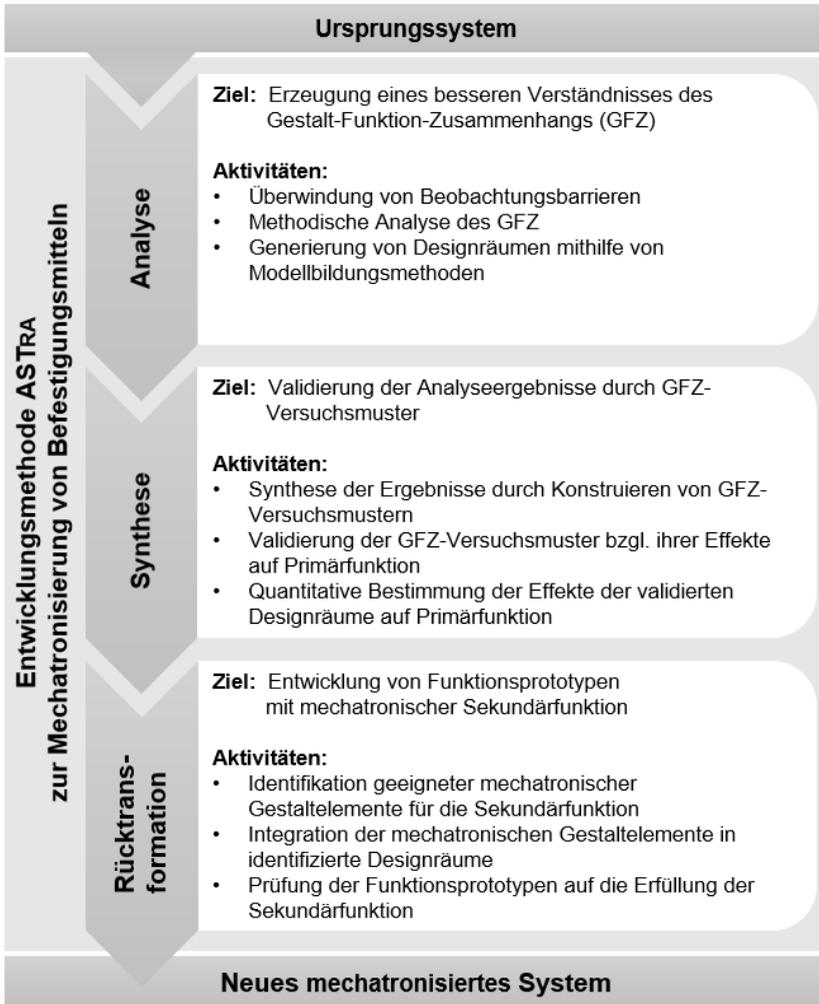


Abbildung 8.1: Darstellung der Entwicklungsmethode ASTra zur Mechatronisierung bestehender Befestigungsmittel mit einer Sekundärfunktion

8.1 Analyse

Ausgehend vom ursprünglichen Befestigungsmittel, dem Ursprungssystem, beginnt der erste Schritt mit der Generierung eines besseren Verständnisses für den GFZ der Primärfunktion mittels eines Modells zur Überwindung der Beobachtungsbarrieren. Dieses Modell bildet ein Ersatzsystem. Es erweist sich als essenziell, um ein tiefgreifendes Verständnis der Versagensmechanismen eines Befestigungsmittels zu erlangen und diese Mechanismen zu verstehen. Grundsätzlich existieren für viele Befestigungssysteme bereits mehr oder weniger umfassende Erkenntnisse zu den Versagensmechanismen, jedoch liegen diese meist noch nicht ausreichend umfassend vor oder können von falschen Annahmen geprägt sein. Wie in Unterkapitel 2.6.1 beschrieben, stehen für die Eliminierung von Beobachtungsbarrieren und die Erstellung eines Erkenntnisprüfstandes bereits verschiedene Modellbildungsmethoden zur Verfügung. Ein wesentlicher Schritt, um die qualitative Aussagekraft der Beobachtungen zu gewährleisten, ist die Modellverifizierung des erstellten Erkenntnisprüfstandes. Hierfür eignen sich für Befestigungsmittel insbesondere Auszugsversuche mit dem Vergleich zwischen Versuchsergebnissen der gebildeten Modelle und Versuchsergebnissen mit unveränderten Referenzen. Durch etablierte Standardversuche können Rückschlüsse auf die Vergleichbarkeit des Erkenntnisprüfstandes zum Ursprungssystem gezogen werden. Dazu eignen sich unter anderem das charakteristische Last-Verschiebungs-Verhalten, quantitative Kriterien wie normierte Versagenslasten oder qualitative Kriterien wie Schadensbilder der geprüften Befestigungsmittel. Anhand der Beobachtungen des Erkenntnisprüfstandes können mithilfe weiterer Modellbildungsmethoden, wie dem in diesem Beispiel verwendeten CONTACT&CHANNEL-ANSATZ (C&C²-A) (Unterkapitel 2.6.3) oder der SCHUBVIERECK-METHODE (Unterkapitel 2.6.2), Aussagen zum Kraftfluss bis zum Versagen getroffen werden. Hierdurch lassen sich die funktionsrelevanten und nicht funktionsrelevanten Flächen des Befestigungsmittels identifizieren. Durch die Nutzung der nicht funktionsrelevanten Flächen, also der Begrenzungsflächen, können Designräume definiert werden, an denen das Einbringen zusätzlicher Gestaltelemente für die spätere mechatronische Funktion möglich ist. Die Ergebnisse dieses Schrittes lassen sich also wie folgt zusammenfassen:

- Besseres Systemverständnis der kontinuierlichen Schädigungsmechanismen
- Identifikation der funktionsrelevanten und nicht funktionsrelevanten Gestaltelemente
- Identifikation von Designräumen zur Mechatronisierung

Dieser Entwicklungsschritt endet mit der Identifikation mindestens eines potenziellen Designraumes.

8.2 Synthese

Dem *Analyseschritt* folgt der zweite Entwicklungsschritt, die *Synthese*. Die *Synthese* umfasst die Umsetzung und Validierung der Ergebnisse mit eigens dafür entwickelten Ersatzsystemen, den GFZ-Testobjekten. Dieser Schritt stellt eine Besonderheit in der Produktentwicklung dar und bildet den Kern dieser Entwicklungsmethode. Hierbei wird nicht, wie üblich, direkt aus den Ergebnissen, also den aufgestellten Hypothesen, des *Analyseschrittes* das fertige Produkt entworfen, sondern es werden zuerst die erzielten Hypothesen über sogenannte GFZ-Testobjekte validiert. Durch diesen Schritt ergibt sich die Möglichkeit, etwaige Fehleinschätzungen bezüglich der Hypothesen frühzeitig im Entwicklungsprozess durch ein tiefgreifendes Verständnis des GFZ zu erkennen. Durch den Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren bei der Erstellung der Gestaltelemente der GFZ-Testobjekte kann dieser Schritt kurzfristig und ohne größeren zeitlichen Aufwand durchgeführt werden. Hierfür werden für die vorher identifizierten Designräume mögliche Gestaltelemente in einfachen Geometrien konstruiert und beispielsweise über 3D-Druckverfahren oder vorhandene Halbzeuge wie Bleche oder Drähte erstellt. Durch das Einbringen dieser Gestaltelemente in das Ursprungssystem, also in das ursprüngliche Befestigungssystem, werden verschiedene GFZ-Testobjekte generiert. Mit steigender Anzahl möglicher Designräume steigt somit auch die Anzahl der zu konstruierenden Gestaltelemente und der GFZ-Testobjekte. Um die einzelnen Effekte jedes Gestaltelementes und bei Bedarf auch die Effekte der Wechselwirkungen der Gestaltelemente untereinander bestimmen zu können, empfiehlt es sich, auf unterstützende statistische Methoden, wie etwa die STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG (DOE, Unterkapitel 2.6.4), zurückzugreifen. Diese können mit statistischen Rechenverfahren beispielsweise helfen, ein Regressionsmodell aus dem durchgeführten teil- oder vollfaktoriellen Versuchsplan zu erstellen, das die direkten Effekte und die Wechselwirkungen quantitativ bestimmt. Die Wahl eines teil- oder vollfaktoriellen Versuchsplans hängt dabei von der Anzahl der zu untersuchenden Gestaltelemente, der zu erwartenden Streuung der einzelnen Versuche und den zur Verfügung stehenden Ressourcen wie Zeit, Geld oder Versuchsapparaturen ab. Wenn grundsätzlich die Möglichkeit besteht und das zu untersuchende Ursprungssystem in seiner Gänze verstanden werden soll, empfiehlt es sich, in diese Versuchsplanung gezielt auch Gestaltelemente einzubringen, die nach dem *Analyseschritt* als funktionsrelevant identifiziert wurden, um auch diese Hypothesen zu validieren. Dementsprechend lässt sich für diesen Schritt folgendes Ergebnis konstatieren:

- Erkenntnis über die Effekte der identifizierten Designräume ohne Beeinflussung der Primärfunktion

Mit dieser Erkenntnis zu mindestens einem vorhandenen validierten Designraum endet dieser Entwicklungsschritt und die Konstruktion mindestens eines Funktionsprototypen kann begonnen werden.

8.3 Rücktransformation

Abschließend werden in einem finalen Entwicklungsschritt aus den gewonnenen Erkenntnissen der *Synthese* die Funktionsprototypen eines möglichen mechatronisierten Befestigungsmittels entwickelt, konstruiert und verifiziert. Infolgedessen entsteht eine mechatronisierte Variante, ein mechatronisiertes Befestigungsmittel, des ursprünglichen Systems, eines konventionellen Befestigungsmittels. Hierfür wird die gewünschte Sekundärfunktion betrachtet, um daraus Kriterien und Randbedingungen für die Mechatronisierung abzuleiten und zu gewichten. Hierbei können verschiedene Methoden wie die MoSCoW-Methode oder ein morphologischer Kasten unterstützen. Anhand dieser Kriterien und unter Beachtung der Randbedingungen können mechatronische Bauteile, die diese gewünschte Sekundärfunktion erfüllen, ausgewählt und im verfügbaren Designraum eingebracht werden. Sofern keine negativen Effekte beziehungsweise Wechselwirkungen im *Syntheseschritt* ermittelt wurden, können auch mehrere Designräume genutzt werden, um die mechatronischen Bauteile in das System, also das Befestigungsmittel, zu integrieren.

Um dies zu erreichen, müssen die mechatronischen Bauteile auf den vorhandenen Designraum konstruktiv angepasst werden. Dazu muss auch die vorher vereinfachte Geometrie des Gestaltelements aus dem *Syntheseschritt* auf die Funktionalität konstruktiv angepasst werden. Auch hier können, wie im *Syntheseschritt*, Rapid-Prototyping-Verfahren unterstützen, erste Funktionsprototypen zu erstellen, um die Funktionalität vor einer fertigungstechnischen Optimierung kurzfristig zu überprüfen. Ist die grundsätzliche Funktionalität des mechatronisierten Systems gewährleistet, kann mit der Konstruktion des eigentlichen Funktionsprototypen begonnen werden. Mit diesem können nun Versuche durchgeführt werden, die die geforderte Primärfunktion und die gewünschte Sekundärfunktion verifizieren. Mit einem Funktionsprototypen lassen sich optional außerdem erste Untersuchungen zu Wechselwirkungen mit der Umgebung, wie Witterungseinflüsse oder andere anwendungsspezifische Besonderheiten, überprüfen. Mit der Verifizierung des Funktionsprototypen ist der letzte Schritt der entworfenen ASTRA-Methode abgeschlossen und es kann mit der Entwicklung des Serienproduktes begonnen werden. Das Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes lässt sich demnach wie folgt zusammenfassen:

- Funktionsprototyp mit verifizierter mechatronischer Sekundärfunktion liegt vor

8.4 Anwendung der ASTRA-Methode auf andere Befestigungsmittel

Die Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln wurde anhand des Vorgehens zur Integration eines Sensors in ein konventionelles Verbundankersystem auf Vinylesterbasis abgeleitet. Diese Entwicklungsmethode soll zukünftig auch für andere Befestigungsmittel verwendbar sein. Im Folgenden soll der Einsatz dieser ASTRA-Methode für diese Anwendung diskutiert werden.

Das Ursprungssystem in diesem Beispiel ist ein Verbundankersystem auf Basis einer M12-Standardgewindestange mit dem Mörtelsystem FIS V der Firma FISCHER. Das neue mechatronisierte System ist ebendieses Verbundankersystem, erweitert um die Sekundärfunktion der Verschiebungsmessung zur Kontrolle der Befestigungssituation. Für die Mechatronisierung von Befestigungsmitteln sind jedoch auch andere elektronische oder mechatronische Bauteile denkbar. So können beispielsweise Sensoren mit anderen Messprinzipien wie der Vorspannkraftermittlung bei Bolzenankern eingesetzt werden. Außerdem können Elemente zur Identifikation beziehungsweise Charakterisierung eines verbauten Dübels Handwerkern auch nach Jahren über geeignete Auslesegeräte Auskunft geben, welcher Dübel damals verbaut wurde und wie stark dieser belastet werden darf, beziehungsweise die zugehörige Bewertung angeben. Eine besonders herausfordernde mechatronische Lösung wäre die aktive Schwingungsdämpfung eines Befestigungsmittels im Erdbebenfall über Sensoren und Aktoren. Zur Unterstützung der Entwicklung genau solcher Ideen soll die vorgestellte Entwicklungsmethode ASTRA dienen.

Analyse:

Zu Beginn muss hierfür der genaue GFZ des betrachteten Befestigungsmittels, egal ob Kunststoffdübel oder Stahl-Schwerlast-Bolzenanker, ausreichend bekannt sein. Dementsprechend ist der *Analyseschritt* der ASTRA-Methode als besonders bedeutsam einzustufen. Falls es beispielsweise aufgrund anderer Wirkmechanismen nicht möglich ist, einen Stahl-Bolzenanker aufgrund seiner hohen Installationsspreizkräfte in einem In Situ-Erkenntnisprüfstand zu untersuchen, empfiehlt die Entwicklungsmethode im *Analyseschritt* hierfür die allgemeine Modellbildungsmethode zur Überwindung von Beobachtungsbarrieren. Zur Überwindung von Beobachtungsbarrieren haben beispielsweise Matthiesen et al. (2017) oder Zhu (2018) bereits andere Möglichkeiten aufgezeigt, wie etwa die Anwendung der Methode ‚Spannungsoptik‘ (Abbildung 2.24) oder eines Computertomographen-Scans (Zhu, 2018, S. 39ff.) unter statischer Belastung der Befestigungsmittel. Durch die Beobachtung der Schadens- und Versagensmechanismen, wie beispielsweise Rissbildung und -wachstum oder Verformung des Befestigungsmittels bei Kunststoffdübeln, können Rückschlüsse auf die Spannungs- und Kraftrichtungen gezogen werden. Zur Steigerung

des Verständnisses stehen auch diesbezüglich verschiedene Methoden wie die in dieser Arbeit angewendete SCHUBVIERECKMETHODE (Unterkapitel 2.6.2) zur Verfügung, um dies qualitativ und unabhängig von der Art des Befestigungsmittel zu analysieren. Anhand dieser Ergebnisse müssen nun alle funktionsrelevanten und nicht funktionsrelevanten Flächen ermittelt werden. Dazu eignet sich vor allem der C&C²-ANSATZ (Unterkapitel 2.6.3), da er einen ausgiebigen Werkzeugkasten, ein klar definiertes Vokabular und zahlreiche Beispiele anderer technischer Systeme liefert. Die funktionsrelevanten Flächen werden in dieser Methode als Wirkflächen und nicht funktionsrelevante Flächen als Begrenzungsflächen definiert. Anhand der Positionen der Begrenzungsflächen können nun aus Überlegungen heraus dreidimensionale Bereiche ermittelt werden, die als Designräume für zusätzliche Bauteile verwendet werden können. Diese Designräume gelten jedoch bis zur experimentellen Validierung nur als Hypothesen. Auch dieses Vorgehen ist ohne Einschränkungen auf andere Befestigungsmittelarten wie beispielsweise Kunststoffdübel oder Stahl-Bolzenanker anwendbar. Mit der Identifizierung der Designräume endet dieser Entwicklungsschritt und der *Syntheseschritt* folgt.

Synthese:

Der *Syntheseschritt* stellt die Besonderheit dieser ASTRA-Methode dar. Ziel dessen ist die Validierung der Hypothesen über die potenziellen Designräume. Um dies zu erreichen, wird nicht direkt ein Funktionsprototyp des gewünschten Produktes entwickelt, sondern abstrahiert anhand schneller Prototypen der Effekt von Gestaltelementen auf die Primärfunktion untersucht. Diese Primärfunktion entspricht bei Befestigungsmitteln in der Regel der Bereitstellung der Haltekraft für Anbauteile. Somit eignet sich auch diese Vorgehensweise des *Syntheseschrittes* für alle Arten von Befestigungsmitteln. Die Ermittlung der Effekte kann quantitativ beispielsweise über ein Regressionsmodell aus etablierten Methoden wie der STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG (DoE, Unterkapitel 2.6.4) erreicht werden. Anhand dieser Effekte können nun die Designräume für den ersten Funktionsprototypen ausgewählt werden, die der Erfüllung der Sekundärfunktion in Anordnung und Position am ehesten entsprechen.

Rücktransformation:

Der finale Schritt der ASTRA-Methode, die *Rücktransformation*, hat die Verifizierung der ersten Funktionsprototypen der mechatronisierten Befestigungsmittel zum Ziel. Hierzu werden die im *Syntheseschritt* validierten Designräume gegen die Anforderungen und Randbedingungen der mechatronischen Sekundärfunktion bewertet. Die Anforderungen und Randbedingungen lassen sich dabei aus der üblichen oder gewünschten Anwendung oder der bautechnischen produktspezifischen Bewertung

ermitteln. In einem ersten Schritt können die Designräume ausgewählt werden, die sich beispielsweise aus physikalischen Gründen an geeigneten Positionen befinden. Im Beispiel dieser Arbeit ist dies für die Verschiebungsmessung und die relevanten Versagensmechanismen der Designraum in Position des Bohrlochgrundes. Im Falle des in der Einleitung dieses Unterkapitels erwähnten Beispiels der Befestigungsmittelidentifizierung läge diese Position wahrscheinlich eher außerhalb des Bohrlochs und für die Erfassung der Vorspannkraft höchstwahrscheinlich im Bereich des direkten Krafftflusses des zu mechatronisierenden Befestigungsmittels. Weiterhin müssen die elektronischen Bauteile, die für die Mechatronisierung notwendig sind, den späteren Anforderungen genügen. Dahingehend stehen vor allem die harschen Umgebungsbedingungen der Anwendungen von Befestigungsmitteln der Beständigkeit und der Lebensdauer der elektronischen Komponenten gegenüber. Sind durch die Anforderungen an die Sekundärfunktion und die Randbedingungen der Anwendung geeignete Designräume und mechatronische Komponenten ausgewählt, können diese konstruktiv kombiniert und in das Befestigungsmittel integriert werden. Auch dieses Vorgehen in der vorgestellten Entwicklungsmethode ist für alle gängigen Befestigungsmittel anwendbar. Anschließend folgt die Verifizierung der hieraus entwickelten Funktionsprototypen, für die ein standardisiertes Prüfverfahren für Befestigungsmittel, wie beispielsweise der Auszugsversuch für die Verifizierung der Verschiebungsmessung, verwendet werden kann. Als optionales Vorgehen in diesem Entwicklungsschritt kann unter simulierten Umgebungsbedingungen die Sekundärfunktion auf beispielsweise Temperatur- oder Feuchtigkeitsbeständigkeit überprüft werden.

Mit dem verifizierten Funktionsprototypen endet die vorgestellte Entwicklungsmethode ASTRA. Wie diskutiert, lässt sich diese Methode zur Mechatronisierung eines beliebigen Befestigungsmittels anwenden. Zur Validierung dieser These muss im Weiteren die Methode an der Mechatronisierung eines anderen beliebigen Befestigungsmittels angewandt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Vorgehensweise, Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und diskutiert diese. Abschließend werden offene Punkte dargelegt und Empfehlungen für weitere Forschungsvorhaben ausgesprochen.

9.1 Zusammenfassung

Mit aufwendigeren Bauvorhaben und der steigenden Bedeutung der Digitalisierung im Bauwesen steigt auch der Bedarf an wirtschaftlichen Möglichkeiten zur Bauwerksüberwachung. Häufig wird diese Überwachung von Bauwerken mit wirtschaftlich und technisch aufwendigen Individuallösungen bewerkstelligt. Als lasteinleitende Elemente eignen sich vor allem nachträgliche Befestigungspunkte wie etwa chemische Schwerlastbefestigungen zur partiellen Erfassung des Bauwerkszustandes. Als sicherheitsrelevante Bauteile und durch ihre Überwachung mit strengen Vorgaben zum Erreichen einer bautechnischen Bewertung sind sie besonders für die Integration von sensorischen Elementen geeignet. Solche mechatronisierten Befestigungssysteme, in diesem Beispiel Verbundankersysteme, können durch Serienfertigung, gewohnte Montagevorgänge und ihre lasteinleitende Position eine ideale PLUG-AND-PLAY-Variante in einem Sensornetzwerk zur kontinuierlichen Bauwerksüberwachung bieten. Aus diesem Grund lautete die zentrale Forschungsfrage für diese Arbeit:

Ist es möglich, ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungsmittel mit einer geeigneten Entwicklungsmethode für die kontinuierliche Überwachung der Befestigungssituation zu mechatronisieren, ohne dabei seine Primärfunktion zu verschlechtern?

Diese zentrale Forschungsfrage wurde in drei Teilforschungsfragen unterteilt, die in den Hauptkapiteln 5, 6 und 7 dieser Arbeit bearbeitet wurden. Die Vorgehensweise zur Beantwortung der Teilforschungsfragen wurde in den dazugehörigen Kapiteln parallel abstrahiert und schließlich im vorangegangenen Kapitel 8 als neue Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln zusammengefasst.

Die erste Teilforschungsfrage, die auch den ersten Entwicklungsschritt *Analyse* dieser ASTRA-Methode beschreibt, lautete:

1. Können durch einen In Situ-Erkenntnisprüfstand die Versagensvorgänge chemischer Befestigungsmittel auf Vinylesterbasis analysiert werden und lassen sich dadurch Begrenzungsflächen identifizieren?

In bisherigen Untersuchungen war es nicht möglich, die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen eines Verbundankers bis zum Versagen zeitlich und räumlich bestimmt zu beobachten. Dies ist jedoch zwingend erforderlich, wenn das Systemverständnis von Verbundankern um die kontinuierlichen Schädigungsmechanismen erweitert werden soll. Denn nur mit dem Verständnis dieser lassen sich Flächen am Verbundanker identifizieren, die zur Erfüllung der Primärfunktion beitragen (sogenannte Wirkflächen) oder die nicht dazu beitragen (sogenannte Begrenzungsflächen). Hierfür wurde ein In Situ-Erkenntnisprüfstand entwickelt, mit dem nun erstmals die Möglichkeit besteht, diese Schädigungsmechanismen kontinuierlich zeitlich und räumlich bestimmt zu beobachten. Mithilfe der SCHUBVIERECKMETHODE und des C&C²-ANSATZES konnten die Versagensvorgänge beschrieben werden und mit einem C&C²-SEQUENZMODELL ließen sich diese Wirk- und Begrenzungsflächen für das untersuchte Verbundankersystem identifizieren.

Hieran schloss sich die zweite Teilforschungsfrage an, die auch den zweiten Entwicklungsschritt der ASTRA-Methode, die *Synthese*, am Beispiel Verbundanker beschreibt:

2. Können in ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungselement auf Vinylesterbasis zusätzliche Gestaltelemente eingebracht werden, ohne dabei die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ zu beeinflussen?

Da es sich bei den Aussagen zu Wirk- und Begrenzungsflächen ohne Validierung nur um Hypothesen handelt, wurde dies im Rahmen der zweiten Teilforschungsfrage mit der Vorgehensweise des Entwicklungsschrittes *Synthese* überprüft. Die Wirk- und Begrenzungsflächen wurden dazu in Volumina, sogenannte Designräume, umgewandelt, wobei eine für bisherige Entwicklungsmethoden neue Vorgehensweise angewendet wurde. Statt, wie üblich, die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Entwicklung eines neuen Befestigungsmittels einfließen zu lassen, wurden in die identifizierten Designräume des Verbundankers Gestaltelemente eingebracht und im Versuch experimentell untersucht. Diese Gestalt-Funktion-Versuchsmuster (GFZ-Versuchsmuster) wurden mit Rapid-Prototyping-Verfahren erstellt und durch methodische Unterstützung der statistischen Versuchsplanung experimentell in einem vollfaktoriellen 3³-Versuchsplan auf ihre Haltekraft überprüft.

Aus den gewonnenen Ergebnissen konnte ein lineares Regressionsmodell erstellt werden. So konnten die GFZ-Versuchsmuster auf ihre Effekte und gegenseitigen Wechselwirkungen gegenüber der Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ quantitativ bewertet werden. Durch diese Vorgehensweise im Entwicklungsschritt der *Synthese* ist es erstmals möglich, methodisch Designräume in Verbundankersystemen zu validieren, in die ohne negative Beeinflussung der Primärfunktion zusätzliche Gestaltelemente eingebracht werden können. Diese Designräume können folglich genutzt werden, um eine mechatronische Sekundärfunktion zu implementieren. Die vier Designräume befinden sich im Bereich des Bohrlochgrundes, im Gewindegrund, in einem geringen Teil der Verbundfläche und an der Betonoberfläche ohne Abstützung.

Abschließend folgte die dritte Teilforschungsfrage und somit der letzte Entwicklungsschritt der neuen Entwicklungsmethode ASTRA, die *Rücktransformation*:

3. Können in einem chemischen Befestigungsmittel integrierte Sensoren zur Zustandsüberwachung der Befestigungssituation genutzt werden?

Bei einer *Analyse* der relevanten Versagensmechanismen stellte sich der *Betonausbruch* und das *Herausziehen*, also die axiale Verschiebung, als relevant heraus. Die Überwachung der axialen Verschiebung ist geeignet, um frühzeitig auch bei Montagefehlern oder dem Einsatz falscher Verbundmörtel, wie dies bei den Tunnelunfällen in Boston und Sasago der Fall war, Schäden zu erkennen. Mit der Erfassung verschiedener Anforderungen an das Messprinzip aufgrund von beispielsweise Designraum, Lebensdauer, Umgebungsbedingungen oder Wirtschaftlichkeit wurden Messprinzipien zur Bestimmung der axialen Verschiebung ermittelt. Dahingehend erwies sich vor allem das kapazitive Messprinzip als geeignet für den Einsatz zur Mechatronisierung von Verbundankersystemen. Dieses wurde daraufhin konstruktiv in die zur Verfügung stehenden Designräume eingepasst und es wurden zwei verschiedene Sensorelemente vorgestellt: der kapazitive Abstandssensor im Bohrlochgrund und der kapazitive Impedanzsensor im Gewindegrund. Der kapazitive Abstandssensor kann aufgrund seiner kraftleitungsfreien und unbeweglichen Position im Bohrlochgrund Bewegungen des Verbundankers relativ zu diesem detektieren und eignet sich somit für die Versagensarten *Betonausbruch* und alle Ausprägungen der Versagensart *Herausziehen*. Lediglich die Versagensart *Stahlbruch* wird nur bedingt abgedeckt. Der kapazitive Impedanzsensor kann durch die Ausbildung eines elektrischen Feldes Änderungen in der näheren Umgebung, etwa im Mörtel oder Beton, durch die Änderung der dielektrischen Eigenschaften detektieren. Dementsprechend eignet sich der im Verbundanker integrierte kapazitive Im-

pedanzsensor des mechatronisierten Verbundankers zur kontinuierlichen *Rissdetektion* im näheren Umfeld des Befestigungsmittels und somit der Risskontrolle des Untergrundes Beton.

In der anschließenden Verifizierung dieser Sensorelemente im zentrischen Auszugsversuch mit enger Abstützung zeigte der Funktionsprototyp des kapazitiven Abstandssensors eine Messbarkeit der axialen Verschiebung. Die grundsätzliche Funktion des kapazitiven Impedanzsensors konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Jedoch ließ das Messsignal des kapazitiven Impedanzsensors keine eindeutige Vorhersage zum Verbundversagen zu. Auch bei der darauffolgenden Untersuchung ausgewählter Umwelteinflüsse auf das Messsignal, wie Temperatur, Feuchtigkeit oder korrosive Umgebung, ließ der Funktionsprototyp des mechatronisierten Verbundankers mit kapazitivem Impedanzsensor keine Robustheit erkennen. Anders waren die Ergebnisse der Messsignalrobustheit gegenüber den ausgewählten Umweltbedingungen beim mechatronisierten Verbundanker mit kapazitivem Abstandssensor. Dieser zeigte weder bei den ausgewählten Temperaturen von 50 °C und 80 °C, den relativen Feuchtigkeiten von 50 %, 75 % und 98 % noch bei der korrosiven Umgebung mit Natriumchloridlösung eine Veränderung des Messsignals. Mit diesen Ergebnissen konnte schlussendlich die zentrale Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit beantwortet werden: Es ist möglich, ein bautechnisch bewertetes chemisches Befestigungsmittel für die kontinuierliche Überwachung der Befestigungssituation zu mechatronisieren, ohne dabei seine Primärfunktion zu verschlechtern.

Das beschriebene Vorgehen zur Entwicklung eines sensorintegrierten Verbundankersystems zur kontinuierlichen Zustandserfassung wurde parallel zur Beantwortung der einzelnen Teilforschungsfragen beschrieben und abschließend zu einer allgemeinen Entwicklungsmethode ASTRA für die Mechatronisierung von Befestigungsmitteln abstrahiert. Angelehnt an die drei Teilforschungsfragen gliedert sich auch die ASTRA-Methode in drei Entwicklungsschritte:

1. Schritt: **Analyse** – Beobachtungsbarrieren überwinden
2. Schritt: **Synthese** – Ergebnisse mit GFZ-Testobjekten validieren
3. Schritt: **Rücktransformation** – Funktionsprototyp ableiten

Der *Analyseschritt* legt den Fokus dabei auf die Erweiterung des Systemverständnisses des zu mechatronisierenden Befestigungsmittels. Hierfür sollen Beobachtungsbarrieren eliminiert werden, um Beobachtungen zu den kontinuierlichen Versagensmechanismen des Befestigungsmittels zu ermöglichen und Erkenntnisse hieraus zu gewinnen. Mithilfe geeigneter Modellbildungsmethoden lassen sich aus

den Beobachtungen und Erkenntnissen mögliche Designräume identifizieren, in denen die Einbringung zusätzlicher Gestaltelemente für eine mechatronische Sekundärfunktion möglich ist, ohne dabei die Primärfunktion ‚Haltekraft für Anbauteile gewährleisten‘ des zu mechatronisierenden Befestigungsmittels zu verschlechtern.

Darauf folgt der *Syntheseschritt*, der im Vergleich zu bestehenden Entwicklungsmethoden die Möglichkeit bietet, mit einem geringen Zeit- und Ressourcenaufwand möglichst schnell umfassende Erkenntnisse zu Designräumen und potenziellen Einflussfaktoren auf die Primärfunktion zu erhalten. Hierfür geeignete zeit- und ressourcensparende Verfahren umfassen verschiedene Rapid-Prototyping-Verfahren und die statistische Versuchspannung. Mit den gewonnenen Ergebnissen lassen sich hieraus die Effekte und Wechselwirkungen unterschiedlicher Gestaltelemente auf die Primärfunktion quantitativ erfassen. Diese Gestaltelemente liefern dann die Designräume zur Integration einer mechatronischen Sekundärfunktion.

Die Integration und deren Verifizierung folgen im letzten Entwicklungsschritt, der *Rücktransformation*. Diese beschreibt eine in der Produktentwicklung übliche Vorgehensweise, bei der aus der bestehenden oder zukünftigen Anwendung Umgebungsbedingungen und Anforderungen an die mechatronischen Bauteile ermittelt und aus dem Stand der Technik ausgewählt werden. Anschließend werden diese mechatronischen Bauteile an den vorhandenen Designraum angepasst und es erfolgt die Verifizierung der Funktion mit ersten erstellten Funktionsprototypen. Zusätzliche Untersuchungen zu Umgebungsbedingungen sind an dieser Stelle optional möglich.

Aus Überlegungen heraus lässt sich diese ASTRA-Methode zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln unbegrenzt auf alle Befestigungsmittel übertragen. Somit liegt erstmals für die Produktentwicklung mechatronischer Befestigungsmittel eine unterstützende Entwicklungsmethode vor, die durch die Vorgehensweise des hier dargestellten Beispiels der Sensorintegration eines Verbundankersystems bereits verifiziert werden konnte.

9.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert eine neue Methode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln und veranschaulicht die Vorgehensweise dieser Methode am Beispiel eines Verbundankersystems auf Vinylesterbasis. Die Mechatronisierung des Verbundankersystems basiert auf der Integration von Sensoren zur Erfassung der axialen Verschiebung beziehungsweise der Rissbildung. Dieses System kann zukünftig einen großen Beitrag zur Überwachung und Sicherung von Bauwerken liefern, da es im direkten Lastfluss nachträglich angebrachter Bauteile liegt. Da die vorgestellte Entwicklungsmethode ASTRA mit dem beschriebenen Vorgehen jedoch

bisher nur an diesem Beispiel des sensorintegrierten Verbundankersystems bis zum Funktionsprototypen dargelegt wurde, besteht weiterer Untersuchungsbedarf, inwieweit diese Entwicklungsmethode uneingeschränkt auf andere Befestigungsmittel oder sogar andere zu mechatronisierende Produkte im Bauwesen übertragbar ist. Weiterhin müssen auch an den sensorintegrierten Verbundankern weitere Untersuchungen und Entwicklung durchgeführt werden, um deren zuverlässigen Einsatz im realen Anwendungsfall zu gewährleisten. Im Folgenden werden Potenziale für weitere Untersuchungen vorgestellt.

Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln

Die Entwicklung anderer mechatronisierter Befestigungsmittel kann zukünftig von hoher Relevanz sein. Andere Mörtelsysteme und vor allem Stahlschwerlastbefestigungen eignen sich ebenso zur Mechatronisierung wie der Forschungsgegenstand dieser Arbeit. Die in dieser Arbeit vorgestellte neue ASTRA-Methode kann bei dieser Aufgabe unterstützen. Hierbei muss indes geprüft werden, ob sich der entwickelte In Situ-Erkennnisprüfstand für die Beobachtung und Identifizierung von Designräumen im Allgemeinen eignet oder ob andere Methoden zur Eliminierung der Beobachtungsbarrieren notwendig sind. Die vorgestellte Entwicklungsmethode ASTRA sieht dies vor und verweist in diesem Zusammenhang unter anderem auf die Vorgehensweisen von Matthiesen et al. (2017). Die vorgeschlagenen Methoden zur Identifizierung der qualitativen Kraftverläufe sowie der Identifizierung und Validierung der Designräume müssten sich ohne weitere Anpassungen direkt auf andere Befestigungsmittel übertragen lassen. Der Entwicklungsschritt der *Rücktransformation* hingegen ist auch aufgrund unterschiedlicher Ziele der Mechatronisierung etwa durch Einbringung von anderen Bauteilen wie Aktoren oder anderen Sensoren individuell zu betrachten. Hierbei besteht für die Erweiterung der vorgestellten Entwicklungsmethode ASTRA zur Mechatronisierung ein hohes Potenzial. Weitere Untersuchungen am Beispiel anderer Befestigungssysteme zur Mechatronisierung sind hierfür erforderlich.

Weiterentwicklung des kapazitiven Abstandssensors

Durch seine vielversprechende Funktion bereits im Stadium eines Funktionsprototypen eignet sich dieser mechatronisierte Verbundanker zur kontinuierlichen Überwachung von Befestigungssituationen. Um die tatsächliche Robustheit und die Langzeitbeständigkeit dieses Systems zu gewährleisten, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Eine Ausweitung der Versuche auf andere Lastfälle wie etwa Querlast- oder Dynamikanwendungen erweist sich dahingehend als sinnvoll. Auch müssen umweltbedingte Einflüsse auf das Messsignal näher untersucht werden, um diese daraufhin auszuschließen.

Weiterentwicklung des kapazitiven Impedanzsensors

Der kapazitive Impedanzsensor offenbart großes Potenzial zur Detektion von Rissen im Untergrund, ist jedoch in seinem aktuellen Entwicklungsstand noch nicht ausgereift. Ein trainierter Algorithmus könnte zukünftig beispielsweise helfen, anhand des Messsignalverlaufs eine Vorhersage des Verbundversagens zu treffen. Dementsprechend sind hier sowohl für die materialeitige Auslegung des Sensorelementes als auch die Interpretation des Messsignals weitere Untersuchungen zwingend erforderlich, um einen robusten Funktionsprototypen zu erhalten, der beständig gegenüber den zu erwartenden Umweltbedingungen ist.

Messelektronik und Gehäuse

In der vorliegenden Arbeit wurde die Messelektronik nicht näher untersucht. Für die weitere Entwicklung der sensorintegrierten Verbundanker sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig. Ein robustes Design der Elektronik sowie ein wirtschaftliches und sicheres Gehäuse, das Baustellenbedingungen und den harschen Umweltbedingungen standhält, denen ein Befestigungsmittel ausgesetzt ist, sind für einen ausfallsicheren Betrieb zwingend notwendig. Zwar gibt es durch verschiedene Projekte zur Bauwerksüberwachung hierfür bereits Konzepte, diese müssen aber von diesen Individuallösungen auf serientaugliche Lösungen transferiert werden.

Sensordaten und deren Nutzung für DIGITALE ZWILLINGE

Für die vorliegende Arbeit wurden die Ausgangsspannungssignale der Messelektronik zur Bewertung der Versuchsergebnisse verwendet. Zukünftig müssen hierfür Konzepte für ein geeignetes Datenmanagement entwickelt werden, das beispielsweise Abtastrate, Echtzeitvisualisierung, Datenübertragung und geringes Datenvolumen verbindet. Gerade für die Nutzung dieser Messsignale beziehungsweise Sensordaten in einem DIGITALEN ZWILLING müssen geeignete Schnittstellen identifiziert werden, wobei ebenfalls die unkomplizierte schnelle Handhabung der Daten zu gewährleisten ist. Nur so kann sich ein mechatronisiertes Befestigungsmittel zukünftig als Standard für die Bauwerksüberwachung durchsetzen.

Literaturverzeichnis

- Achenbach, M., Edler J., Hellmig, R. J., Mattheck, C., Moldenhauer, H., Sachs, W. & Tesari, I. (2010). *Entwicklung von effizienten, einfach anzuwendenden Konstruktionsprinzipien für technische Bauteile nach dem Vorbild der Natur. Abschlussbericht Förderkennzeichen 01 RI 0638* (BMBF, Hrsg.). Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF.
- Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In *8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation. Haus der Technik, Kassel*.
- Appl, J. (2009). *Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bergmeister, K. (2003). *Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures. State-of-art report* (Bulletin / International Federation for Structural Concrete, vol. 22). Lausanne: Fédération internationale du béton (fib).
- Bernstein, H. (2014). *Messelektronik und Sensoren. Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Blochwitz, R. (2019). *Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Botz, M. & Große, C. (2020). Monitoring im Rahmen eines digitalen Bauwerkszwilings. In Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP e.V.) (Hrsg.), *Fachtagung Bauwerksdiagnose. Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin*, S. 1–9.
- Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 365 (1851), 589–622.
- Bund/Länder Arbeitsgruppe Brücken- und Ingenieurbau, Referat StB 17 (Mitarbeiter) (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg.). (2013).

- Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. Dokumentation 2013.* Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesanstalt für Straßenwesen. (2020). *Brückenstatistik von Bundesfernstraßen* (www.BAST.de, Hrsg.). Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter https://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D7
- Caprani, C. (Australian Broadcasting Corporation, Hrsg.). (2018). *Genoa bridge collapse a sign of things to come if infrastructure maintenance ignored.* Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter <http://ipweaq.interse-arch.com.au/ipweaqjspui/handle/1/3905>
- Chacón, R., Guzmán, F., Mirambell, E., Real, E. & Oñate, E. (2009). Wireless Sensor Networks for Strain Monitoring during Steel Bridges Launching. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 8 (3), 195–205.
- Chen, J., Bulbul, T., Taylor, J. E. & Olgun, G. (2014). A Case Study of Embedding Real-time Infrastructure Sensor Data to BIM. In D. Castro-Lacouture, J. Irizarry & B. Ashuri (Hrsg.), *Construction Research Congress 2014*, S. 269–278. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Cook, R., Kunz, J., Fuchs, W. & Konz, R. (1998). Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal*, 95 (1), 9–26.
- Cook, R. A., Eligehausen, R. & Appl, J. J. (2007). Overview: Behavior of Adhesive Bonded Anchors. *Beton- und Stahlbetonbau*, 102 (Special Edition), 16–21. <https://doi.org/10.1002/best.200710107>
- Davis, T. M. & Cook, R. A. (2012). Stress Versus Time-To-Failure Test Method for Evaluating the Sustained Load Performance of Adhesive Anchor Systems in Concrete. *ACI Special Publication*, (283), 1–12.
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.). (2006). Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau [Themenheft]. *DBV-Merkblatt-Sammlung*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Merkblatt).
- DIN 1076:1999-11 (November 1999). *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN CEN/TS 1992-4-5 (August 2009). *Eurocode 2: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton – Teil 4-5: Dübel – Chemische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01 (Januar 2011). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 60529 (September 2014). *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. Berlin: Beuth Verlag, VDE-Verlag.
- DIN EN 206:2017-01 (Januar 2017). *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN-206:2013+A1:2016*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9227:2017-07 (Juli 2017). *Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären- Salzsprühnebelprüfungen (ISO-9227:2017); Deutsche Fassung EN-ISO-9227:2017*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 1992-4:2019-04 (April 2019). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 4: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 12390-3:2019-10 (Oktober 2019). *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche und Englische Fassung EN 12390-3:2019*. Berlin: Beuth Verlag.
- Duo, J. & Liu, P. (2019). Fazhida Beijing Tech Co. Ltd. (Anmelder). Patentschrift CN109595240 A.
- ASTM E1512-01. *Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Elbaz, K., Shen, J. S., Arulrajah, A. & Horpibulsuk, S. (2016). Geohazards induced by anthropic activities of geoconstruction: a review of recent failure cases. *Ara-bian Journal of Geosciences*, 9 (18), 482ff.
- Eligehausen, R. (2008). *Evaluation Report for the assessment of bonded anchors for anchoring in concrete in accordance with AC308. Report: 20080602*. Stuttgart: Engineering Office Eligehausen und Asmus.

- Eligehausen, R., Appl, J. J., Lehr, B. & Mészáros, J., Fuchs, W. (2004). Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen mit Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung. Teil 1: Einzeldübel mit großem Achs- und Randabstand. *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (7), 561–571. <https://doi.org/10.1002/best.200490142>
- Eligehausen, R., Mallée, R. & Rehm, G. (1984). Befestigungen mit Verbundankern (Teil 1 - 3). *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 50 (50-52), 686–692.
- Eligehausen, R., Mallée, R. & Silva, J. F. (2006). *Anchorage in Concrete Construction* (1. Aufl.). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- EAD 330499-00-0601 (Juli 2017). *Bonded Fasteners for use in Concrete*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- Europäisches Parlament und Europäischer Rat. Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. EUV 305/2011:2011-03-09. Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R0305-20140616>
- ETAG 001 - Annex C (2010). *ETAG 001 - Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for use in Concrete - Annex C: Design Methods for Anchorages*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- ETAG 001 - Part 5 (2013). *ETAG 001 - Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for use in Concrete - Part five: Bonded Anchors*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- ETA-02/0024 (2017). *fischer Injektionssystem FIS V zur Verankerung im Beton*. Berlin: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- ETA-17/0979 (2019). *fischer Injektionssystem FIS EM Plus - Verbunddübel zur Verankerung im Beton*. Berlin: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- ETA-12/0258 (2019). *fischer Superbond - Verbunddübel zur Verankerung im Beton*. Berlin: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).

- Fédération Internationale du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010* (fib Model Code). Hoboken: Wiley.
- FHWA HIF-15-005 (Juli 2015). *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Findley, W. N., Lai, J. S. & Onaran, K. (1976). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials, with an introduction to linear viscoelasticity* (North-Holland series in applied mathematics and mechanics, v. 18). Amsterdam: North-Holland Pub. Co. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=574316>
- Fischer R. (2019). *Elektrotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Frank, A. (2019, März). *Inhouse-Training: DoE - Design of Experiments. Schulungsunterlagen*, fischerwerke GmbH & Co. KG, Waldachtal.
- Fuchs, W. (2009). Geschichtliche Entwicklung der Bemessungsmethoden für Dübel in Deutschland. In T. Pregartner (Hrsg.), *Bemessung von Befestigungen in Beton: Einführung mit Beispielen* (Bauingenieur-Praxis, Bd. 2012, S. 3–4). Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- Fuchs, W. & Eligehausen, R. (1995). Das CC-Verfahren für die Berechnung der Betonausbruchlast von Verankerungen. *Beton- und Stahlbetonbau*, 90 (1), 6–9. <https://doi.org/10.1002/best.199500020>
- Fuchs, W., Hofmann, J. & Hülder, G. (2015). Montage bei tiefen Temperaturen - Einfluss auf das Tragverhalten chemischer Dübel. *Beton- und Stahlbetonbau*, 110 (6), 394–401. <https://doi.org/10.1002/best.201500010>
- González, A., Remenyte-Prescott, R., Martinez, D., Laefer, D. F., Mangina, E., OBrien, E. J., Chen, S. & et al. (2018). *TRUSS Training in Reducing Uncertainty in Structural Safety. D5.2 Final Report: WP5 - Rail and Road Infrastructure* (European Commission, Hrsg.). University College Dulin: Horizon 2020.
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2020). The contact and channel approach – 20 years of application experience in product engineering. *Journal of Engineering Design*, 31 (5), 241–265.
- Habenicht, G. (2009). *Kleben* (6. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- Haller, S. (2013). *Gestaltfindung: Untersuchungen zur Kraftkegelmethode*. Dissertation, Institut für Angewandte Materialien. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Horn, S., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Entwicklung eines sensorintegrierten Verbundankers zur Überwachung der Befestigungssituation. *Beton- und Stahlbetonbau*, 116 (6), 460–467. <https://doi.org/10.1002/best.202000105>
- Horn, S., Hölz, K., Schwabe, M. & Matthiesen, S. (2020). Experimentelle Untersuchung von Versagensvorgängen an Verbundankern mit einem In-Situ-Versuchsmodell. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115 (1), 45–53. <https://doi.org/10.1002/best.201900013>
- Horn, S. & Schwab, J. (2018). fischerwerke GmbH & Co. KG (Anmelder). Patentschrift WO2018/177675 A1.
- Horn, S. & Winkelmann, C. (2017). fischerwerke GmbH & Co. KG (Anmelder). Patentschrift WO2018/024449 A1.
- Horn, S., Zimprich, S., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Ermittlung eines Designraums zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln am Beispiel von Verbundankern. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115 (11), 878–886. <https://doi.org/10.1002/best.202000022>
- Huber, M. (2017). *Dispersion und Ausrichtung von Korund-Nanoplättchen in bioinspirierten Epoxid- und Vinylester-Harzsystemen und deren Anwendung als chemische Verbundanker*. Dissertation, Institut für Makromolekulare Chemie. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.
- Huisinga, H., Mohrmann, M. & Hofmann, L. (2014). *Intelligente Bauwerke. Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk die energieautarke Brücke* (Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Hrsg.). Leibniz Universität Hannover: Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik IEH. Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/index/index/docId/2165>
- Jaswal, S. & Gaur, B. (2014). New trends in vinyl ester resins. *Reviews in Chemical Engineering*, 30 (6), 567–581.
- Kederer, M., Wostradowski, U., Pirk, T., Purkl, F., Ehrenpfordt, R., Pleuger, W. & Curcic, M. (2019). Robert Bosch GmbH (Anmelder). Patentschrift WO2020/020682 A1.

- Kleppmann, W. (2016). *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren* (Praxisreihe Qualitätswissen, 9., überarbeitete Auflage). München: Hanser.
- Ko, J. M. & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27 (12), 1715–1725.
- Kränkell, T. & Gehlen, C. (2018). Reaktionsharzgebundene Verbunddübel unter Dauerlast. *Beton- und Stahlbetonbau*, 113 (10), 727–736.
<https://doi.org/10.1002/best.201800042>
- Küenzlen, J. (2020). Adolf Würth GmbH & Co. KG; Würth International AG (Anmelder). Patentschrift WO2020/216815 A1.
- Lachinger, S. & Bergmeister, K. (2014). Randnahe Mehrfachbefestigung unter kombinierter Belastung. Experimentelle und theoretische Untersuchungen. *Beton- und Stahlbetonbau*, 109 (5), 334–343.
<https://doi.org/10.1002/best.201300091>
- Lehmann, F., Ernst, H. & Laumann, S. (2016). Universität Stuttgart; (Anmelder). Patentschrift DE102016219953 B4.
- Lehmann, R. (1979). *Mehrfachbefestigungen*. Kolloquium über Fragen der Befestigungstechnik im Bauwesen, Universität Stuttgart, nicht veröffentlicht.
- Li, X., Zhou, Y., Zhao, K., Ding, Y. & Guo, D. (2017). Subway Eng Co. Ltd. of China Railway (Anmelder). Patentschrift CN106895053A.
- Liu, Z., Liu, Y. & Liu, J. (2019). Fashida Tech Co. Ltd. (Anmelder). Patentschrift CN110219865 A.
- Lüdeke, T. F. (2016). *Beitrag zur gewichtsoptimierten Entwicklung mechatronischer Produkte*. Dissertation, Physik und Mechatronik. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Mattheck, C. (2010). *Denkwerkzeuge nach der Natur* (1., unveränd. Nachdr). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Mattheck, C. & Bethge, K. (2004). *The face of failure. In nature and engineering* (1. ed.). Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.

- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Dissertation, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung - Prozess und Methoden. In B. Bender & Gericke K. (eds) (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (9. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflugler, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese*. Bericht, Institut für Produktentwicklung. Institut für Produktentwicklung IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Windisch, E. (2020). Erkenntnisgewinn in der Gestaltung mit Rapid Prototyping Ersatzsystemen durch Modellbildung und Parametertransformation. In R. Lachmayer, R. B. Lippert & S. Kaieler (Hrsg.), *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018* (S. 145–164). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Matthiesen, S., Hölz, K. & Grauberger, P. (2017). Systemverständnis durch Analysemethoden. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Oktober 2017* (1. Auflage). Hamburg: TuTech Verlag, TuTech Innovation GmbH.
- Mayer, B. (1990). *Funktionsersatzprüfungen für die Beurteilung der Eignung von kraftkontrolliert spreizenden Dübeln*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Mészáros, J. (2002). *Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Montero, R., Victores, J. G., Martínez, S., Jardón, A. & Balaguer, C. (2015). Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Automation in Construction*, 59, 99–112.
- Oloyede, S. A., Omoogun, C. B. & Akinjare, O. A. (2010). Tackling Causes of Frequent Building Collapse in Nigeria. *Journal of Sustainable Development*, 3 (3), 127–132.

- Ostrom, T. M. (1988). Computer Simulation. The Third Symbol System. *Journal of Experimental Social Psychology*, 24, 381–392.
- Ozbolt, J. & Eligehausen, R. (1990). Numerical analysis of headed studs embedded in large plain concrete blocks. In N. Bicanic (Hrsg.), *Computer aided analysis and design of concrete structures. Vol. 1*, S. 645–656. Swansea: Pineridge Press.
- Parfitt, M. K. (2008). Building Failures: Avoiding the Mistakes of Yesterday Leads to the Successes of Today. *Journal of Architectural Engineering*, 14 (2), 31. Editorial.
- Parthier, R. (2020). *Messtechnik. Vom SI-Einheitensystem über Bewertung von Messergebnissen zu Anwendungen der elektrischen Messtechnik* (9., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Pasini, D., Ventura, S. M., Rinaldi, S., Bellagente, P., Flammini, A. & Ciribini, A. L. C. (2016, September). Exploiting Internet of Things and building information modeling framework for management of cognitive buildings. In *IEEE International Smart Cities Conference 2016 (ISC2)*, S. 1–6. Trento, Italy: IEEE.
- Pfarr, L., Gut, M., Winkler, B., Ter Braack, T. & Khandozhko, S. (2020). HILTI AG (Anmelder). Patentschrift WO2020/225113 A1.
- Pregartner, T. (Hrsg.). (2009). *Bemessung von Befestigungen in Beton: Einführung mit Beispielen* (Bauingenieur-Praxis): Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- Pregartner, T., Mészáros, J., Eligehausen, R. & Fuchs, W. (1998, 11. März). *Schallemissionsanalyse an Betonwürfeln mit Injektionsankern M12. Bericht Nr.: 1/101-98/5*. Bericht, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Rat der europäischen Gemeinschaften. Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte. 89/106/EWG. Zugriff am 22.07.2020. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31989L0106&from=DE>
- Rawlings, J. J. (1911). Rawlings, J.J. (Anmelder). Patentschrift GB191122680A, Großbritannien.

- Rawlings, J. J. (1930). Rawlings, J.J. (Anmelder). Patentschrift US1942256A, USA.
- Rosenker, M. V., Sumwalt, R. L., Hersman, D. A. P., O'Leary Higgins, K. & Chealander, S. R. (2007, 10. Juli). *Ceiling Collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel; Boston, Massachusetts; July 10, 2006. Accident Report NTSB/HAR-07/02*. PB2007-916203 (National Transportation Safety Board, Hrsg.). Washington, D.C.: National Transportation Safety Board.
- Saam N. J. (2009). Modellbildung. In S. Kühl (Hrsg.), *Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden* (1. Aufl., 518 ff.). Wiesbaden: Springer VS.
- Sacks, R., Eastman, C. M., Lee, G. & Teicholz, P. M. (2018). *BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (Third edition). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Schacht, G., Käding, M., Bolle, G. & Marx, S. (2019). Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrissskorrosionsgefahr. *Beton- und Stahlbetonbau*, 114 (2), 85–94. <https://doi.org/10.1002/best.201800087>
- Schätzle, J. (2013). Langzeitverhalten von chemischen Verbundankersystemen. *Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 108* (10 (Sonderheft)), 90–97.
- Schätzle, J., Suchy, U., Lehmann, D., Horn, S. & Riexinger, S. (2019). fischerwerke GmbH & Co. KG; (Anmelder). Patentschrift WO2019/233907 A1.
- Schiffke, P. (2015). Bacht Dämmtechnik GmbH & Co. KG (Anmelder). Patentschrift EP2910905 A1.
- Schmidt, P., Appl, J. & Khandozhko, S. (2013). HILTI AG (Anmelder). Patentschrift WO2013/113586 A1.
- Schmied, S. (2008). *Dehnungsverteilung in Beton bei Dübeln unter Querlast*. Diplomarbeit, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- Schnabel, P. (2017). *Elektronik-Fibel. Elektronik Grundlagen, Bauelemente, Schaltungstechnik, Digitaltechnik* (7., überarbeitete Auflage, Korrektur vom Februar 2017). Ludwigsburg: Patrick Schnabel.

- Schönfelder, G. & Hering, E. (2018). *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schuermann, F. & Novotny, R. (1959). Bergwerksverband GmbH (Anmelder). Patentschrift DE1205038B, Deutschland.
- Shirato, M. (2014). Investigation of Tunnel Ceiling Collapse Accident. In *30th US Japan Bridge Engineering Workshop*, 6.2 1–8. Washington D.C.
- Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017). *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer Verlag.
- Stahlmecke, B. (2008). *Elektromigration in Gold und Silber Nanostrukturen*. Dissertation, Experimentalphysik, Fakultät für Physik. Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Stapf, G., Lehmann, F. & Ruckteschell, N. von (2015). Neuzzeitliche Bauwerksmonitoringkonzepte und Realisierungen. In *Neuste Entwicklungen bei geklebten Holzbauteilen. 3. Stuttgarter Holzbau-Symposium: 08.-09. Oktober 2015* (S. 31–42). Stuttgart: Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart Abteilung Holzkonstruktionen.
- Stark, J. & Wicht, B. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton* (2., akt. und erw. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Stierschneider, E., Schwenn, M., Zeman, O. & Bergmeister, K. (2020). Assessment of measurement uncertainty examining sustained load tests with bonded fasteners. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51 (1), 109–127.
- Stierschneider, E., Zeman, O., Lachinger, S. & Bergmeister, K. (2016). Evaluierung der zentrischen Resttragfähigkeit von randnahen Verbundankern nach erfolgtem Betonkantenbruch. *Beton- und Stahlbetonbau*, 111 (3), 149–158. <https://doi.org/10.1002/best.201500061>
- Stracke, J. & Kepplin, R. (2020). Der BIM-Prozess in der Tragwerksplanung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115 (4), 324–331. <https://doi.org/10.1002/best.201900097>

- Strauss, A., Bien, J., Neuner, H., Harmening, C., Seywald, C., Österreicher, M., Voit, K., Pistone, E., Spyridis, P. & Bergmeister, K. (2020). Sensing and monitoring in tunnels testing and monitoring methods for the assessment of tunnels. *Structural Concrete*, 4 (1), 971.
- Taerwe, L., Bergmeister, K., Strauss, A., Antón C., J. M., Bucher, C., Campos e Matos, J., Cervenka, V., Chefdebien, A. de, Frangopol, D. M., Graubner, C.-A. et al. (2018). *fib Bulletin 86. Safety and performance concept. Reliability assessment of concrete structures* (Fib bulletin, Bd. 86). Lausanne, Switzerland: fib. The International Federation for Structural Concrete.
- Tautschnig, A., Fröch, G., Mösl, M. & Gächter, W. (2017). Building Information Modeling - Übersicht über Technologie und Arbeitsmethodik mit Praxisbeispielen. In K. Bergmeister, F. Fingerloos & J.-D. Wörner (Hrsg.), *Beton Kalender 2018* (Bd. 107, S. 355–413). Weinheim, Germany: Wiley.
- TR 020 (2004). *Technical Report 020 - Evaluation of Anchorages in Concrete concerning Resistance to Fire*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- TR 029 (2010). *Technical Report 029 - Design of Bonded Anchors*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- TR 048 (2016). *Technical Report 048 - Details of Tests for post-installed Fasteners in Concrete*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).
- Teufelhart, S. (2017). HILTI AG (Anmelder). Patentschrift WO2018/041558 A1.
- Thau, S. L. (2013). *Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Van Treeck, C., Elixmann, R., Rudat, K., Hiller, S., Herkel, S. & Berger, M. (2016). *Gebäude. Technik. Digital. Building Information Modeling* (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Vorwerk-Handing, G., Gwosch, T., Schork, S., Kirchner, E. & Matthesen, S. (2019). Classification and examples of next generation machine elements. *Forschung im Ingenieurwesen*, 70 (01/02), 21–32.

- Vorwerk-Handing, G., Vogel, S. & Kirchner, E. (2019). Integration von Messfunktionen in bestehende technische Systeme unter Berücksichtigung der Baustruktur. In VDI e.V. (Hrsg.), *Fachtagung Mechatronik 2019*, S. 219–224. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Wan-Wendner, R., Marcon, M., Boumakis, I., Czernuschka, L.-M., Podrouzek, J. & Vorel, J. (2017). Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Verbundankern. In Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb) (Hrsg.), *5. Jahrestagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, S. 1–8. Kaiserslautern.
- Weidner, P., Ruff, D., Jauretzko, M. & Ummenhofer, T. (2019). Messtechnische Begleitung der Ertüchtigungsmaßnahme an der Rheinbrücke Maxau. *Messtechnik im Bauwesen*, 12 (3), 19–26.
- Welz, G. (2011). *Tragverhalten und Bemessung von Injektionsdübeln unter Quer- und Schrägzubelastung im Mauerwerk*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Wiesner, M. & Vajna, S. (2014). Bionische Radien als User Defined Feature. In J. Krzywinski, M. Linke, C. Wölfel & G. Kranke (Hrsg.), *Entwerfen, Entwickeln, Erleben 2014. Beiträge zum technischen Design ; Dresden, 26. - 27. Juni 2014* (Technisches Design, Bd. 9, S. 345–356). Dresden: TUDpress.
- Wintergerst, E. (2015). *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wissner, C. (2010). *Beiträge zum Fail Safe Design*. Dissertation, Institut für Angewandte Materialien. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wissner, K. (2015). Ingenieurbüro Tim Wissner und Kai Wissner GbR (Anmelder). Patentschrift DE102015116841 A1.
- Ye, X. W., Su, Y. H. & Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review. *The ScientificWorldJournal*, 2014 (Special Issue - Volume 2014), 652329.
- Zhang, Y. & Bai, L. (2015). Rapid structural condition assessment using radio frequency identification (RFID) based wireless strain sensor. *Automation in Construction*, 54, 1–11.

Zhu, F. (2018). *Kriechverhalten von Verbundankern. Untersuchung mittels Nanoindentierung und numerischer Simulation*. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation vom Autor Co-betreut wurden:

Neumayer, M. (2019). *Der Einsatz von Befestigungsmitteln mit integrierten Sensoren im realen Anwendungsfall*. Bachelor-Thesis. Hochschule Offenburg.

Schwabe, M. (2018). *Ermittlung der Wirkflächenpaare einer chemischen Verankerung mit dem C&C²-Ansatz (Contact&Channel-Ansatz) und deren Änderung im Auszugsversuch*. Projektarbeit T2000. fischerwerke GmbH & Co. KG: Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart, Campus Horb.

Anhang A

Versuchsergebnisse der In Situ- & Referenzversuche

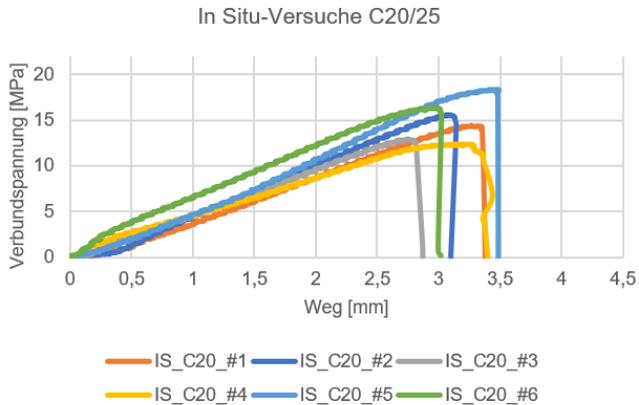


Abbildung Anhang 1: Verläufe der Verbundspannung über den Weg der In Situ-Auszugsversuche in C20/25

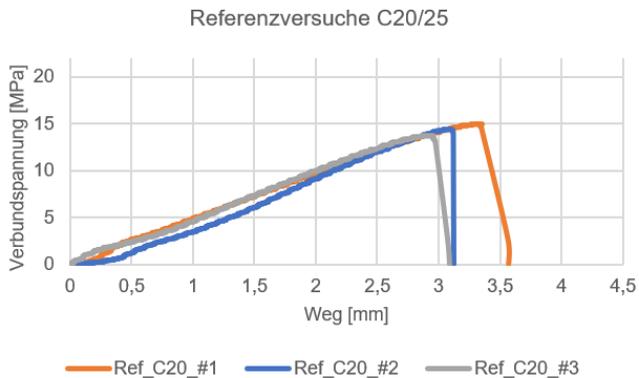


Abbildung Anhang 2: Verläufe der Verbundspannung über den Weg der Referenz-Auszugsversuche in C20/25

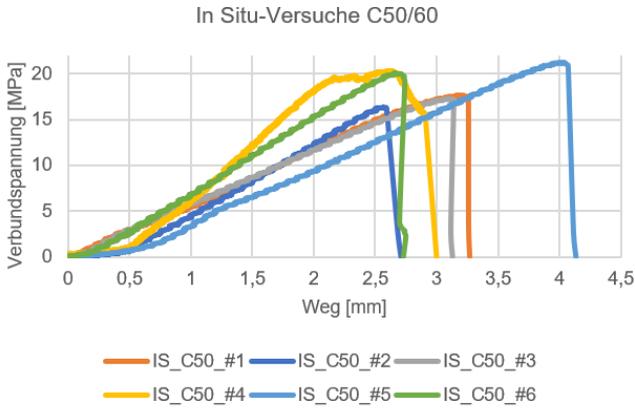


Abbildung Anhang 3: Verläufe der Verbundspannung über den Weg der In Situ-Auszugsversuche in C50/60

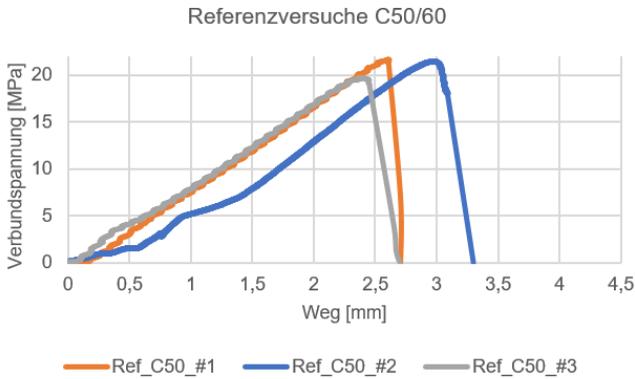


Abbildung Anhang 4: Verläufe der Verbundspannung über den Weg der Referenz-Auszugsversuche in C50/60

Tabelle Anhang 1: Prüfkörperparameter der In Situ-Erkenntnisprüfstände

Versuchsnummer	Betondruckfestigkeit	Einbindetiefe h_{ef} [mm]	Überstand x_L [mm]	Überstand x_R [mm]
IS_C20_#1	C20/25	51,77	0,10	0,00
IS_C20_#2	C20/25	51,74	0,83	1,34
IS_C20_#3	C20/25	50,49	0,50	0,50
IS_C20_#4	C20/25	50,13	0,78	1,10
IS_C20_#5	C20/25	58,59	0,00	0,00
IS_C20_#6	C20/25	52,63	1,32	1,75
IS_C50_#1	C50/60	50,23	0,08	0,97
IS_C50_#2	C50/60	56,38	0,10	0,00
IS_C50_#3	C50/60	51,49	0,11	0,20
IS_C50_#4	C50/60	49,49	0,53	0,50
IS_C50_#5	C50/60	57,89	0,67	0,53
IS_C50_#6	C50/60	52,54	1,20	0,80

Versuchsergebnisse der Haltekrafteinflüsse der Gestaltelemente

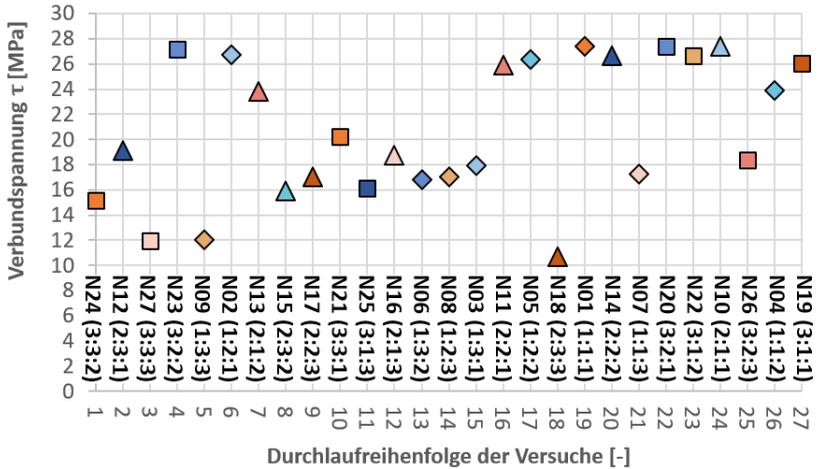


Abbildung Anhang 5: Übersicht der ermittelten Verbundspannungen aus den Versuchen zur Ermittlung der Haltekrafteinflüsse zusätzlicher Gestaltelemente aufgetragen über die randomisierte Durchlaufreihenfolge mit Versuchsmusterbezeichnung und dazugehöriger Stufenzusammensetzung der jeweiligen Faktoren

Anhang B

Quelltext des ersten Messelektronikprototypen

```

//Bibliotheken laden
#include <Wire.h> //Bibliothek zur Kommunikation mit I2C-Protokoll
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Bibliothek zur Kommunikation mit LCD-Display

//LCD-Display Konfiguration
#define I2C_ADDR 0x27
#define BACKLIGHT_PIN 3
#define En_pin 2
#define Rw_pin 1
#define Rs_pin 0
#define D4_pin 4
#define D5_pin 5
#define D6_pin 6
#define D7_pin 7
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, En_pin, Rw_pin, Rs_pin, D4_pin, D5_pin, D6_pin,
D7_pin);

//Sensor PINs definieren
const int OUT_PIN = A2;
const int IN_PIN = A0;

//Kapazität zwischen IN_PIN und GND berechnen durch Ladezeit der Sensorfläche

const float IN_STRAY_CAP_TO_GND = 31.8; //Streuung reduzieren
const float IN_EXTRA_CAP_TO_GND = 0.0; //Referenzmessung
const float IN_CAP_TO_GND = IN_STRAY_CAP_TO_GND + IN_EX-
TRA_CAP_TO_GND;
const int MAX_ADC_VALUE = 1023;
const int d = 0.01; //Sensorflächen Durchmesser in [m]
const int Epsilon = 1.5; //Permittivität (Annahme)

void setup()
{
  pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
  //digitalWrite(OUT_PIN, LOW); //Das ist der Grundzustand für Outputs
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  //digitalWrite(IN_PIN, LOW);
  pinMode(7, OUTPUT); //LED rot

```

```
pinMode(8, OUTPUT); //LED gelb
pinMode(12, OUTPUT); //LED grün
lcd.begin (16, 2);
lcd.setBacklightPin(BACKLIGHT_PIN, POSITIVE);
lcd.setBacklight(HIGH);
lcd.home ();
Serial.begin(115200);
}
```

```
void loop()
{
  //Aufladen
  //Kondensator zwischen OUT_PIN und IN_PIN im Test
  //Ansteigendes Signal (Flanke) an OUT_PIN
  pinMode(IN_PIN, INPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
  int val = analogRead(IN_PIN);
  //Entladen
  //Alles löschen für nächste Messung
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  pinMode(IN_PIN, OUTPUT);
  //Berechnen und Ergebnisse ausgeben
  float capacitance = (float)val * IN_CAP_TO_GND / (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
  float distance = (1000*0,25*PI*d*d*Epsilon)/(4*capacitance);

  lcd.setCursor (0, 0); // erste Zeile LCD
  lcd.print("Kap.");
  lcd.setCursor (9, 0);
  lcd.print(capacitance, 3);
  lcd.setCursor (14, 0);
  lcd.print("pF");
  Serial.print(F("Kapazitaet = "));
  Serial.print(capacitance, 3);
  Serial.print(F(" pF ("));
  Serial.print(val);
  Serial.println(F(")"));
  if (distance <= 0.500)
  {
    Serial.print(F("Abstand = "));
    Serial.print(distance, 3);
    Serial.print(F(" mm ("));
    Serial.print(val);
  }
}
```

```
Serial.println(F(" "));
}

if (distance > 0.500)
{
  Serial.print("Abstand zu gross");
  Serial.print(F("Abstand = "));
  Serial.print(distance, 3);
  Serial.print(F(" mm ("));
  Serial.print(val);
  Serial.println(F(" "));
}

if (capacitance >= 18.000) //LED grün
{
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(12, HIGH);
  lcd.setCursor(0, 1); // zweite Zeile LCD
  lcd.print("Abstand i.O. ");
}
if (capacitance > 14.000 && capacitance < 17.000) //gelb
{
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  lcd.setCursor(0, 1); // zweite Zeile LCD
  lcd.print("Abstand testen ");
}
if (capacitance <= 14.000) //rot
{
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(12, LOW);
  lcd.setCursor(0, 1); // zweite Zeile LCD
  lcd.print("Abstand zu gross");
}
while (millis() % 500 != 0);
delay(100);
}
```

Anhang C

Tabelle Anhang 2: Verwendete internationale Patentklassifikationen (IPC) für die Recherche nach sensorischen Befestigungsmitteln

IPC	Bezeichnung
G01	Messen; Prüfen
F16	Maschinenelemente oder Maschineneinheiten; allgemeine Maßnahmen für die ordnungsgemäße Arbeitsweise von Maschinen oder Einrichtungen; Wärmeisolierung allgemein
G08	Signalwesen
G06	Datenverarbeitung; Rechnen oder Zählen
E04	Baukonstruktion
H01	Grundlegende elektrische Bauteile
H04	Elektrische Nachrichtentechnik
E21	Erdbohren oder Gesteinsbohren; Bergbau
E02	Wasserbau; Gründungen; Bodenbewegung
G09	Unterricht; Geheimschrift; Anzeige; Reklame; Siegel