

Julian Philipp Peters

Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel von Befestigungsschrauben

Sensor-integration in Machine Elements
at the Example of Fastening Bolts

Band 202

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Forschungsberichte



Julian Philipp Peters

Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel von Befestigungsschrauben

Sensor-integration in Machine Elements at the Example of Fastening Bolts

Band 202

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

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel von Befestigungsschrauben

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

angenommene

DISSERTATION

von

M. Sc. Julian Philipp Peters

Tag der mündlichen Prüfung:	13.05.2026
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Klaus 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 202

Grundlage der industriellen Digitalisierung ist die Verfügbarkeit geeigneter Daten. Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 2305 „Sensorintegrierende Maschinenelemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird der Ansatz verfolgt, bestehende Maschinenelemente durch sensorintegrierende Maschinenelemente in bestehenden Anlagen ersetzbar zu machen. Dazu muss erforscht werden, wie Sensoren zur Datengenerierung in Standard-Maschinenelemente integriert werden können. Die erhobenen Daten müssen energiesparend gemessen und drahtlos kommuniziert werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird erforscht, wie in eine Befestigungsschraube der Größe M20 eine derartige Sensorik integriert werden kann. Durch die räumliche Integration der mechanischen Haltefunktion und der neuen sensorischen Funktion tritt ein Zielkonflikt auf, der exemplarisch für die mechatronische Produktentwicklung ist. Die kraftübertragende Struktur der Schraube muss den Sensor tragen und ihm Bauraum abtreten. Dadurch wird die Schraube geschwächt und die mechanische Haltefunktion reduziert. Gleichzeitig wird die Nachgiebigkeit erhöht, was die Sensorsensibilität des Dehnmessstreifens verbessert. Die mechanische Domäne und die elektronisch-sensorische Domäne müssen miteinander verhandeln, wo das gemeinsame Optimum für die sensorintegrierende Schraube liegt. Um diesem Zielkonflikt methodisch zu begegnen, schlägt Julian Peters ein Verhandlungsmodell vor, das eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Ermittlung der optimalen Sensorbauraum-Gestaltmerkmale im Spannungsfeld mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung bietet. Es bildet die Basis für die Entwicklung vergleichbarer Sensorkonzepte in Maschinenelementen. Das Verhandlungsmodell wird bei der Entwicklung von insgesamt vier Prototypen der sensorintegrierenden Schraube genutzt. Zwei der vier entwickelten Prototypen sind in der Lage, Spannungen mehraxial zu messen und die gemessenen Daten drahtlos über Bluetooth Low Energy zu übertragen. Die Messgenauigkeit liegt auf einem beeindruckenden Niveau, das etwa dem Spannungsverlust durch Setzen in der Schraubverbindung entspricht. Die Entwicklungsgeschichte der Prototypen wird von Julian Peters auf das Genaueste analysiert. Der Schwerpunkt liegt auf dem entwicklungsbegleitenden Wissensaufbau. Julian Peters gibt wichtige Hinweise, welche Methode zum entwicklungsbegleitenden Wissensaufbau zu welchem Zeitpunkt und zu welchem Stand des Wissens der jeweiligen Domäne der Produktentwicklung verwendet werden soll. Die vorgelegte Arbeit enthält wichtige Erkenntnisse zum mechatronischen Maschinenelement der sensorintegrierenden Schraube und zu methodischen Aspekten ihrer domänenübergreifenden Entwicklung.

Kurzfassung

Die Verfügbarkeit aussagekräftiger Messdaten zum Zustand und zu den Prozesskräften von Maschinen und Anlagen ist eine zentrale Herausforderung der Digitalisierung im Maschinenbau. Durch die Integration von Sensorik direkt in standardisierte und weitverbreitete Maschinenelemente wie Schrauben können flächendeckend und niedrigschwellig Messdaten mit hoher Aussagekraft erfasst werden. Dies ermöglicht die Dokumentation der individuellen Beanspruchungshistorie und leistet dadurch einen Beitrag zur Realisierung der Kreislauffabrik.

Kern des Problems bei der Entwicklung sensorintegrierender Schrauben ist jedoch der Zielkonflikt zwischen dem Erhalt der mechanischen Funktion und der Bereitstellung einer möglichst guten sensorischen Funktion. Die Integration eines Sensormoduls, bestehend aus Sensoren und Elektronik, in das Innere der Schraube reduziert zwangsläufig deren mechanische Funktion, da die Gestaltmerkmale des Sensormoduls die beiden Funktionen in ihrem Verhalten gegenseitig beeinflussen. Bisher fehlten sowohl konkretes Wissen als auch Methoden, um diesen Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion zu verhandeln.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Zielkonflikt systematisch zu untersuchen und so zu verhandeln, dass eine Kompromisslösung gefunden werden kann. Dazu wurde ein Verhandlungsmodell entwickelt, das optimale Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale und das damit erreichbare funktionale Verhalten berechnet. Basierend auf diesen Gestaltmerkmalen wurden mehrere Iterationen sensorintegrierender Schrauben gefertigt und empirisch in ihrem funktionalen Verhalten bewertet. Die Iterationen erreichten Messfehler von bis zu 2 % und Sensitivitäten, die eine Auflösung der Axialkraft von bis zu 6 N und des Biegemoments von bis zu 46 mNm ermöglichen. Die unvermeidbare Reduktion der mechanischen Funktion wurde derart begrenzt, dass sie durch Erhöhung der Schraubenfestigkeitsklasse kompensierbar ist. Zur systematischen Unterstützung des Aufbaus von Wissen für die Sensorintegration wurde ein methodischer Ansatz am Beispiel der Schraube entwickelt, um interdisziplinäre Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und empirische Testing-Aktivitäten besser zu planen.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass der Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion in Schrauben durch gezielten Wissensaufbau wie die Quantifizierung der Zusammenhänge von Gestaltmerkmalen und funktionalem Verhalten verhandelt und eine Kompromisslösung gefunden werden kann. Die vollständig integrierte Messkette mit drahtloser Datenkommunikation eröffnet zukünftig das Potenzial, die Unsicherheiten in der Montage, insbesondere im Anziehfaktor, durch eine Koppelung mit einem Werkzeug zu verringern. Dadurch kann die Überdimensionierung von Schraubverbindungen um bis zu 73 % gesenkt werden.

Abstract

The availability of meaningful measurement data on the condition and process forces of machines and plants is a key challenge of digitalization in mechanical engineering. By integrating sensors directly into standardized and widely used machine elements such as bolts, comprehensive measurement data with high informative value can be recorded with low threshold. This enables the documentation of individual stress histories, thereby contributing to the realization of the circular factory.

However, the core problem in the development of sensor-integrated screws is the conflict of objectives between maintaining mechanical function and providing the best possible sensory function. The integration of a sensor module, consisting of sensors and electronics, into the interior of the screw inevitably reduces its mechanical function, as the design features of the sensor module have an opposing effect on the behavior of the two functions. Until now, there has been a lack of both concrete knowledge and methods for negotiating this conflict of objectives between mechanical and sensory function.

The aim of this work is to systematically investigate the conflict of objectives and negotiate it in such a way that a compromise solution can be found. To this end, a negotiation model was developed that calculates the optimal design features of the sensor module installation space and the functional behavior that can be achieved with it. Based on these design features, several iterations of sensor-integrating screws were manufactured and empirically evaluated in terms of their functional behavior. The iterations achieved measurement errors of up to 2% and sensitivities that enable a resolution of the axial force of up to 6 N and the bending moment of up to 46 mNm. The unavoidable reduction in mechanical function was limited to such an extent that it can be compensated for by increasing the screw strength class. To systematically support the development of knowledge for sensor integration, a methodological approach was developed using the example of the screw in order to identify interdisciplinary conflicts of interest at an early stage and to better plan empirical testing activities.

Overall, the work shows that the conflict of objectives between mechanical and sensory function in screws can be negotiated through targeted knowledge building, such as quantifying the relationships between design features and functional behavior, and that a compromise solution can be found. The fully integrated measurement chain with wireless data communication opens up the potential in the future to reduce uncertainties in assembly, especially in the tightening factor, by coupling it with a tool. This can reduce the oversizing of screw connections by up to 73 %.

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung zahlreicher Freundinnen und Freunde, Kolleginnen und Kollegen sowie Projektpartnerinnen und Projektpartner während meiner Zeit am IPEK des KIT nicht entstanden. Ihnen allen möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen, für das Vertrauen, Forschungsprojekte eigenständig führen zu dürfen, für die Freiheit, Fehler zu machen, sofern aus ihnen gelernt wird, und für das konsequente Einfordern greifbarer und erlebbarer Prototypen.

Meinem Korreferenten, Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann, danke ich für die Begutachtung dieser Arbeit und für die erfolgreiche Zusammenarbeit im zugrunde liegenden Forschungsprojekt. Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer danke ich herzlich für die Übernahme des Vorsitzes und ihre Unterstützung im Promotionsverfahren.

Mein Dank gilt außerdem allen weiteren Projektpartnerinnen und Projektpartnern der Technischen Universität Darmstadt, insbesondere Prof. Dr. mont. Mario Kupnik, Felix Herbst, David Riehl und Dirk Leiacker. Ohne eure fachliche Expertise, eure Unterstützung und die vertrauensvolle Zusammenarbeit wäre das Forschungsprojekt in dieser Form nicht gelungen.

Allen Kolleginnen und Kollegen am IPEK danke ich für die gemeinsame Zeit. Fachliche und nichtfachliche Diskussionen, zahlreiche Feierabendgetränke, die gemeinsame Bewältigung schwieriger Phasen sowie das Feiern von Erfolgen und gelegentlich auch von Misserfolgen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders gerne erinnere ich mich an die finale Schreibphase mit Jan Heinrich und Johannes. Gemeinsam ist es uns gelungen, Struktur in die Kapitel und Ordnung in die Gedanken zu bringen. Jan Heinrich danke ich außerdem für den Last-Minute-PDF-Export auf seinem Rechner – auf meinem würde er vermutlich noch heute laufen. Markus, Sascha, Felix und Patric danke ich für die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit und für vieles darüber hinaus. Ebenso danke ich allen Abschlussarbeitenden und studentischen Hilfskräften, die ich im Rahmen dieser Arbeit betreuen durfte, insbesondere Nathi und Oliver.

Ein großer Dank gilt den Technischen Diensten, insbesondere Moni, Fabian, Felix, Thomas und Herrn Ganz stellvertretend für das gesamte Team. Eure Unterstützung war für die Durchführung der Versuche und damit für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung.

Auch der IT danke ich für die Rettung wichtiger Daten und dafür, die Funktionsfähigkeit des vermutlich wichtigsten Arbeitsmittels während der gesamten Promotionszeit aufrechtzuerhalten.

Dem Sekretariat, insbesondere Susanne, danke ich für die zuverlässige organisatorische Unterstützung. Ohne deinen Blick für freie Termine in vollen Kalendern hätte nur ein Teil der zahlreichen Forschungsaustausche stattfinden können. Mein Dank gilt ebenso der Administration, insbesondere Heike, Hildegard, Frau Stephan und Isha, für die verlässliche Betreuung der Finanzen und organisatorischen Abläufe in den Forschungsprojekten.

Meinen Freundinnen und Freunden sowie meinen ehemaligen Kommilitoninnen und Kommilitonen danke ich für das regelmäßige Einnorden, für ehrliche Rückmeldungen und dafür, mich immer wieder auf den Boden der Tatsachen zurückzuholen.

Meiner Familie danke ich von Herzen für die beständige Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Promotionszeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Partnerin Niky für ihre Liebe, ihre Geduld und ihre uneingeschränkte Unterstützung. Du hast mir den Rücken freigehalten und hattest jederzeit ein offenes Ohr. Da wir den Weg der Promotion gemeinsam beschreiten, weißt du wie kaum jemand, wie viel diese Unterstützung bedeutet.

Mai 2026 Julian Peters

Irgendwo ist immer eine Schraube locker.

Disclaimer

Im Rahmen dieser Dissertation wurden verschiedene digitale Werkzeuge zur sprachlichen Überarbeitung einzelner Textpassagen eingesetzt. Gemäß den Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie den Leitlinien des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zum Einsatz generativer KI wird der Gebrauch dieser Hilfsmittel hier transparent offengelegt.

Zur Verbesserung von Klarheit, Lesbarkeit und stilistischer Präzision wurden die KI-basierten Sprachmodelle DeepL Write¹ und ChatGPT² eingesetzt. Weiterhin wurde die KI-basierte Rechtschreibprüfung LanguageTool³ verwendet. Die Literaturrecherche wurde durch Elicit⁴ unterstützt. Alle fachlichen Inhalte, wissenschaftlichen Bewertungen, Interpretationen und Ergebnisse wurden vollständig vom Autor erarbeitet und verantwortet. Sämtliche durch KI-gestützte Tools vorgeschlagenen Änderungen wurden individuell auf inhaltliche Korrektheit geprüft.

Diese Offenlegung dient der Nachvollziehbarkeit des wissenschaftlichen Arbeitsprozesses und stellt sicher, dass die Eigenleistungsverpflichtung gemäß guter wissenschaftlicher Praxis gewahrt bleibt.

¹ DeepL Write: KI-gestützter Schreibassistent (DeepL SE). Siehe <https://www.deepl.com/write> (Zugriff: 10.12.2025)

² ChatGPT: KI-gestütztes Sprachmodell (OpenAI). Siehe <https://chatgpt.com> (Zugriff: 10.12.2025)

³ LanguageTool: KI-basierte Rechtschreibprüfung. Siehe <https://languagetool.org/de> (Zugriff: 23.12.2025)

⁴ Elicit: KI-gestützter Rechercheassistent. Siehe <https://elicit.com/> (Zugriff: 23.12.2025)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	xv
Tabellenverzeichnis.....	xxi
Abkürzungsverzeichnis.....	xxiii
Formelzeichen.....	xxv
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung.....	3
2.1 Sensorintegration als Schlüsselement für den Erfolg der Industrie 4.0 und der Digitalisierung in der Industrie	4
2.2 Schrauben als Verbindungselement.....	6
2.2.1 Funktion von Schrauben	7
2.2.2 Normen und Richtlinien	7
2.2.3 Elastische Verspannung und Federmodell	8
2.2.4 Auslegung	9
2.2.5 Spannungsverläufe in Schrauben - Finite-Elemente-Analysen ..	12
2.3 Messen von Kräften.....	15
2.3.1 Sensoren zur Kraftmessung	15
2.3.2 Messkette	19
2.3.3 Mehraxiale Kraftmessung	20
2.3.4 Messfehler und Sensitivität	21
2.4 Sensorintegrierende Schrauben	22
2.5 Methoden der mechatronischen Produktentwicklung und Sensorintegration	25
2.5.1 Richtlinie VDI 2206 zur Entwicklung mechatronischer Systeme	25
2.5.2 Methoden der Sensorintegration.....	28
2.6 Methodik des Testing zum Aufbau von Wissen	30
2.7 Übersicht über die verwendeten Begriffe im Rahmen der Funktion und der Gestalt.....	32
2.8 Fazit zum Stand der Forschung.....	33
3 Motivation und Zielsetzung.....	35
4 Forschungsdesign.....	37

5	Identifikation der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion.....	41
5.1	Kurzzusammenfassung	41
5.2	Methode.....	43
5.2.1	Ablaufdiagramm zum Vorgehen.....	43
5.2.2	Schritt 1: Sensorkonzept.....	45
5.2.3	Schritt 2.1: Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums und initiale Bauraumdefinition	46
5.2.4	Schritt 2.2: Testing-Umgebung.....	49
5.2.5	Schritt 3: Bewertungsgrößen und Randbedingungen.....	49
5.2.6	Schritt 4: Finite-Elemente-Modell	49
5.2.7	Schritt 5.1-5.3: Modellierung des mechanischen Funktionserfüllungsindex	52
5.2.8	Schritt 5.4: Prüfung der FE-Modell-Spannungsergebnisse.....	53
5.2.9	Schritt 5.5-5.7: Modellierung des sensorischen Funktionserfüllungsindex	54
5.2.10	Schritt 5.8: Prüfung der FE-Modell-Dehnungsergebnisse	55
5.2.11	Schritt 6: Kombination der Modelle zur Optimierungsfunktion ...	56
5.3	Ergebnisse.....	57
5.3.1	Initiale Abschätzung der Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums	57
5.3.2	Mechanischer Funktionserfüllungsindex	59
5.3.3	Prüfung der FE-Ergebnisse für die von-Mises-Spannung	61
5.3.4	Sensorischer Funktionserfüllungsindex.....	62
5.3.5	Prüfung der FE-Ergebnisse für die Dehnung.....	63
5.3.6	Verhandlungsmodell: Kombination der Modelle zur Optimierungsfunktion	65
5.4	Beispielanwendung des Verhandlungsmodells.....	66
5.4.1	Gleichzeitige Anforderungen an mechanische und sensorische Funktionserfüllung.....	67
5.4.2	Anforderungen an die mechanische Funktionserfüllung.....	68
5.4.3	Anforderungen an die sensorische Funktionserfüllung.....	69
5.5	Diskussion	70
5.5.1	Vergleich mit dem Stand der Forschung	72
5.5.2	Einschränkungen	74
5.6	Zwischenfazit	75
6	Quantifizierung und Bewertung des funktionalen Verhaltens der sensorintegrierenden Schrauben	77
6.1	Kurzzusammenfassung	77
6.2	Methode.....	78

6.2.1	Bewertungsgrößen des funktionalen Verhaltens der sensorintegrierenden Schrauben	80
6.2.2	Testfälle	81
6.2.3	Testing-Umgebung und Berechnungen	82
6.2.4	Datenerfassung und Nachbereitung	85
6.3	Ergebnisse zum Entwurf und zur Bewertung der Prototypen der sensorintegrierenden Schraube	87
6.3.1	V1: Gerollte zylindrische Dehnungsmessstreifen im Schraubenschaft	87
6.3.2	V2.1: Verformungskörper mit flachen Dehnungsmessstreifen	93
6.3.3	V2.2: Hohlgebohrter Verformungskörper	95
6.3.4	V3: Verformungskörper mit Biegebalken	101
6.3.5	Zusammenfassung und Vergleich der Bewertungsgrößen	103
6.4	Diskussion	106
6.4.1	Einschränkungen	109
6.5	Zwischenfazit zur Beantwortung der Forschungsfrage 2	110
7	Ansatz zur methodischen Unterstützung der Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel einer Befestigungsschraube	113
7.1	Kurzzusammenfassung	113
7.2	Methode	114
7.3	Ergebnisse	117
7.3.1	Fallstudie sensorintegrierende Schraube: Aufbau von Wissen	118
7.3.2	Muster und Beobachtungen im Vorgehen	128
7.4	Diskussion	130
7.4.1	Einschränkungen	132
7.5	Zwischenfazit	133
8	Zusammenfassung und Ausblick	135
8.1	Zusammenfassung	135
8.2	Ausblick	140
8.2.1	Weiterentwicklung der sensorintegrierenden Schraube	140
8.2.2	Nutzung der sensorintegrierenden Schraube	141
8.2.3	Nutzung des methodischen Ansatzes	144
	Literaturverzeichnis	I
	Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden	XV
	Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind	XIX

Glossar.....	XXIII
Anhang A	XXV
Formeln zur Berechnung des Verlaufs der mechanischen Spannungen mit Kerbeeinfluss für Querschnitte ohne Hohlraum.....	XXV
Einfluss der Höhe auf normierte von-Mises-Spannung.....	XXVI
Elementarten und -anzahl des FE-Modells.....	XXVII
Koeffizienten der kurvenangepassten Funktionen der von-Mises-Spannung und der Dehnung	XXVII
Anhang B	XXIX
Technische Zeichnungen der Testing-Umgebung	XXIX
Technische Zeichnungen der sensorintegrierenden Schrauben und der Verformungskörper	XXXI
Zeitverläufe der Testfälle	XXXVI
Anhang C	XLI
Komplette Liste der Fallstudie zur Entwicklung der Sensorintegrierenden Schraube	XLI
Beschreibung weiterer Schritte.....	XLVI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Verspannungsschaubild zentrisch verspannter und belasteter Schraubenverbindungen für Ausgangszustand (links), Montagezustand (Mitte) und Belastung durch FA unter Kopf und Mutter (rechts).....	9
Abbildung 2.2:	Spannungsverlauf in zylindrischen Bauteilen für Zug (a), Biegung (b), Torsion (c) mit dazugehörigen Formeln (Läpple, 2016).....	12
Abbildung 2.3:	Von-Mises-Spannung in Schrauben einer Flanschverbindung zeigen überlagerte Zug- und Biegespannungen (Blachowski & Gutkowski, 2016) Lizenz-Nr.: 6071271273404.....	13
Abbildung 2.4:	Kerbfaktor, Formzahl und Kerbwirkungszahl einer taillierten Schraube (Wiegand et al., 2007).....	14
Abbildung 2.5:	Aufbau eines DMS mit Einzelgitter (links). Wheatstone'sche Brückenschaltung (rechts), mit U_M als Brückenausgangsspannung bzw. Messspannung, U_B als Brückenspeisespannung.	17
Abbildung 2.6:	Messkette von der physikalischen Größe am Messobjekt bis zur digitalen Anzeige, die eine Unterteilung in (nicht-)elektrische, analoge und digitale Größen zeigt (Kupnik, 2024).....	19
Abbildung 2.7:	Verformungskörper zur dreiaxialen Kraftmessung mit vier Dehnungsmessungen auf Basis von T-Rosetten in Halbbrückenverschaltung (Baki et al., 2013).	20
Abbildung 2.8:	Verformungskörper aus dem Stand der Forschung mit drei flachen DMS und einem Temperaturelement auf den ebenen Flächen (Groche & Brenneis, 2014).	22
Abbildung 2.9:	V-Modell für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, basierend auf (VDI/VDE 2206).	26
Abbildung 2.10:	Aufbau von Konstruktionswissen durch Testing, basierend auf (Matthiesen & Grauberger, 2024).....	31
Abbildung 2.11:	Übersicht der verwendeten Begriffe im Rahmen der Funktion bis zu den Gestaltmerkmalen am Beispiel einer Schraubenverbindung. Der Kraftfluss ist nach dem C&C ² Ansatz eingezeichnet (Matthiesen, 2021).....	32

Abbildung 4.1:	Forschungsdesign, welches das Ziel und den Aufbau sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten der Forschungsfragen (FF) zeigt.	38
Abbildung 5.1:	„Graphical abstract“ zur Bauraumidentifikation und -verhandlung im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion, übersetzt aus Peters, Mirbach, Herbst, Riehl, Kupnik et al. (2024).	42
Abbildung 5.2:	Ablaufdiagramm zur Identifikation des Bauraums im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung durch eine Kombination aus Optimierungsfunktion und FE-Modellen.	44
Abbildung 5.3:	Querschnitt in der Kerbe Kopf/Schaft, für den der Spannungsverlauf berechnet wird (links). Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums in der Schraube (rechts).	48
Abbildung 5.4:	Varianten von Gestaltmerkmalen des Bauraums, die in der FE-Analyse modelliert und ausgewertet werden.	50
Abbildung 5.5:	Testing-Umgebung zur Verifizierung der FE-Modellergebnisse (links), Nachbau der Testing-Umgebung in FE-Analyseumgebung Abaqus (rechts).	51
Abbildung 5.6:	Modellentwurf zur Berechnung des mechanischen Funktionserfüllungsindex (MFI).	52
Abbildung 5.7:	Modellentwurf zur Berechnung des sensorischen Funktionserfüllungsindex (SFI).	55
Abbildung 5.8:	Vergleichspunkte zwischen FE-Modell und physischen Testing-Objekt.	56
Abbildung 5.9:	Vergleich der normierten Spannungsverläufe für Zug- (σ_z), Biege- (σ_b in Abhängigkeit zur neutralen Faser) und Torsionsbeanspruchung (τ in Abhängigkeit des Radius, ausschließlich positiv) im Querschnitt der Kerbe Schraubenkopf/-schaft einer M20-Schraube mit und ohne Berücksichtigung des Kerbeeinflusses.	58
Abbildung 5.10:	FE-Ergebnisse der von-Mises-Spannung σ_v	59
Abbildung 5.11:	Von-Mises-Spannung und Kurvenanpassung für Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale d_1 und d_2	61
Abbildung 5.12:	Vergleich der analytischen Berechnung mit den auf den Kerbquerschnitt begrenzten FE-Modellergebnissen der von-	

	Mises-Spannung, normiert auf den Anfangswert der Vollschraube.	62
Abbildung 5.13:	Dehnung und Kurvenanpassung für Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale $d1, d2$	63
Abbildung 5.14:	Vergleich zwischen FE-Ergebnissen und DMS-Messungen an der Außenseite des Schafts (links) und in einer zentrischen Bohrung (rechts).	64
Abbildung 5.15:	Verhandlungsmodell aus der Kombination des mechanischen und sensorischen Funktionserfüllungsindex mit verschiedenen Gewichtungen von $w_{mech} = 1, w_{sens} = 0$ (links oben) bis $w_{mech} = 0, w_{sens} = 1$ (rechts unten).	65
Abbildung 5.16:	Mechanischer Funktionserfüllungsindex (MFI) in Abhängigkeit von $d1, d2$ mit Bedingung $MFI \leq 1,25$ und $d2 = 14$ mm, daraus folgt $d1 \approx 12$ mm.	68
Abbildung 5.17:	Sensorischer Funktionserfüllungsindex (SFI) in Abhängigkeit von $d1, d2$ mit Bedingung $SFI \geq 2,9$ und Montierbarkeitsrandbedingung $d2 \geq d1$, daraus folgt $d1 = d2 =$ 17 mm.	70
Abbildung 6.1:	Sensorkonzept zur mehraxialen Messung von Zug- und Biegebeanspruchung, die in der Schraube in überlagerter Form auftreten können.	79
Abbildung 6.2:	Testing-Umgebung für Testfall 1: Axiale zentrische Beanspruchung in der Universalprüfmaschine.	83
Abbildung 6.3:	Testing-Umgebung für Testfall 3: Dreipunkt-Biegeversuch in der Universalprüfmaschine.	84
Abbildung 6.4:	Miniaturisierte, flexible, modulare Elektronikplattform F ² LECS zur Erfassung und drahtlosen Kommunikation von DMS- Signalen, die komplett in den Schraubenkopf integrierbar ist.	86
Abbildung 6.5:	Prototyp V1 mit drei gerollten DMS im Schaft der Schraube.	88
Abbildung 6.6:	Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für Prototyp V1.	89
Abbildung 6.7:	Testfall 2, Anziehen und Lösen für Prototyp V1.	90
Abbildung 6.8:	Testfall 3, Prototyp V1: Zeitverlaufsdiagramm der Dreipunkt- Biegung aus einer gleichbleibenden Belastungsrichtung.	91
Abbildung 6.9:	Testfall 3 für den Prototyp V1. Sensitivitäten über dem Winkel der Biegebelastung (200 Nm).	92

Abbildung 6.10:	Prototyp V2.1 mit drei flachen DMS, koaxial angeordnet entlang der Schraubenachse, um 120° versetzt, im Abstand von 3,2 mm zur Schraubenmittelachse auf einem Verformungskörper	93
Abbildung 6.11:	Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für die Prototypen V1 und V2.1.....	95
Abbildung 6.12:	Prototyp V2.2 mit 3 DMS koaxial entlang der Schraubenachse, um 120° versetzt, im Abstand von 3,35 mm zur Schraubenmittelachse auf einem Verformungskörper mit zentrischer Bohrung.....	96
Abbildung 6.13:	Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für die Prototypen V1-V2.2.	98
Abbildung 6.14:	Testfall 2, Anziehen und Lösen für die Prototypen V1-V2.2....	99
Abbildung 6.15:	Testfall 3 für die Prototypen V1 (links) und V2.2 (rechts).	100
Abbildung 6.17:	Iteration V3 mit sechs flachen DMS, die zu drei Halbbrücken verschaltet und jeweils auf einem Biegebalken angeordnet sind.	101
Abbildung 6.18:	Vergleich des mechanisch- und des sensorisch-funktionalen Verhaltens anhand der Erhöhung der von-Mises-Spannung, bezogen auf die Vollschraube, $\sigma_v / \sigma_{v,0}$ und der Linearitäts- und Hysteresemessfehler im reinen Zug (Testfall 1).....	105
Abbildung 7.1:	Prozess zum Wissensaufbau in der Mikroebene innerhalb des V- Modells, basierend auf Matthiesen und Grauberger (2024).	116
Abbildung 7.2:	V-Modell als Vorgehen in der Makroebene mit markierten Schritten zum Wissensaufbau	118
Abbildung 7.3:	Darstellung des qualitativen Spannungsverlaufs für Beanspruchungsart Zug mit Kerbfaktoren (links), Markierung geeigneter Bauräume (Mitte) und ein möglicher Sensorbauraum mit Spannungsverlauf und Hohlraumdurchmesser d (rechts).	123
Abbildung 7.4:	Evolution der DMS und Verformungskörper.....	125
Abbildung 7.5:	Abfolge der Schritte zum Aufbau von Wissen	128
Abbildung 8.1:	Evolution der sensorintegrierenden Schraube.	138
Abbildung 8.2:	Qualitativer Darstellung von Spannungsverläufen durch Biegemomente beim Anziehen, verursacht von	

	Winkelabweichungen und Querkräften aus zwei Richtungen (durch Anziehwerkzeug).....	143
Abbildung A.1:	Einfluss des Gestaltmerkmals h_1 , Höhe des Sensorbauraums, auf die Erhöhung der von-Mises-Spannung bezogen zur Vollschraube.	XXVI
Abbildung B.1:	Technische Zeichnung der oberen Platte.	XXIX
Abbildung B.2:	Technische Zeichnung der unteren Platte.	XXX
Abbildung B.3:	Technische Zeichnung des Prototyps V1.	XXXI
Abbildung B.4:	Technische Zeichnung des Prototyps V2.1.	XXXII
Abbildung B.5:	Technische Zeichnung des Verformungskörpers des Prototyps V2.1.....	XXXIII
Abbildung B.6:	Technische Zeichnung des Prototyps V2.2	XXXIV
Abbildung B.7:	Technische Zeichnung des Verformungskörpers des Prototyps V2.2.....	XXXV
Abbildung B.8:	Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V1: DMS- Ausgangsspannung über der Zeit.	XXXVI
Abbildung B.9:	Testfall 2 (Anziehen mit 100 Nm, 150 Nm und 200 Nm) für V1: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit.	XXXVII
Abbildung B.10:	Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V2.1: DMS- Ausgangsspannung über der Zeit.	XXXVII
Abbildung B.11:	Testfall 2 (Anziehen mit 150 Nm) für V2.1: DMS- Ausgangsspannung über der Zeit.	XXXVIII
Abbildung B.12:	Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V2.2: DMS- Ausgangsspannung über der Zeit.	XXXVIII
Abbildung B.13:	Testfall 2 (Anziehen mit 100 Nm, 150 Nm, 200 Nm) für V2.2: DMS-Ausgangsspannung über Zeit.....	XXXIX
Abbildung B.14:	Testfall 3 (Dreipunkt-Biegung aus 33° zu DMS1, Vgl. Abbildung 6.15) für V2.2: DMS-Ausgangsspannung über Zeit.	XXXIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Überblick über die im Rahmen dieser Forschungsarbeit relevanten Normen und Richtlinien	8
Tabelle 2.2:	Auszug von Sensoren zur Kraft- bzw.- Dehnungsmessung, die direkt elektrisch auswertbar sind, basierend auf Ștefănescu (2020), Kleckers (2013).....	16
Tabelle 5.1:	Parameter und Werte zur Berechnung der Spannungsverteilungen mit Berücksichtigung der Kerbformzahl	47
Tabelle 5.2:	Gestaltmerkmale für den Sensormodul-Bauraum, Durchmesser d werden variiert, Höhen h sind konstant. Tabelle angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024).	48
Tabelle 5.3:	Werte zur Berechnung der Beispielanwendungen des Verhandlungsmodells.....	67
Tabelle 6.1:	Testfälle zur Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens. Übersetzt aus Peters, Rappenecker, Mirbach, Herbst, Riehl et al. (2025)	82
Tabelle 6.2:	Bewertungsgrößen zum mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhalten; für Linearitäts- und Hysteresemessfehler sind jeweils die Maxima aller drei DMS aufgeführt, für die Sensitivität der Mittelwert. Werte mit F sind mit F ² LECS erfasst, sonst mit GSV. Werte mit Ausnahme von V3 aus Peters und Rappenecker et al. (2025).....	104
Tabelle 7.1:	Auszug der durchgeführten Schritte zum Wissensaufbau (komplette Auflistung in Tabelle C.1). D: Disziplin, M: mechanisch, S: sensorisch, E: elektronisch.....	119
Tabelle A.1:	Elementarten und -anzahl pro Bauteil im FE-Modell, Tabelle angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).....	XXVII
Tabelle A.2:	Koeffizienten der kurvenangepassten Funktion, die die von-Mises-Spannung in Abhängigkeit von d_1, d_2 beschreibt, angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024).....	XXVII
Tabelle A.3:	Koeffizienten der kurvenangepassten Funktion, die die Dehnung an der Sensorposition in Abhängigkeit von d_1, d_2 beschreibt, angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024). ...	XXVIII

Tabelle C.1:	Übersicht über die durchgeführten Schritte zum Wissensaufbau; D: Disziplin, M: mechanisch, S: sensorisch, E: elektronisch	XLII
--------------	---	------

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Converter (Analog-Digital-Konverter)
ADS1220	AFE mit 24 Bit Auflösung und 4 Eingangskanälen von der Firma Texas Instruments
AFE	Analog-Front-End
BLE	Bluetooth Low Energy (energiesparendes Bluetooth)
DMS	Dehnungsmessstreifen
E-Modul	Elastizitätsmodul
FBGS	Fiber Bragg Grating Sensor (Optischer Sensor auf Basis einer strukturierten Glasfaser zur Messung von Dehnung)
FE	Finite-Elemente
F ² LECS	Flexible Low-Power Embedded Circuit for Strain Gauges in Sensor-Integrating Machine Elements (Flexibler energiesparender eingebetteter Schaltkreis für DMS in sensorintegrierenden Maschinenelementen)
GSV4, GSV8	Mehrkanal Messverstärker für den Einsatz mit DMS von der Firma ME-Meßsysteme
MFI	Mechanischer Funktionserfüllungsindex
PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)
PEID	Produkteingebettete Sensoren
SFI	Sensorischer Funktionserfüllungsindex
SiS	Sensorintegrierende Schraube
SiME	Sensorintegrierendes Maschinenelement
v.E.	vom Messbereichsendwert, gebraucht in Zusammenhang der relativen Messfehlerangabe
Vfk	Verformungskörper

Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
A_0	zutreffende kleinste Querschnittsfläche der Schraube
a, b, c, d	Parameter der Ebenengleichung
B	Wheatstone'scher Brückenfaktor
d_0	Durchmesser zum zutreffenden kleinsten Querschnitt der Schraube
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes
D	Durchmesser
e_{lin}	Linearitätsmessfehler
e_{hyst}	Hysteresemessfehler
E	Elastizitätsmodul (E-Modul)
ENOB	Effektive Bitzahl (Effective Number of Bits)
f_{PA}	Verschiebung der Platte bei axialer Betriebskraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
f_{PM}	Verschiebung der Platte im Montagezustand (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
f_{SA}	Verschiebung der Schraube bei axialer Betriebskraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
f_{SM}	Verschiebung der Schraube im Montagezustand (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
f_Z	Setzbeträge (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
fit_r	Lineare Ausgleichsgerade, Kennlinie
F	Kraft
F_A	Axialkraft, bei Schrauben axiale Betriebskraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)

F_K	Klemmkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
$F_{K\text{ erf}}$	Erforderliche Klemmkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
F_{KR}	Restklemmkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
F_M	Montagevorspannkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
$F_{M\text{ min}}$	erforderliche Mindest-Montagevorspannkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
$F_{M\text{ zul}}$	zulässige Montagevorspannkraft (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
F_{PA}, F_{SA}	Anteil der axialen Betriebskraft, die auf die Platte, Schraube wirkt (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
F_Z	Setzkraftverlust (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
F_z	Kraft in z-Richtung
I	Flächenträgheitsmoment
k	Empfindlichkeit der Dehnungsmessstreifen (k-Faktor)
M	Moment (b: Biegemoment, t: Torsionsmoment, G: Gewinde)
P	Gewindesteigung
r	Radius eines Kreisquerschnitts, Zylinderfläche
R	Widerstand oder Radius
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze der Schraube nach (DIN EN ISO 898-1:2013-05)
U_A, U_B	Brückenausgangs-, Brückenspeisespannung (Wheatstone)
W	Widerstandsmoment des Schraubenschafts
x_a	Messwert
$x_{a\text{ auf}}, x_{a\text{ ab}}$	Messwert bei auf-, absteigender Belastung
X	Bezugswert (zur Ermittlung der Messfehler)
α_k	Kerbfaktor (z: Zug, b: Biegung, t: Torsion)
δ_S, δ_P	Nachgiebigkeit der Schraube, Platte (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)
ε	Dehnung

ε_b	Biegungskomponente der Dehnung im Schraubenschaft
$\varepsilon_{DMSi_{SAb}}$	DMS-Dehnung der Schraube (aus Messung)
ε_{Schaft}	Dehnung im Schaft der Schraube
ε_{SA}	Axialkomponente der Dehnung, Mittelwert der Dehnung im Schraubenschaft
ε_{SAb}	Maximale Dehnung im Schraubenschaft
μ_G	Reibungszahl im Gewinde
ν	Materialausnutzungsfaktor
σ_b	Biegespannung
σ_v	Von-Mises-Spannung
σ_z	Zugspannung
τ_t	Schubspannung

1 Einleitung

Maschinenelemente wie Schrauben, Wellen oder Lager sind unverzichtbare Bestandteile technischer Systeme. Sie erfüllen grundlegende mechanische Funktionen, sind meist genormt, weit verbreitet und bilden oft die strukturelle Grundlage für Kraftübertragung und Lastaufnahme. Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung technischer Produkte gewinnen sensorische Fähigkeiten stark an Bedeutung, sowohl zur Zustandserfassung als auch zur Regelung und Optimierung technischer Systeme. Die Integration sensorischer Funktionen in standardisierte Maschinenelemente bietet daher ein hohes Potenzial, Informationen direkt an mechanisch relevanten Schnittstellen zu erfassen, ohne zusätzliche Bauteile oder Sensorträger einzuführen. Dies eröffnet neue Perspektiven für Zustandsüberwachung, Predictive Maintenance und adaptive Steuerung, insbesondere in hochbelasteten und sicherheitskritischen Anwendungen. Dieser Nachrüstcharakter kann die Hürde zum Einsatz von Sensoren zum Erfassen von aussagekräftigen Messdaten senken und ermöglicht eine skalierbare Digitalisierung. (Hofmann et al., 2022; Kirchner et al., 2024)

Die Herausforderung bei der Integration sensorischer Funktionen in mechanisch hochbeanspruchte Maschinenelemente liegt jedoch im inhärenten Zielkonflikt: Einerseits müssen die mechanische Funktion (lösbare Verbindung durch das Aufbringen von Vorspannkraft herstellen), die standardisierten Schnittstellen und die Auslegungsprinzipien der Maschinenelemente gewahrt bleiben, um die Nachrüstbarkeit zu gewährleisten, andererseits erfordert die Sensorik genügend Bauraum im Innern der Maschinenelemente, um die sensorische Funktion zu erfüllen (aussagekräftige Messdaten zum Zustand kommunizieren). Dieser Konflikt prägt sich besonders am Beispiel der Schraube aus. Diese ist ein standardisiertes, hochbeanspruchtes und zugleich wenig Freiraum bietendes Verbindungselement. Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion systematisch zu untersuchen und durch methodische Ansätze sowie gestalterische Lösungen verhandelbar zu machen.

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich wie folgt:

Nach dieser Einleitung werden in Kapitel 2 die theoretischen und methodischen Grundlagen sowie der Stand der Forschung dargestellt.

Kapitel 3 präsentiert die Motivation und formuliert die Zielsetzung.

Kapitel 4 behandelt das zugrundeliegende Forschungsdesign inklusive der Forschungsfragen.

Die Bearbeitung der drei Forschungsfragen erfolgt in den Kapiteln 5 bis 7.

Kapitel 5 behandelt die Sensormodul-Bauraumidentifikation im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung.

Kapitel 6 behandelt die Quantifizierung des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens von sensorintegrierenden Schrauben, die auf Basis der Bauraumidentifikation entworfen und gefertigt wurden.

Kapitel 7 behandelt einen Ansatz zur methodischen Unterstützung der Sensorintegration.

In Kapitel 8 werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen sowie den aktuellen Stand der Forschung zur Integration von Sensoren in Maschinenelemente mit einem besonderen Fokus auf Schrauben als weitverbreitete Verbindungselemente.

In Kapitel 2.1 wird die Bedeutung der Sensorintegration in Maschinenelemente für die erfolgreiche Digitalisierung in der Industrie erläutert und auf zentrale Herausforderungen hingewiesen. Diese sind die Erfassung hochwertiger Prozessdaten sowie die Anforderungen an integrierbare, kompakte und autarke Sensorlösungen, die das mechanisch-funktionale Verhalten der Maschinenelemente nicht verändern.

In Kapitel 2.2 wird die Schraube als weitverbreitetes Verbindungselement vorgestellt, wobei auf die Funktion „Klemmkraft aufbringen“, die Normung, die elastische Verspannung, die Auslegung sowie die Spannungsverläufe eingegangen wird. Dies dient als Grundlage für die Analyse des mechanisch-funktionalen Verhaltens unter Einfluss der Sensorintegration.

Kapitel 2.3 erläutert das Messen von Kräften, welches die funktionsbezogene zu messende Größe ist.

In Kapitel 2.4 werden bestehende Lösungsansätze sensorintegrierender Schrauben aus der Literatur vorgestellt und hinsichtlich ihrer sensorischen Fähigkeiten und ihrer Auswirkungen auf das mechanische Verhalten der Maschinenelemente analysiert.

In Kapitel 2.5 erfolgt eine Betrachtung relevanter Methodiken zur mechatronischen Produktentwicklung, die für die Integration von Sensoren in Schrauben zu berücksichtigen sind.

Kapitel 2.6 stellt den systematischen Aufbau von fehlendem Wissen durch die Methodik des Testing vor.

Kapitel 2.8 schließt den Stand der Forschung mit einem Fazit ab.

2.1 Sensorintegration als Schlüsselement für den Erfolg der Industrie 4.0 und der Digitalisierung in der Industrie

Die Industrie 4.0 bleibt weiterhin ein relevantes Forschungsgebiet, der Fokus verlagert sich auf KI-basierte Echtzeit-Zustandsüberwachung, datengetriebene Produktion und smarte, nachhaltige Produktionsanlagen (Rejeb, Rejeb, Süle, Hassoun & Keogh, 2025). Diese Themen vereint der Bedarf an Messdaten zum Zustand der Maschinen und Anlagen. Echtzeitdaten zum Zustand dieser können Ausfallzeit und Wartungskosten senken (Antao, Reis & Goncalves, 2018; Djidrov, 2024; Drent, Drent, Arts & Kapodistria, 2023). Insbesondere bei Systemen wie Offshore-Windkraftanlagen sind Sensorsysteme zur echtzeitbasierten Zustandsüberwachung notwendig, um lange Ausfallzeiten zu senken und die Energiekosten niedrig zu halten (Daneshi-Far, Capolino & Henao, 2010; Moradzadeh & Vandevelde, 2024; Yang, Tavner, Crabtree, Feng & Qiu, 2014).

Fleischer, Klee, Spohrer und Merz (2018) postulieren, dass die Industrie 4.0 erst zur Revolution werden kann, wenn „flächendeckende Sensoren die Datenbasis für neue Anwendungen liefern“. Kirchner, Martin und Vogel (2018) führen dazu aus, dass im Zuge aktueller Megatrends mit Bezug zu Industrie 4.0 der Fokus eher auf dem Generieren von großen Mengen an Daten und deren Sicherheit liegt und weniger auf der Qualität der Daten. Kirchner et al. (2024) differenzieren, dass die begrenzte Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Prozessdaten ein zentrales Hindernis für die Digitalisierung und die Industrie 4.0 ist. Als Ursache wird das Fehlen kompakter, autonomer und kostengünstiger Sensoren benannt, die einfach in Maschinen integrierbar sind (Kirchner et al., 2024).

Kanoun et al. (2021) sehen einen signifikanten Vorteil von flexibel und einfach einsetzbaren, drahtlosen, autarken und nachrüstbaren Sensormodulen für die Digitalisierung in der Industrie, inklusive Produktionsleistung oder vorausschauender Wartung. Auch Strauss, Schmitz, Wostmann und Deuse (2018) zeigen einen Bedarf an nachrüstbaren und kostengünstigen Sensoren für die vorausschauende Wartung im Rahmen der Industrie 4.0 auf.

Als Lösung wird vorgeschlagen, Sensormodule in standardisierte Maschinenelemente (ME) zu integrieren (Kirchner et al., 2024). Derartige ME mit sensorischen Funktionen ermöglichen:

- Eine Messung direkt im mechanischen Prozess, was eine höhere Messqualität zur Folge hat (Kirchner et al., 2024; Vorwerk-Handing, Gwosch, Schork, Kirchner & Matthiesen, 2020),

- Eine platzsparende und robuste Integration in bestehende Systeme, da die standardisierten Schnittstellen der Maschinenelemente genutzt werden (Kirchner et al., 2024; Vorwerk-Handing et al., 2020),
- Eine skalierbare und nachrüstbare Digitalisierung durch die Verwendung standardisierter Maschinenelemente als Träger der Sensormodule (Kirchner et al., 2024).

Vorwerk-Handing et al. (2020) klassifiziert ME mit sensorischen Funktionen je nach dem Zusammenhang zwischen der zu messenden Zielgröße und der Funktion des ME in:

- sensortragende ME, bei denen die zu messende Zielgröße nicht mit der Funktion des Maschinenelements zusammenhängt, wie bspw. eine Schraube mit einem integrierten Temperatursensor,
- sensorintegrierende ME (SiME), bei denen die zu messende Zielgröße in direktem Zusammenhang zur Funktion steht, wie bspw. eine Schraube mit einem integrierten Kraftsensor,
- sensornutzbare ME, bei denen die elektrischen Eigenschaften des ME oder vielmehr seines Materials direkt als Messgröße verwendet werden können, wie bspw. die Kapazität zwischen dem Innen- Außenring sowie den Kugeln eines Lagers zur Radialkraftmessung (Vorwerk-Handing et al., 2020).

Als Herausforderung wird identifiziert, dass die Maschinenelemente durch die strukturintegrierten oder vielmehr eingebetteten Sensormodule Spannungskonzentrationen erfahren, die zu einer Verringerung der Tragfähigkeit bzw. der Beanspruchbarkeit führen können (Dumstorff, Paul & Lang, 2014; Kirchner et al., 2024). Dazu fehlt es momentan an Methoden und Richtlinien, die diese Änderung im mechanisch-funktionalen Verhalten quantifizieren und berücksichtigen (Kirchner et al., 2024; Peters et al., 2022).

Sensorintegrierende Maschinenelemente (SiME) können auch als produktintegrierte Sensoren betrachtet werden. Im Rahmen von Forschungsarbeiten am Institut für Produktentwicklung wurden diese im Zusammenhang mit Power-Tools erforscht. Dort ermöglichen sie die kontinuierliche, unbeobachtete und skalierbare Erfassung von Nutzungsdaten, was für die datengetriebene Produktentwicklung entscheidend ist (Dörr, Peters & Matthiesen, 2021; Dörr, Ott, Matthiesen & Gwosch, 2021). Produktintegrierte Sensoren werden mit fortschreitender Miniaturisierung informationstechnologischer Erweiterungen als im Produkt eingebettete Sensoren (PEID) betrachtet und je nach Ausmaß der eingebetteten Messkette klassifiziert: Als fortschrittlichster Typ D zählt hierbei ein Sensormodul für smarte Produkte, das Sensor, Speicher, Mikroprozessor, Energieversorgung und Kommunikation integriert (Jun, Shin, Kim, Kiritsis &

Xirouchakis, 2009). Die in dieser Forschungsarbeit geplanten sensorintegrierenden Maschinenelemente können als Typ D bezeichnet werden.

Grauberger et al. (2024) führen als eine zentrale Herausforderung im Rahmen der Kreislauffabrik die Analyse der aus dem Feld zurückkommenden Subsysteme und Komponenten an, um die Wiederverwendbarkeit und Erneuerbarkeit zu bewerten. SiME als PEID vom Typ D können hierbei einen wesentlichen Beitrag leisten, da sie die Daten zur Beanspruchungshistorie individueller ME bereitstellen können. Diese ist notwendige Eingangsgröße für datengetriebene Modelle zur Bewertung der Wiederverwertbarkeit (Afifi et al., 2025; Kim et al., 2024). Rajput und Singh (2021) bezeichnen die Digitalisierung und insbesondere Sensortechnologien als Hürden für den erfolgreichen Einsatz der Kreislaufwirtschaft.

Besonders vielversprechend ist die Sensorintegration in das Maschinenelement Schraube. Schrauben gehören zu den mit am weitest verbreiteten Maschinenelementen und werden als Befestigungsschrauben üblicherweise im Kraftfluss eingesetzt (Steinhilper & Sauer, 2012). Somit eröffnet eine sensorintegrierende Schraube (SiS) das Potenzial, neben ihrer eigenen Beanspruchung auch Prozesskräfte zu messen.

2.2 Schrauben als Verbindungselement

Im Rahmen dieser Dissertation werden ausschließlich Schrauben der Kategorie „Verbindungselemente mit metrischem Gewinde“ betrachtet, die als Befestigungsschrauben eingesetzt werden. Diese werden im weiteren Verlauf als „Schraube“ bezeichnet.

Es wird zwischen Durchschraub- und Auf- bzw. Einschraubverbindungen unterschieden. Im ersten Fall wird die Verspannung der Fügeteile durch das Anziehen einer Mutter auf dem Gewinde der Schraube erreicht. Im zweiten Fall wird die Schraube in einem Gegengewinde angezogen, das in eines der Fügeteile geschnitten wurde. (Steinhilper & Sauer, 2012)

Für diese Forschungsarbeit ist es besonders wichtig zu verstehen, was die Funktion einer Schraube ist, wie sie erfüllt wird, welche Normen gelten, welche Kräfte auf eine Schraube wirken und wie eine Schraube ausgelegt wird. Auf diese Punkte wird im Folgenden eingegangen.

2.2.1 Funktion von Schrauben

Die Funktion von Schrauben als Verbindungselement besteht darin, eine lösbare Verbindung zwischen Bauteilen herzustellen (Steinhilper & Sauer, 2012; Wiegand, Kloos & Thomala, 2007). Dabei werden zwei oder mehr Bauteile form- oder kraftschlüssig miteinander verbunden, ohne diese dauerhaft zu verändern (Wiegand et al., 2007).

Zur Erfüllung dieser Funktion wird in der Regel eine ausreichende Flächenpressung durch eine Klemmkraft in der Trennfuge benötigt. Durch die Montage, dem Eindrehen der Schraube im Gewinde, wird eine Montagevorspannkraft aufgebracht, die zu einer elastischen Verspannung der Schraube und der Füge Teile führt.

Dies wird durch das Eindrehen der Schraube im Gewinde erreicht (Montage), wodurch eine elastische Verspannung der Schraube und der Füge Teile erreicht wird. Dadurch entsteht die Montagevorspannkraft zwischen dem verschraubten Teil des Gewindes und dem Schraubenkopf, die in der Trennfuge eine Klemmkraft bewirkt (Abbildung 2.1). Diese unterbindet das Aufklaffen der Schraubenverbindung, bspw. bei axialer Belastung in einer Flanschverbindung. Weiterhin entsteht ein Kraftschluss in der Trennfuge, der Querkräfte aufnehmen kann, bspw. bei einer Laschenverbindung. (Steinhilper & Sauer, 2012, S. 275; VDI 2230 Blatt 1: 2015-11; Wiegand et al., 2007, S. 135)

2.2.2 Normen und Richtlinien

Schrauben sind in ihren Maßen, Benennungen und funktionellen Eigenschaften genormt. In Tabelle 2.1 befindet sich ein Überblick der für diese Forschungsarbeit relevanten Normen und Richtlinien. In diesen sind u. a. Begriffe sowie Gestaltmerkmale der Schnittstellen des Kopfs und des Gewindes spezifiziert. Außerdem sind Materialeigenschaften spezifiziert und Berechnungen zur Auslegung und Tragfähigkeitsberechnung aufgeführt.

Tabelle 2.1: Überblick über die im Rahmen dieser Forschungsarbeit relevanten Normen und Richtlinien

DIN 2244:2002-05	Gewinde - Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde (Nenndurchmesser, Kerndurchmesser, Gewindesteigung etc.).
DIN 13-1:1999-11	Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde; Gewinde-Nenndurchmesser von 1 mm bis 68 mm. In dieser Arbeit wird die Sensorintegration an einer Schraube mit dem Gewinde M20 durchgeführt.
DIN EN ISO 4014:2022-10	Verbindungselemente - Sechskantschrauben mit Schaft, Produktklassen A und B (Gewinde M1,6 bis M39). Spezifikation von Werten für relevante Gestaltsmerkmale von Schaftschrauben bspw. Schaftdurchmesser, Kopfrundungsradien.
DIN EN ISO 898-1:2013-05	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde. Spezifikation von Dehn Grenzen u. a.
VDI 2230 Blatt 1: 2015-11	Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, zylindrische Einschraubenverbindungen. Berechnung von Montagevorspannkraften u. a.

2.2.3 Elastische Verspannung und Federmodell

Die verspannten Teile wirken in Form von Federn als Kraftspeicher. Das Verspannungsschaubild zeigt die wirkenden Kräfte und Verschiebungen einer zentrisch verspannten Verbindung (Abbildung 2.1). Die beim Anziehen erzeugte Vorspannkraft F_M erzeugt eine Klemmkraft F_K in der Trennfuge. Eine axiale Betriebskraft F_A wirkt dabei anteilig auf die verspannte Trennfuge, also die Platten (F_{PA}) sowie die Schraube (F_{SA}). Der Anteil ist abhängig von der Geometrie, der Krafteinleitung und der Nachgiebigkeit der verspannten Bauteile. Die auf die Schraube wirkende Kraft setzt sich somit aus der Vorspannkraft und dem auf die Schraube wirkenden Anteil der Betriebskraft zusammen. Zusätzliche Effekte wie Temperatúrausdehnung und Setzen können die Klemmkraft und letztendlich auch die auf die Schraube wirkende Kraft beeinflussen. Die Formeln zur Berechnung dieser Kräfte sind in VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 zu finden.

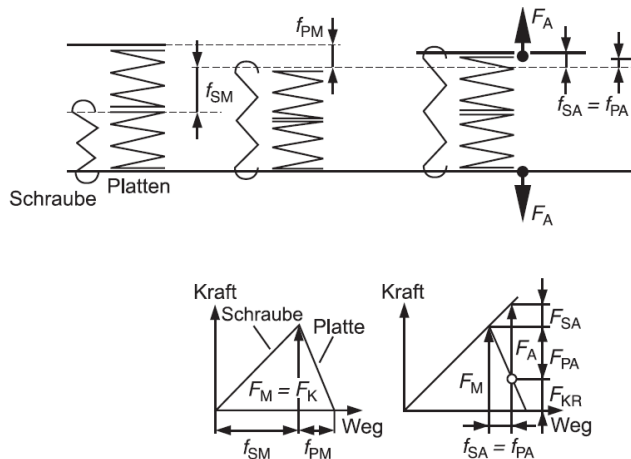


Abbildung 2.1: Verspannungsschraubverbindung zentrisch verspannter und belasteter Schraubenverbindungen für Ausgangszustand (links), Montagezustand (Mitte) und Belastung durch F_A unter Kopf und Mutter (rechts). Vorspannkraftänderungen wie das Setzen würden von F_M subtrahiert werden, sind hier jedoch nicht eingezeichnet. Abbildung aus VDI 2230 Blatt 1: 2015-11.

Im Federmodell von Schraubenverbindungen führt eine höhere Nachgiebigkeit der Schraube zu einer Reduzierung der Beanspruchung durch eine axiale Betriebskraft F_A , was insbesondere unter Ermüdungsgesichtspunkten vorteilhaft ist (Wiegand et al., 2007). Im Stand der Technik werden sogenannte taillierte Schrauben oder Dehnschrauben mit reduziertem Schaftquerschnitt gezielt als Maßnahme gegen Ermüdung eingesetzt.

2.2.4 Auslegung

Schrauben sind in der Regel nur für eine Belastung in Richtung Längsachse ausgelegt (Axialkraft) und sollen nicht quer dazu belastet werden (Scherkraft). Querkraft zwischen den verspannten Fügebauteilen werden daher durch Kraftschluss in den Trennfugen übertragen. Dies erfordert eine genügend hohe Montagevorspannkraft der Schraube, um Flächenpressungen in den Trennfugen zu erreichen. Andere Schraubenverbindungen zur Aufnahme von Querkraften durch Formschluss wie die Scherlochlaibungsschraubverbindung werden hier nicht betrachtet. (Steinhilper & Sauer, 2012, S. 289)

Ein detailliertes Vorgehen mit Rechenschritten zur Auslegung einer Schraubenverbindung ist in der Richtlinie VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 zu finden. Im Folgenden werden für das Verständnis der vorliegenden Forschungsarbeit notwendige Auszüge daraus gezeigt.

Die Beanspruchung einer Schraubenverbindung ist vielfältig. Neben der axialen Beanspruchung durch die Vorspannkraft und zentrisch axiale Betriebskräfte verursachen exzentrische Betriebskräfte auch Biegemomente oder Torsionsmomente, je nachdem ob sie axial oder quer zur Schraubenachse wirken. Bereits beim Anziehen wird ein hohes Torsionsmoment eingeleitet. (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)

Im Betriebszustand setzt sich die auf die Schraube wirkende Gesamtkraft aus der zulässigen Montagevorspannkraft $F_{M\text{ zul}}$ und dem auf die Schraube wirkenden Anteil der Betriebskraft F_{SA} zusammen. F_{SA} kann sich aus einer axialen Betriebskraft und einem entsprechend umgerechneten Betriebsmoment zusammensetzen. Es werden Faktoren verrechnet, die den Einfluss des jeweiligen Kraft- bzw. Momenteinleitungsorts und Schrägstellungen bspw. des Kopfes berücksichtigen. (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)

Die Betriebskraft beträgt in der Regel nur wenige Prozent der Schraubengesamtkraft. Freiwerdende Beanspruchungsreserven durch den Abbau der Torsionsspannung nach der Montage können sogar die Betriebsbelastung teilweise kompensieren. (Wiegand et al., 2007, S. 131)

Den größten Teil der auf die Schraube wirkenden Belastung entsteht durch die Montagevorspannkraft. Die maximal zulässige Montagevorspannkraft $F_{M\text{ zul}}$ berechnet sich nach Gleichung 2.1 zu

$$F_{M\text{ zul}} = \frac{v R_{p0,2min} A_0}{\sqrt{1 + 3 \left[\frac{3d_2}{2d_0} \left(\frac{P}{\pi d_2} + 1,155 \mu_{G\text{ min}} \right) \right]^2}} \quad 2.1$$

Der Term im Zähler berücksichtigt die Beanspruchung durch die Vorspannkraft, der Term im Nenner die Beanspruchung durch das Torsionsmoment im Anziehprozess. Das Symbol v steht für den Ausnutzungsfaktor der Streckgrenze (in der Regel auf 90 % festgelegt), $R_{p0,2min}$ für die Mindeststreckgrenze der Schraube (DIN EN ISO 898-1:2013-05), A_0 für die minimale Querschnittsfläche der Schraube und d_0 für den Durchmesser an dieser Stelle, d_2 für den Flankendurchmesser des Gewindes. P ist

die Gewindesteigung und μ_{Gmin} der Reibwert des Gewindes. Der Wert $R_{p0,2min}$ ist ein materialspezifischer Wert, der nicht überschritten werden darf, um plastische Verformung zu vermeiden. Das bedeutet, dass F_{Mzul} direkt an den minimalen Querschnitt A_0 und den Durchmesser d_0 gekoppelt ist: Je geringer diese Werte, desto geringer ist die zulässige Montagevorspannkraft. Im Fall statischer Beanspruchung wird die Schraube normalerweise an der Stelle des kleinsten Querschnitts versagen. (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)

Um eine geforderte Montagevorspannkraft zu erreichen, muss eine Schraube korrekt angezogen werden. Beim Anziehen werden etwa 90 % des Drehmoments für die Überwindung der Reibung an Kopf und Gewinde aufgebracht (Bickford, 2007). Daraus resultiert beim Anziehen ein überlagerter Torsionsmoment zwischen Kopf/Werkzeug und Gewinde (Bickford, 2007; Rousseau & Bouzid, 2024), zusätzlich zur axialen Klemmkraft und den zuvor beschriebenen Biegemomenten.

Der Vorspannkraftverlust einer Schraube durch Setzen (F_Z) liegt in einer Größenordnung, die die sensorintegrierende Schraube von der Auflösung her minimal erfassen können sollte. Er hängt von der Art der Betriebsbelastung, der Anzahl der Trennfugen sowie der Größe der Rauigkeit der gepaarten Oberflächen ab (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11). Die Größenordnung beträgt wenige Prozent bei Stahl/Stahl Paarungen bis zu über zehn Prozent bei lackierten Trennfugen (Stranghöner, Makevičius, Henkel, Glienke & Dörre, 2018). Zur Vereinfachung der Berechnung existieren Setzbeträge (f_Z) für verschiedene Parameterkombinationen. Zusammen mit den Nachgiebigkeiten der Schraube (δ_s) und verspannten Platten (δ_p) kann der Vorspannkraftverlust durch Setzen nach Gleichung 2.2 (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11) berechnet werden:

$$F_Z = \frac{f_Z}{\delta_s + \delta_p}. \quad 2.2$$

Die Streuung im Montageprozess wird durch den Anziehfaktor berücksichtigt. Dieser erhöht die maximale Montagevorspannkraft, die die Schraube ertragen können muss und führt zu einer Überdimensionierung der Schraubenverbindung. Je nach Verfahren müssen Faktoren zwischen 1,1 und 4 berücksichtigt werden. Die kleinsten Faktoren (1,1 bis 1,5) werden bei Anziehverfahren mit Längungsmessung verwendet, da sich die funktional relevante Größe Vorspannkraft damit mit geringer Unsicherheit bestimmen lässt. Die größten Faktoren werden bei Verfahren verwendet, die die erreichte Vorspannkraft durch der Hilfsgröße Drehmoment

berechnen müssen (1,4 bis 2,5), oder für Schlagschrauber (2,5 bis 4). In der Regel sind die Reibwerte, die für die Umrechnung von Drehmoment in Vorspannkraft benötigt werden, nur ungenau bekannt. Dies führt zu einer großen Streuung in diesen Verfahren und somit zu einer hohen notwendigen Überdimensionierung. (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11)

Bei dynamischer oder schwingender Beanspruchung versagen Schrauben gewöhnlicherweise an den Stellen mit den höchsten Spannungsamplituden, die üblicherweise in den Kerbstellen auftreten (Illgner & Esser, 2001; Wiegand et al., 2007). Aus diesem Grund werden im Folgenden die Spannungsverläufe und die Kerben von Schrauben näher betrachtet.

2.2.5 Spannungsverläufe in Schrauben - Finite-Elemente-Analysen

Um die Platzierung von Sensormodulen im Inneren der Schraube und die dazugehörigen Tragweiten abschätzen zu können, muss der Spannungsverlauf in der Schraube bekannt sein. Schrauben sind im Grunde zylindrische Bauteile, die durch Zug, Biegung und Torsion beansprucht werden können (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11). Abbildung 2.2 zeigt den qualitativen Spannungsverlauf unter allen drei Beanspruchungsrichtungen in zylindrischen Bauteilen. Zug hat einen konstanten Spannungsverlauf über dem Querschnitt. Biege- und Schubspannung steigen dagegen linear mit dem Abstand zur Mittelachse und führen somit im Zentrum zu einer geringeren Spannung als in den Randbereichen.

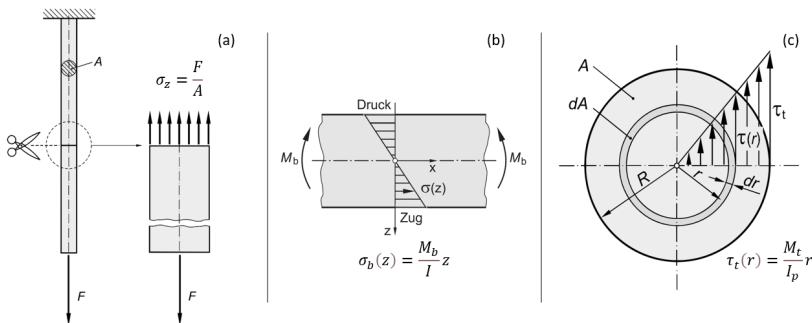


Abbildung 2.2: Spannungsverlauf in zylindrischen Bauteilen für Zug (a), Biegung (b), Torsion (c) mit dazugehörigen Formeln (Läpple, 2016).

Die verschiedenen Spannungszustände können in realen Anwendungen überlagert auftreten. So zeigen die Finite-Elemente-(FE-)Analysen von Blachowski und Gutkowski (2016) überlagerte Zug- und Biegespannungen von M20-Schrauben in einer Flanschverschraubung eines Telekommunikationsmastes. Die höchsten Spannungen treten dabei auf der Zugseite der Biegung auf. Insbesondere bei Flanschverbindungen mit Dichtmedium in der Trennfuge entstehen Biegemomente (Abid & Nash, 2006).

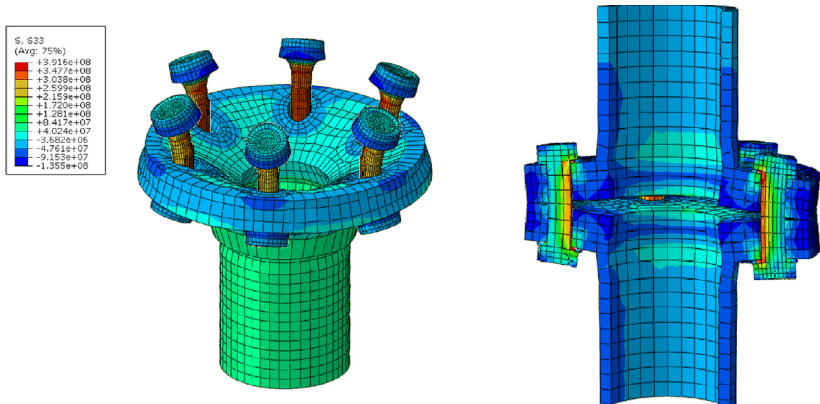


Abbildung 2.3: Von-Mises-Spannung in Schrauben einer Flanschverbindung zeigen überlagerte Zug- und Biegespannungen (Blachowski & Gutkowski, 2016) Lizenz-Nr.: 6071271273404.

Eine Schraube ist ein stark gekerbtes Bauteil. Die Kerben führen zu einer Erhöhung der Spannung im Kerbgrund. Diese können durch Kerbfaktoren beschrieben werden. Die Kerbe mit dem größten Einfluss befindet sich am ersten Gewindegang des eingreifenden Gegengewindes (Mutter oder Platte) mit $\alpha_k = [4..10]$, gefolgt vom Übergang von Kopf zu Schaft mit $\alpha_k = [3..5]$.

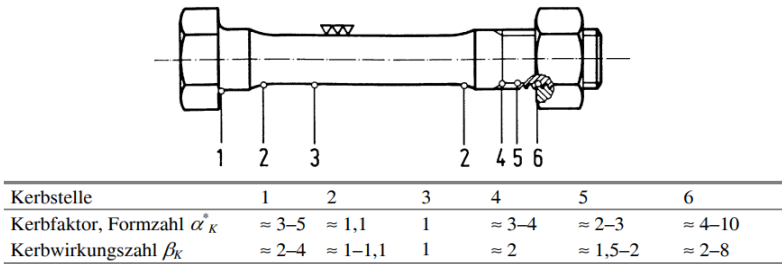


Abbildung 2.4: Kerbfaktor, Formzahl und Kerbwirkungszahl einer taillierten Schraube (Wiegand et al., 2007).

Kerben führen insbesondere an den Rändern zu erhöhten Spannungen. Im Zentrum sinkt die Spannung, da die gesamte Spannung im Querschnitt konstant bleiben muss, wie durch Gleichung 2.3

$$F_z = \int \sigma_z dA \tag{2.3}$$

beschrieben wird (Hibbeler, 2021). Dabei ist σ_z die Normalspannung und A die Querschnittsfläche.

Im Folgenden sind die Gleichungen zur Berechnung der Zug-, Biege- und Torsionsspannung für einen Querschnitt mit Außendurchmesser D und Hohlbohrung d sowie die Kerbfaktoren α dargestellt. Für einen Vollquerschnitt wird $d = 0$ gesetzt. Bei $d = D$ gehen die Spannungen gegen unendlich, da kein Material mehr vorhanden ist. Die maximale Zugspannung wird auf Basis des elementaren Zusammenhangs für Zugspannungen $\sigma = F/A$ (Läpple, 2016) nach Gleichung 2.4 berechnet:

$$\sigma_{z,Kerbe}(d) = \frac{F_M + F_{SA}}{\frac{\pi(D-d)^2}{4}} \cdot \alpha_z. \tag{2.4}$$

Die wirkende Zugkraft ist hierbei die Summe aus Montagevorspannkraft F_M und Anteil der Betriebskraft F_{SA} auf die Schraube. Analog ergeben sich die maximalen Biege- und Schubspannung nach Gleichungen 2.5, 2.6:

$$\sigma_{b,Kerbe}(d) = \frac{F_{SA} \cdot s}{\frac{\pi D^3}{32}} \cdot \frac{D^4}{D^4 - d_{int}^4} \cdot \alpha_b, \quad 2.5$$

$$\tau_{t,Kerbe}(d) = \frac{M_G}{\frac{\pi D^3}{16}} \cdot \frac{D^4}{D^4 - d_{int}^4} \cdot \alpha_t. \quad 2.6$$

Diese bauen auf den Grundgleichungen aus Abbildung 2.2 (Läpple, 2016) auf. Das wirkende Biegemoment wird aus der Kraft F_{SA} multipliziert mit dem Hebelarm s berechnet. Das Gewindemoment M_G ist der VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 zu entnehmen.

2.3 Messen von Kräften

2.3.1 Sensoren zur Kraftmessung

Eine Kraft ist nicht direkt messbar. Sie kann nur über ihre Wirkung auf ein Objekt gemessen werden, bspw. durch eine Verformung oder Dehnung eines Körpers. Mithilfe der Materialparameter oder einer geeigneten Kalibrierung kann aus der Dehnung die Kraft berechnet werden. (Kupnik, 2024; Ștefănescu, 2011)

Gemäß dem allgemeinen Verhalten linear-elastischer Materialien (Hookesches Gesetz) ergibt sich die Dehnung ε aus der Kraft F , dem Elastizitätsmodul E und dem Querschnitt A für den einachsigen Spannungszustand nach Gleichung 2.5 (Ștefănescu, 2011):

$$\varepsilon = \frac{F}{EA}. \quad 2.7$$

Daraus lässt sich ableiten, dass bei einem kleineren Querschnitt die Dehnung steigt, sofern die Kraft und das Elastizitätsmodul konstant bleiben. Für einen Sensor erhöht sich somit die Sensitivität.

In Tabelle 2.2 sind Sensoren aufgelistet, die zur Messung der Kraft durch eine Dehnungsmessung eingesetzt werden und deren Signal direkt elektrisch ausgewertet werden kann. Dies ist für die weitere Verarbeitung der Messdaten und der Digitalisierung von Vorteil.

Tabelle 2.2: Auszug von Sensoren zur Kraft- bzw.- Dehnungsmessung, die direkt elektrisch auswertbar sind, basierend auf Ștefănescu (2020), Kleckers (2013).

Sensortyp	Physikalisches Wandlungsprinzip	Bewertung
Resistive Dehnungsmessstreifen (DMS)	Dehnung wird in eine Widerstandsänderung gewandelt, die elektrisch messbar ist.	(+) Hohe Genauigkeit, Langzeitstabilität in Nullpunkt und Sensitivität, statische und dynamische Messung möglich, günstig, vielseitig, Kompensation bestimmter Einflüsse (Temperatur, Kriechen) möglich (-) Unsicherheit durch Applikation, Kalibrierung erforderlich
Piezo-elektrische Kraftsensoren	Kraft wird in eine elektrische Ladung gewandelt, die proportional zur Kraft ist.	(+) Robust, durch steifen Aufbau dynamische Messung geringer Kräfte möglich, Überlastfähigkeit erreichbar, geringe Temperaturabhängigkeit (-) Drift, schlecht geeignet für statische Messung kleiner Kräfte über längeren Zeitraum
Glasfasersensor (FBGS)	Messung der Reflexion des Lichts in einer Glasfaser, die durch Dehnung verändert wird.	(+) Hohe Genauigkeit, unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen, chemisch stabil (-) Hohe Temperaturabhängigkeit, teuer

Im Folgenden werden die resistiven DMS näher beleuchtet, da diese aufgrund der guten Bewertung in dieser Forschungsarbeit verwendet werden. Diese basieren auf dem Effekt der elektrischen Widerstandsänderung eines Drahtes (Messgitter), der auf einer Trägerfolie aufgebracht ist, in Folge einer Dehnung (Abbildung 2.5). Ein DMS kann ebenso mehrere Messgitter beinhalten, sodass unterschiedliche Dehnungsrichtungen messbar sind. Diese werden als Rosetten bezeichnet und

haben in der Regel definierte Ausrichtungen der Gitter zueinander, wie bspw. das „T“. Gleichung 2.8 zeigt den Zusammenhang zwischen Dehnung und Messgröße eines DMS (Keil, 2017):

$$\varepsilon k = \frac{\Delta R}{R}. \quad 2.8$$

Die physikalische Dehnung, der der Dehnungsmessstreifen ausgesetzt ist, wird durch ε beschrieben. Die Empfindlichkeit des DMS ist k . Die Widerstandsänderung ist ΔR , während R den Nennwiderstand des unbelasteten DMS beschreibt. Bei höheren Dehnungen entsteht also eine proportional größere Messsignaländerung.

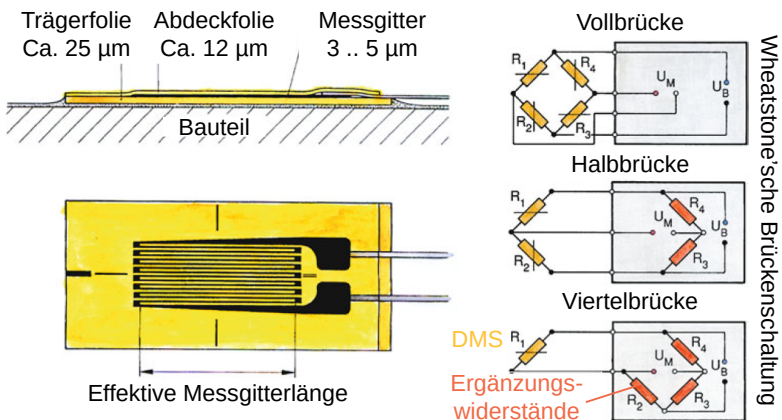


Abbildung 2.5: Aufbau eines DMS mit Einzelgitter (links). Wheatstone'sche Brückenschaltung (rechts), mit U_M als Brückenausgangsspannung bzw. Messspannung, U_B als Brückenspeisespannung. Abbildungen aus Keil, 2017.

Die Änderung des elektrischen Widerstands kann durch eine Spannungsänderung an einer Widerstandsbrücke gemessen werden. Hierbei wird üblicherweise die „Wheatstone'sche Brückenschaltung“ (Wheatstone, 1843) verwendet, die die genaue Messung elektrischer Widerstände ermöglicht. Sie besteht aus vier Widerständen (Abbildung 2.5). Dabei können ein, zwei oder alle vier Widerstände

aus DMS bestehen, was als Viertel-, Halb- oder Vollbrücke bezeichnet wird (Keil, 2017).

Je nach Anzahl, Ausrichtung und Konfiguration der DMS in einer Wheatstone'schen Brücke können verschiedene Brückenverstärkungen erreicht werden oder gezielt Einflüsse kompensiert werden. Darunter zählen bspw. temperaturbedingte Widerstandsänderungen. Weiterhin ist es möglich, Axial-, Biege oder Torsionsdehnungen zu kompensieren und somit überlagerte Beanspruchungsarten zu trennen. Wenn bspw. nur eine Biegedehnung gemessen werden soll, kann die Axialdehnung kompensiert werden. (Keil, 2017)

Gleichung 2.9 zeigt den Zusammenhang der Dehnung mit der Messspannung der Wheatstone'schen Brücke mit B als Brückenfaktor, U_A als Brückenausgangsspannung und U_B als Brückenspeisespannung (Keil, 2017; Ștefănescu, 2011).

$$\varepsilon = \frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{U_A}{U_B} \quad 2.9$$

Der Brückenfaktor B ist dabei abhängig von der Ausrichtung und Verschaltung der DMS. In Abbildung 2.7 ist eine Halbbrückenschaltung mit DMS in der Anordnung als T-Rosette dargestellt, beide Messgitter sind auf derselben Fläche eines Balkens. Dadurch wird sich bei axialer Beanspruchung der Widerstand des Längsgitters erhöhen und der des Quergitters aufgrund der Querkontraktion verringern. Der Brückenfaktor B ist hierbei $(1 + \nu)$, mit ν als Querkontraktionszahl.

Gleichung 2.10 stellt den Zusammenhang von axialer Kraft F_A mit der Ausgangsspannung der Wheatstone-Brücke unter Zugbeanspruchung bei linear-elastischen Materialverhalten dar.

$$F_z = A_0 \sigma_z = A_0 E \varepsilon_z \Rightarrow F_A \propto \varepsilon_z \quad 2.10$$

Symbol A_0 bezeichnet hier die kleinste wirksame Querschnittsfläche unter Berücksichtigung des Kraftflusses, σ_z ist die Normalspannung, ε_z die Normaldehnung, E das Elastizitätsmodul.

2.3.2 Messkette

Die Messkette von der physikalischen Größe bis zur digitalen Anzeige ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Der Messaufnehmer formt die nicht-elektrische (physikalische) Messgröße in ein elektrisches Messsignal um. Er ist also die Schnittstelle zwischen der nicht-elektrischen (mechanischen) und der elektrischen Welt. Der messgrößenempfindliche Teil des Messaufnehmers ist der Sensor. Passive Sensoren wie Dehnungsmessstreifen (DMS) benötigen zur Wandlung externe Energie. (Kupnik, 2024)

Das elektrische Messsignal wird bei Bedarf verstärkt, getrennt oder angepasst und dann von einem Analog-Digital-Konverter (ADC) digitalisiert. Dadurch entstehen Quantisierungsverluste, die in erster Linie von der Auflösung des ADC abhängen. (Bernstein, 2013)

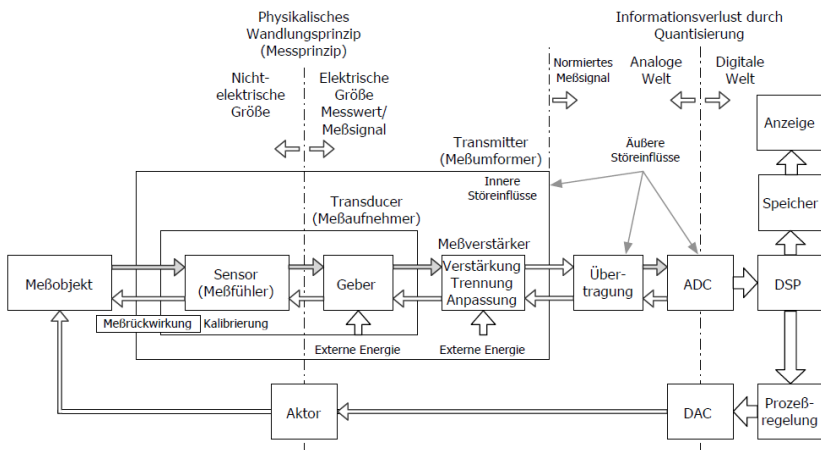


Abbildung 2.6: Messkette von der physikalischen Größe am Messobjekt bis zur digitalen Anzeige, die eine Unterteilung in (nicht-)elektrische, analoge und digitale Größen zeigt (Kupnik, 2024).

Am Beispiel der DMS-basierten Kraftmessung ist das Messobjekt ein Körper, an dem ein DMS als Sensor geklebt ist, der die Dehnung in eine Widerstandsänderung umformt. Diese wird durch eine anliegende Speisespannung (Geber) als eine Spannungsänderung weitergegeben (Wheatstone'sche Brückenschaltung). Diese

Spannungsänderung wird in der Regel verstärkt und anschließend digitalisiert, wodurch sie durch einen digitalen Signalprozessor (DSP) verarbeitet werden kann. Der DSP kann dabei bspw. ein Mikrocontroller sein.

2.3.3 Mehraxiale Kraftmessung

Eine mehraxiale Kraftmessung bezeichnet die Messung von Kräften oder Momenten in mehr als einer Raumrichtung. Dies wird üblicherweise durch mehrere Dehnungssensoren in bestimmten Anordnungen auf einem Verformungskörper erreicht. (Templeman, Sheil & Sun, 2020)

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit soll eine mehraxiale Kraftmessung in Form von Axialkraft und Biegemomenten ermöglicht werden.

Noh et al. (2016) stellen eine Messung von Axialkraft und Biegemomenten durch drei koaxiale Abstandssensoren vor, die gleichmäßig im Winkel von 120° auf einem Abstand zur Mittelachse um den Umfang verteilt sind. Baki, Székely und Kósa (2013) zeigen Messungen von Axialkraft und Scherkräften mittels vier koaxialer DMS, die als T-Rosette in Halbbrücken verschaltet sind (Abbildung 2.7). Diese Konzepte können als Grundlage für die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit angestrebte mehraxiale Kraftmessung dienen.

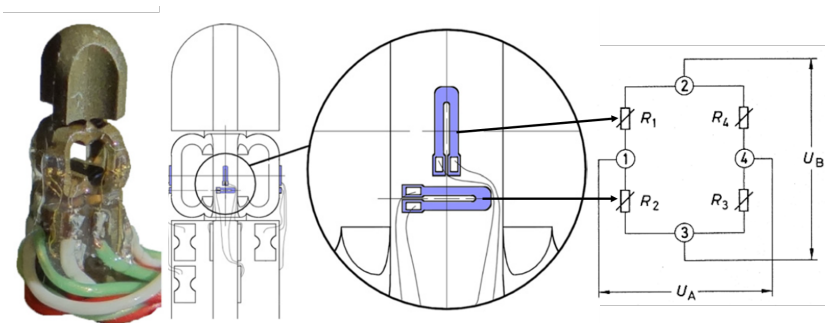


Abbildung 2.7: Verformungskörper zur dreiaxialen Kraftmessung mit vier Dehnungsmessungen auf Basis von T-Rosetten in Halbbrückenverschaltung (Baki et al., 2013).

2.3.4 Messfehler und Sensitivität

Der Messfehler e ist definiert als Differenz zwischen dem ausgegebenen Wert x_a eines Messsignals und dem wahren Wert x_r . Der relative Messfehler e_r ist das Verhältnis des Messfehlers zu einem Bezugswert X . Dieser ist üblicherweise der Messwert, der wahre Wert oder das Messbereichsende (v. E. bzw. F. S.) und muss als Hinweis bei der Fehlerangabe enthalten sein. (Bernstein, 2013)

Die im Zuge dieser Arbeit betrachteten Messungen auf Basis von DMS weisen in der Regel einen linearen Zusammenhang der physikalischen Größe „Dehnung“ zur elektrischen Messgröße „Widerstand“ bzw. „Spannung“ auf (mit Ausnahme des Temperatureinflusses). Somit kann eine lineare Kennlinie ermittelt werden, mit der für jeden gemessenen Wert die physikalische Größe ermittelt werden kann. Die Steigung der Kennlinie, in der Regel durch mehrere Messpunkte ermittelt, wird auch als **Sensitivität** bezeichnet.

Für den **Linearitätsmessfehler** e_{lin} wird eine lineare Kennlinie fit_r der Messwerte x_a in Bezug auf einen Referenzsensor (wahrer Wert) bestimmt, bspw. durch das Verfahren der linearen kleinsten Quadrate. Der maximale Abstand zwischen dem Messwert und der Kennlinie bei gleicher Referenzkraft, dividiert durch den Bezugswert X , stellt den Linearitätsmessfehler dar und berechnet sich nach Gleichung 2.11 zu

$$e_{\text{lin}} = 100 \frac{\max(fit_r - x_a)}{X} \quad 2.11$$

in %. Der Abstand zwischen den Mittelwerten der Messpunkte der ansteigenden und der abfallenden Beanspruchung bei gleicher Referenzkraft stellt den **Hysteresemessfehler** e_{hyst} dar und berechnet sich in prozentualer Form nach Gleichung 2.12 zu

$$e_{\text{hyst}} = 100 \frac{\max(x_{a \text{ auf}} - x_{a \text{ ab}})}{X}. \quad 2.12$$

2.4 Sensorintegrierende Schrauben

Im Stand der Forschung existieren bereits sensorintegrierende Schrauben (SiS). Allerdings ist derzeit keine Lösung bekannt, die eine mehraxiale Kraftmessung mit einer komplett integrierten Messkette sowie einer begrenzten und kompensierbaren Reduktion des mechanisch-funktionalen Verhaltens vereint. Im Folgenden werden existierende Ansätze aus dem Stand der Forschung analysiert. Dabei wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Sensorprinzip und Messort sowie zu messende physikalische Größe,
- Integrationsgrad der Messkette, Daten- und Energieübertragung in Schraube,
- Änderung im mechanisch-funktionalen Verhalten,
- Erhaltung von standardisierten Schnittstellen oder Beeinträchtigung der Anwendbarkeit durch Kabelführung.

Groche und Brenneis (2014) stellen eine M24-Schraube vor, in der drei DMS und ein Temperatursensor auf einem Verformungskörper installiert sind, der durch Rundkneten in die Schraube eingebracht wird (Abbildung 2.8). Dadurch lassen sich theoretisch die Vorspannkraft als auch die Biegemomente ermitteln. Es wurde in genannter Veröffentlichung jedoch nur die Vorspannkraft analysiert, für die eine Sensitivität von $44 \text{ kN}/(\text{mV/V})$ bzw. $23 \text{ } \mu\text{V/V/kN}$ angegebenen wird. Von der Messkette sind nur die Sensorelemente integriert. Der Rest ist extern und wird via Kabel angebunden, worüber auch die Daten- und Energieübertragung erfolgt. Das funktionale Verhalten, bewertet durch die Beanspruchbarkeit, wird als 20 % reduziert angegeben. Die Schnittstelle Schraubenkopf ist durch den Kabelkonnektor und das Kabel selbst verändert. Der Ansatz eines Verformungskörpers ist auch für das hier vorgestellte Forschungsvorhaben vielversprechend, da er prinzipiell die Messung von Axialkräften und Biegemomenten ermöglicht.

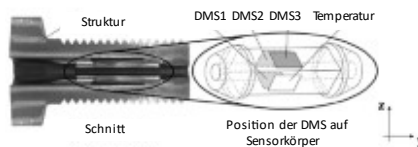


Abbildung 2.8: Verformungskörper aus dem Stand der Forschung mit drei flachen DMS und einem Temperaturelement auf den ebenen Flächen (Groche & Brenneis, 2014).

Die ConSenses GmbH (2026) bietet eine Kraftmessschraube in den Größen M12, M16, M20 an, die die Vorspannkraft durch einem im Schraubenschaft verbauten piezoresistiven Sensor messen kann. Von der Messkette ist nur das Sensorelement in der Schraube integriert, der Rest der Messkette muss extern bereitgestellt werden. Das Sensorelement wird via Kabel am Kopf der Schraube verbunden. Die Schnittstelle Innensechskant wird erhalten, bei Anwendungen muss allerdings die Kabelführung berücksichtigt werden. Das funktionale Verhalten wird laut Hersteller erhalten, trotz des Sensors im Schaft. Es müssen also Kompensationsmaßnahmen getroffen worden sein. Dies ist ein Ansatz, der auch in dieser Forschungsarbeit verfolgt werden kann.

Frank et al. (2019) und Wang et al. (2024) stellen M42- bzw. M16-Schrauben vor, auf deren Kopf DMS installiert sind. Diese messen die Dehnung der Kopfoberfläche, woraus sich die Vorspannkraft berechnen lässt. Je nach Ausrichtung der DMS lässt sich auch das Torsionsmoment beim Anziehen ermitteln (Frank et al., 2019). Von der Messkette sind jeweils nur die Sensorelemente DMS am Kopf der Schraube integriert. Die restliche Messkette ist extern verortet und wird via Kabel angebunden, worüber auch die Daten- und Energieübertragung zur Schraube erfolgt. Es werden keine Hohlräume in die Schraube eingebracht, aufgrund dessen verändert sich das funktionale Verhalten nicht. Allerdings ist die Schnittstelle Schraubenkopf durch die DMS und das Kabel verändert. Aus diesem Grund ist eine Applikation der DMS auf dem Schraubenkopf eher ungeeignet.

Die Sensorise GmbH (2026) bietet Schrauben in den Größen M24 bis M300 an, die die Vorspannkraft durch eines im Gewindegrund gewickelten DMS messen können. Von der Messkette ist nur das Sensorelement in der Schraube integriert, der Rest muss extern bereitgestellt und via Kabel verbunden werden. Das funktionale Verhalten der Schraube bleibt erhalten. Es ist allerdings eine Gewindelänge von mindestens 130 mm für M42 erforderlich, um den nötigen Mindestwiderstand des gewickelten DMS zu erreichen. Für kleinere Größen steigt die Länge noch, weshalb dieses Konzept nicht verfolgt wird.

Biehl, Paetsch, Meyer-Kornblum und Bräuer (2016) und Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST (2026) stellen ein Sensormodul vor, das die Vorspannkraft der Schraube durch drei piezoresistive Drucksensoren in einer Unterlegscheibe mit einer Genauigkeit von 1 % bzw. 5 % des Messbereichs misst. Sowohl Sensorelement als auch der Rest der Messkette inklusive Energieversorgung ist nicht in der Schraube integriert, sondern in einer Unterlegscheibe und Aufbau, der den Kopf vergrößert. Dadurch muss zwar die Schraube nicht verändert werden und das funktionale Verhalten wird erhalten, allerdings vergrößert sich der Bauraumbedarf der Schraube um den Kopf erheblich,

wodurch der Einsatz begrenzt wird. Einen ähnlichen Ansatz mit piezoresistiven Drucksensoren in einer Unterlegscheibe verfolgt Sanli, Demirkale und Kanoun (2025) mit dem Ziel der Detektion eines LöSENS der Schraubenverbindung, also einem Vorspannkraftabfall. Die Autoren zeigen in genannter Veröffentlichung jedoch nur den Zusammenhang des Widerstands des Sensorelements zu einem Anzugsdrehmoment, der mit einem Linearitätsfaktor von 0,96 messbar ist. Zum Messen des Widerstands wird ein externes Labormessgerät verwendet, von der Messkette ist demnach lediglich das Sensorelement in der Unterlegscheibe integriert. Aufgrund der erwähnten Nachteile, insbesondere der nicht vorhandenen Integration, wird dieses Konzept nicht verfolgt.

Im Stand der Forschung gibt es einige Ansätze zur Vorspannkraftmessung und weiterer Beanspruchungen wie dem Torsionsmoment durch optische Sensoren wie dem „Fiber Bragg Grating Optical Sensor“ (FBGS), bspw. von Guo, Hu, Xiong, Zhou und Zhu (2022) oder Li et al. (2024). Durch die Dehnung der Glasfaser kann die Kraft bzw. das Moment ermittelt werden, je nach Ausrichtung der Faser. Alle Ansätze integrieren jedoch lediglich die Glasfasern in Bohrungen der Schraube, was das funktionale Verhalten beeinträchtigen kann. Der Rest der Messkette ist extern zur Schraube untergebracht und via Kabel verbunden, was die Anwendbarkeit beeinträchtigen kann. Aufgrund des Platzbedarfs und der hohen Temperaturabhängigkeit wird dieses Konzept nicht verfolgt.

Intellifast (2026) bietet eine Schraube an, die die Vorspannkraft mittels ultraschallbasierter Dehnungsmessung innerhalb der Schraube ermitteln kann. Die Elektronik zur Ultraschallerzeugung sowie die restliche Messkette ist allerdings extern und wird via Kabel verbunden, weshalb die standardisierte Schnittstelle verändert wird. Das funktionale Verhalten der Schraube wird dadurch nicht verändert. Aufgrund der Veränderung der mechanischen Schnittstelle wird dieses Konzept nicht verfolgt.

Die Core Sensing GmbH (2026) bietet ein Sensormodul an, das in einen Hohlraum von Bauteilen wie Wellen, Spindeln oder Kupplungen integriert werden kann. Das Sensormodul kann Axialkraft, Biege- sowie Torsionsdrehmoment durch DMS sowie weitere Größen durch andere Chip-Sensoren messen. Das Sensormodul wird durch eines patentierten Einpressvorgangs montiert. Die komplette Messkette wird integriert. Es können verschiedene Energie und Datenübertragungsvarianten gewählt werden. Dafür benötigt das Sensormodul jedoch relativ viel Platz und reduziert das mechanisch-funktionale Verhalten der Bauteile in einer nicht akzeptablen Größenordnung insbesondere für kleinere Durchmesser, weshalb dieses Konzept nicht verfolgt wird.

2.5 Methoden der mechatronischen Produktentwicklung und Sensorintegration

Die Integration von Sensoren in mechanische Systeme umfasst alle Disziplinen der Mechatronik. Sensorelemente und elektronische Bauteile zur Erfassung und Kommunikation der Daten wie Analog-Digital-Konverter (ADC) und Mikrocontroller (uC) werden in mechanische Elemente integriert. Deshalb kann die Integration von Sensoren in ein Produkt als mechatronische Produktentwicklung verstanden werden. Die zentralen Herausforderungen in der mechatronischen Produktentwicklung manifestieren sich in der Koordination und Synchronisation des disziplinspezifischen Entwicklungsprozesses, den Zusammenhängen und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Disziplinen sowie der umfassenden Integration über alle Disziplinen hinweg (Abramovici & Bellalouna, 2007).

Eine weitverbreitete Methode zur Entwicklung mechatronischer Systeme, die auf die Wechselwirkungen der Disziplinen und deren Integration eingeht, ist die VDI/VDE 2206 mit dem darin integrierten V-Modell (Fotso & Rettberg, 2012). Diese wird im Folgenden vorgestellt. Anschließend wird auf Methoden speziell für die Sensorintegration eingegangen.

2.5.1 Richtlinie VDI 2206 zur Entwicklung mechatronischer Systeme

Die VDI/VDE 2206 hat zum Ziel, ein strukturierendes Rahmenwerk für die Entwicklung mechatronischer Systeme zu bieten, unabhängig von der konkreten Projektorganisation (klassisch oder agil). Die neueste Version der Richtlinie (Stand November 2021) adressiert Herausforderungen, die sich aus der zunehmenden Vernetzung, Digitalisierung und Systemkomplexität ergeben. (VDI/VDE 2206)

Das V-Modell ist ein zentrales Element der Richtlinie und basiert auf einer Idee aus der Softwareentwicklung von Boehm (1979), aufgegriffen von Bröhl und Dröschel (1993). Im Kern geht es um die Zerlegung des Systems in seine Elemente auf dem linken Schenkel des „V“ (Dekomposition), die Implementierung der Elemente in den Disziplinen auf der unteren Waagerechten und die schrittweise Integration der Elemente und Subsystemen zum Gesamtsystem auf dem rechten Schenkel. Eine kontinuierliche Eigenschaftsabsicherung in Form von Verifizierung und Validierung findet zwischen den beiden Schenkeln des „V“ statt.

Die VDI/VDE-Richtlinie erweitert die Kernidee des V-Modells um eine mechatronische Sichtweise (Abbildung 2.9). Anfangs erfolgt die Ableitung der

Anforderungen aus den Entwicklungszielen. Weiterhin erfolgen der Systementwurf und die Definition der Anforderungen über alle Disziplinen hinweg auf dem linken Schenkel. Über die Dekomposition erfolgt der Übergang zur Waagerechten mit der disziplinspezifischen Implementierung der Systemelemente. Dort stehen die Modellierung, die Simulation und das Anforderungsmanagement im Fokus. Auf der rechten Seite des „V“ erfolgt die Integration der disziplinspezifischen Umsetzungen und die Verifikation bzw. Validierung mit ihren jeweiligen Pendants aus den Anforderungen auf der linken Seite des „V“. Je nach Anwendungsfall können zusätzlich beteiligten Technologien, z. B. Optik, Hydraulik oder Magnetik zu den klassischen Disziplinen Mechanik, Elektronik und Software hinzugenommen werden. Die Richtlinie betont die Wichtigkeit einer tiefgreifenden Vernetzung der Disziplinen. (VDI/VDE 2206)

Das V-Modell liefert somit die Struktur auf der Makroebene. Für die Mikroebene werden verschiedene Werkzeuge zur Unterstützung vorgeschlagen, bspw. Model-based systems engineering (MBSE), Software-/Hardware-in-the-loop, Digitale Zwillinge, Merkmallisten zur strukturierten Anforderungserhebung. (VDI/VDE 2206)

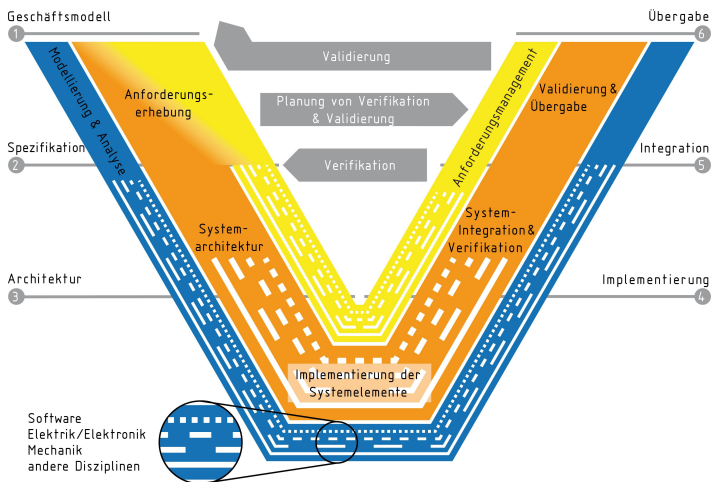


Abbildung 2.9: V-Modell für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, basierend auf (VDI/VDE 2206).

Die Stärken der Richtlinie VDI/VDE 2206 mit dem V-Modell ist die Flexibilität als Rahmenwerk, was eine Anpassbarkeit an spezifische Aufgaben und Projektkontexte ermöglicht. Weiterhin fördert sie die disziplinübergreifende Entwicklung und kontinuierliche Absicherung der Umsetzungen gegenüber den Anforderungen. (Gausemeier & Moehringer, 2003; Graessler & Hentze, 2020)

Schwächen der Richtlinie liegen ebenso in der hohen Flexibilität, die naturgemäß ein hohes Abstraktionsniveau mit sich bringt und deshalb wenig konkrete methodische Handlungsanweisungen für spezifische Szenarien liefern kann. Die Technologieoffenheit führt zu einer geringen disziplinspezifischen Unterstützung. Das V-Modell muss deshalb auf konkrete Kontexte angepasst werden (Knöchelmann, 2020). Praktische Details bspw. für die Integration von Sensoren in Maschinenelemente müssen ergänzend betrachtet werden.

Aus diesen Gründen wurde die VDI/VDE-Richtlinie mit dem V-Modell im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten für spezielle Anwendungsfälle spezifiziert und erweitert. Ley, Knöchelmann, Wolf und Lachmayer (2022) erweiterten das V-Modell mit der Disziplin Optomechatronik und damit einhergehend mit einer Reihe von optomechatronik-spezifischen Unterstützungen und Werkzeugen auf der Mikroebene, um eine Problemstellung aus der automobilen Lichttechnik zu lösen. Zheng, Hehenberger, Le Duigou, Bricogne und Eynard (2017) erweitern das V-Modell mit einer Kompatibilitätstestphase am Anfang der Systemintegrationsphase im aufsteigenden Schenkel des „V“, um die Integration von Subsystemen verschiedener Disziplinen besser zu unterstützen. Rahman, Pulm und Stetter (2007) spezifizieren konkrete Methoden der Konstruktionslehre, um bei der Entwicklung einer piezoelektrischen Bremse zu unterstützen. Dabei verwenden sie das V-Modell als strukturgebenden Rahmen in der Makroebene und die Aufteilung des Entwurfsprozesses in die vier Phasen Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten nach Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote (2007).

Damit SiME erfolgreich entwickelt werden können und in der Breite in der Industrie Anwendung finden können, müssen die bestehenden Normen der Maschinenelemente weiter eingehalten werden (Kapitel 2.2.2). Es bedarf einer angepassten Methode, die bei der Verhandlung des daraus entstehenden Zielkonflikts zwischen den Disziplinen bei der Sensorintegration in Maschinenelemente unterstützt. Eine Spezifizierung der VDI/VDE 2206 oder des V-Modells für die Integration von Sensoren in fertig entwickelte und genormte Maschinenelemente ist nicht bekannt. Allerdings zeigen diese Erweiterungen und Spezifizierungen der VDI/VDE 2206 bzw. des V-Modells vielversprechend Ansätze, um eine angepasste methodische Unterstützung für die Sensorintegration in Maschinenelemente zu entwickeln. Insbesondere die Einführung einer zusätzlichen

Disziplin Sensorik, analog zur Optomechatronik wie bei Ley et al. (2022) erscheint zielführend, da der Sensor die Schnittstelle zwischen den Disziplinen Mechanik und Elektronik ist (Kapitel 2.3.2) und einen Fokus in der Sensorintegration darstellt.

2.5.2 Methoden der Sensorintegration

Kirchner et al. (2024) fassen die Hauptherausforderungen der Sensorintegration in Maschinenelemente zusammen, die methodischer Unterstützung bedürfen:

- Die ursprüngliche Funktion, bewertbar im funktionalen Verhalten, darf durch die Sensorintegration nicht ohne weiteres beeinträchtigt werden,
- Bestehende und genormte Schnittstellen der Maschinenelemente, bspw. Kopf und Gewinde bei der Schraube, müssen erhalten werden, damit die Maschinenelemente weiterhin in bestehenden Maschinen und Anlagen angewendet werden können,
- die beteiligten Disziplinen teilen sich Gestaltmerkmale, die zu Zielkonflikten führen können (Kirchner et al., 2024).

Auch Dumstorff et al. (2014) führt als zentrale Herausforderung der Sensorintegration den Konflikt zwischen Erhaltung der mechanischen Eigenschaften und Bereitstellung einer sensorischen Funktion.

Um diese Herausforderungen zu meistern, sollte ein Fokus der methodischen Unterstützung darauf liegen, die Zielkonflikte verhandelbar zu machen. Dazu müssen die beteiligten Disziplinen intensiv miteinander interagieren und Anforderungen gemeinsam ausgehandelt werden. Es bedarf Modelle, die die Gestaltmerkmale des Sensormoduls mit der mechanischen und sensorischen Funktion verknüpfen. (Kirchner et al., 2024)

Laut Hausmann, Häfner und Kirchner (2022) wird Sensorintegration in der Praxis oft empirisch und nicht systematisch durchgeführt. Der Fokus liegt auf Einzelaspekten wie der Platzierung oder der Sensorauswahl und nicht auf einem vollständigen Vorgehensmodell (Hausmann et al., 2022; Hausmann et al., 2023).

Weiterhin sind existierende Ansätze oft anwendungsspezifisch, nicht übertragbar und nur zum Teil systematisch (Hausmann et al., 2023). Hausmann et al. (2022) stellen deshalb ein konsistentes Vorgehensmodell zur systematischen Sensorintegration vor, das disziplinübergreifend anwendbar ist. Der methodische Kern liegt in der strukturierten Analyse, Synthese und Validierung von Sensorlösungen. Dies wird gestützt durch existierende Vorgehensmodelle wie dem Münchener Vorgehensmodell, und erste methodische Werkzeuge wie

Effektkataloge und Flussmodelle. Für viele Teilschritte fehlen allerdings noch konkrete methodische Hilfsmittel, bspw. die Ableitung messbarer Größen aus der Messaufgabe oder die Integration in bestehende Geometrien wie Maschinenelemente und deren Auswirkungen.

Neben vollständigen Methoden oder Vorgehensmodellen zur Sensorintegration können auch Teilaspekte wie die Sensorauswahl wertvolle Unterstützung liefern. Bezüglich Auswahl des Sensors existiert der Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0, der Anwender und Hersteller bei der Anforderungsdefinition und Entwicklung kostengünstigerer Sensorsysteme unterstützen soll. Der Leitfaden stellt Leitfragen sowie Werkzeugkästen bereit. Die Leitfragen sollen bei der Identifikation kostentreibender Aspekte unterstützen. Die Werkzeugkästen stellen technische Optionen und Vorgehensweisen für unterschiedliche Aspekte von Sensorsystemen anschaulich dar, wie bspw. Sensortypen, Kommunikationstechnologien oder Datenverarbeitung. (Fleischer et al., 2018)

Der Leitfaden beinhaltet jedoch keine Unterstützung im Detail für die Integration von Sensoren in platzbegrenzte Maschinenelemente.

Horn, Zimprich, Gwosch und Matthiesen (2020) ermitteln Designraum zur Einbettung von sensorischen Elementen in einen Verbundanker mit dem Ziel, die Primärfunktion Haltekraft zu erhalten. Durch die Analyse des Verbundankers mit dem C&C² Modell (Matthiesen, 2021) wurden Begrenzungsflächen identifiziert, die nicht funktionsrelevant sind. Darauf aufbauend wurden Hypothesen zur Anordnung von sensorischen Elementen am Verbundanker aufgestellt. In empirischen Versuchen wurden diese Hypothesen untersucht mit dem Ergebnis, dass sensorische Elemente im Gewindegrund oder in axialer Anordnung das funktionale Verhalten um maximal 5 % bis 10 % beeinflussen.

Dieses Vorgehen wurde von Horn (2022) zur Methode ASTra erweitert, die folgende drei Schritte umfasst:

1. Analyse: Beobachtungsbarrieren überwinden,
2. Synthese: Ergebnisse mit Gestalt-Funktions-Zusammenhang-Testobjekten validieren,
3. Rücktransformation: Funktionsprototyp ableiten (Horn, 2022).

Die Methode behandelt allerdings nicht die Integration des Sensormoduls in das Innere des Verbundankers, sondern nur an das Äußere (Horn et al., 2020; Horn, 2022). Damit ist der Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion weniger stark ausgeprägt. Im Vorhaben der vorliegenden Forschungsarbeit ist eine

Integration der sensorischen Elemente an das Äußere jedoch nicht möglich, das Sensormodul soll gekapselt in der Schraube integriert sein. Dadurch gibt es keine nicht funktionsrelevanten Wirkflächen, im Gegensatz zu ASTra.

2.6 Methodik des Testing zum Aufbau von Wissen

Um den Zielkonflikt zwischen der Erhaltung der mechanischen Funktion, spezifiziert durch die Normen und Richtlinien, und der sensorischen Funktion zu untersuchen und verhandelbar zu machen, fehlt es an spezifischem technischem Wissen. Dies gilt insbesondere für die Interaktion zwischen den Disziplinen der Mechanik und der Elektronik. Das zu lösende Problem ist die physische Integration eines Sensormoduls, ohne das mechanisch-funktionale Verhalten übermäßig zu beeinflussen. Zur Lösung dieses Problems muss Wissen aufgebaut werden, dazu bedarf es methodischer Unterstützung.

Matthiesen und Grauberger (2024) stellen eine Methodik für den systematischen Aufbau von technischem Wissen in der Produktentwicklung vor. Im Fokus steht die Methodik des „Testing“ als zentraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Zur erfolgreichen Entwicklung eines Produkts müssen Wissenslücken identifiziert und geschlossen werden. Das zur Entwicklung notwendige Wissen kann Entwicklungsziele, Entwicklungsergebnisse oder den Zusammenhang zwischen Entwicklungszielen und -ergebnissen betreffen. Letzteres befähigt zur Synthese von zu den Zielen passenden Ergebnissen. Eine Teilmenge dieses Zusammenhangswissens ist das Konstruktionswissen, das die Merkmale der Gestalt und ihre Auswirkung auf das funktionale Verhalten zusammenführt. Dadurch wird die Entwicklung von Produkten mit gewünschtem funktionalem Verhalten ermöglicht. (Matthiesen & Grauberger, 2024)

Zentrale Bedeutung zum Aufbau des Konstruktionswissens hat die Konstruktionshypothese. Diese wird aus einem vermuteten Zusammenhang von Gestalt und Funktion abgeleitet. Sie verknüpft neben dem Merkmal (Gestalt-domäne) und dem funktionalen Verhalten (Funktions-domäne) auch eine Erklärung des Zusammenhangs und ist wie folgt formalisiert: (Matthiesen & Grauberger, 2024)

Wenn ... (In der Konstruktion festlegbares Merkmal der Produktgestalt),

dann ... (Aus dem Merkmal resultierendes funktionales Verhalten),

weil ... (Erklärung der Ursache des Zusammenhangs).

Der Aufbau von fehlendem Entwicklungswissen kann durch recherchierende, modellbasierte oder empirische Aktivitäten stattfinden, je nachdem in welcher Form Wissen bereits vorhanden oder nicht vorhanden ist. Recherchierbares Wissen ist in Form von Dokumenten verfügbar. Modellbasiertes Wissen basiert auf bekannten mathematischen oder physikalischen Zusammenhängen und kann ohne Experiment erzeugt werden. Wenn Wissen nicht recherchiert oder modellbasiert aufgebaut werden kann, muss es empirisch erzeugt werden. Der empirische Wissensaufbau bildet den Kern der Methode des Testing und ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Ein Testing-Objekt wird in einer Testing-Umgebung betrieben, beobachtet und anhand des funktionalen Verhaltens bewertet, woraus das Konstruktionswissen interpretiert wird. (Matthiesen & Grauberger, 2024)

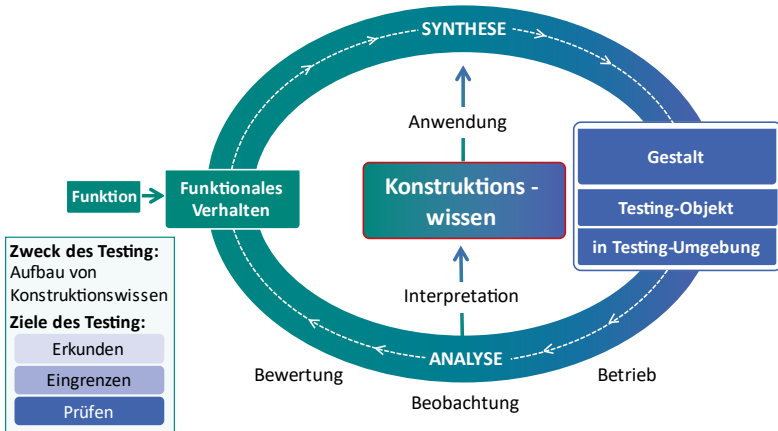


Abbildung 2.10: Aufbau von Konstruktionswissen durch Testing, basierend auf (Matthiesen & Grauberger, 2024)

Testing zum Aufbau von Zusammenhangwissen wie hier beschrieben beantwortet eine offene Fragestellung und grenzt sich dadurch von den geschlossenen Fragestellungen der Verifikation und Validierung ab, die nur einen Abgleich der Anforderungen mit den Spezifikationen und dem Kunden vornehmen und in der VDI/VDE 2206 Anwendung finden. Das Ziel kann das Erkunden, das Eingrenzen oder das Prüfen sein, je nachdem ob neue Hypothesen generiert, eingegrenzt, angenommen oder verworfen werden (Matthiesen & Grauberger, 2024).

Die Kombination der Methode des Testing mit der Richtlinie VDI/VDE 2206 erscheint zielführend. Die Richtlinie spezifiziert bisher zwar die Absicherung der Anforderung in Form von Verifizierung und Validierung, allerdings keine Testing-Aktivitäten zum Aufbau von Wissen wie von Matthiesen und Grauberger (2024) vorgestellt. Der methodische Wissensaufbau kann insbesondere in der Mikroebene spezifische Unterstützung in den Disziplinen und deren Vernetzung bieten.

2.7 Übersicht über die verwendeten Begriffe im Rahmen der Funktion und der Gestalt

Abbildung 2.11 zeigt die Begriffe zum Umfeld der Funktion und der Gestalt, die in der Methodik des Testing verwendet werden, am Beispiel einer Schraubenverbindung.

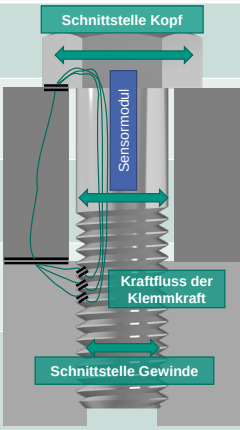
	Mechanisch		Sensorisch
Funktion	Lösbare Verbindung von Bauteilen durch Eindrehen des Gewindes herstellen		Daten zur mehraxialen Belastung der Schraube bereitstellen
Funktio- nales Verhalten	Klemmkraft in Trennfuge durch elastische Verspannung der Bauteile		Umformung der Dehnung in elektrische Messgröße & Kommunikation dieser
Bewer- tungs- größe	Spannung, bspw. von-Mises		Dehnung, Messfehler, Sensitivität (Auflösung)
Eigen- schaft	Beanspruchbarkeit, Schnittstellen für Bauteile und Werkzeug (Kopf- und Gewindeform)		Umwandlungsfaktor, Energiebedarf, Übertragungsprotokolle
Gestalt- merkmale	Schaftdurchmesser, Kopf: <i>Außensechskant</i> , <i>Schlüsselweite</i> , ... Gewinde: <i>Metrisch</i> , <i>Kerndurchmesser</i> , <i>Steigung</i> , <i>Flankenwinkel</i> , ...		Sensormodulbreite & -höhe (in der Schraube), Position, Ausrichtung, Art, Verschaltung, Applikation der DMS

Abbildung 2.11: Übersicht der verwendeten Begriffe im Rahmen der Funktion bis zu den Gestaltmerkmalen am Beispiel einer Schraubenverbindung. Der Kraftfluss ist nach dem C&C² Ansatz eingezeichnet (Matthiesen, 2021).

2.8 Fazit zum Stand der Forschung

Sensorintegrierende Maschinenelemente können einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung in der Industrie liefern, da sie aussagekräftige Daten zum Zustand von Maschinen und Anlagen bereitstellen können. Insbesondere im Rahmen der Kreislauffabrik kann die Analyse der aus dem Feld zurückkommenden Komponenten verbessert werden, da die Historie der Belastung von individuellen Maschinenelementen durch die Sensorintegration mit kompletter Messkette und Speicher bekannt ist. Hierbei bieten Schrauben ein großes Potenzial, da sie hoch standardisiert sind, zu den weitverbreitetsten Verbindungselementen gehören und üblicherweise im Kraftfluss eingesetzt werden. Darüber hinaus erfahren sie überlagerte Beanspruchungsarten, weshalb eine mehraxiale Kraftmessung wertvolle Daten zum Zustand liefern kann. Dehnungsmessstreifen (DMS) bieten sich zur mehraxialen Kraftmessung in Schrauben an, da sie eine hochgenaue, driftfreie Kraftmessung und vielfältige Kompensationsmöglichkeiten von Störeinflüssen ermöglichen.

Damit sensorintegrierende Maschinenelemente mit möglichst wenig Einschränkungen zum konventionellen Maschinenelement angewendet werden können und nachrüstbar sind, darf die Erfüllung ihrer mechanischen Funktion so wenig wie möglich beeinträchtigt werden. Wichtige Eigenschaften der mechanischen Funktion sind die Beanspruchbarkeit und die Geometrie der mechanischen Schnittstellen, die in den Merkmalen der Gestalt ausgeprägt sind. Diese müssen im Rahmen der geltenden Normen und Richtlinien weitestgehend erhalten werden. Insbesondere Steckverbindungen an der Schraube beeinträchtigen die standardisierten Geometrien, weshalb drahtlose Lösungen für die Sensorintegration angestrebt werden sollen. Bei der Integration der Sensoren in das Innere des Maschinenelements besteht die Gefahr, die Beanspruchbarkeit des Maschinenelements zu reduzieren, da die Gestaltmerkmale des Maschinenelements für die sensorische Funktion verändert werden: Bauraum für die Sensormodule entzieht der mechanischen Funktion Material. Die Beanspruchbarkeit unter dem Einfluss der Sensorintegration muss deshalb genau analysiert werden. Es fehlt Konstruktionswissen in Form der Zusammenhänge zwischen der Funktion und den für die Sensorintegration zu verändernden Gestaltmerkmalen.

Aktuell sind keine sensorintegrierenden Schrauben bekannt, die die Beanspruchbarkeit und die mechanischen Schnittstellen der Schraube ansatzweise erhalten und dabei Messdaten zur mehraxialen Beanspruchung der Schraube in Form von Axialkraft und Biegemomentvektor drahtlos kommunizieren. Eine Lösung von im Schaft applizierten DMS, bspw. auf einem Verformungskörper, erscheint

zielführend. Kompensationsmaßnahmen zur Erhaltung des mechanisch-funktionalen Verhaltens wurden erwähnt und müssen im Rahmen dieser Forschungsarbeit untersucht werden.

Bei der Entwicklung von sensorintegrierenden Maschinenelementen entsteht ein Zielkonflikt zwischen den Disziplinen der Mechanik und der Elektronik. Neue sensorische Funktionen sollen in ein fertig entwickeltes und standardisiertes mechanisches Element integriert werden, in denen in der Regel kein Bauraum für Sensorelemente und Elektronik vorhanden ist. Dadurch wird die Erhaltung der mechanischen Funktion in ihrer Eigenschaft der Beanspruchbarkeit durch die neu zu integrierende sensorische Funktion beeinträchtigt. Insbesondere bei der Sensorintegration in Schrauben ist das der Fall, da hier die Beanspruchung relativ hoch ist. Darüber hinaus kann die sensorische Funktion (aussagekräftige Messdaten bereitstellen) besser erfüllt werden, je mehr Bauraum ihr gegeben wird.

Um den Zielkonflikt bei der Sensorintegration in Maschinenelemente, insbesondere in Schrauben, zu untersuchen und verhandelbar zu machen, bedarf es methodischer Unterstützung. Es fehlt nämlich Wissen zu den Zusammenhängen von durch die Sensorintegration veränderten Gestaltmerkmalen der Maschinenelemente (Bauraum der Sensormodule) und der Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion in ihren jeweiligen Bewertungsgrößen. Es ist unklar, ob und wie Sensormodule integriert werden können, ohne den Erhalt der mechanischen Funktion zu beeinträchtigen. Aktuell ist im Stand der Forschung keine methodische Unterstützung bekannt, die speziell für die Bedürfnisse der Integration von sensorischen Funktionen in Maschinenelemente ausgelegt ist. Mit der VDI/VDE 2206 gibt es jedoch ein strukturierendes Rahmenwerk, das für die Entwicklung von mechatronischen Systemen, zu denen auch sensorintegrierende Maschinenelemente gehören, geeignet ist. Im Stand der Forschung ist es gängige Praxis, die VDI/VDE 2206 bei Bedarf für den individuellen Anwendungsfall zu spezifizieren. Insbesondere die Erweiterung des V-Modells mit einer Disziplin Sensorik erscheint zielführend, angelehnt an das Vorgehen von Ley et al. (2022) mit der optomechatronischen Disziplin. Ebenso vielversprechend klingt die Kombination des V-Modells mit zusätzlichen Testphasen, analog zu von Zheng et al. (2017). Eine Kombination mit der Methodik des Testing nach Matthiesen und Grauberger (2024) kann helfen, das fehlende Wissen zur Verhandlung der Zielkonflikte in der Sensorintegration aufzubauen.

3 Motivation und Zielsetzung

Die Verfügbarkeit aussagekräftiger Messdaten zum Zustand und den Prozesskräften von Maschinen und Anlagen ist eine zentrale Herausforderung der Digitalisierung im Maschinenbau. Je näher am Kraftfluss gemessen wird, desto aussagekräftiger werden die Messdaten. Sensormodule sollten sich deshalb in-situ, strukturintegriert im Kraftfluss befinden und können dadurch aussagekräftige Messdaten bereitstellen. Universell einsetzbare, standardisierte Maschinenelemente sind bereits in den meisten Maschinen und Anlagen installiert und werden auch im Kraftfluss eingesetzt. Insbesondere Befestigungsschrauben als weitverbreitetes Verbindungselement bieten sich als Träger für strukturintegrierte und universell einsetzbare Sensormodule an. Damit kann ebenfalls ein Beitrag für die Kreislauffabrik geleistet werden, da die Historie der Beanspruchung für individuelle Maschinenelemente verfügbar wird. Aktuell sind keine sensorintegrierenden Schrauben bekannt, die die mechanische Funktion erhalten und dabei Messdaten zur mehraxialen Beanspruchung der Schraube drahtlos kommunizieren. Das übergeordnete Ziel ist deshalb die Erforschung der Integration von Sensormodulen in die Struktur standardisierter Schrauben und gleichzeitig der Erhalt der mechanischen Funktion.

Kern des Problems ist, dass die Integration neuer sensorischer Funktionen in ein ausgereiftes und standardisiertes Maschinenelement wie die Schraube zu einem Zielkonflikt zwischen einer hohen Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion führt. Ein äußerer Anbau von Sensormodulen verletzt die standardisierten Schnittstellen, was die Anwendbarkeit gefährdet. Deshalb muss die komplette Messkette, die zur neuen Sensorfunktion notwendig ist, als Sensormodul in das Innere der Schraube integriert werden. Dies beeinträchtigt jedoch die mechanische Funktion, da dieser nun weniger Material zur Verfügung steht. Es fehlen sowohl das Konstruktionswissen zu den Auswirkungen der Integration von Sensormodulen auf die Erfüllung der mechanischen Funktion als auch Methoden, welche strukturiert beim Aufbau von solchem Konstruktionswissen zur Sensorintegration unterstützen.

Die Funktion einer Schraubenverbindung wird maßgeblich durch die beim Anziehen erreichte Montagevorspannkraft beeinflusst. Eine sensorintegrierende Schraube kann eine Kommunikationsschnittstelle bereitstellen und dadurch mit einem Montagewerkzeug informationstechnisch gekoppelt werden. Damit kann das Montagewerkzeug die reale gemessene Kraft in der Steuerung verwenden. Dadurch eröffnet sich das Potenzial, die Steuerung gängiger Anziehverfahren in der erreichten

Montagevorspannkraft zu reduzieren und dadurch die nach VDI 2230 geforderte Überdimensionierung zu verringern.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse und Verhandlung des Zielkonflikts zwischen hoher mechanischer und hoher sensorischer Funktionserfüllung bei der Sensorintegration in Maschinenelementen durch den methodischen Aufbau von Konstruktionswissen. Um das Ziel zu erreichen, wird beispielhaft eine mehraxial kraftmessende, sensorintegrierende Schraube entwickelt. Die Sensorintegration soll das mechanisch-funktionale Verhalten der Schraube möglichst gering beeinflussen und dabei mit minimalem Fehler und hoher Sensitivität Messdaten zum mehraxialen Belastungszustand der Schraube drahtlos kommunizieren.

4 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird das zugrundeliegende Forschungsdesign erläutert. Es dient der Erreichung des Ziels, den Zielkonflikt zwischen hoher mechanischer und hoher sensorischer Funktionserfüllung bei der Sensorintegration in Maschinenelementen durch den methodischen Aufbau von Konstruktionswissen zu analysieren und zu verhandeln. Um das Ziel zu erreichen, wird beispielhaft eine mehraxial kraftmessende, sensorintegrierende Schraube entwickelt. Die Sensorintegration soll das funktionale Verhalten der Schraube möglichst gering beeinflussen und dabei mit minimalem Fehler und hoher Sensitivität Messdaten zum mehraxialen Belastungszustand der Schraube drahtlos kommunizieren.

Die Entwicklung der sensorintegrierenden Schraube erfolgte im Rahmen des DFG-Projekts „SiSmaK – Sensorintegrierende Schrauben zur mehraxialen Kraftmessung und Ableitung einer Entwurfsmethode zur Sensorintegration in zylindrische Maschinenelemente“, welches in Kooperation mit den Fachbereichen Mess- und Sensortechnik unter Prof. Kupnik und Integrierte elektronische Systeme unter Prof. Hofmann, beide aus der Technischen Universität Darmstadt, erarbeitet wurde. Das Projekt ist Teil des Schwerpunktprogrammes SPP 2305: „Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung“. Die im Folgenden vorgestellten Forschungsfragen fokussieren Teilaspekte der Entwicklung der sensorintegrierenden Schraube. Die Projektfortschritte sind in Peters, Herbst et al. (2024) und Riehl, Peters et al. (2025) dokumentiert.

Zur Erreichung des Ziels werden drei **Forschungsfragen** abgeleitet:

Forschungsfrage 1: *Wie kann der Bauraum für das Sensormodul in der Schraube im Zielkonflikt zwischen einer hohen Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion identifiziert werden?*

Forschungsfrage 2: *Welches quantitative mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten erreichen iterativ entwickelte Prototypen der sensorintegrierenden Schraube?*

Forschungsfrage 3: *Welcher methodische Ansatz kann aus der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube abgeleitet werden, der bei der Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten durch den Aufbau von Konstruktionswissen unterstützt?*

Das Forschungsdesign, aufbauend auf den drei Forschungsfragen, ist in folgender Abbildung zu sehen:

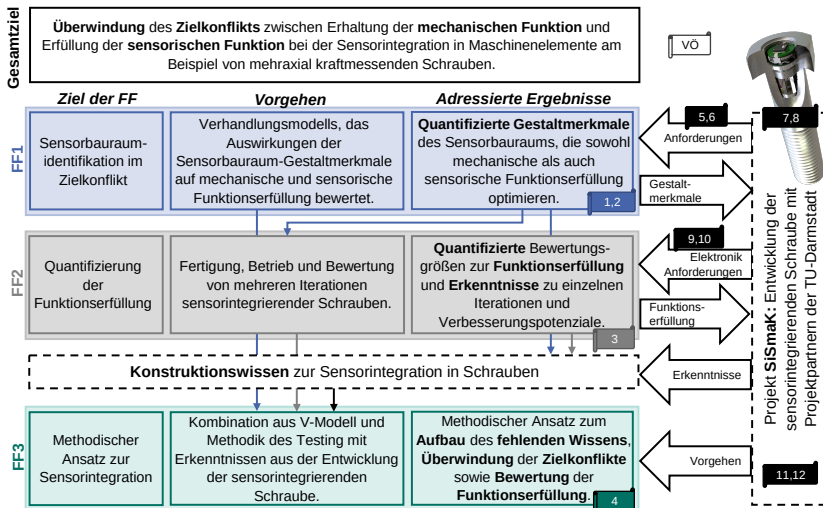


Abbildung 4.1: Forschungsdesign, welches das Ziel und den Aufbau sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten der Forschungsfragen (FF) zeigt. Das Projekt „SiSmaK“, in dessen Rahmen diese Dissertation entstand, stellt Anforderungen und liefert Teilergebnisse an die FF. Die FF wiederum zahlen Ergebnisse in das Projekt ein und interagieren mit dem Konstruktionswissen. FF1 und FF2 sowie das gesamte Projekt „SiSmaK“ zahlen in den Aufbau des Konstruktionswissens ein, FF3 speist sich daraus. Als VÖ sind alle Veröffentlichungen gekennzeichnet, die im Rahmen des Projekts bzw. des SPP 2305 unter Co-Autorenschaft veröffentlicht sind. Diese sind am Ende des Literaturverzeichnisses näher erläutert.

Forschungsfrage 1 adressiert die Analyse und Verhandlung des Zielkonflikts zwischen mechanischer Funktionserfüllung und neu zu integrierender sensorischer Funktionserfüllung. Ein zentrales Problem bei der Integration von Sensormodulen in Schrauben ist die Identifikation des Sensormodulbauraums, dessen Gestaltmerkmale sowohl das mechanisch- als auch das sensorisch-funktionale Verhalten gegenläufig beeinflussen und dadurch einen Zielkonflikt auslösen. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Vorgehen vorgestellt, das mithilfe eines

Finite-Elemente-(FE-)Modells quantifiziert, wie bestimmte Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums die Bewertungsgrößen des mechanisch-funktionalen Verhaltens (von-Mises-Spannung) und des sensorisch-funktionalen Verhaltens (Sensitivität – Dehnung an der Sensorposition) beeinflussen. Diese Ergebnisse werden in eine Optimierungsfunktion überführt und mit Gewichtungsfaktoren versehen. So entsteht ein Verhandlungsmodell, das Gestaltmerkmale für eine optimierte Funktionserfüllung berechnet. Weiterhin wird die Tragweite der Modellergebnisse bewertet und es werden Kompensationsmaßnahmen formuliert, um die Veränderungen im mechanisch-funktionalen Verhalten auszugleichen.

Das Ergebnis der Forschungsfrage sind die Gestaltmerkmale Bohrungsdurchmesser in zwei Abstufungen für die M20-Schraube, die für die weitere Gestaltung des Sensormoduls notwendig sind.

Forschungsfrage 2 adressiert die Quantifizierung des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens von Prototypen der neuen sensorintegrierenden Schraube. Dazu werden Prototypen in mehreren Iterationen entworfen, gefertigt und bewertet, basierend auf den in Forschungsfrage 1 ermittelten Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen. Die sensorintegrierenden Schrauben messen die Dehnung im Schraubenschaft in drei Achsen, womit eine Berechnung der Axialkraft sowie des Biegemomentvektors ermöglicht wird. In einer Testing-Umgebung werden die sensorintegrierenden Schrauben mit verschiedenen Lastfällen betrieben, beobachtet und bewertet. Auf Basis der Sensormodul-Messsignale werden sensorische Bewertungsgrößen quantifiziert. Die aus jeder Iteration gewonnenen Erkenntnisse werden detailliert dargestellt und miteinander verglichen, um daraus Verbesserungsansätze abzuleiten.

Ergebnis der Forschungsfrage ist das quantifizierte mechanisch- sowie sensorisch-funktionale Verhalten der sensorintegrierenden Schrauben sowie die Erkenntnisse zum Entwurf und der iterativen Verbesserungen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für Forschungsfrage 3.

Forschungsfrage 3 adressiert einen Ansatz zur methodischen Unterstützung für die Entwicklung sensorintegrierender Schrauben. Dazu werden die während der Entwicklung gewonnenen Erkenntnisse in die im Stand der Forschung vorhandenen Entwicklungsmethoden integriert. Der Ansatz basiert auf der VDI/VDE 2206 und kombiniert diese mit der Methodik des Testing zum Wissensaufbau (Matthiesen & Grauberger, 2024). Die in Forschungsfragen 1 und 2 erarbeiteten Vorgehensweisen und Erkenntnisse werden genutzt, um das aufgebaute Konstruktionswissen zu formulieren und zusammen in einen methodischen Ansatz zu integrieren. Fokus der Methode ist die Analyse und Verhandlung der Zielkonflikte zwischen mechanischer

und sensorischer Funktionserfüllung bei der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube sowie die Quantifizierung des funktionalen Verhaltens gefertigter Prototypen.

Das Ergebnis der Forschungsfrage ist ein methodischer Ansatz, der den Aufbau von Konstruktionswissen zur Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube zeigt.

Durch die Beantwortung der drei Forschungsfragen wird das Ziel erreicht, den Zielkonflikt zwischen hoher mechanischer und hoher sensorischer Funktionserfüllung bei der Sensorintegration in Maschinenelementen durch den methodischen Aufbau von Konstruktionswissen zu analysieren und zu verhandeln. Um das Ziel zu erreichen, wird beispielhaft eine mehraxial kraftmessende, sensorintegrierende Schraube entwickelt. Die Sensorintegration soll das funktionale Verhalten der Schraube möglichst gering beeinflussen und dabei mit geringem Fehler Messdaten zum mehraxialen Belastungszustand der Schraube drahtlos kommunizieren.

5 Identifikation der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion

In diesem Kapitel wird die **Forschungsfrage 1** untersucht und beantwortet:

Forschungsfrage 1: *Wie kann der Bauraum für das Sensormodul in der Schraube im Zielkonflikt zwischen einer hohen Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion identifiziert werden?*

Die Inhalte dieses Kapitels zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 basieren auf einer wissenschaftlichen Veröffentlichung des Autors der vorliegenden Arbeit:

Peters, J., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K., Matthiesen, S. (2024). Overcoming Conflicts of Objectives between Sensory and Mechanical Domain in the Development of Sensor-Integrating Machine Elements Using the Example of Bolts. *IEEE Access*, 12, 93975–93992. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3423674> (VÖ1).

Die Abbildungen sowie wesentliche Textabschnitte zu Methode, Ergebnissen, Beispielanwendung und Diskussion sind in übersetzter Form aus dem Englischen sinngemäß übernommen. Die Begrifflichkeiten wurden an die vorliegende Forschungsarbeit angepasst. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Gegensatz zu den Abbildungen auf eine gesonderte Kennzeichnung der Texte verzichtet.

5.1 Kurzzusammenfassung

Ein zentrales Problem bei der Integration von Sensormodulen in Schrauben ist die Identifikation des Sensormodulbauraums, dessen Gestaltmerkmale sowohl das mechanisch- als auch das sensorisch-funktionale Verhalten gegenläufig beeinflussen und dadurch einen Zielkonflikt auslösen. Dies bedeutet konkret, dass die Hohlräume für das Sensormodul die Dehnung erhöhen, was ein besseres sensorisch-funktionales Verhalten bewirken kann. Allerdings erhöhen sie auch die Spannungen, was ein schlechteres mechanisch-funktionales Verhalten bewirken kann. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Vorgehen vorgestellt, das

5.2 Methode

Zunächst wird ein Vorgehen zur Bauraumidentifikation im Zielkonflikt zwischen sensorischer und mechanischer Funktionserfüllung vorgestellt, welches anschließend exemplarisch auf den Anwendungsfall von Schrauben angewendet wird. Es wird eine Optimierungsfunktion formuliert, welche einen Funktionserfüllungsindex aus Bewertungsgrößen des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens in Abhängigkeit von den Gestaltmerkmalen des Sensormodul-Bauraums berechnet. Dabei wird auf den Ergebnissen eines FE-Modells zur Quantifizierung dieser Abhängigkeiten aufgebaut. Im Anschluss werden Kombinationen von Gestaltmerkmalen physisch verifiziert. Im weiteren Verlauf wird die **Kombination aus Optimierungsfunktion und FE-Modell Verhandlungsmodell** genannt, da sie gewissermaßen zwischen den Disziplinen verhandelt.

Die Anforderung aus dem in Kapitel 3 formulierten Ziel besteht darin, dass das Sensormodul in das Innere der Schraube integriert werden muss, um die äußeren standardisierten Schnittstellen nicht zu verletzen.

5.2.1 Ablaufdiagramm zum Vorgehen

Abbildung 5.2 zeigt das allgemeine Vorgehen zur Herleitung der Optimierungsfunktion.

Die Voraussetzung für die Modellierung der Auswirkung der Sensorbauraum-Gestaltmerkmale auf die Funktionserfüllung ist die Entwicklung eines **Sensorkonzepts** (Schritt 1). Dieses dient der Festlegung eines geeigneten initialen Bauraums hinsichtlich der Gestaltmerkmale Form und Lage innerhalb der Schraube. Die Grundlage dafür bildet die **analytische Gleichung** zur von-Mises-**Spannung** (Schritt 2.1). Die Spannungswerte aus dieser Gleichung werden zur Beurteilung der Materialausnutzung herangezogen und unterstützen somit die Identifikation von Bereichen mit geringem Einfluss auf das mechanisch-funktionale Verhalten. Zur Reduktion des Rechenaufwands wird die Gleichung auf einen zweidimensionalen Querschnitt im kritischsten Bereich der Schraube angewendet, wobei Kerbfaktoren berücksichtigt werden. Zur empirischen Überprüfung der Ergebnisse der späteren Schritte wird schon jetzt ein **Prüfstand** für das zu untersuchende Objekt aufgebaut (Schritt 2.2). Dieser ermöglicht das Aufbringen und Messen einer Belastung auf die Schraube.

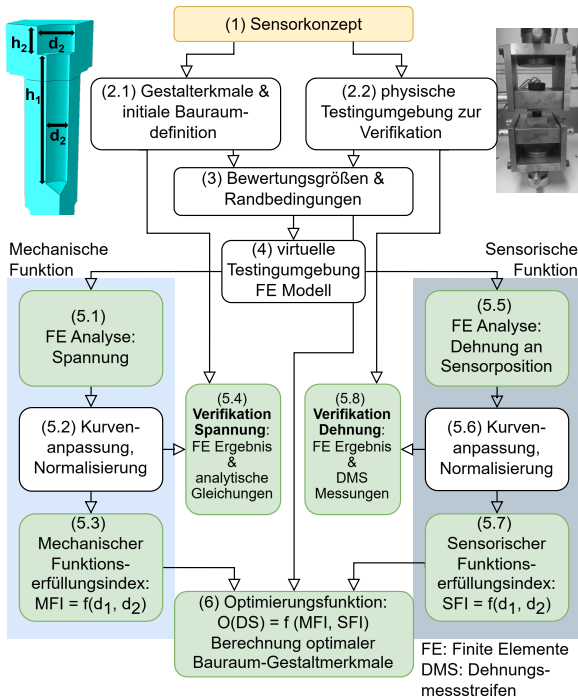


Abbildung 5.2: Ablaufdiagramm zur Identifikation des Bauraums im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung durch eine Kombination aus Optimierungsfunktion und FE-Modellen. Abbildung übersetzt aus an Peters und Matthiesen (2024).

Im Anschluss werden **Randbedingungen** definiert (Schritt 3), beispielsweise hinsichtlich maximaler Belastungen, Wechselwirkungen oder Montierbarkeit.

Daraufhin wird ein **FE-Modell** erstellt, das die Grundlage für die nachfolgende Modellierung ist (Schritt 4). Dieses bildet den Prüfstand aus Schritt 2.2 ab und ermöglicht so den Vergleich zwischen virtuellen und physischen Versuchsergebnissen. Das Modell beinhaltet einen Lastfall, der auf dem Prüfstand darstellbar ist, und ist hinsichtlich der in Schritt 2.1 bestimmten Gestaltmerkmale (Form und Lage) variabel ausgelegt.

Anschließend verzweigt sich das Vorgehen in die Modellierung des mechanischen und sensorischen Funktionserfüllungsindex.

Eine **Parameterstudie** der Gestaltmerkmale wird mit dem FE-Modell durchgeführt. Die **FE-Ausgabe** der **von-Mises-Spannung** wird für den **mechanischen Teil** (Schritt 5.1) und eine für das Sensorkonzept passende Größe, in diesem Fall **Dehnung** für den **sensorischen Teil** (Schritt 5.5) verwendet. Die resultierenden Datenpunkte werden durch **Kurvenanpassung** in eine Funktion der Spannung respektive Dehnung in Abhängigkeit der Gestaltmerkmale überführt (Schritte 5.2, 5.6). Die resultierende Funktion wird auf einen Anfangswerte **normiert**, woraus sich der mechanische (Schritt 5.3) respektive sensorische **Funktionserfüllungsindex** (Schritt 5.7) ergibt.

Die **Verifizierung der Spannungswerte** des FE-Modells erfolgt durch den Vergleich der normierten globalen Maximalspannungen mit den Ergebnissen der analytischen Spannungsgleichung aus Schritt 2.1 im kritischsten Querschnitt (Schritt 5.4). Um das Vertrauen in das FE-Modell zu erhöhen, werden die berechneten Dehnungen an bestimmten Punkten mit den Messwerten von Dehnungsmessstreifen (DMS) auf dem Prüfstand aus Schritt 2.2 verglichen.

Abschließend wird der mechanische und sensorische Funktionserfüllungsindex zu einer kombinierten **Optimierungsfunktion** in Abhängigkeit der Gestaltmerkmale zusammengeführt, die das **Verhandlungsmodell** bilden (Schritt 6). Gegebenenfalls werden die Indizes invertiert, um eine minimierbare Funktion für den Optimierer zu erhalten. Mittels Gewichtungsfaktoren kann eine Priorisierung zwischen mechanischem und sensorischem Anteil vorgenommen werden.

Im Folgenden werden die Schritte aus Abbildung 5.2 im Detail erläutert.

5.2.2 Schritt 1: Sensorkonzept

Für eine Eingrenzung des Lösungsraums auf einen handhabbaren Bereich ist eine geeignete initiale Definition des Bauraums erforderlich. Hierzu muss ein Sensorkonzept festgelegt werden (siehe Abbildung 5.2 Schritt (1)). Die Grundidee des Sensorkonzepts zur Erfassung mehraxialer Kräfte in einer Schraube besteht darin, mindestens drei Messachsen kollinear entlang der Schraubenachse anzuordnen, wie in Kapitel 2.3.3 vorgestellt wurde.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Verwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS) als Messumformer (Kapitel 2.3.1), die auf einem Verformungskörper appliziert sind. Dieses Sensorkonzept wurde bereits erfolgreich von bspw. Groche

und Brenneis (2014) angewendet (Kapitel 2.4). Zur Erhöhung des Verstärkungsfaktors und Kompensation von Temperaturstörungen fällt der Fokus auf Halbbrückenverschaltung von zwei DMS pro Messachse (Kapitel 2.3.1).

Darüber hinaus muss die Messkette zur Erfassung und Übertragung der Messdaten sowie ein Energiespeicher zur Pufferung der Versorgungsspannung innerhalb der Schraube untergebracht werden, um das Ziel zu erfüllen.

Der Bauraum muss also sechs DMS und die Elektronik aufnehmen können. Die DMS müssen im Bereich einer möglichst homogenen Dehnung liegen, die durch die Beanspruchung hervorgerufen wurde. Die Elektronik soll möglichst keine Dehnung durch die Schraube erfahren, um Beschädigungen zu vermeiden.

5.2.3 Schritt 2.1: Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums und initiale Bauraumdefinition

Ausgehend vom Vorgehen aus Schritt (2.1) werden unter Verwendung der Erkenntnisse aus Schritt (1) initiale Gestaltmerkmale des Bauraums hinsichtlich Form und Lage definiert. Hierzu werden analytische Berechnungen herangezogen, um die Spannung als Indikator für die Materialausnutzung bzw. Beanspruchbarkeit in einem gekerbten Schraubenquerschnitt unter Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchung abzuschätzen. Als Geometrie wird ein zylindrischer Querschnitt betrachtet, der einem Schraubenschaft nahe dem Übergang vom Schaft auf den Kopf entspricht (siehe Abbildung 5.3). Kerben führen insbesondere an den Rändern zu erhöhten Spannungen. Im Zentrum sinkt die Spannung, da sie über den gesamten Querschnitt konstant bleiben muss (Kapitel 2.2.5). Für die Auslegung bei dynamischer Belastung sind die maximalen Spannungen relevant, die in der Regel an den Kerbstellen auftreten (Kapitel 2.2.4, 2.2.5). Die Kerbe mit der höchsten Wirkung im ersten tragenden Gewindegang (Abbildung 2.4) soll deshalb unverändert bleiben.

Die unbekannten Funktionen der Spannung mit Kerbeeinfluss $\sigma_{z,Kerbe}$, $\sigma_{b,Kerbe}$, $\tau_{t,Kerbe}$ in Abhängigkeit vom Radius r wird durch einen Ansatz zweiter bzw. fünfter Ordnung beschrieben und unter Verwendung von Symmetrie-Randbedingungen und bekannten Randwerten am maximalen Radius $\sigma_{z,Kerbe}(r = R) = \alpha_z \sigma_z$ sowie dem Erhalt der Gesamtspannung (nach Kapitel 2.2.5) gelöst, siehe Gleichungen A.1 bis A.5 im Anhang.

Da der Fokus auf dem Verlauf der Spannungen liegt, werden die Gleichungen auf die jeweiligen Maximalspannungen $\sigma_{z,max}$, $\sigma_{b,max}$, $\tau_{t,max}$ ohne Kerbformzahlen normiert. Damit können die Maximalspannungen aus den Gleichungen

herausgekürzt werden, die somit unabhängig von den äußeren Lasten formuliert sind (Gleichung 5.1).

$$\frac{\sigma_{z,Kerbe}(r)}{\sigma_{z,max}}, \frac{\sigma_{b,Kerbe}(r)}{\sigma_{b,max}}, \frac{\tau_{t,Kerbe}(r)}{\tau_{t,max}} \quad 5.1$$

Die zur Berechnung der Gleichungen verwendeten Parameter sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die Kerbformzahlen wurden mit Geometriewerten aus der DIN EN ISO 4014:2022-10 für eine M20-Schraube berechnet (Kerbradius 0,8 mm, kleiner Durchmesser 20 mm, großer Durchmesser 28,19 mm).

Tabelle 5.1: Parameter und Werte zur Berechnung der Spannungsverteilungen mit Berücksichtigung der Kerbformzahl

Parameter	Symbol	Wert
Radius im Querschnitt	r	[0..10]mm
Maximaler Radius für M20 (DIN EN ISO 4014:2022-10)	R	10 mm
Kerbformzahl Zug (DIN 743-2:2012-12)	α_z	2,49
Kerbformzahl Biegung (DIN 743-2:2012-12)	α_b	2,23
Kerbformzahl Torsion (DIN 743-2:2012-12)	τ_t	1,63

Die Ergebnisse des Spannungsverlaufs für Zug-, Biege- und Torsionsspannung sind in Kapitel 5.3.1 dargestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wird eine zylindrische Form gewählt, die mittig im Querschnitt ausgerichtet ist, da diese Geometrie unter Berücksichtigung von Beanspruchungen aus unbekannten Richtungen die plausibelste Lösung hinsichtlich der auftretenden Spannungen darstellt. Die Parameter des Bauraums sind entsprechend in Abbildung 5.3 und Tabelle 5.2 definiert. Dabei wurden folgende Entscheidungen getroffen:

- Der Sensorbauraum liegt im Schaft (d_1, h_1), da dort eine annähernd homogene Dehnung angenommen werden kann,
- der Elektronikbauraum liegt im Kopf (d_2, h_2), da dort eine geringe Dehnung angenommen werden kann.

Im weiteren Verlauf der FE-Analyse werden die Durchmesser variiert, da diese einen hohen Einfluss auf die Spannung haben (siehe Kapitel 2.2.5). Die Höhen werden konstant gehalten. Der Einfluss von h_1 auf die Spannungserhöhung ist relativ gering, sofern sie nicht in die Kerbe Gewinde/Schaft oder zum ersten tragenden Gewindegang vordringt (Abbildung A.1). Sollte der Hohlraum in den Bereich dieser Kerben eindringen, steigt die Spannung erheblich und die Beanspruchbarkeit wird stark beeinträchtigt. Deshalb wird h_1 auf den in Tabelle 5.2 gezeigten Wert limitiert.

Tabelle 5.2: Gestaltmerkmale für den Sensormodul-Bauraum, Durchmesser d werden variiert, Höhen h sind konstant. Tabelle angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024).

Sensormodul-Gestaltmerkmale	Symbol	Wert
Durchmesser des Sensorbauraums	d_1	[0..14] mm
Höhe des Sensorbauraums	h_1	32 mm
Durchmesser des Elektronikbauraums	d_2	[0..18] mm
Höhe des Elektronikbauraums	h_2	6,5 mm

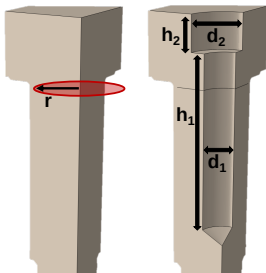


Abbildung 5.3: Querschnitt in der Kerbe Kopf/Schaft, für den der Spannungsverlauf berechnet wird (links). Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums in der Schraube (rechts). Index 1 für den Sensor- und Index 2 für den Elektronikbauraum. Abbildung entnommen aus Peters und Mirbach et al. (2024).

5.2.4 Schritt 2.2: Testing-Umgebung

Eine Testing-Umgebung wird aufgebaut, in der die Modellergebnisse der Schraubenverbindung aus der FE-Analyse physisch analysiert werden können. Die Testing-Umgebung besteht aus zwei Platten, die zentrisch von einer M20-Schraube verspannt werden können. Die Platten sind in einer Universalprüfmaschine (Test 112.50kN, Solingen, Deutschland) eingespannt, die eine Beanspruchungskraft in axialer Richtung zur Schraube aufbringen kann, siehe Abbildung 5.5.

5.2.5 Schritt 3: Bewertungsgrößen und Randbedingungen

Die Definition von Bewertungsgrößen für das mechanisch und sensorisch-funktionale Verhalten wird vorausgesetzt und sollte spätestens in diesem Schritt erfolgen. Die von-Mises-Spannung (mechanisch) und die Dehnung an der Sensorposition (sensorisch) werden ausgewählt. Als Randbedingungen werden folgende Bedingungen aufgestellt:

1. Auswertung im linear elastischen Bereich, Begrenzung der Beanspruchung dementsprechend
2. Montage und Fertigung: die obere Bohrung darf nicht kleiner als die untere sein: $d_2 \geq d_1$
3. Mathematisch: $d_2 \geq 0, d_1 \geq 0$

5.2.6 Schritt 4: Finite-Elemente-Modell

Ein FE-Modell wird aufgebaut, um den Einfluss der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale auf die Bewertungsgrößen des funktionalen Verhaltens zu berechnen, aus denen dann die Funktionserfüllungsindizes ermittelt werden. Als Bewertungsgrößen werden von-Mises-Spannungen (mechanisch) sowie Dehnungen (sensorisch) verwendet.

Die FE-Analyse wird mit Abaqus 2022 (Simulia, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich) durchgeführt. Die Geometriemodellierung sowie die Vernetzung erfolgen mit den integrierten Werkzeugen der Software. Die Geometrie wird als Schraube zwischen zwei Blöcken verspannt modelliert (Abbildung 5.5), so wie in der physischen Testing-Umgebung aus Schritt 2.2, siehe Kapitel 5.2.4. Die betrachteten Gestaltmerkmale des Sensormodul-Bauraums sind in Tabelle 5.2 sowie in der Abbildung 5.3 dargestellt. Verschiedene Parameterkombinationen mit den in Tabelle 5.2 gezeigten Wertebereichen werden simuliert. Als Referenz dient

eine Vollschraube ohne Hohlräume ($d_1 = d_2 = 0$), an der die Spannungssteigerung bewertet wird (Abbildung 5.4 links).

Die Ergebnisse werden sowohl für Varianten mit als auch ohne eingepressten Verformungskörper ausgewertet (Abbildung 5.4 rechts, Mitte). Die Presspassung ist eine zylindrische Übermaßpassung (+30 μm). Diese Varianten dienen dazu, den Einfluss des Verformungskörpers auf das funktionale Verhalten gezielt zu untersuchen.

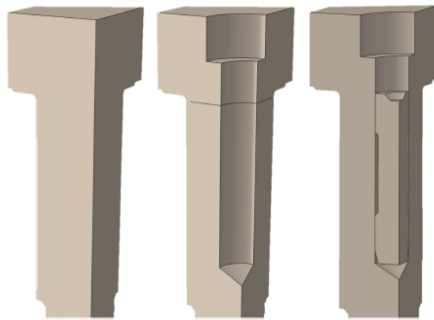


Abbildung 5.4: Varianten von Gestaltmerkmalen des Bauraums, die in der FE-Analyse modelliert und ausgewertet werden. Vollschraube ohne Hohlräume (Referenz, links), Hohlräume für Sensor und Elektronik (Mitte), eingepresster Verformungskörper (rechts). Abbildung entnommen aus Peters und Mirbach et al. (2024)

Der aufgebaute Prüfstand aus Schritt 2.2 ist in Abbildung 5.5 (links), das daran angelehnte FE-Modell in Abbildung 5.5 (rechts) dargestellt. Die verwendeten Elementarten und -anzahl sind in Tabelle A.1, Anhang A aufgeführt. Zur Vernetzung der Schraube sowie aller Bereiche in der Nähe von Kontaktflächen werden Hexaederelemente mit reduzierter Integration (C3D8R) eingesetzt. In den direkten Kontaktflächen werden hingegen Hexaederelemente ohne reduzierte Integration (C3D8) verwendet, um ein Eindringen der Elemente zu minimieren. Kritische Bereiche, wie beispielsweise die Kerben an der Schraube, werden mit einer feineren Netzdichte versehen, um genauere Ergebnisse zu erzielen. Für die Bereiche der Blöcke, die nicht mit anderen Bauteilen in Kontakt stehen, werden Tetraederelemente (C3D10) verwendet.

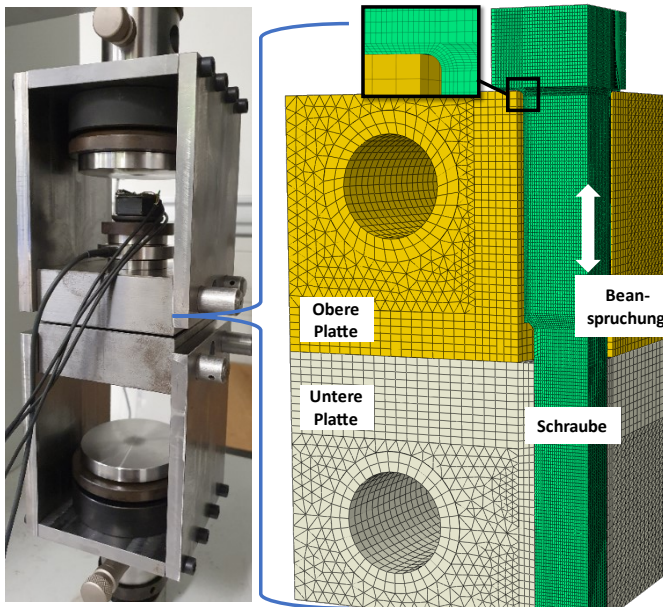


Abbildung 5.5: Testing-Umgebung zur Verifizierung der FE-Modellergebnisse (links), Nachbau der Testing-Umgebung in FE-Analyseumgebung Abaqus (rechts). Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Eine der kritischsten Kontaktflächen im System ist die Gewindeverbindung zwischen der Schraube und der unteren Platte. Eine detailgetreue Modellierung des Gewindes ist sehr aufwendig, weshalb hier die bewährte Methode der verteilten Kontaktinteraktion, „*smear contact interaction*“ (Montgomery, 2008) verwendet wird, wie sie in Abaqus als spezielle Funktion für Schraubenverbindungen implementiert ist.

Als Material wird die Festigkeitsklasse 8.8 (DIN EN ISO 898-1:2013-05) ausgewählt, mit einer Streckgrenze von 640 N/mm^2 . Die Belastung besteht aus einer Vorspannkraft von 40 kN sowie einer zusätzlichen Zugkraft von 40 kN als Betriebskraft. Da die nachgelagerte Auswertung relativ erfolgen soll, werden alle Werte auf die Vollschrabe normiert, wodurch sich die Höhe der Belastung eliminiert. Für Schritt 5.8 (Verifizierung der Dehnung) wird die Zugkraft zwischen

5 kN und 40 kN variiert. Zugkräfte haben den größten Einfluss auf die Erhöhung der von-Mises-Spannung im Bereich von Kavitäten im Schaft, wie in Kapitel 5.3.1 gezeigt wird. Die gewählten Kräfte führen zu einer Beanspruchung, die unterhalb der maximalen Beanspruchbarkeit der verwendeten Festigkeitsklasse der modellierten Schraube liegt, sodass das Materialverhalten im linear-elastischen Bereich bleibt (Schritt 3). Um die Rechenzeit zu reduzieren, wird ein Viertelmodell der Schraube betrachtet.

5.2.7 Schritt 5.1-5.3: Modellierung des mechanischen Funktionserfüllungsindex

Der nächste Schritt im dargestellten Vorgehen (siehe Abbildung 5.2, Schritt 5.1) ist die Modellierung des mechanischen Funktionserfüllungsindex (MFI). Die mechanische Funktion einer genormten metrischen Schraube besteht darin, eine lösbare Verbindung zwischen Bauteilen herzustellen. Dabei wird eine Vorspannkraft auf die zu verbindenden Bauteile zwischen Schraubenkopf und Gewinde aufgebracht. Hierdurch wirken Kräfte und Momente auf die Schraube, die zu Spannungen in der Schraube führen. Zur Bewertung der mechanischen Funktion wird die von-Mises-Spannung herangezogen, was dem Stand der Technik entspricht und beispielsweise erfolgreich durch Bonaiti, Knoll, Otto, Gorla und Stahl (2022) sowie Dumstorff et al. (2014) angewendet wurde.

Das Grundkonzept zur Modellierung des mechanischen Funktionserfüllungsindex durch die von-Mises-Spannung als Bewertungsgröße in Abhängigkeit der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

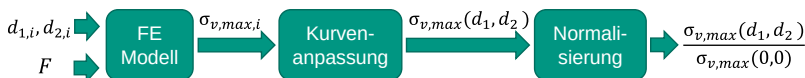


Abbildung 5.6: Modellentwurf zur Berechnung des mechanischen Funktionserfüllungsindex (MFI). Eingaben sind die Gestaltmerkmale in verschiedenen Variationen i des Bauraums sowie die Beanspruchung F . Das FE-Modell berechnet daraus die von-Mises-Spannung. Anschließend erfolgten eine Kurvenanpassung und Normalisierung. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024)

Die Ausgabegröße ist die auf die Referenzschraube normierte maximale von-Mises-Spannung, welche Grundlage für die Definition des MFI in Abhängigkeit der variierenden Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale (d_1, d_2) ist. Die Eingangsgrößen sind die genannten Gestaltmerkmale sowie die Beanspruchung. Das in Kapitel 5.2.6 beschriebene FE-Modell liefert die von-Mises-Spannungen als Zwischenergebnis. Die resultierenden Spannungsdaten werden einer Kurvenanpassung unterzogen, um eine Funktion der Spannung in Abhängigkeit von d_1, d_2 zu erstellen. Die Kurvenanpassung erfolgt mit MATLAB 2022b (MathWorks, MA, USA). Anschließend wird die Funktion auf die maximale von-Mises-Spannung einer Schraube ohne Kavitäten ($d_1 = d_2 = 0$) normiert, wodurch sich der MFI ergibt, wie in Gleichung 5.2 dargestellt.

$$\text{MFI} := \sigma_{v,\text{norm}}(d_1, d_2) = \frac{\sigma_{v,\text{max}}(d_1, d_2)}{\sigma_{v,\text{max}}(d_1 = 0, d_2 = 0)}. \quad 5.2$$

5.2.8 Schritt 5.4: Prüfung der FE-Modell-Spannungsergebnisse

Zur Verifizierung der Ergebnisse des FE-Modells bezüglich der maximalen von-Mises-Spannung werden analytische Gleichungen herangezogen. Die zu untersuchende von-Mises-Spannung, basierend auf Zug-, Biege- und Torsionsspannung ($\sigma_z, \sigma_b, \tau_t$), liegt in der Kerbe Kopf/Schaft. Deshalb werden die Gleichungen für einen zweidimensionalen Querschnitt in diesen Bereich in Abhängigkeit eines Hohlraumdurchmessers d aufgestellt:

$$\sigma_{v,\text{Kerbe}}(d) = \sqrt{(\sigma_z(d) \cdot \alpha_z + \sigma_b(d) \cdot \alpha_b)^2 + 3(\tau_t(d)\alpha_t)^2}. \quad 5.3$$

Im Fokus der Auswertung steht, ähnlich wie beim MFI, die relative Änderung zu einer unveränderten Schraube ohne Hohlraum $d = 0$, die wie folgt analytisch berechnet wird:

$$\sigma_{v,\text{Kerbe,norm}}(d) = \frac{\sigma_{v,\text{Kerbe}}(d)}{\sigma_{v,\text{Kerbe}}(d = 0)}. \quad 5.4$$

Dabei kürzen sich absolute Werte der Beanspruchung (Kräfte und Momente) heraus. Die Formeln zur Berechnung der Zug-, Biege- und Torsionsspannung sind in Kapitel 2.2.5 dargestellt. Für das FE-Modell wird $\sigma_{v,\text{norm}}(d_1 = d_2 = d)$ herangezogen (Gleichung 5.2).

5.2.9 Schritt 5.5-5.7: Modellierung des sensorischen Funktionserfüllungsindex

Zur Modellierung des sensorischen Funktionserfüllungsindex wird die Dehnung an der Sensorposition in Abhängigkeit der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale betrachtet. Das Messprinzip von DMS basiert auf der Wandlung der physischen Dehnung in eine elektrische Größe (Kapitel 2.3.1). Hierzu wird die Dehnung an den Flächen einer Bohrung auf halber Höhe des Schraubenschafts betrachtet, da dies die wahrscheinlichste Position für die Platzierung von DMS ist (Kapitel 5.2.2).

Eine höhere Dehnung führt zu einem besser ausnutzbaren Messbereich, was sich positiv auf das Signal-Rausch-Verhältnis und die erreichbare Auflösung auswirkt. Dies wird durch die grundlegenden Formeln zur Funktionsweise von DMS beschrieben, die den Zusammenhang zwischen Dehnung und elektrischer Messgröße darstellen (Kapitel 2.3.1). Je größer die Dehnung, desto größer die Änderung der elektrisch messbaren Größe, desto besser das Signal-Rausch-Verhältnis und desto besser die Auflösung. Daraus folgend wird der sensorische Funktionserfüllungsindex (SFI) formuliert, der direkt von der Dehnung abhängt (Gleichung 5.5):

$$\begin{aligned} \text{SFI}(d_{1,2}) &\propto \varepsilon(d_1, d_2) = \frac{\Delta R(d_1, d_2)}{Rk} \\ \text{SFI} &:= \varepsilon_{\text{Sensor, norm}}(d_1, d_2) = \frac{\varepsilon_{\text{Sensor}}(d_1, d_2)}{\varepsilon_{\text{Sensor}}(d_1 = 0, d_2 = 0)}. \end{aligned} \tag{5.5}$$

Das Konzept des Modells zur Berechnung des SFI ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Eingangsgrößen sind die variierenden Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale (d_1, d_2) sowie die Beanspruchung. Das FE-Modell errechnet die Dehnung, die dann durch Kurvenanpassung in eine Funktion in Abhängigkeit von d_1, d_2 überführt und normiert wird auf den Dehnungswert der Referenzschraube ($d_1 = d_2 = 0$).



Abbildung 5.7: Modellentwurf zur Berechnung des sensorischen Funktionserfüllungsindex (SFI). Eingaben sind Gestaltmerkmale in verschiedenen Variationen i des Bauraums sowie die Beanspruchung F . Das FE-Modell berechnet daraus die Dehnung an der Sensorposition. Anschließend erfolgen eine Kurvenanpassung und Normalisierung. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Mit den Formeln aus Kapitel 2.3.1 und Kenntnis der Messkette lässt sich die **Auflösung der Kraftmessung** $F_{n,min}$ bestimmen, indem die effektive Bitzahl (ENOB, „Effective Number of Bits“) des Analog-Digital-Konverters (ADC) berücksichtigt wird. Diese ergibt sich aus der Auflösung des ADC, der Verstärkung und dem Rauschverhalten des ADC. Zur Berechnung der kleinsten messbaren Kraft wird U_A in Gleichung 2.9 durch $U_{ref}/2^{(ENOB)}$ ersetzt, wobei U_{ref} die Referenzspannung des ADC ist und hier mit der Brückenspeisespannung U_B gleichgesetzt wird, siehe Gleichungen 5.6-5.8:

$$\epsilon_{min} = \frac{4}{k} \frac{U_{ref}}{U_B 2^{ENOB}} = \frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{1}{2^{ENOB}} \quad 5.6$$

$$F_{n,min} = AE \epsilon_{n,min} = AE \frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{U_{ref}}{U_B 2^{ENOB}} = AE \frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{1}{2^{ENOB}} \quad 5.7$$

$$ENOB = \log_2 \left(\frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{1}{\epsilon_{min}} \right) = \log_2 \left(\frac{1}{B} \frac{4}{k} \frac{AE}{F_{min}} \right). \quad 5.8$$

5.2.10 Schritt 5.8: Prüfung der FE-Modell-Dehnungsergebnisse

Gemäß dem Vorgehen aus 5.2.1, Schritt 5.8 wird die errechnete Dehnung des FE-Modells an definierten Punkten mit DMS-Messungen an der in Schritt 2.2

aufgebauten Testing-Umgebung verglichen (Kapitel 5.2.4). Hierzu werden die Messungen von:

1. drei auf der Außenseite des Schraubenschafts applizierten DMS (Typ: 1-LY41-3/350, HBM, Darmstadt, Deutschland), siehe Abbildung 5.8 (links),
2. sowie einem zylindrischen Dehnungsmessstreifen in einer Bohrung vom Durchmesser 2 mm (Typ: 1-LB11-3/120ZW, HBM, Darmstadt, Deutschland), siehe Abbildung 5.8 (rechts), mit den Dehnungsergebnissen des FE-Modells an jeweils entsprechenden Punkten verglichen.

Zur Messwerterfassung wird ein Verstärker vom Typ GSV-1A4 (ME-Meßsysteme, Hennigsdorf, Deutschland) verwendet, der über eine Referenzspannung von 5 V und eine Empfindlichkeit von 2 mV/V verfügt. Der Offset wurde vor jedem Prüfablauf kompensiert.

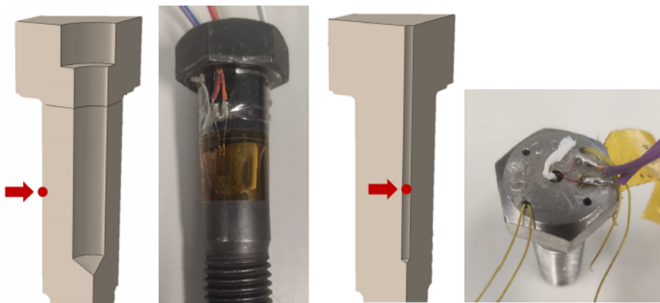


Abbildung 5.8: Vergleichspunkte zwischen FE-Modell und physischen Testing-Objekt. Schraube mit Hohlbohrung $d_1 = 10$ mm, $d_2 = 13$ mm und drei DMS am Schaft in selber Höhe des Knotens im FE-Modell (links). Schraube mit Hohlbohrung $d_1 = d_2 = 2$ mm und zylindrischem DMS in selber Höhe (rechts). Abbildung übernommen aus Peters und Mirbach et al. (2024).

5.2.11 Schritt 6: Kombination der Modelle zur Optimierungsfunktion

Der mechanische und sensorische Funktionserfüllungsindex wird in einer gemeinsamen Funktion (Symbol O) in Abhängigkeit von den Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen zusammengeführt. Um eine Anpassbarkeit der Priorisierung

zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung zu ermöglichen, werden den Teilkomponenten Gewichtungsfaktoren w_{mech} und w_{sens} zugewiesen:

$$w_{\text{mech}} = 1 - w_{\text{sens}}, w_{\text{mech}} = [0..1] \quad 5.9$$

Die Optimierungsfunktion wird als Exponentialfunktion aufgebaut. Die zuvor beschriebenen, normierten Indizes MFI (Kapitel 5.2.7) und SFI (Kapitel 5.2.9) bilden die Exponenten zusammen mit den Gewichtungsfaktoren. Die Normierung gewährleistet eine bessere Skalierung und wird erfolgreich von bspw. Sahib und Ahmed (2016) angewendet. Der SFI wird zusätzlich invertiert, da eine hohe Dehnung das Optimum darstellt, die Optimierungsfunktion jedoch minimiert werden soll. Die Optimierungsfunktion ist in Gleichung 5.10 dargestellt:

$$O(d_1, d_2) := \exp\left(w_{\text{mech}} \frac{\sigma_{v,\text{max}}(d_1, d_2)}{\sigma_{v,\text{max}}(0,0)}\right) \cdot \exp\left(w_{\text{sens}} \frac{\varepsilon_{\text{Schaft}}(0,0)}{\varepsilon_{\text{Schaft}}(d_1, d_2)}\right) \quad 5.10$$

Zur Bestimmung des Minimums der Optimierungsfunktion wird die Optimierungstoolbox von MATLAB verwendet. Dabei kommt der Standard-Solver „fmincon“ zum Einsatz. Als Randbedingungen werden die in Kapitel 5.2.5 aufgestellten Bedingungen übergeben.

5.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vorgehens anhand der Schraube vorgestellt.

5.3.1 Initiale Abschätzung der Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums

Basierend auf den analytisch berechneten Spannungsverläufen im Querschnitt der Kerbe Kopf/Schaft für Zug, Biegung und Torsion kann eine geeignete Lage und Form für den Sensormodulbauraum identifiziert werden. Abbildung 5.9 zeigt den Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Radius eines Querschnitts im

Schraubenschaft mit einem Außendurchmesser von 20 mm ohne Hohlbohrung. Bei Biege- und Torsionsbeanspruchung ohne Berücksichtigung von Kerbeffekten ist die Spannung an der Außenseite höher als im Inneren der Schraube. Wird der Kerbeinfluss im Übergangsbereich zwischen Kopf und Schaft berücksichtigt, verstärkt sich dieser Effekt und tritt sogar im Zuglastfall auf. Kerben verlagern die Spannung an die Außenränder.

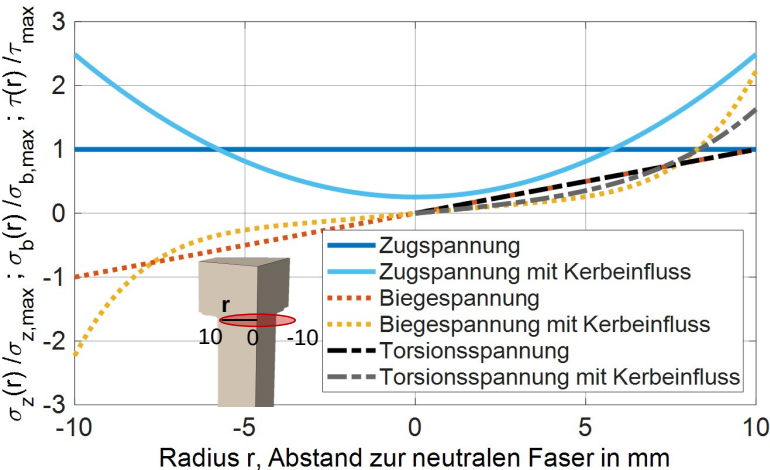


Abbildung 5.9: Vergleich der normierten Spannungsverläufe für Zug- (σ_z), Biege- (σ_b in Abhängigkeit zur neutralen Faser) und Torsionsbeanspruchung (τ in Abhängigkeit des Radius, ausschließlich positiv) im Querschnitt der Kerbe Schraubenkopf/-schaft einer M20-Schraube mit und ohne Berücksichtigung des Kerbeinflusses. Mit Kerbeinfluss steigt die Spannung an der Außenseite ($|r| = 10$ mm) an und nimmt im Inneren des Schraubenquerschnitts ab. Im Zuglastfall mit Kerbeinfluss zeigt sich an der Außenseite ($|r| = 10$ mm) die höchste Spannungssteigerung. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Daraus lässt sich ableiten, dass sich zentral im Schraubenschaft platzierte Kavitäten weniger sensibel auf eine Spannungserhöhung auswirken und vermeiden somit eine übermäßige Reduktion der mechanischen Funktion. Da die Richtung der Belastung insbesondere bei Biegebeanspruchung nicht bekannt ist, stellen zylindrische Hohlräume die sinnvollste Form dar.

Zudem zeigt sich, dass die Zugbeanspruchung mit einer Spannungsüberhöhung von Faktor 2,5 etwas höher liegt als die Biegebeanspruchung (2,2) und deutlich höher als die Torsionsbeanspruchung (1,6). Daher wird dieser als kritischster Lastfall für die FE-Analyse im folgenden Abschnitt herangezogen.

5.3.2 Mechanischer Funktionserfüllungsindex

Der erste Schritt des mechanischen Modells besteht in der Herleitung des Zusammenhangs zwischen den Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen (Durchmesser d_1 , d_2) und der von-Mises-Spannung. Dazu wird das FE-Modell, wie in Kapitel 5.2.6 (Schritt 4) beschrieben, ausgeführt.

Abbildung 5.10 zeigt exemplarisch die Verteilung der von-Mises-Spannung σ_v in der Schraube bei den Sensorbauraum-Gestaltmerkmalen $d_1 = 10 \text{ mm}$ und $d_2 = 13 \text{ mm}$ unter der in Schritt 4 beschriebenen Beanspruchung.

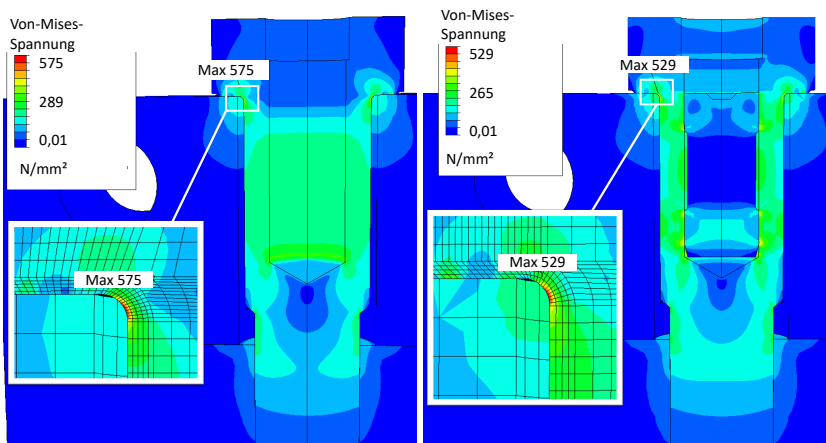


Abbildung 5.10: FE-Ergebnisse der von-Mises-Spannung σ_v Schraube mit Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen $d_1 = 10 \text{ mm}$, $d_2 = 13 \text{ mm}$, zeigt ein Maximum von $\sigma_v = 575 \text{ N/mm}^2$ (links). Schraube mit eingepresstem Verformungskörper zeigt ein Maximum von $\sigma_v = 529 \text{ N/mm}^2$ (rechts). Die Belastung beträgt wie in Kapitel 5.2.6 beschrieben 40 kN Vorspannkraft und 40 kN axiale Betriebskraft. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Die höchste Spannung tritt bei allen simulierten Varianten in der Kerbe zwischen Schraubenkopf und -schaft auf. Der eingepresste Verformungskörper (siehe Kapitel 5.2.6) ist in der Lage, die Spannung zu reduzieren, insbesondere die maximale Spannung im Bereich der Kerbe zwischen Schraubenkopf und -schaft verringert sich um 8 % (Abbildung 5.10).

Die in der FE-Analyse simulierten Kombinationen der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale sind in Abbildung 5.11 als weiße Punkte dargestellt. Auf Basis der daraus resultierenden Spannungswerte wurde mit MATLAB eine Kurvenanpassung mit Polynomen dritten Grades für d_1 und d_2 durchgeführt, siehe Gleichung 5.11. Als Anpassungsmethode wurde die Methode der kleinsten Quadrate mit robusten bisquare-Einstellungen gewählt, bei der die Summe der quadrierten Residuen minimiert und Ausreißer durch bisquare-Gewichte abgeschwächt werden. Als Anpassungsalgorithmus kam das Trust-Region-Verfahren zum Einsatz.

$$\sigma_{v,fit}(d_1, d_2) = p_{00} + p_{10}d_1 + p_{01}d_2 + p_{20}d_1^2 + p_{11}d_1d_2 + p_{02}d_2^2 + p_{30}d_1^3 + p_{21}d_1^2d_2 + p_{12}d_1d_2^2 + p_{03}d_2^3 \quad 5.11$$

In der Kurvenanpassung werden die zehn Koeffizienten p_{ij} der Ansatzgleichung eingegrenzt. Der Koeffizient p_{00} kann als konstanter Offset der Funktion interpretiert werden und wurde daher auf einen Bereich zwischen 460 N/mm² und 480 N/mm² beschränkt, entsprechend dem Wert für die Vollschrabe ohne Hohlräume (siehe Abbildung 5.11, 469 N/mm² bei $d_1 = d_2 = 0$). Die Gleichung 5.11 zeigt die angepasste Funktion in Abhängigkeit von d_1 und d_2 , die eine Spannungsfläche im Parameterraum aufspannt. Die resultierende Oberfläche ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Spannung steigt mit größer werdenden d_1 und d_2 an. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,988. Die ermittelten Koeffizienten der Polynome sind Tabelle A.2 aufgeführt. Aus Gleichung 5.11 und mittels der Koeffizienten wird der Anfangswert bei $d_1 = d_2 = 0$ auf 469 N/mm² berechnet. Damit wird die Funktion für die weitere Verwertung in der Optimierung normiert, um die relative Änderung zu betrachten (Kapitel 5.2.7, Schritt 5.6).

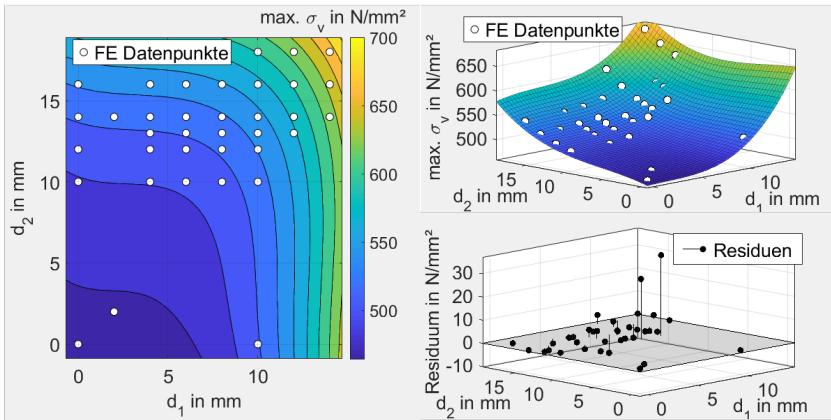


Abbildung 5.11: Von-Mises-Spannung und Kurvenanpassung für Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Sensormodulbauparameter d_1 und d_2 . Die im FE-Modell simulierten Datenpunkte sind weiß dargestellt. Die Spannung steigt mit größer werdenden d_1 und d_2 an. Residuengraph zeigt die Fehler der Kurvenanpassung. Abbildung angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).

5.3.3 Prüfung der FE-Ergebnisse für die von-Mises-Spannung

Abbildung 5.12 zeigt die normierte von-Mises-Spannung des FE-Modells im Vergleich zur analytisch berechneten Spannung gemäß Gleichung 5.4, Kapitel 5.2.8. Für Hohlraumdurchmesser $d_1 = d_2 = d \leq 15 \text{ mm}$ zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Bei größeren Durchmessern hingegen liefert die analytische Berechnung höhere Spannungssteigerungen als das FE-Modell.

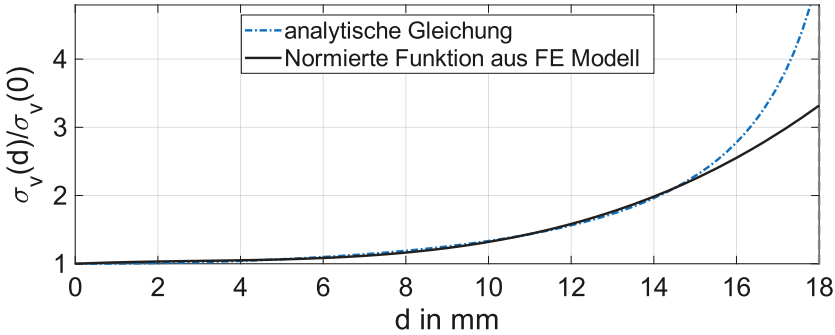


Abbildung 5.12: Vergleich der analytischen Berechnung mit den auf den Korbquerschnitt begrenzten FE-Modellergebnissen der von-Mises-Spannung, normiert auf den Anfangswert der Vollschraube. Gute Übereinstimmung für $d \leq 15$ mm, was die Qualität der FE-Ergebnisse zeigt. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

5.3.4 Sensorischer Funktionserfüllungsindex

Für den sensorischen Funktionserfüllungsindex SFI werden die Dehnungsdaten aus den FE-Modellergebnissen herangezogen. Analog zum Vorgehen bei der mechanischen Modellierung wurde auch hier eine Kurvenanpassung der Datenpunkte in MATLAB mit Polynomen dritten Grades für d_1 und d_2 durchgeführt. Das Verfahren sowie die verwendete Kurvenanpassungsmethode entsprechen denen der mechanischen Modellierung, jedoch unter Verwendung der Dehnung ε anstelle der Spannung σ , siehe Gleichung 5.12.

$$\varepsilon_{\text{Schaft,fit}}(d_1, d_2) = p_{00} + p_{10}d_1 + p_{01}d_2 + p_{20}d_1^2 + p_{11}d_1d_2 + p_{02}d_2^2 + p_{30}d_1^3 + p_{21}d_1^2d_2 + p_{12}d_1d_2^2 + p_{03}d_2^3 \quad 5.12$$

Die resultierende Oberfläche ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Dehnung steigt mit größer werdenden d_1 an, d_2 (Durchmesser des Hohlraums im Kopf) zeigt einen geringen Einfluss auf die Dehnung an der Sensorposition. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Kurvenanpassung beträgt 0,98. Die Koeffizienten der Polynome sind Tabelle A.3 aufgeführt. Aus Gleichung 5.12 berechnet sich der Anfangswert zu

$\epsilon_{\text{Schaft,fit}}(0,0) = 5,95 \cdot 10^{-4}$. Damit wird die Funktion für die weitere Verwertung in der Optimierung normiert, um die relative Änderung zu betrachten (Kapitel 5.2.9, Schritt 5.6).

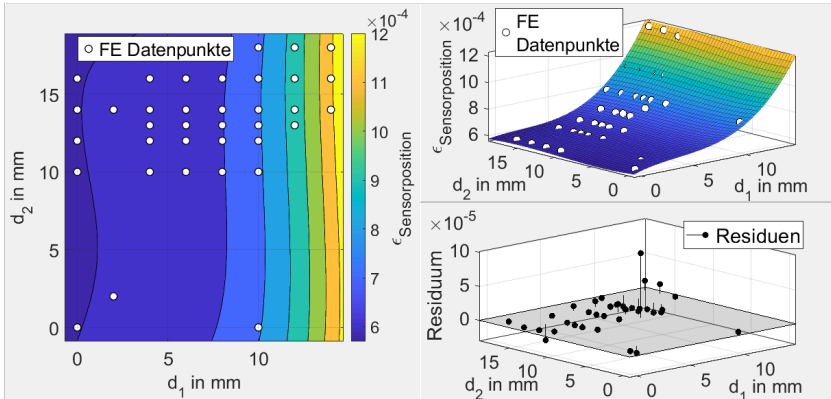


Abbildung 5.13: Dehnung und Kurvenanpassung für Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale d_1, d_2 . Die im FE-Modell simulierten Datenpunkte sind weiß dargestellt. Die Dehnung steigt mit größer werdenden d_1 an, d_2 hat einen sehr geringen Einfluss. Residuengraph zeigt die Fehler der Kurvenanpassung. Abbildung angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).

5.3.5 Prüfung der FE-Ergebnisse für die Dehnung

Abbildung 5.14 zeigt den Vergleich der Dehnung des FE-Modells mit den Messwerten der drei DMS am Schraubenschaft (links) sowie des zylindrischen DMS in der zentrischen Bohrung (rechts) bei variierenden Beanspruchungen (Vergleich dazu Abbildung 5.8). Die Dehnungsverläufe der DMS folgen grundsätzlich dem Anstieg des FE-Modells, weichen jedoch leicht davon ab. Dies kann einerseits an Ungenauigkeiten in der Applikation der DMS liegen, darunter fallen Ausrichtung der DMS und die Klebschichtdicke. Andererseits kann es an Unsicherheiten in den Umrechnungsparametern von der elektrischen Messgröße auf die Dehnung, wie bspw. des k-Faktors der DMS oder des E-Moduls (Kapitel 2.3.1) liegen. Die drei DMS am Schraubenschaft zeigen zudem untereinander gewisse Abweichungen, die wie zuvor erklärt durch Ungenauigkeiten in der Applikation hervorgerufen werden können, aber auch durch ein überlagertes Biegemoment. Dies kann durch

toleranzbedingte Abweichungen bspw. der Parallelität in der Fertigung der Platten verursacht werden. Die relative Abweichung zweier DMS verringert sich mit zunehmender Last von etwa 0,3 auf 0,2, während die Abweichung des dritten DMS über den gesamten Lastbereich relativ konstant bei etwa 0,1 verbleibt. Die Abweichung des DMS in der zentrischen Bohrung sinkt für Kräfte ab 30 kN unter 0,1. Auf Basis der Ergebnisse zählt das FE-Modell als verifiziert, die vorhandenen Abweichungen sind eher Messunsicherheiten zuzuordnen und nicht systematischen Ungenauigkeiten im FE-Modell.

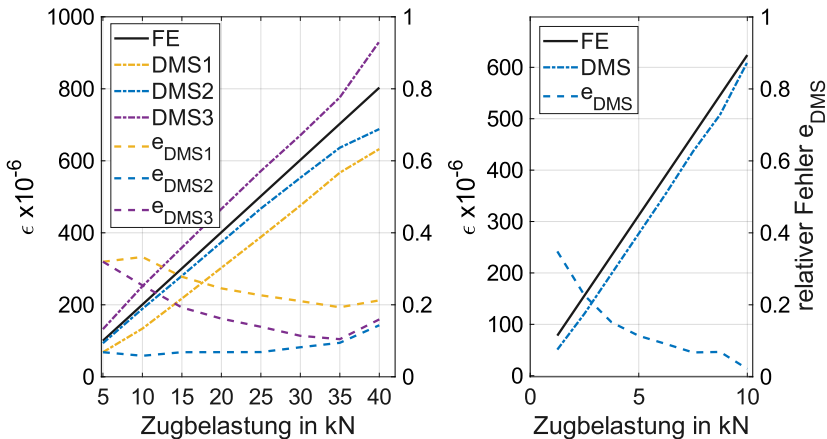


Abbildung 5.14: Vergleich zwischen FE-Ergebnissen und DMS-Messungen an der Außenseite des Schafts (links) und in einer zentrischen Bohrung (rechts). Die DMS-Messungen am Schaft stimmen in der Steigung gut mit dem FE-Modell überein, der relative Fehler (e) variiert zwischen den DMS und liegt zwischen 0,3 für DMS1,3 und 0,1 für DMS2. Die DMS-Messung in der zentrischen Bohrung (rechts) stimmt von der Steigung ebenfalls gut mit dem FE-Modell überein. Die geringere Dehnung im Vergleich zum linken Bild ist materialbedingt. Der relative Fehler sinkt mit größer werdender Kraft und ist geringer als bei den DMS-Messungen am Schaft. Dies lässt eine überlagerte Biegung im physischen Aufbau vermuten. Abbildung angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).

5.3.6 Verhandlungsmodell: Kombination der Modelle zur Optimierungsfunktion

Gemäß Schritt 6 (Kapitel 5.2.11, Abbildung 5.2) wird der mechanische und sensorische Funktionserfüllungsindex in eine gemeinsame Optimierungsfunktion (Symbol O), dem Verhandlungsmodell zusammengeführt, um daraus die Sensormodulbaurraum-Gestaltmerkmale d_1 und d_2 bei optimaler Funktionserfüllung zu errechnen.

Abbildung 5.15 zeigt eine Reihe von Konturdiagrammen des Modells bei variierenden Gewichtungen $w_{\text{mech}}, w_{\text{sens}}$ gemäß Gleichung 5.9.

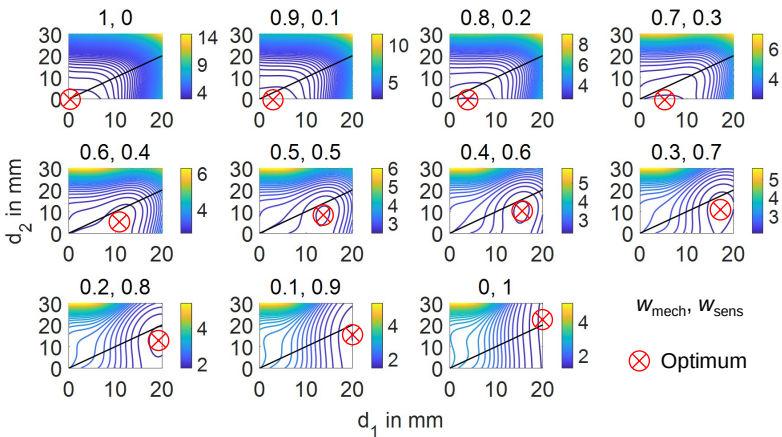


Abbildung 5.15: Verhandlungsmodell aus der Kombination des mechanischen und sensorischen Funktionserfüllungsindex mit verschiedenen Gewichtungen von $w_{\text{mech}} = 1, w_{\text{sens}} = 0$ (links oben) bis $w_{\text{mech}} = 0, w_{\text{sens}} = 1$ (rechts unten). Dunkelblau zeigt Bereiche guter Funktionserfüllung, die schwarze Linie zeigt die Montierbarkeitsrandbedingung $d_2 \geq d_1$, nur Werte oberhalb der Linie erfüllen diese Bedingung. Abbildung entnommen aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Wie zu erwarten, verschieben sich die Optima (Minima in Dunkelblau) in Abhängigkeit der Gewichtung: Hohe Werte für w_{mech} und niedrige für w_{sens} führen zu Optima bei kleinen d_1, d_2 und umgekehrt. Anschaulich bedeutet das: Bei **hoher**

Priorisierung der mechanischen Funktionserfüllung ähnelt die Schraube der **Vollschraube ohne Hohlräume**, da das Optimum bei $d_1 = d_2 = 0$ mm liegt, und bei **hoher sensorischer Funktionserfüllung** ähnelt die Schraube einer **Dehnschraube**, da das Optimum bei hohen d_1 und somit geringem Querschnitt im Schraubenschaft liegt, was zu einer hohen Dehnung an den Sensorelementen führt.

Weiterhin lässt sich erkennen, dass bei hohen Gewichtungen der sensorischen Funktionserfüllung ($w_{\text{sens}} \geq 0,8$) der Einfluss von d_1 dominiert (Linien gleicher Funktionserfüllung verlaufen senkrecht entlang d_1 -Richtung), während der Einfluss von d_2 sehr klein ist für $d_2 \leq 20$ mm (Linien gleicher Funktionserfüllung verlaufen entlang d_2 -Richtung).

Bei gleicher Gewichtung des mechanischen und sensorischen Anteils (jeweils 0,5, siehe Abbildung 5.15) ergibt sich das Optimum zunächst bei $d_1 = 13,7$ mm und $d_2 = 9$ mm. Dieses erfüllt jedoch nicht die Montierbarkeitsrandbedingung $d_1 \geq d_1$ (Kapitel 5.2.5). Unter Berücksichtigung dieser Randbedingung liegt das Optimum genau auf dieser Randbedingung, bei $d_1 = d_2 = 13,2$ mm. Das führt zu einem mechanischen Funktionserfüllungsindex (MFI) von 1,29 (29 % erhöhte von-Mises-Spannung im Vergleich zur Vollschraube) und einem sensorischen Funktionserfüllungsindex (SFI) von 1,81 (81 % erhöhte Dehnung im Vergleich zur Vollschraube). Diese Differenz zwischen MFI und SFI im Optimum unter gleicher Gewichtung der mechanischen und sensorischen Funktionserfüllung zeigt, dass der Einfluss des Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmals d_1 auf die sensorische Funktion stärker ist als auf die mechanische Funktion, also dass die Dehnung prozentual mehr steigt als die von-Mises-Spannung.

5.4 Beispielanwendung des Verhandlungsmodells

Das Verhandlungsmodell lässt sich auf drei verschiedene Weisen nutzen, je nachdem welche Anforderungen gegeben werden:

1. Gleichzeitige Anforderungen an mechanische und sensorische Funktionserfüllung.
2. Anforderungen primär an die mechanische Funktionserfüllung.
3. Anforderungen primär an die sensorische Funktionserfüllung.

Während bei Fall 1 Anforderungen sowohl an mechanische als auch sensorische Funktionserfüllungen gestellt werden, behandeln Fälle 2 und 3 Anforderungen an nur eine der Funktionserfüllungen.

Für die Berechnungen werden Werte aus Tabelle 5.3 zugrunde gelegt.

Tabelle 5.3: Werte zur Berechnung der Beispielanwendungen des Verhandlungsmodells.

Symbol	Bedeutung	Wert
k	DMS Faktor	2,05
B	Wheatstone-Brückenfaktor	1,3
U_B	Brückenspeisespannung bzw. ADC Referenzspannung	2,5 V
$\varepsilon_{\text{Schaft},0}$	Dehnung im Schaft der Vollschraube (Kapitel 5.3.2)	$5,95 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{v,0}$	Maximale von-Mises-Spannung der Vollschraube (Kapitel 5.3.4)	469 N/mm ²

5.4.1 Gleichzeitige Anforderungen an mechanische und sensorische Funktionserfüllung

Für diesen Fall ist zunächst die Festlegung von Gewichtungsfaktoren erforderlich, um die Priorisierung zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung im Verhandlungsmodell abzubilden. In diesem Beispiel werden die Gewichtungen auf $w_{\text{mech}} = w_{\text{sens}} = 0,5$ gesetzt, beide Funktionen werden also gleich priorisiert. Zusätzlich werden Bedingungen für beide Funktionserfüllungen definiert (Gleichung 5.13):

$$\begin{aligned} \text{MFI}(d_1, d_2) &\leq 1.1, \\ \text{SFI}(d_1, d_2) &\geq 1.2. \end{aligned} \tag{5.13}$$

Die Optimierungsfunktion des Verhandlungsmodells wird gemeinsam mit den aufgestellten Bedingungen (inklusive der Montierbarkeitsrandbedingung) formuliert. Es ergeben sich Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale von $d_1 = d_2 = 8,8$ mm. Der mechanische Funktionserfüllungsindex MFI beträgt wie gefordert 1,1, was einem Anstieg der von-Mises-Spannung um 10 % entspricht (Gleichungen 5.2, 5.11). Der sensorische Funktionserfüllungsindex SFI beträgt 1,22, was einer Erhöhung der Dehnung an der Sensorposition um 22 % entspricht (Gleichungen 5.5, 5.12).

5.4.2 Anforderungen an die mechanische Funktionserfüllung

In diesem Beispiel wird zunächst die maximal zulässige Spannungserhöhung festgelegt. Diese ist anwendungsspezifisch und kann in der Regel durch eine fundierte Analyse bestimmt werden. In diesem Beitrag wird ein maximaler Spannungsanstieg von 25 % respektive ein Faktor von 1,25 festgelegt (von 469 N/mm² auf 582 N/mm² für den betrachteten Lastfall). Dies liegt in einem Bereich, der beispielsweise durch die Wahl einer höheren Festigkeitsklasse kompensiert werden kann, bspw. von 8.8 auf 10.9 (DIN EN ISO 898-1:2013-05). Die Nachteile werden in Kapitel 5.5 diskutiert. Als Bedingung wird Gleichung 5.14 formuliert:

$$MFI(d_1, d_2) \leq 1,25. \quad 5.14$$

Mögliche Lösungen für d_1, d_2 , welche die genannte Bedingung erfüllen, sind in Abbildung 5.16 durch die rot gestrichelte Linie dargestellt.

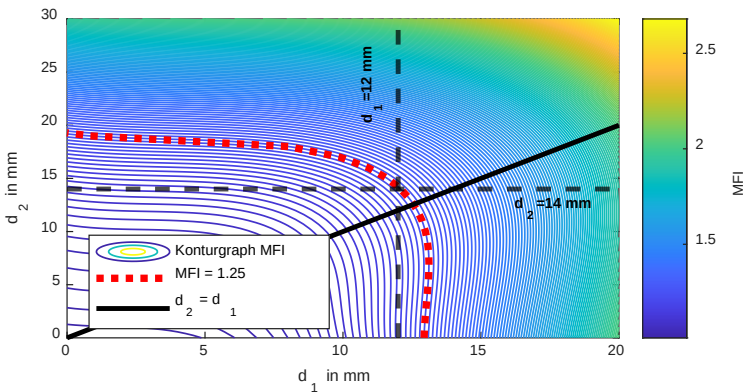


Abbildung 5.16: Mechanischer Funktionserfüllungsindex (MFI) in Abhängigkeit von d_1, d_2 mit Bedingung $MFI \leq 1,25$ und $d_2 = 14 \text{ mm}$, daraus folgt $d_1 \approx 12 \text{ mm}$. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Um konkrete Werte für die Parameter festzulegen, muss einer der beiden Parameter vorgegeben oder zusätzliche Randbedingungen definiert werden. In diesem Beispiel wird der Durchmesser des Elektronikbauraums im Schraubenkopf mit $d_2 = 14$ mm festgelegt, da das realistische Dimension eines Elektronikmoduls sind. Am Schnittpunkt dieser Vorgabe mit der Konturlinie aus Gleichung 5.14 ergibt sich für das fehlende Gestaltmerkmal ein Wert von $d_1 \approx 12$ mm.

Für diese Gestaltmerkmale kann der sensorische Funktionserfüllungsindex anhand von Gleichungen 5.5, 5.12. berechnet oder aus Abbildung 5.16 abgelesen werden. In diesem Fall ergibt sich ein Wert von $MFI \approx 1,59$, was einer Erhöhung der Dehnung im Schaft um 59 % bzw. $\varepsilon = 9,47 \cdot 10^{-4}$ (Gleichung 5.12) für den verwendeten Lastfall bei der Gesamtbelastung von 80 kN (FE-Modell, Kapitel 5.2.6) entspricht. Soll eine Laständerung von 1 % (entsprechend 800 N in diesem Fall bzw. $\varepsilon = 9,47 \cdot 10^{-4} / 100 = 9,47 \cdot 10^{-6}$) messbar sein, beträgt die erforderliche effektive Auflösung des ADC (ENOB) 17,3 Bit, also 18 Bit (Gleichung 5.8, Kapitel 5.2.9). Für 0,01 % (Laständerung 8 N) sind 24 Bit erforderlich. Die Anwendung der Modelle hilft somit bei der Beurteilung, ob die geplante Messkette technisch umsetzbar ist oder ob eine Iteration erforderlich ist, beispielsweise durch Reduktion des MFI.

5.4.3 Anforderungen an die sensorische Funktionserfüllung

Im Fall ausschließlich sensorischer Anforderungen erfolgt das Vorgehen analog zum zuvor beschriebenen, allerdings wird mit der Bedingung für die sensorische Funktionserfüllung begonnen: Eine Auflösung der Kraft von 4,15 N bei Verwendung von DMS in einer Halbbrückenverschaltung nach Kapitel 2.3.1 und einem ADC mit einer ENOB von 24 Bits. Daraus lässt sich mit Gleichung 5.6 die minimale Dehnung berechnen, die durch das Sensormodul aufgelöst werden kann: $\varepsilon_{\min} = 8,95 \cdot 10^{-8}$. Eine Vollschraube weist bei 4,15 N jedoch nur eine Dehnung von $\varepsilon_{\min} = 3,09 \cdot 10^{-8}$ auf (berechnet aus einer Skalierung des Ergebnisses der FE-Analyse von 80 kN, $\varepsilon_0 = 5,95 \cdot 10^{-4}$, auf 4,15 N). Also muss die Dehnung um Faktor 2,9 erhöht werden. Daraus folgt

$$SFI(d_1, d_2) \geq 2,9. \quad 5.15$$

Dazu passende Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale d_1, d_2 kann durch Lösen der Gleichung für den SFI (Kapitel 5.3.4) oder grafisch im Konturdiagramm (Abbildung 5.17) gefunden werden: Der Schnittpunkt der Konturlinie bei einem SFI

von 2,9 mit der Montierbarkeitsrandbedingung $d_2 \geq d_1$ führt zu einer naheliegenden Gestaltmerkmalskombination von $d_1 = d_2 = 17$ mm.

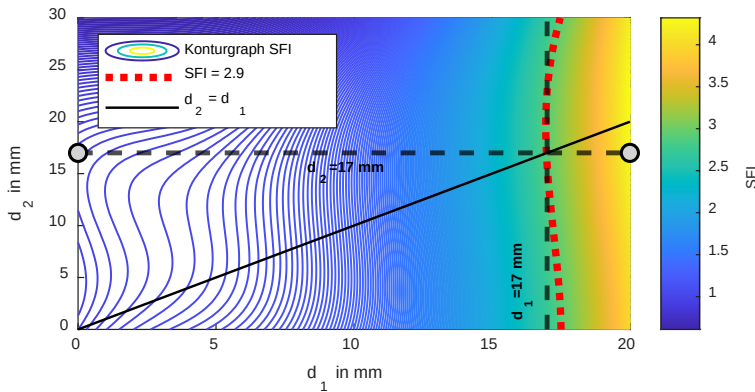


Abbildung 5.17: Sensorischer Funktionserfüllungsindex (SFI) in Abhängigkeit von d_1, d_2 mit Bedingung $SFI \geq 2,9$ und Montierbarkeitsrandbedingung $d_2 \geq d_1$, daraus folgt $d_1 = d_2 = 17$ mm. Abbildung angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).

Für diesen Fall beträgt der mechanische Funktionserfüllungsindex (MFI) 1,62, was einer Erhöhung der von-Mises-Spannung um 62 % gegenüber der Vollschraube entspricht. Für den in dieser Arbeit untersuchten Lastfall steigt die von-Mises-Spannung somit von 469 N/mm² auf 760 N/mm². Dies bedeutet, dass die Festigkeitsklasse der Schraube von 8.8 auf 10.9 (DIN EN ISO 898-1:2013-05) erhöht werden muss werden, um die Beanspruchbarkeit zu erhalten.

5.5 Diskussion

Verhandlungsmodell zur Analyse und Verhandlung des Zielkonflikts in der Bauraumidentifikation: Die Integration eines Sensormoduls in das Innere der Schraube führt unweigerlich zu einer Reduktion der mechanischen Funktionserfüllung, bewertbar durch eine Erhöhung der Spannung. Der Sensor muss prinzipbedingt in den Kraftfluss integriert werden. Wie auch schon Dumstorff et al. (2014) feststellte, erhöht sich die von-Mises-Spannung im Bauteil,

insbesondere an den Kerben, da das Sensormaterial und die Elektronik ein wesentlich geringeres E-Modul haben. Dadurch verringert sich die Beanspruchbarkeit. Die gleichzeitige Erfüllung einer hohen mechanischen und hohen sensorischen Funktion kann deshalb nicht gewährleistet werden. Um bestmögliche Kompromisslösungen zur Verhandlung dieses Zielkonflikts zu identifizieren, wurde das hier vorgestellte Verhandlungsmodell aufgebaut.

Reduktion der mechanischen Funktionserfüllung und Kompensation: Mit dem vorgestellten Modell kann die unvermeidbare Reduktion der mechanischen Funktionserfüllung quantifiziert werden. Bei Bedarf können Kompensationsmaßnahmen wie eine Erhöhung der Festigkeitsklasse ergriffen werden. Diesbezüglich können allerdings auch Nachteile mit einer höheren Festigkeitsklasse einhergehen, die im individuellen Fall geprüft werden müssen. Dazu zählen die höheren Kosten, die geringere Bruchdehnung und die erhöhte Gefahr der Wasserstoffversprödung. Im Gegensatz zum Zugewinn an Reserven bei statischer Beanspruchung führt eine Erhöhung der Festigkeitsklasse nur zu einem vernachlässigbaren Zuwachs an dauerhaft ertragbarer dynamischer respektive zyklischer Beanspruchung (Steinhilper & Sauer, 2012, S. 367). Die hier vorgestellte Lösung umgeht dieses Problem, da der Sensormodulbauraum die kritischste Kerbe im ersten tragenden Gewindegang nicht verändert, an der in der Regel der Dauerbruch einsetzt.

Einfluss des Gestaltmerkmals Höhe des Sensorbauraums auf die von-Mises-Spannung: Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale d_1 , d_2 variiert, während die Höhen h_1 , h_2 konstant gehalten wurden (Kapitel 5.2.3). Dies wurde durch den signifikant höheren Einfluss der beiden Durchmesser auf Spannung und Dehnung und somit auf die Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion begründet. Der Parameter h_1 hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Spannung oder Dehnung, solange er nicht in den Gewindebereich hineinragt (siehe Abbildung A.). Der Parameter h_2 hingegen kann einen stärkeren Einfluss haben, da er nahe an der Kerbe Kopf/Schaft liegt. Da dieser Bereich typischerweise die Elektronik und Energiespeicher aufnimmt, muss er variiert werden, wenn beispielsweise mehr Rechenleistung oder eine längere Betriebszeit ohne Aufladung gefordert ist.

Einfluss des Durchmessers des Kopfhohlraums d_2 auf die Dehnung an Sensorposition im Schaft: Die Dehnungswerte im Schaftbereich zeigen sich relativ konstant in Abhängigkeit von d_2 (Abbildung 5.13). Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss des Gestaltmerkmals d_2 im Kopf der Schraube auf die Dehnung im Schaftbereich gering ist. Aufgrund der räumlichen Trennung erscheint dies plausibel.

Analytische Gleichung kann FE-Modell für von-Mises-Spannung in begrenztem Bereich ersetzen: Abbildung 5.9 zeigt den Vergleich der analytisch berechneten Spannungen mit den aus den FE-Ergebnissen kurvenangepassten Funktion. Die Verläufe stimmen gut überein bis zu den Hohlraumdurchmessern $d_1 = d_2 \leq 15$ mm. In diesem Bereich für normierte Verläufe und mit der Bedingung $d_1 = d_2$ könnten die analytischen Gleichungen sogar das FE-Modell ersetzen und somit den Aufwand verringern. Die Abweichungen bei $d_1, d_2 > 15$ mm lassen sich entweder auf Vereinfachungen in den analytischen Gleichungen oder auf die begrenzte Gültigkeit der Kurvenanpassung zurückführen, die für $d_1 \leq 15$ mm auf FE-Ergebnisse zurückgreifen kann.

Vergleich der FE-Dehnungsergebnisse mit DMS-Messwerten im Prüfstand: Zwischen den FE-Ergebnissen und den DMS-Messwerten bestehen Abweichungen, die sich durch verschiedene Ursachen erklären lassen:

1. Montageprobleme der Dehnungsmessstreifen (z. B. fehlerhafte Klebung oder Ausrichtung), welche sowohl absolute Abweichungen als auch Unterschiede in den Steigungen erklären können.
2. Toleranzen im mechanischen Aufbau des Prüfstands, die Biegebelastungen auf die DMS verursachen können. Dies zeigt sich in der relativen Abweichung der einzelnen DMS-Messwerte (Abbildung 5.14).
3. Der DMS misst die mittlere Dehnung über seine Messgitterlänge, was in dem FE-Modell mehreren Knoten entspricht. Die FE-Resultate wurden allerdings nur an einzelnen Knoten ausgewertet.
4. Ungenauigkeiten bei Offset- und Temperaturkompensation während der Versuche sowie Abweichungen im E-Modul.

5.5.1 Vergleich mit dem Stand der Forschung

Vergleich der Spannung: Das vorgestellte Verhandlungsmodell zur Identifikation der Gestaltmerkmale für den Sensorbauraum dient als Basis für die weitere Entwicklung der Sensormodule. Bei der Entwicklung des Sensorkonzepts im zugrundeliegenden Forschungsprojekt haben Herbst et al. (2024) unabhängige Bauraumanalysen mit Bewertung der von-Mises-Spannungen angestellt, die zu ähnlichen Ergebnissen führen wie in dieser Arbeit präsentiert. Bei Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen von 12 mm im Schaft und 16 mm im Kopf wird eine relative Schwächung von 23,5 % angegeben, die mit der Erhöhung der von-Mises-Spannung korrespondiert. Das hier vorgestellte Modell berechnet für diese Gestaltmerkmale eine Erhöhung von 28,6 %. Die Abweichung lässt sich durch Unterschiede in der Modellierung erklären. Herbst et al. (2024) verwenden Rundungen an den Kanten des Hohlraums und einen festen Abschluss des

Hohlraums am Kopf. Diese Maßnahmen reduzieren die Spannungserhöhung, sind jedoch auch aufwendiger in der Fertigung.

Dumstorff et al. (2014) untersuchten Spannungsanstiege aufgrund von generischen integrierten Modulen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul, die eingebetteter Elektronik und Sensorik entsprechen sollen. Bei Modulen mit niedrigerem E-Modul zeigten die Autoren Anstiege der von-Mises-Spannung von bis zu 60 %, insbesondere in den Ecken des umgebenden Materials. Der dort beobachtete starke Spannungseffekt an den Rändern ist vergleichbar mit den Kerbeffekten, wie hier gezeigt (Kapitel 5.3.2). Die in dieser Arbeit ermittelten Spannungsanstiege sind jedoch geringer, was vor allem auf geometrische Unterschiede zurückzuführen ist: Die in den FE-Modellen von Dumstorff et al. (2014) verwendeten rechtwinkligen Kanten erzeugen hohe Spannungskonzentrationen. Bei der Schraube gibt es in der kritischen Kerbe Kopf/Schaft, in der die maximalen Spannungen auftreten, eine Rundung, die den Spannungsanstieg in Grenzen hält.

Vergleich der Dehnung: Ein weiteres Sensorkonzept zur Messung von Kräften in Schrauben wurde von Groche und Brenneis (2014) vorgestellt. In deren Beitrag wurden keine Spannungen oder Dehnungen angegeben, sondern lediglich die relative Steifigkeit. Bei einer relativen Betrachtung heben sich Kraft, Elastizitätsmodul und Länge gegenseitig auf, sodass die Steifigkeit mit der Dehnung in Beziehung gesetzt werden kann. Ausgehend von den dort angegebenen Gestaltmerkmalen für den Durchmesser des Sensormodul-Hohlraums im Schaft von 45 % des Außendurchmessers ergibt sich eine relative Steifigkeitsänderung von 26 % gegenüber dem Vollkörper. Dieser Wert liegt nahe an der in dieser Arbeit ermittelten Dehnungsänderung von 23 % bei gleichem relativem Durchmesser, wie in Abbildung 5.17 abgelesen werden kann ($d_1 = 9$ mm entsprechen 45 % des Außendurchmessers, Vergleich des Dehnungswerts an dieser Stelle mit $d_1 = 0$ mm).

Darüber hinaus kann die Aussage bestätigt werden, dass die Steifigkeit mit der Sensitivität der Sensorik korreliert. Die in dieser Arbeit verwendeten Formeln zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Dehnung und Widerstandsänderung der Dehnungsmessstreifen zeigen, dass bei höherer Dehnung ein größerer Messbereich ausgenutzt werden kann. Weiterhin deuten die Ergebnisse von Groche und Brenneis (2014) darauf hin, dass ein in die Schraubenstruktur eingepasster Verformungskörper in der Lage ist, die Beeinträchtigung des Hohlraums auf die mechanische Funktionserfüllung zum Teil zu kompensieren. Dies bestätigt sich auch durch den in dieser Arbeit vorgestellten Vergleich der FE-Ergebnisse mit und ohne eingepressten Verformungskörper (Kapitel 5.3.2).

Vergleich mit Maschinenelement Zahnrad: Auch wenn in der Arbeit von Bonaiti et al. (2022) mit einem Zahnrad ein anderes Maschinenelement betrachtet wird, handelt es sich dennoch um eine Sensorintegration mit dem Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung. Die Autoren berichten bei Hohlräumen von einem Anstieg der Spannung um 22 %, der sich im gleichen Bereich wie die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit und von Herbst et al. (2024) befindet.

5.5.2 Einschränkungen

Höhere Nachgiebigkeit der Schraube verringert Betriebskräfte: Im vorgestellten Modell wird nicht berücksichtigt, dass sich die Betriebskräfte auf eine verspannte Schraube verringern, wenn sich die Nachgiebigkeit der Schraube erhöht (Kapitel 2.2.3). Durch die eingebrachten Hohlräume ist das der Fall, vergleichbar mit einer Dehnschraube. Der Anteil der Betriebskraft, die auf die Schraube wirkt, hängt jedoch von dem individuellen Verschraubungsfall und den Nachgiebigkeiten der verspannten Komponenten ab, weshalb dies in dieser Studie nicht modelliert wurde. Dadurch kann sich die mechanische Funktionserfüllung noch verbessern.

Einfluss des Verformungskörpers auf von-Mises-Spannung und Dehnung: Die Ergebnisse in Abbildung 5.10 zeigen, dass der Verformungskörper die maximale von-Mises-Spannung reduziert, da er Teil des Kraftflusses wird. Dadurch würde sich der mechanische Funktionserfüllungsindex (MFI) erhöhen. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass der Verformungskörper aus einem Werkstoff mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften, insbesondere E-Modul, wie die Schraube besteht. In diesem Fall wird allerdings auch die Dehnung an der Sensorposition verringert, da sich der Querschnitt wieder erhöht. Dadurch reduziert sich der sensorische Funktionserfüllungsindex (SFI). Hier zeigt sich erneut der Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktion. Zur Erhöhung des SFI kann der Verformungskörper z. B. aus Aluminium oder einem Kunststoff gefertigt werden, dies führt jedoch zu einer Reduktion des MFI.

Gültigkeitsbereich der Kurvenanpassung: Die Funktionen der Funktionserfüllungsindizes MFI und SFI im Verhandlungsmodell basieren auf einer Kurvenanpassung an diskrete FE-Ergebnisse. Diese sind im Bereich $0 \text{ mm} \leq d_1 \leq 14 \text{ mm}$ und $10 \text{ mm} \leq d_2 \leq 18 \text{ mm}$ genügend dicht gesetzt, dass die R^2 -Werte über 0,9 liegen und somit eine gute Übereinstimmbarkeit zeigen (Abbildung 5.11 und Abbildung 5.13). Außerhalb dieser Wertebereiche können größere Abweichungen auftreten, was sich auch im Vergleich der analytischen und FE-basierten Spannungswerte in Abbildung 5.12 zeigt. Eine Erweiterung der FE-Analyse kann hier zur Verbesserung beitragen.

Übertragbarkeit: Das Vorgehen zum Aufbau des Modells muss noch in seiner Übertragbarkeit auf Schrauben anderer Größen und andere Maschinenelemente ähnlicher Geometrie untersucht werden. Dazu wurden an einer M12-Schraube und einer Elastomer-Klauenkupplung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2305 bereits erste Untersuchungen angestellt (Peters, Menning et al., 2024).

5.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die **Forschungsfrage 1** untersucht:

Forschungsfrage 1: *Wie kann der Bauraum für das Sensormodul in der Schraube im Zielkonflikt zwischen einer hohen Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion identifiziert werden?*

Die Frage kann beantwortet werden: Der Bauraum für das Sensormodul kann durch den Aufbau eines Verhandlungsmodells identifiziert werden, das den Einfluss von ausgewählten Gestaltmerkmalen des Sensormodulbauraums auf das mechanische und sensorisch-funktionale Verhalten quantifiziert und in einer Optimierungsfunktion abbildet. Dadurch ist der Zusammenhang als Konstruktionswissen verfügbar und es können Gestaltmerkmale für eine optimale Funktionserfüllung berechnet werden. Eine volle Erfüllung beider Funktionen ist nicht möglich, die Gestaltmerkmale bilden somit einen bestmöglichen Kompromiss ab.

Das Verhandlungsmodell basiert auf einem FE-Modell, kombiniert mit einer gewichteten Optimierungsfunktion. Das mechanisch-funktionale Verhalten wird mit der von-Mises-Spannung bewertet, das sensorische mit der Dehnung an der Sensorposition. Gegebene Anforderungen an mechanische und sensorische Funktionserfüllung werden berücksichtigt. Weiterhin kann eine Priorisierung der Funktionen durch Gewichtungsfaktoren vorgenommen werden.

Unter Berücksichtigung montage technischer Randbedingungen liegt das Optimum mit gleicher Gewichtung der mechanischen und sensorischen Funktionserfüllung bei Gestaltmerkmalen von $d_1 = d_2 = 13,2 \text{ mm}$ (Durchmesser im Schaft und im Kopf). Dies führt zu einer Erhöhung der von-Mises-Spannung um 29 % und zu einer Steigerung der Dehnung an der Sensorposition um 80 %. Wird die Erhöhung der von-Mises-Spannung auf 25 % der Vollschrabe begrenzt, sodass sie durch die Erhöhung der Festigkeitsklasse ausgeglichen werden kann, ergeben sich Gestaltmerkmale von $d_1 = 12 \text{ mm}$ (Sensor im Schaft) und $d_2 = 14 \text{ mm}$ (Elektronik im Kopf). Die Dehnung erhöht sich für diese Parameter auf 59 % der Vollschrabe.

Dadurch kann mit einem ADC mit einer effektiven Bitanzahl von 24 eine Auflösung der Kraft von 8 N erreicht werden.

Damit bietet das Verhandlungsmodell eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Ermittlung der optimalen Sensorbauraum-Gestaltmerkmale im Spannungsfeld mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung und dient als Ausgangswert für die weitere Sensorkonzeptentwicklung. Im Folgenden muss das funktionale Verhalten quantifiziert werden, das prototypische Lösungen mit dem identifizierten Sensormodulbauraum erreichen.

6 Quantifizierung und Bewertung des funktionalen Verhaltens der sensorintegrierenden Schrauben

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage 2 untersucht und beantwortet:

Forschungsfrage 2: *Welches quantitative mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten erreichen iterativ entwickelte Prototypen der sensorintegrierenden Schraube?*

Die Inhalte dieses Kapitels zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 basieren auf einem wissenschaftlichen Manuskript des Autors der vorliegenden Arbeit:

Peters, J., Rappenecker, K., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K., Matthiesen, S. (2026). The Role of Testing and Characterization in the Methodical Development of Sensor-integrating Bolts for Multi-axial Force Measurement. *Sensors*, 26(14), 4415. <https://doi.org/10.3390/s26144415> (VÖ3).

Die Abbildungen sowie wesentliche Textabschnitte zu Methode, Ergebnissen und Diskussion sind in übersetzter Form aus dem Englischen sinngemäß übernommen. Die Begrifflichkeiten wurden an die vorliegende Forschungsarbeit angepasst. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Gegensatz zu den Abbildungen auf eine gesonderte Kennzeichnung der Texte verzichtet.

6.1 Kurzzusammenfassung

Vier aufeinander aufbauende Prototypen der sensorintegrierenden Schraube zur mehraxialen Kraftmessung mit vollständig integrierbarer Messkette, die auf den Modellergebnissen von Forschungsfrage 1 basieren, werden gefertigt und hinsichtlich ihres sensorisch-funktionalen Verhaltens quantifiziert. Somit wird iterativ die Verbesserung von Eigenschaften wie den Messfehlern, den Sensitivitäten oder der Unsicherheit in der Applikation der Dehnungsmessstreifen (DMS) gezeigt. Die Messergebnisse werden systematisch bewertet und Verbesserungspotenziale abgeleitet, die in das Design der folgenden Iteration einfließen.

Alle Prototypen zeigen ein lineares und reproduzierbares sensorisch-funktionales Verhalten bei wiederholter Axial- und Biegebeanspruchung, mit Ausnahme des Versagens eines Prototyps im Verformungskörper-Pressverband. Das sensorisch-funktionale Verhalten wird durch Messfehler und Sensitivität bewertet. Der Linearitätsmessfehler konnte über alle Prototypen von 3,3 % auf 1 % des Messbereichsendes (v. E.) in axialer Richtung und von 3,7 % auf 0,1 % v. E. in Biegerichtung verbessert werden. Der Hysteresemessfehler liegt über alle Prototypen hinweg bei maximal 6 % v. E. Die Sensitivität liegt bei ca. 10 $\mu\text{V/V/kN}$ in axialer Richtung und in Biegerichtung bei ca. 1 $\mu\text{V/V/Nm}$. Damit ist unter idealen Bedingungen eine Auflösung der Kraft von ca. 6 N in axialer Richtung und 46 mNm in Biegerichtung möglich. Dadurch lässt sich eine Kraftänderung wie bspw. durch das Setzen der Schraubenverbindung detektieren. Die integrierbare Messkette mit drahtloser Datenkommunikation (F²LECS) führt zu einer geringen Verschlechterung der Messfehler um 2,7 % respektive 3,8 %. Das mechanisch-funktionale Verhalten, bewertet durch die von-Mises-Spannung, reduziert sich über alle Prototypen um 1,26 % bis 28,6 % bezogen auf die Vollschraube. Zur Kompensation dieser Reduktion müssen Maßnahmen ergriffen werden, wie etwa die Erhöhung der Festigkeit der Schraube. Dies verdeutlicht den Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung: eine höhere sensorische führt zu einer geringeren mechanischen Funktionserfüllung. Die gefundene Kompromisslösung zeigt, dass der Zielkonflikt verhandelbar geworden ist.

Die Messungen lassen vermuten, dass beim manuellen Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel neben der erwünschten axialen Vorspannkraft auch Biegemomente überlagert werden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit mehraxialer Kraftmessungen im Einsatz unter realistischen Lastbedingungen. Auch Versagensmodi wie klaffende Schraubenverbindungen können erfasst werden.

Die vorgestellten sensorintegrierten Schrauben ermöglichen eine mehraxiale Kraftmessung mit geringem Messfehler und drahtloser Datenkommunikation bei gleichzeitiger Beibehaltung der standardisierten mechanischen Schnittstellen und quantifizierter Reduktion des mechanisch-funktionalen Verhaltens. Sie können daher wie herkömmliche Schrauben verwendet werden, ohne Einschränkungen hinsichtlich des benötigten Platzbedarfs oder verwendbarer Anziehwerkzeuge.

6.2 Methode

Im Rahmen dieser Forschungsfrage werden mehrere aufeinander aufbauende Prototypen der sensorintegrierenden Schraube untersucht. In Kapitel 6.2 wird das alle Prototypen gleichermaßen betreffende Vorgehen erläutert, das die

Bewertungsgrößen, die Testing-Umgebung, die Testfälle und die Datenerfassung umfasst. In Kapitel 6.3 werden der Entwurf, die Fertigung, die Vermessung, die Bewertung und Verbesserungen zu jedem iterativ entwickelten Prototypen beschrieben.

Als Basis für die Entwicklung von Prototypen der sensorintegrierenden Schraube dienen die im Rahmen der Forschungsfrage 1 getätigten Analysen zur Spannungs- und Dehnungsverteilung, den Kerbwirkungszahlen sowie den identifizierten Gestaltmerkmalen für den Sensormodulbauraum. Dieser wird hier wie folgt begrenzt, um das mechanisch-funktionale Verhalten (bewertet durch die von-Mises-Spannung) um weniger als 30 % zu reduzieren und Bauraum für die komplette Messkette inklusive Elektronik und Datenübertragung nach Riehl et al. (2024) zu bieten: $d_1 = 12 \text{ mm}$, $d_2 = 16 \text{ mm}$, $h_1 = 32 \text{ mm}$, $h_2 = 6,5 \text{ mm}$. Damit ist die Reduktion durch Erhöhung der Festigkeitsklasse bspw. von 8.8 auf 10.9 kompensierbar. Das Sensorkonzept für die mehraxiale Messung ist in Abbildung 6.1 dargestellt und basiert auf drei koaxial angeordneten Dehnungsmessungen mittels DMS (siehe auch Kapitel 2.3.3 zur mehraxialen Kraftmessung). Zur Quantifizierung des funktionalen Verhaltens wird die in Forschungsfrage 1 aufgebaute Testing-Umgebung für das empirische Testing erweitert.



Abbildung 6.1: Sensorkonzept zur mehraxialen Messung von Zug- und Biegebeanspruchung, die in der Schraube in überlagerter Form auftreten können. Sensorelemente sind drei koaxial entlang der Schraubenachse ausgerichtete Dehnungsmessstreifen, die gleichmäßig in konstantem Radius r über dem Umfang verteilt sind.

6.2.1 Bewertungsgrößen des funktionalen Verhaltens der sensorintegrierenden Schrauben

Bewertung des mechanisch-funktionalen Verhaltens

Als Bewertungsgröße des mechanisch-funktionalen Verhaltens wurde in Forschungsfrage 1 (Kapitel 5) bereits die Erhöhung der maximalen von-Mises-Spannung verwendet, die bei kombinierten axialen und Biegebeanspruchungen als Bewertungsgröße etabliert ist (Blachowski & Gutkowski, 2016; Dumstorff et al., 2014) und auch im Rahmen der Forschungsfrage 2 herangezogen wird. Das Modell zur Berechnung der maximalen von-Mises-Spannung infolge von variierbaren Sensormodulbaurraum-Gestaltparametern in einer M20-Schraube wird hierbei wiederverwendet.

Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens

Hinsichtlich des sensorisch-funktionalen Verhaltens werden die **Messfehler in Linearität und Hysterese** sowie die **Sensitivitäten** unter statischer Beanspruchung analysiert. Dazu werden die Schrauben entsprechend einem mehrstufigen Beanspruchungsmuster in axialer und Biegerichtung geprüft, basierend auf DIN EN ISO 376:2011. Die Grundlagen zur Berechnung der **Linearitäts- und Hysteresemessfehler** e_{lin}, e_{hyst} befinden sich in Kapitel 2.3.4. Der Messwert ist in diesem Fall der Mittelwert aller Messpunkte innerhalb einer Beanspruchungsstufe („Stufe“). Die Messfehler in Prozent berechnen sich zu

$$e_{lin} = 100 \frac{\max\left(fit_r - \frac{\sum_i^n DMS_{Stufe,i}}{n}\right)}{\max(DMS)}, \quad 6.1$$

$$e_{hyst} = 100 \frac{\max\left(\frac{\sum_i^n DMS_{Stufe,auf,i}}{n} - \frac{\sum_i^n DMS_{Stufe,ab,i}}{n}\right)}{\max(DMS)}. \quad 6.2$$

Als Bezugswert wird der Maximalwert der DMS-Signale bei der maximalen Belastung der Universalprüfmaschine von 50 kN genommen. Das Ergebnis ist ein maximaler Linearitäts- und Hysteresemessfehler pro Dehnungsmessstreifen und Testdurchlauf. Zum Vergleich wird jeweils der höchste Fehlerwert aller DMS einer Schraube ermittelt.

Die **Sensitivität** wird als Steigung der linearen Kennlinien (fit_i) berechnet. Die Einheit der DMS-Signale ist V/V , da die Brückenspannung und Verstärkung bereits berücksichtigt sind. Aus der Sensitivität lässt sich mit Kenntnis der Messkette, wie schon in Forschungsfrage 1 gezeigt, die Auflösung der Kräfte und Momente berechnen.

6.2.2 Testfälle

Die Prototypen der sensorintegrierten Schrauben (V_i) werden in der nachfolgend beschriebenen Testing-Umgebung unter Anwendung der folgenden Testfälle in ihrem funktionalen Verhalten quantifiziert. Eine Ausnahme stellt der letzte Prototyp dar („V3“). Dafür werden die Daten aus Herbst et al. (2024) für Testfall 1 und aus Herbst et al. (2022) für Testfall 3 verwendet. Testfall 3 wurde in dem Fall nur am Verformungskörper (Vfk) durchgeführt. Eine Zuordnung der Testfälle zu den Bewertungsgrößen ist in Tabelle 6.1 dargestellt. F²LECS, GSV4 und GSV8 sind Messgeräte und werden im Kapitel 6.2.4 vorgestellt.

1. Zentrische axiale Zugbeanspruchung ohne Anziehen, mit einer maximalen Last von 50 kN.
2. Anziehen und Lösen mit einem Drehmomentschlüssel (Inspect Pro, Kistler, Deutschland) bei unterschiedlichen Einstellwerten des Anziehdrehmoments zwischen minimal 100 Nm und maximal 200 Nm.
3. Drei-Punkt-Biegebeanspruchung mit einem maximalen Biegemoment von 200 Nm, das über eine Axialkraft von 10 kN eingeleitet wird (Kapitel 6.2.3); die Schraube wird auf sechs Positionen, dem Sechskant des Kopfes und der Mutter entsprechend rotiert und beansprucht.

Die Schrauben werden entsprechend einem Muster in axialer und Biegerichtung gemäß DIN EN ISO 376:2011 beansprucht. Dabei kommen drei Vorbeanspruchungszyklen auf Maximalwert sowie fünf bzw. neun gleichmäßig verteilte Beanspruchungsstufen (einschließlich null) in drei Wiederholungen zum Einsatz.

Tabelle 6.1: Testfälle zur Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens.
Übersetzt aus Peters et al. (2026)

Testfall	Kenngroße	V1	V2.1	V2.2	V3 ¹
1. Zentrische axiale Belastung	Axial: $e_{lin}, e_{hyst}, sens$	GSV4	GSV4	GSV4 F ² LECS	GSV8
2. Anziehen und Lösen mit Drehmomentschlüssel	Axial: $e_{lin}, sens$	GSV4	GSV4	GSV4	-
3. Dreipunkt-Biegebelastung	Biegung: $e_{lin}, e_{hyst}, sens$	GSV4	-	GSV4	GSV8 Vfk

6.2.3 Testing-Umgebung und Berechnungen

Die Testing-Umgebung besteht aus einer Universalprüfmaschine zur Erzeugung von Druck- oder Zugbeanspruchungen mit maximal 50 kN (112,50 kN, TesT GmbH, Solingen, Deutschland). Die Maschine verfügt über einen Referenzkraftsensor (301,50 kN, Klasse 0,5, TesT GmbH, Solingen, Deutschland) sowie einen integrierten inkrementalen Wegaufnehmer mit einer Auflösung von 1 µm. In der Testing-Umgebung werden Axial- und Biegebeanspruchung getrennt betrachtet, da dies eine eindeutigere Quantifizierung des funktionalen Verhaltens zulässt.

Zur Aufbringung der Axialbeanspruchung werden zwei Blöcke aus Stahl (42CrMo4) verwendet, die durch die zu untersuchende sensorintegrierende Schraube verspannt werden können (Abbildung 6.2). Die untere Platte besitzt eine Sechskantmutter-Aufnahme, in die entweder die Mutter oder der Schraubenkopf zur einfacheren Montage eingeführt werden kann (Abbildung B.2). Zwischen dem Schraubenkopf und der oberen Platte wird eine Kraftmessscheibe (KR20plus, HBM, Darmstadt, Deutschland) als zusätzlicher Referenzsensor montiert. Dieser wird ausschließlich beim Anziehen verwendet, ansonsten dient der Kraftsensor der Universalprüfmaschine als Referenz. Die untere Platte wird im Rahmen der Universalprüfmaschine eingespannt, während die obere Platte nach oben gezogen werden kann. Dadurch werden Beanspruchungen auf die Schraube eingebracht.

¹ Nach Publikationen von Herbst et al. (2022); Herbst et al. (2024).

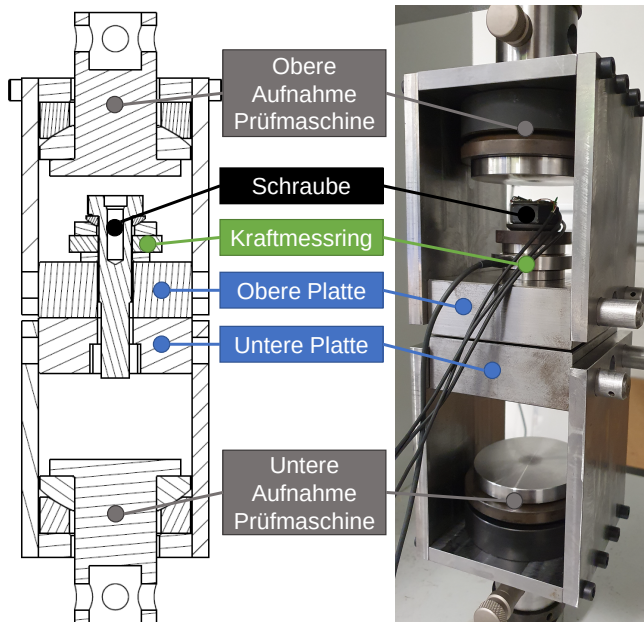


Abbildung 6.2: Testing-Umgebung für Testfall 1: Axiale zentrische Beanspruchung in der Universalprüfmaschine. Abbildung übernommen aus Peters et al. (2026) .

Um die notwendige Auflösung der Kraftmessung einordnen zu können, wird der Setzkraftverlust für diese Testing-Umgebung mit Formeln aus VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 (Kapitel 2.2.4) berechnet. In diesem Sinne ist eine kleine Kraft für die sensorische Funktion anspruchsvoll, weshalb die Geometrie so reduziert wird, dass eine Abschätzung für einen minimalen Setzkraftverlust ermittelt werden kann. Dazu wird mit reduzierter Anzahl an Trennfugen und mit hohen Nachgiebigkeiten der hohlgebohrten Schrauben ohne Berücksichtigung der Verformungskörper gerechnet. Formeln und Setzbeträge werden aus VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 entnommen, Geometriewerte aus den technischen Zeichnungen in Anhang B: Abbildung B.1 bis Abbildung B.6. Unter Verwendung von Gleichung 6.3 mit Setzbeträgen für das Gewinde ($3\ \mu\text{m}$), die Kopf- und Mutterauflage ($2,5\ \mu\text{m}$) sowie einer Trennfuge ($1,5\ \mu\text{m}$) ergibt sich ein Setzkraftverlust von $4,9\ \text{kN}$. Das entspricht rund vier Prozent der Montagevorspannkraft der verwendeten Schrauben und liegt im erwartbaren Bereich (Kapitel 2.2.4).

$$F_Z = \frac{f_Z}{\delta_S + \delta_P} = \frac{(3 + 2 \cdot 2,5 + 1,5) \cdot 10^{(-3)} \text{ mm}}{(1,5 \cdot 10^{(-6)} + 4,4 \cdot 10^{(-7)}) \text{ mm/N}} = 4,87 \text{ kN.} \quad 6.3$$

Zur Bewertung der Messung von Biegemomenten wird darüber hinaus ein Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 7438:2021-03 in der Universalprüfmaschine eingesetzt, um eine reine Biegebeanspruchung sicherzustellen (siehe Abbildung 6.3). Der Schraubenkopf sowie eine Mutter, die auf das Gewinde aufgeschraubt ist, werden auf zwei Stützzylinder mit einem Abstand von 80 mm gelegt. Die Krafteinleitung erfolgt mittig über einen weiteren Zylinder.

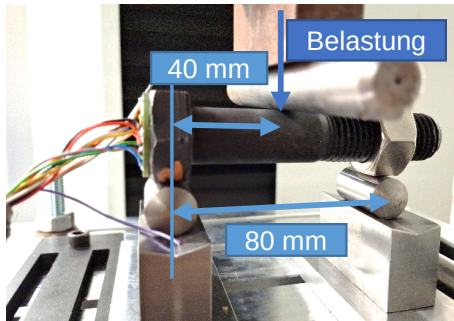


Abbildung 6.3: Testing-Umgebung für Testfall 3: Dreipunkt-Biegeversuch in der Universalprüfmaschine. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Die Berechnung des Biegemoments erfolgt nach Formeln von Rappenecker et al. (2025). Sie basieren auf der Ermittlung der maximalen Dehnung am Schraubenschaft. Dazu wird ein geometrisches Modell aufgestellt, das mit den Positionen und gemessenen Dehnungen der DMS in einem schraubeninternen Koordinatensystem eine Ebene aufspannt, die mit einer gedachten Zylinderfläche im Radius des Spannungsquerschnitts (Schraubenschaft) geschnitten wird, woraus die maximale Dehnung ε_{SAb} berechnet werden kann.

$$\varepsilon_{SAb} = z_{max} = \frac{d + r \sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad 6.4$$

Die Parameter a, b, c, d sind Konstanten der Ebenengleichung und r ist der Radius des Spannungsquerschnitts bzw. des Schafts. Um den Biegeanteil der Dehnung ε_b zu ermitteln wird von der maximalen Dehnung ε_{SAb} die reine Axialkomponente ε_{SA} als Mittelwert der drei DMS-Dehnungen $\varepsilon_{DMSiSAb}$ abgezogen. Die Dehnung an den DMS-Stellen wird aus den Messwerten mit Gleichung 2.9 aus Kapitel 2.3.1 berechnet.

$$\varepsilon_{SA} = \frac{\varepsilon_{DMS1SAb} + \varepsilon_{DMS2SAb} + \varepsilon_{DMS3SAb}}{3} \quad 6.5$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{SAb} - \varepsilon_{SA} \quad 6.6$$

Das Biegemoment kann nun aus dem Biegeanteil der Dehnung ε_b , dem E-Modul E und dem Widerstandsmoment W des Schraubenschafts.

$$M_b = \varepsilon_b E W \quad 6.7$$

6.2.4 Datenerfassung und Nachbereitung

Die Datenerfassung erfolgt durch einen dem Stand der Technik entsprechenden DMS-Verstärker (GSV4-USB bzw. GSV8-USB, ME-Meßsysteme, Deutschland). Zusätzlich wird in einem Testfall die komplett integrierbare, miniaturisierte Elektronikplattform **F²LECS**, eingesetzt, die im Rahmen des DFG-Projekts „SiSmaK“ entwickelt wurde (Riehl et al., 2024). Dies ermöglicht den direkten Vergleich der Messdaten beider Messsysteme.

F²LECS ist eine modulare Plattform zur energiesparenden Erfassung und Übertragung von DMS-Signalen. Sie besteht aus einem flexiblen, faltbaren Teil mit Lötflächen für drei Halbbrücken-DMS, einer Referenzbrücke, einer Brückenspannung von 2,5 V sowie dem Analog-Frontend ADS1220 von Texas Instruments (Dallas, USA) mit einer Auflösung von 24 Bit (Abbildung 2). Der modulare Aufbau erlaubt den Einsatz unterschiedlicher Kommunikations- und Energieversorgungsplattformen (auch Energy-Harvesting). Im Rahmen dieser

Arbeit kommt **Bluetooth Low Energy (BLE)** zum Einsatz. F²LECS hat einen Durchmesser von 13 mm und kann somit in eine Bohrung im Schraubenkopf untergebracht werden.



Abbildung 6.4: Miniaturisierte, flexible, modulare Elektronikplattform F²LECS zur Erfassung und drahtlosen Kommunikation von DMS-Signalen, die komplett in den Schraubenkopf integrierbar ist. Abbildung angelehnt an Riehl et al. (2024) und Peters et al. (2026).

In der Auswertung wird die Vorbeanspruchung nach DIN EN ISO 376:2011 nicht berücksichtigt, da hier Setz- und Ausgleicheffekte auftreten. Für jede der Beanspruchungsstufen und jede der drei Wiederholungen wird der Mittelwert der Dehnungsmessstreifensignale berechnet, wobei die jeweils ersten und letzten 20 % der Datenpunkte einer Stufe ausgeschlossen werden, um Übergangsbereiche der Prüfmaschinenregelung (An- und Abstiege) aus der Bewertung herauszuhalten. Die gesamte Datenauswertung erfolgt in MATLAB R2024b. Alle Daten werden zu Beginn auf null gesetzt, bevor die Beanspruchung aufgebracht wird und mit einem Medianfilter (Fenstergröße fünf) geglättet.

6.3 Ergebnisse zum Entwurf und zur Bewertung der Prototypen der sensorintegrierenden Schraube

In diesem Kapitel werden die iterativ entwickelten Prototypen vorgestellt, jeweils mit dem Entwurf, den Messergebnissen und der Bewertung. Weiterhin werden die gewonnenen Erkenntnisse sowie daraus abgeleitete Verbesserungen erläutert. In Kapitel 7 (Forschungsfrage 3) sind die Erkenntnisse strukturiert dargestellt und das erworbene Wissen aufbereitet.

6.3.1 V1: Gerollte zylindrische Dehnungsmessstreifen im Schraubenschaft

6.3.1.1 Entwurf

Diese Version dient aufgrund ihrer Einfachheit im Wesentlichen der schnellen Prüfung des mehraxialen Messprinzips in der Schraube. Das Unternehmen HBM (Darmstadt, Deutschland) bietet zylindrische Dehnungsmessstreifen (DMS) an, die in Bohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm eingeklebt werden können. Für den ersten Prototyp V1 werden drei dieser DMS verwendet, ergänzt durch den Hohlraum für die Elektronik F²LECS im Schraubenkopf. V1 ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

Die **Sensorelemente** sind drei gerollte zylindrische Dehnungsmessstreifen in T-Rosetten-Konfiguration als Halbbrücke, Widerstand 1 k Ω (TB21, HBM, Darmstadt, Deutschland).

Die **Anordnung und Position** der DMS ist in Bohrungen mit Durchmesser 2 mm im Schraubenschaft, koaxial zur Hauptachse der Schraube, Abstand 5 mm zur Schraubenmittelachse, Winkelpersatz 120°.

Als **Klebstoff** wird EP70 verwendet, der vom Hersteller HBM für diesen DMS empfohlen wird. Die Bohrung wird komplett mit dem Klebstoff geflutet. An seiner Maximaldehnung von $2,5 \cdot 10^{(-3)}$ kann der Klebstoff maximal fünf bis zehn Lastzyklen belastet werden.

Der **Bauraum für die Elektronik** F²LECS ist im Schraubenkopf mit einem Bauraum von 14 mm im Durchmesser und 6,5 mm in der Tiefe (wie aus Forschungsfrage 1).

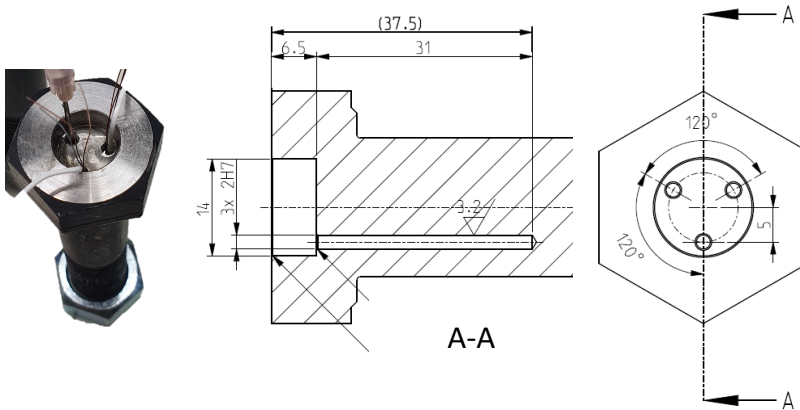


Abbildung 6.5: Prototyp V1 mit drei gerollten DMS im Schaft der Schraube. Diese sind coaxial entlang der Schraubenachse angeordnet, um 120° versetzt und im Abstand von 5 mm zur Schraubenmittelachse. Sie bieten Hohlraum für F²LECS zur Erfassung und Kommunikation der DMS-Signale im Schraubenkopf. Abbildung basierend auf Peters et al. (2026).

6.3.1.2 Bewertung und Verbesserung

Hinsichtlich des **mechanisch-funktionalen Verhaltens** zeigt V1 einen Anstieg der **von-Mises-Spannung um 1,26 %**. Die Zeitverlaufdiagramme der Testfälle zur Bewertung des **sensorisch-funktionalen Verhaltens** sind in Abbildung B.8 im Anhang dargestellt.

Abbildung 6.6 zeigt die Diagramme von V1 für **Testfall 1** als Grundlage zur Bestimmung der Sensitivität (Steigung der Kennlinie) sowie der Linearitäts- und Hysteresemessfehler in axialer Richtung, die in Tabelle 6.2 dargestellt sind. Die maximalen Messfehler liegen unter 4 % vom Messbereichsende (v. E.), die mittlere Sensitivität beträgt 10 $\mu\text{V/V/kN}$ (Tabelle 6.2). Unter idealen Bedingungen ergibt sich mit den Daten der Messkette aus Kapitel 6.2.4 eine Auflösung der Axialkraft von 6 N (Gleichung 5.7). Die Sensitivität von DMS2 ist höher als die der beiden anderen (Abbildung 6.6). Eine ähnliche Beobachtung wurde schon im Verifikationstest in Forschungsfrage 1 bemerkt (Kapitel 5.3.5). Eine mögliche Ursache ist die manuelle Applikation der DMS. Abweichungen bspw. bei der Ausrichtung oder der Dicke der Klebeschicht verursachen Messabweichungen. Eine andere mögliche Ursache ist

die Existenz eines überlagerten Biegemoments, das sich in diesem Fall zu 35 Nm bei maximaler Axialkraft von 50 kN berechnet (Formeln aus Kapitel 6.2.3). Das kann bspw. durch toleranzbedingte Abweichungen der Ebenheit oder Lage der Kontaktoberflächen verursacht werden.

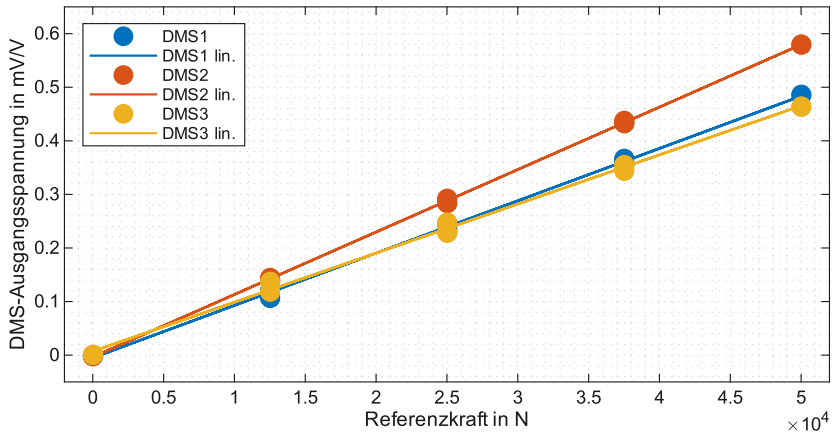


Abbildung 6.6: Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für Prototyp V1. Darstellung der DMS-Ausgangsspannungen in Bezug zur Referenzkraft, lineare Ausgleichsgeraden (lin.) zur Ermittlung von Linearitäts- und Hysteresemessfehlern sowie Sensitivitäten. Abweichungen der Messwerte der einzelnen DMS deuten auf ein überlagertes Biegemoment hin (hier: 21 Nm bei 50 kN Axialkraft). Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Testfall 2 ist in Abbildung 6.7 dargestellt, die Zeitverläufe in Abbildung B.9 im Anhang. Es ergibt sich eine durchschnittliche Sensitivität von $10,6 \mu\text{V/V/kN}$ sowie ein maximaler Linearitätsfehler von $3,7 \% \text{ v. E.}$ (siehe auch Tabelle 6.2). Diese sind etwas höher als bei Testfall 1. Gründe hierfür können wie in Testfall 1 schon ein überlagertes Biegemoment sein, das sich in diesem Fall zu 73 Nm bei maximaler Axialkraft von 72 kN berechnet (Formeln aus Kapitel 6.2.3). Das Biegemoment kann in diesem Fall neben Lage- oder Ebenheitsabweichungen zusätzlich durch das Anziehwerkzeug verursacht werden und dadurch höher ausfallen als bei Testfall 1. Es entsteht durch die Einleitung einer Querkraft auf den Schraubenkopf, verursacht durch das Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel. Darauf wird in der Diskussion näher eingegangen.

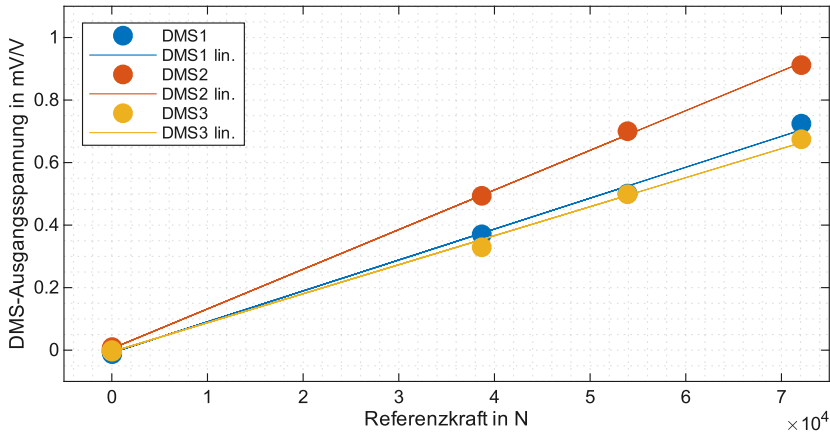


Abbildung 6.7: Testfall 2, Anziehen und Lösen für Prototyp V1. Darstellung der DMS-Signale in Bezug auf das Referenzkraftsignal mit linearen Ausgleichsgeraden zur Ermittlung von Linearitätsfehlern und Sensitivitäten. Wie in Testfall 1 deuten Messwertunterschiede der einzelnen DMS auf ein überlagertes Biegemoment hin (hier: 44 Nm bei 72 kN Axialkraft). Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

In Biegerichtung (**Testfall 3**) zeigen die DMS-Signale positive oder negative Werte, abhängig von ihrer Lage im Zug- oder Druckbereich, also in der oberen oder unteren Hälfte der Schraube (Abbildung 6.8). Ein Wert nahe null würde bedeuten, dass sich der DMS nahe der neutralen Faser der Biegung befindet (DMS3, Abbildung 6.8). Die drei Wiederholungen zeigen ein reproduzierbares Verhalten.

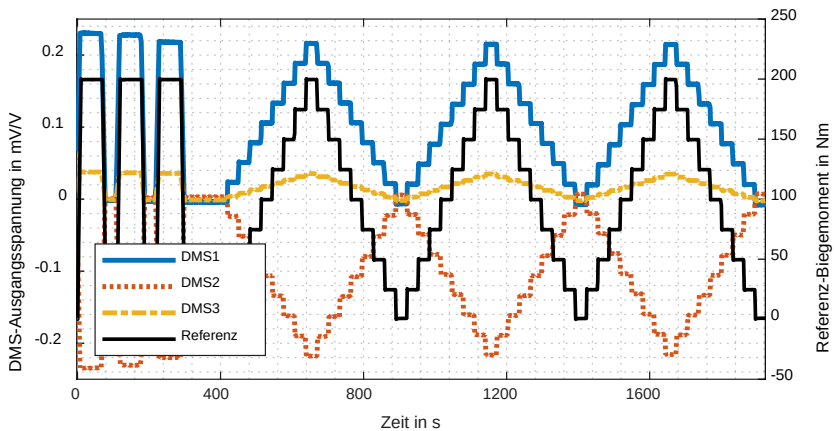


Abbildung 6.8: Testfall 3, Prototyp V1: Zeitverlaufdiagramm der Dreipunkt-Biegung aus einer gleichbleibenden Belastungsrichtung. Die DMS-Signale zeigen positive und negative Werte, je nach Position des jeweiligen DMS im Zug- oder Druckbereich der Schraube. Das Referenz-Biegemoment wird aus den Werten des Referenzkraftsensors sowie der Geometrie des Versuchsaufbaus berechnet. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Die Sensitivitäten hängen von der Richtung der Belastung in Bezug auf die Position der DMS ab. Dies ist im Diagramm der Sinusanpassung der Sensitivitäten (Abbildung 6.9) dargestellt: Jeder der drei DMS folgt bei Richtungsänderung der Belastung einer Sinusfunktion, wobei die Signale um jeweils 120° verschoben sind. Dies entspricht dem Winkelabstand der Sensoren. Dieses Verhalten bestätigt die korrekte Funktionsweise des Messprinzips bei Biegemessungen. Über die Sinuskurven der Kurvenanpassung (Abbildung 6.9) kann somit der Winkel des Biegemoments bestimmt werden. Die maximalen Linearitäts- und Hysteresemessfehler in Biegerichtung betragen 3,68 % und 2,53 % v. E. (Tabelle 6.2). Die maximale Sensitivität beträgt $1,3 \mu\text{V/V/Nm}$ (Tabelle 6.2). Daraus ergibt sich unter idealen Bedingungen und im reinen Biegefall eine Drehmomentauflösung von 46 mNm mit Daten der Messkette aus Kapitel 6.2.4.

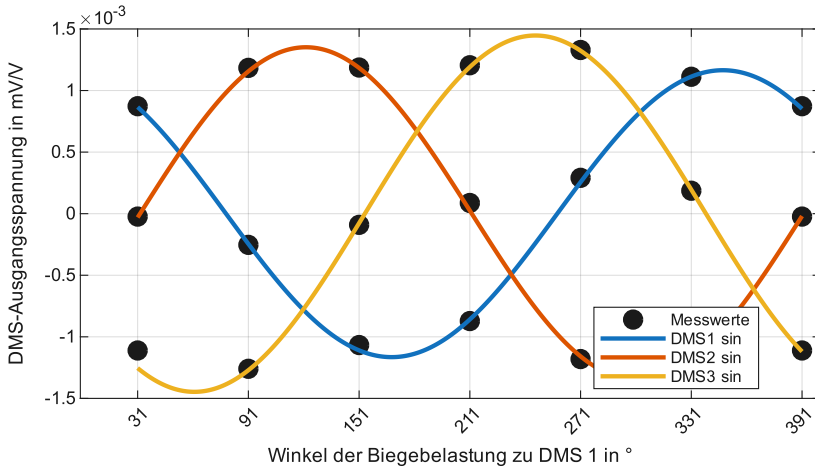


Abbildung 6.9: Testfall 3 für den Prototyp V1. Sensitivitäten über dem Winkel der Biegebelastung (200 Nm). Die drei Sinuskurven (sin) aus der Kurvenanpassung der Messwerte sind jeweils um 120° versetzt, was genau dem Winkel des Positionsversatzes der DMS in der Schraube entspricht. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Ein grundlegendes Problem bei der Applikation der zylindrischen DMS besteht in der fehlenden Möglichkeit, während der Aushärtung des Klebstoffs Anpressdruck auf den DMS auszuüben. Dadurch entsteht eine relativ dicke Klebstoffschicht zwischen DMS und Schraube, deren Dicke nicht reproduzierbar kontrolliert werden kann. Infolge dessen folgt der DMS unter Umständen nicht zuverlässig der realen Dehnung der Schraube. Diese Applikation ist daher besonders anfällig für Unsicherheiten, insbesondere unter Temperatureinfluss, der sich auf die Klebstoffschicht auswirken kann. Zudem ist die Reinigung des Bohrlochs erschwert und der empfohlene Klebstoff laut Herstellerdatenblatt (Hottinger Brüel & Kjaer GmbH) bei Dehnungen an seiner Maximaldehnung von $2,5 \cdot 10^{(-3)}$ lediglich für fünf bis zehn Lastzyklen ausgelegt. Da die sensorintegrierenden Schrauben eine höhere Nachgiebigkeit aufweisen durch den geringeren Querschnitt, besteht die Gefahr in die Nähe dieser Grenze zu geraten. Die Problematik von begrenzten Lastzyklen sowie die fehlende Möglichkeit zur Druckapplikation beim Aushärten wird im nächsten Prototyp **V2.1** gelöst.

Die vom zylindrischen Pressverband zu übertragende Kraft teilt sich im Verhältnis der Querschnittsflächen von Verformungskörper und Rest-Schraube auf. In diesem Fall überträgt der Verformungskörper 17 % der Gesamtkraft. Bei der maximalen Beanspruchung in der Testing-Umgebung entspricht das 8,5 kN.

Die **Sensorelemente** sind drei flache DMS als T-Rosette in Halbbrückenverschaltung (N5K-06-S5045H, ME-Meßsysteme GmbH, Hennigsdorf, Deutschland).

Die **Anordnung und Position** der DMS ist koaxial entlang der Schraubenachse um 120° versetzt, im Abstand von 3,2 mm zur Schraubenmittelachse auf einem Verformungskörper mit planen Flächen.

Der **Klebstoff** ist der DMS-Schnellklebstoff X60 (HBM, Darmstadt, Deutschland).

Der **Verformungskörper** Pressverband hat einen Durchmesser von 10 mm (+40 µm obere Toleranzgrenze, +30 µm untere Toleranzgrenze). Weitere Werte zur Auslegung sind: E-Modul 210000 N/mm², Rautiefe 3,2, Haftreibwert 0,15, Dehngrenze 640 N/mm². Daraus berechnet sich eine Kraftübertragung von 11,1 kN (maximal) und 5,18 kN (minimal), mit Formeln nach Budynas und Nisbett (2015, S. 130–131).

Der **Bauraum für die Elektronik** F²LECS ist identisch zu V1.

6.3.2.2 Bewertung und Verbesserung

Hinsichtlich des **mechanisch-funktionalen Verhaltens** zeigt V2.1 einen Anstieg der **von-Mises-Spannung um 18,4 %** (Peters, Mirbach et al., 2024). Zur Bewertung des **sensorisch-funktionalen Verhaltens** wurde die Schraube analog zu V1 beansprucht. Die Zeitverlaufsdiagramme sind in Abbildung B.10 dargestellt. Abbildung 6.6 zeigt die linearen Ausgleichgeraden von V2.1 in axialer Richtung (**Testfall 1**). Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl Linearitäts- und Hysteresemessfehler als auch die Sensitivität schlechter ausfallen als bei V1 (Abbildung 6.6, Tabelle 6.2).

Ab ca. 25 kN flacht der Verlauf der DMS-Messwerte gegenüber der Referenzkraft ab (Abbildung 6.11, Abbildung B.10). Es wird vermutet, dass ab dieser Kraft der Pressverband versagt und der Verformungskörper beginnt durchzurutschen. Beim Lösen zeigt Abbildung 6.6 ein umgekehrtes Verhalten im Druckbereich. Die Kraft 25 kN entspricht ca. einer Kraft von 4,25 kN, die über den Pressverband auf den Verformungskörper übertragen werden muss (Verhältnis der Querschnittsflächen 17 %). Das ist geringer als das berechnete Minimum in der Auslegung des

Pressverbandes. Mögliche Gründe sind die Unterschreitung der Toleranzgrenze in der Fertigung oder die Beschädigung der Pressflächen beim Einpressen. Dies ist denkbar, da die untere Pressfläche des Verformungskörpers über die gesamte Länge der Bohrung geschoben werden muss und dadurch beschädigt oder eingeebnet werden kann. Die Auswertung von Testfall 2 (Anziehen) sowie die Messung für Testfall 3 (Biegung) wurde aufgrund des Versagens des Pressverbandes abgebrochen. Für die nächste Iteration des Prototypen V2.2 muss der Pressverband überarbeitet werden, um eine zuverlässige Kraftübertragung zu gewährleisten.

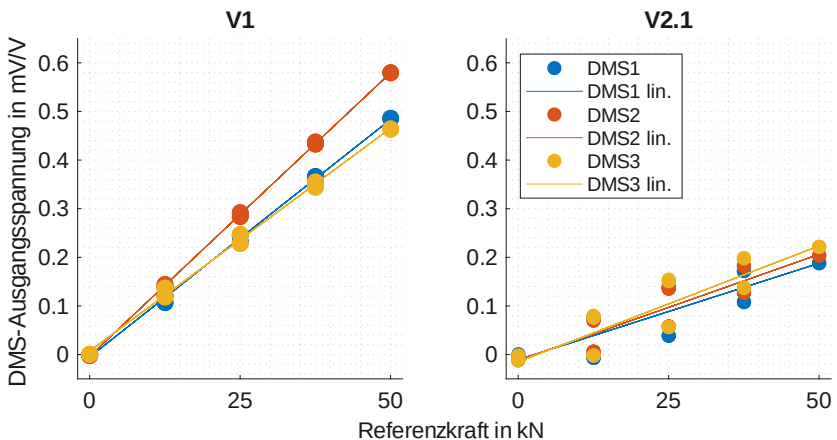
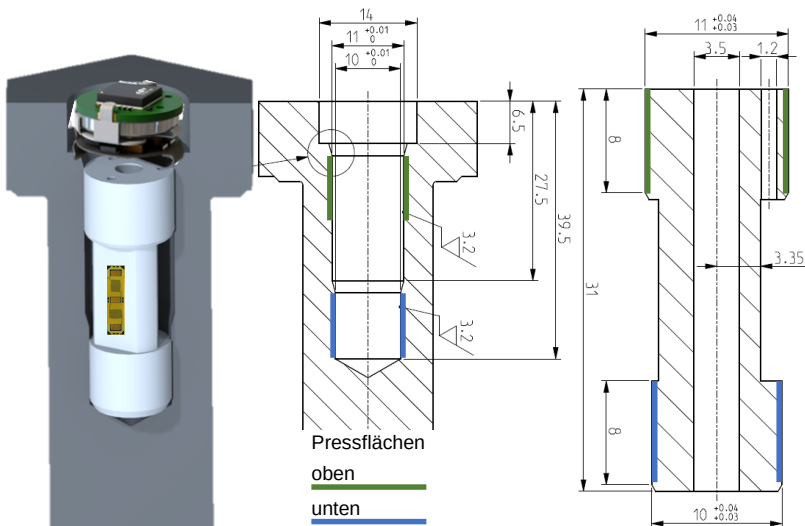


Abbildung 6.11: Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für die Prototypen V1 und V2.1. V2.1 weist einen hohen Hysteresemessfehler sowie eine geringe Sensitivität (Steigung) auf, was auf ein Versagen der Presspassung des Verformungskörpers hindeutet. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

6.3.3 V2.2: Hohlgebohrter Verformungskörper

6.3.3.1 Entwurf

Der Pressverband der V2.1 ist ein Problem, weil er nicht zuverlässig die erforderlichen Kräfte überträgt. Daher muss dieser überarbeitet werden. Eine weitere Verkleinerung der Toleranzfelder ist fertigungsbedingt jedoch nicht möglich. Zudem befindet sich das maximale Übermaß bereits an der Grenze der zulässigen Flächenpressung an der Passfläche der Schraube. Daher bleibt als Option, die Kraft



Die **Sensorelemente** sind identisch zu V2.1.

Die **Anordnung und Position** der DMS ist ähnlich zu V2.1 auf einem Verformungskörper, der Abstand zur Schraubenmittellachse wurde leicht erhöht auf 3.35 mm.

Der **Klebstoff** ist identisch zu V2.1.

Der **Verformungskörper** Pressverband wird mit identischen Übermaßen zu V2.1 (+ 40 μm obere Toleranzgrenze, + 30 μm untere Toleranzgrenze) ausgelegt. Es ergibt sich eine Kraftübertragung von 10.1 kN (maximal) und 4,69 kN (minimal) mit Formeln nach Budynas und Nisbett (2015, S. 130–131). Dadurch kann die erforderliche Kraft mit einer Sicherheit von ca. zwei auch bei minimalem Übermaß übertragen werden. Mit geringerer Sicherheit sind laut Auslegung nun auch Beanspruchungen bis 100 kN auf die Schraube möglich, ohne dass die Presspassung des Verformungskörpers versagt.

Der **Bauraum für die Elektronik** F²LECS ist identisch zu V1.

6.3.3.2 Bewertung und Verbesserung

Hinsichtlich des **mechanisch-funktionalen Verhaltens** zeigt V2.2 einen Anstieg der **von-Mises-Spannung** um **21,1 %** (Peters, Mirbach et al., 2024). Zur Bewertung des **sensorischen funktionalen Verhaltens** ist **Testfall 1** in Abbildung B.12 mit den Zeitverläufen und in Abbildung 6.13 mit den Kennlinien abgebildet. Die linearen Kennlinien bestätigen den Erfolg des Prototyps V2.2 in der Behebung des Problems: Die Erhöhung der Nachgiebigkeit des Verformungskörpers führte zu einer ausreichenden Kraftübertragung des Pressverbands. Die Sensitivität ist ähnlich zu V1 bei ungefähr 10 $\mu\text{V/V/kN}$. Daraus lässt sich mit Daten der Messkette aus Kapitel 6.2.4 eine Auflösung der Kraft von 6 N unter idealen Bedingungen berechnen. Damit können bereits Vorspannkraftverluste in der Höhe typischer Setzkraftverluste erkannt werden. Der Linearitäts- und der Hysteresemessfehler liegt mit jeweils 2,2 % unterhalb der Werte von V1 (Tabelle 6.2). Im Gegensatz zu V1 ist kein überlagertes Biegemoment sichtbar.

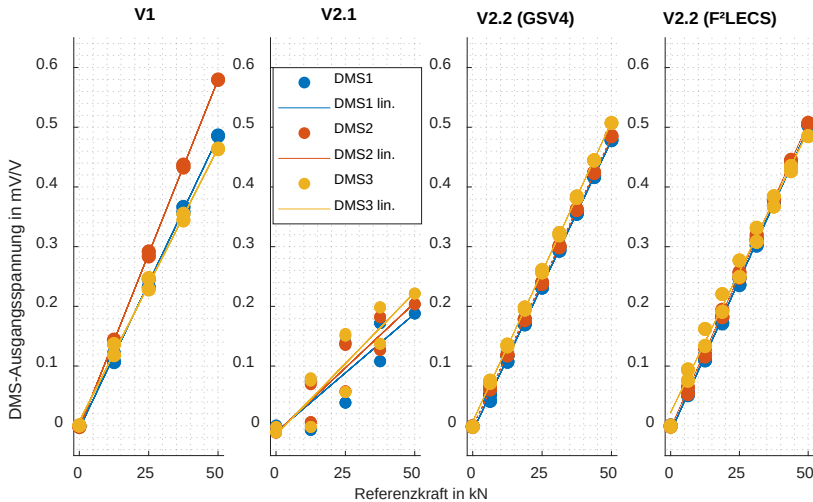


Abbildung 6.13: Testfall 1, axiale zentrische Beanspruchung für die Prototypen V1-V2.2. V1 und V2.2 zeigen ähnliche Steigungen, wobei V1 einen überlagerten Biegemoment von 21 Nm bei 44 kN aufweist (Abweichungen der einzelnen DMS). V2.1 weist einen hohen Hysteresemessfehler sowie eine geringe Sensitivität (Steigung) auf, was auf ein Versagen der Presspassung des Verformungskörpers hindeutet. Bei V2.2 zeigt die miniaturisierte Elektronik F²LECS ein zum GSV4 vergleichbares Verhalten, jedoch leicht erhöhte Messfehler für DMS3. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Abbildung 6.14 zeigt die Kennlinien für den **Testfall 2** des Anziehens und Lösen durch einen Drehmomentschlüssel. Die Zeitverläufe sind in Abbildung B.13 dargestellt. V1 und V2.2 zeigen ähnliche Abweichungen von der linearen Ausgleichsgeraden. Die Linearitätsmessfehler weichen um maximal 1 % je Prototyp von denen aus Testfall 1 ab (Tabelle 6.2). Die Sensitivitäten von V1 sind höher im Vergleich zu V2.2 und auch im Vergleich zu Testfall 1 (siehe Tabelle 6.2), was durch ein überlagertes Biegemoment verursacht werden kann. Darüber hinaus kann keine systematische Abweichung durch den überlagerten Torsionsmoment beim Anziehen festgestellt werden.

Ähnlich wie bei V1 und in Testfall 1 ist hier eine Abweichung der DMS-Signale untereinander zu sehen. Mögliche Ursachen sind, wie in Kapitel 6.3.1.2 erwähnt, die Existenz eines überlagerten Biegemoments, das sich hier zu 38 Nm bei 68 kN berechnet. Das Biegemoment ist im Testfall 2 höher als im Testfall 1, was auf einen Einfluss des Anziehens selbst hindeutet. Dabei wird durch die Kraft des Drehmomentschlüssels eine Querkraft auf den Schraubenkopf eingeleitet. In der Diskussion wird dahingehend zum Stand der Forschung Bezug genommen. Auch eine Überlagerung dieser beiden Ursachen mit addierendem oder subtrahierendem Effekt ist möglich. Dadurch kann der Effekt im Vergleich der Prototypen abweichen.

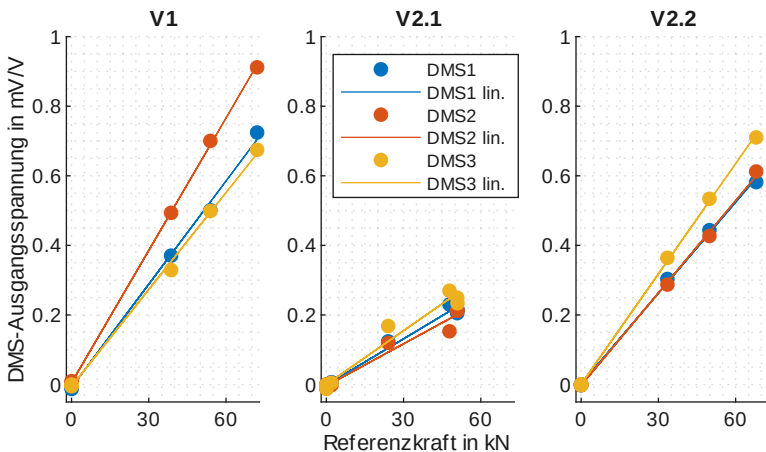


Abbildung 6.14: Testfall 2, Anziehen und Lösen für die Prototypen V1-V2.2. Alle Prototypen zeigen Messunterschiede zwischen den einzelnen DMS (Abweichungen in der Sensitivität), was auf einen überlagerten Biegemoment hindeutet (V1: 44 Nm, V2.2: 23 Nm). V2.1 zeigt hohe Abweichungen zwischen Messpunkten und Ausgleichsgeraden und geringe Sensitivitäten, die auf ein Versagen der Presspassung hindeuten. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Hinsichtlich der Beanspruchung in Biegerichtung (**Testfall 3**) folgen die Sensitivitäten einem Sinusverlauf mit Drehung der Beanspruchungsrichtung, vergleichbar mit V1 (Abbildung 6.15). Ein Zeitverlauf ist in Abbildung B.14 dargestellt. Die Sensitivitäten liegen bei $0,9 \mu\text{V/V/Nm}$, was einer Auflösung von 66 mNm im reinen Biegefall bei idealen Bedingungen entspricht (mit Daten der Messkette aus Kapitel 6.2.4). Damit sind sie um ca. 33 % geringer als bei V1. Der

Grund dafür liegt im Abstand der DMS zur Schraubenmittellachse (neutrale Faser). Bei Biegebeanspruchung steigt die Dehnung linear mit diesem Abstand. Bei V1 beträgt dieser Abstand 5 mm, bei V2.2 3,35 mm. Das entspricht rund 67 % des Abstands von V1 und deckt sich mit dem Unterschied in der Sensitivität. Die maximalen Fehler in Biegerichtung sind ähnlich zu denen von V1: 3,67 % v. E. (Linearität) und 2,73 % v. E. (Hysterese).

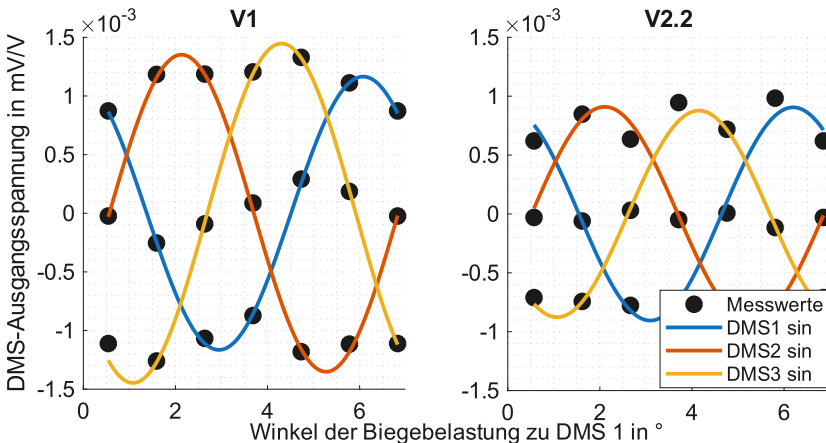


Abbildung 6.15: Testfall 3 für die Prototypen V1 (links) und V2.2 (rechts). Sensitivitäten über dem Winkel der Biegebeanspruchung als Sinuskurven drehend mit dem Winkel der Belastung. Die Sensitivitäten (Amplituden) bei V2.2 sind geringer. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

Um eine höhere Sensitivität bei der Messung von Biegemomenten zu erreichen, müsste der Abstand der DMS zur Schraubenmittellachse erhöht werden. Dies ist jedoch mit der aktuellen Gestalt des Verformungskörpers nicht ohne weitere Verschlechterung des mechanisch-funktionalen Verhaltens möglich. Eine Erhöhung des Abstands erfordert zugleich eine Vergrößerung des Verformungskörperradius. Um den Presssitz weiterhin zu gewährleisten, müsste gleichzeitig die Bohrung im Verformungskörper vergrößert werden, was wiederum den minimalen Querschnitt verringert und somit die maximale übertragbare Kraft der Schraube reduziert. Daher ist ein neuer Entwurf des Verformungskörpers erforderlich, um die Sensitivität, insbesondere für Biegemomente, weiter zu steigern.

Mit dem Prototyp V2.2 wird die neue **F²LECS-Plattform** zur Datenerfassung und Kommunikation ergänzend zum GSV4 (Stand der Technik) eingesetzt, um deren Einfluss auf die Bewertungsgrößen zu untersuchen. Die Linearitäts- und Hysteresemessfehler sind um rund 2,7 % respektive 3,8 % erhöht. Die Sensitivität ist nahezu identisch im Vergleich zur GSV4-Messung.

6.3.4 V3: Verformungskörper mit Biegebalken

6.3.4.1 Entwurf

Dieser Prototyp basiert auf einer Biegebalken-Konfiguration von Herbst et al. (2024): Drei Balken sind gleichmäßig außerhalb der Mittelachse verteilt. Jeder dieser Balken ist außen und innen mit einem DMS ausgestattet, die pro Balken zu einer Halbbrücke verschaltet sind, um die Biegung der einzelnen Balken zu messen (Abbildung 6.16). Wird der Verformungskörper gebogen, verformen sich alle Balken global in die gleiche Richtung. Dadurch verschieben sich die Potenziale der Halbbrückenausgänge pro Balken entsprechend, wie in Abbildung 6.16 (rechts) gezeigt. Ein Ausgang zeigt ein entgegengesetztes Vorzeichen im Vergleich zu den anderen. Durch diese DMS-Anordnung in Biegekonfiguration auf der Vorder- und Rückseite eines Balkens statt einer T-Rosette auf derselben Fläche wie in den Prototypen zuvor, kann eine größere Sensitivität bei Biegebelastungen erreicht werden (Kapitel 2.3.1). (Herbst et al., 2022)



Abbildung 6.16: Iteration V3 mit sechs flachen DMS, die zu drei Halbbrücken verschaltet und jeweils auf einem Biegebalken angeordnet sind. Der Verformungskörper hat drei Biegebalken, die in 120° zueinander versetzt sind. Abbildung basierend auf Herbst et al. (2024).

Bei axialer Beanspruchung verhält sich das System anders: Die Halbbrückenschaltungen auf jedem Balken sind so konfiguriert, dass sie nur auf Biegung reagieren und die axiale Dehnung im Messsignal kompensiert wird. Die Dehnung in axialer Richtung kann auf diese Weise nicht direkt gemessen werden. Wird der Verformungskörper jedoch axial belastet, biegen sich alle Balken zusätzlich zur axialen Dehnung aufgrund ihres Abstands zur Schraubensymmetrieachse. Alle DMS-Halbbrückensignale zeigen dabei das gleiche Vorzeichen, somit ist die Axialbeanspruchung von der Biegebeanspruchung unterscheidbar. (Herbst et al., 2022)

Die **Sensorelemente** sind sechs flache DMS, die pro Balken zu einer Halbbrücke verschaltet sind (N5K-06-S5094Q-10C, ME-Meßsysteme GmbH, Hennigsdorf, Deutschland), siehe Abbildung 6.16. (Herbst et al., 2022)

Die **Anordnung und Position** ist koaxial entlang der Schraubenachse, jeweils zwei DMS auf der Vorder- und Rückseite eines Biegebalkens. Drei Biegebalken sind in einem Verformungskörper um 120° versetzt angeordnet (Abbildung 6.16). (Herbst et al., 2022)

Der **Klebstoff** ist heißaushärtendes Phenolharz: P250, HBK, Darmstadt, Deutschland (Herbst et al., 2022).

Der **Verformungskörper** wird am oberen Teil durch ein Feingewinde verschraubt, am unteren Teil durch eine Klebung zur Bohrungsgrundfläche (Herbst et al., 2022; Herbst et al., 2024).

Der **Elektronikbauraum** hat einen Durchmesser von 16,4 mm und eine Tiefe von 6,4 mm im Schraubenkopf. (Herbst et al., 2024)

6.3.4.2 Bewertung

Hinsichtlich des **mechanisch-funktionalen Verhaltens** zeigt V3 je nach verwendetem FE-Modell einen Anstieg der **von-Mises-Spannung um 28,6 %** (Peters, Mirbach et al., 2024) bzw. **23,5 %** (Herbst et al., 2024). Der Unterschied kann durch Abweichungen in der Modellierung des Sensormodulbauraums hervorgerufen werden,

Die Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens ist in Herbst et al. (2024) veröffentlicht: Der Linearitätsmessfehler in axialer Richtung beträgt 1 % und stellt damit den besten Wert aller Iterationen der Prototypen dar. Der Hysteresemessfehler liegt bei 6,15 % (Herbst et al., 2024). Die Linearitäts- und Hysteresemessfehler in Biegerichtung wurden ausschließlich am

Verformungskörper und nicht in der vollständigen Schraube untersucht. Sie sind besser als bei allen anderen Prototypen und betragen 0,11 % respektive 0,52 %. Die Sensitivität in Biegerichtung wurde bislang noch nicht bewertet.

6.3.5 Zusammenfassung und Vergleich der Bewertungsgrößen

Die zusammengefassten Daten sind in Tabelle 6.2 dargestellt und in Abbildung 6.17 visualisiert. Alle Prototypen weisen Messfehler auf, die nahe bei oder unter 6 % liegen, mit Ausnahme von V2.1, die einen versagenden Pressverband aufweist. Die Sensitivität in axialer Richtung ist bei V1 und V2.2 vergleichbar; in Biegerichtung zeigt V1 jedoch eine höhere Sensitivität als V2.2 aufgrund des Abstands der DMS zur Schraubenmittelachse (neutrale Faser). Die mit der Sensitivität in axialer Richtung erreichbare Auflösung ist ausreichend, um Vorspannkraftverluste in der Höhe typischer Setzkraftverluste aufzulösen.

Der Prototyp V1 erfüllt somit bereits grundlegend die Funktion. Ein Vorteil von V1 liegt in der einfachen Herstellung und der Applikation der DMS. Es wird kein separater Verformungskörper benötigt, das Aufbringen eines Anpressdrucks während der Aushärtung des Klebers ist nicht notwendig. Genau das stellt allerdings auch einen Nachteil dar. Prototyp V2.1 reduziert die Unsicherheiten bei der Applikation durch den Einsatz eines Verformungskörpers, zeigt jedoch einen versagenden Pressverband bei hohen Kräften.

Prototyp V2.2 verbessert den Verformungskörper hinsichtlich des Pressverbands, was sich in geringeren Linearitäts- und Hysteresemessfehlern widerspiegelt. Die Messfehler in axialer Richtung sind sogar geringer als bei V1, jedoch ist die Sensitivität in Biegerichtung aufgrund des geringeren Abstands der DMS zur Schraubenmittelachse ebenfalls geringer. Eine Erhöhung dieses Abstands ist mit dem Verformungskörper von V2.2 nur mit Nachteilen im Pressverband und im mechanisch-funktionalen Verhalten möglich.

Daher wurde mit V3 ein neuer Verformungskörper entworfen, der gezielt auf eine verbesserte Biegemomentmessung ausgelegt ist. Dies wird durch die Anordnung und Verschaltung der DMS in Biegekonfiguration auf der Vorder- und Rückseite jeweils eines Balkens auf dem Verformungskörper erreicht. V3 zeigt die geringsten Fehlerwerte in Biegerichtung.

Tabelle 6.2: **Bewertungsgrößen zum mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhalten; für Linearitäts- und Hysteresemessfehler sind jeweils die Maxima aller drei DMS aufgeführt, für die Sensitivität der Mittelwert. Werte mit F sind mit F²LECS erfasst, sonst mit GSV. Werte mit Ausnahme von V3 aus Peters et al. (2026)**

Bewertungsgröße		V1	V2.1	V2.2	V3 ²
Sensor Testfall 1 (axialer Zug)	$\max(e_{lin,DMS1-3})$	3,30 %	27,43 %	2,20 % F: 4,85 %	1,01 %
	$\max(e_{hyst,DMS1-3})$	4,00 %	54,00 %	2,21 % F: 6,02 %	6,15 %
	$\text{mean}(sens_{DMS1-3})$ in $\mu V/V/kN$	10	4	9,8 F: 9,9	5
Sensor Testfall 2 (Anziehen)	$\max(e_{lin,DMS1-3})$	3,73 %	17,89 %	2,05 %	-
	$\text{mean}(sens_{DMS1-3})$ in $\mu V/V/kN$	10,6	4,5	9,5	-
Sensor Testfall 3 (Biegung)	$\max(e_{lin,DMS1-3})$	3,68 %	-	3,67 %	0,11 %
	$\max(e_{hyst,DMS1-3})$	2,53 %	-	2,73 %	0,52 %
	$\text{mean}(sens_{DMS1-3})$ in $\mu V/V/Nm$	1,3	-	0,9	-
Mecha-nisch	Erhöhung von-Mises-Spannung	1,26 %	18,4 %	21,1 %	28,6 %

Abbildung 6.17 zeigt das Maximum der Linearitäts- und Hysteresemessfehler (e_{lin} , e_{hyst}) in Bezug auf die Erhöhung der von-Mises-Spannung für axiale und Biegebeanspruchung. Auch hier wird der **Zielkonflikt zwischen gutem**

² Nach Publikationen von Herbst et al. (2022); Herbst et al. (2024).

mechanisch- und gutem sensorisch-funktionalen Verhalten deutlich. Insbesondere ist dies in axialer Richtung bei den Prototypen V1, V2.2 und V3 sichtbar, ein besseres sensorisch-funktionales Verhalten führt zu einem schlechteren mechanisch-funktionalen Verhalten. Insgesamt stellt V3 die beste Lösung speziell für die Messung von Biegemomenten dar, da sie in diesem Bereich sehr geringe Fehler aufweist. Dies geht allerdings mit einer Reduktion des mechanisch-funktionalen Verhaltens einher.

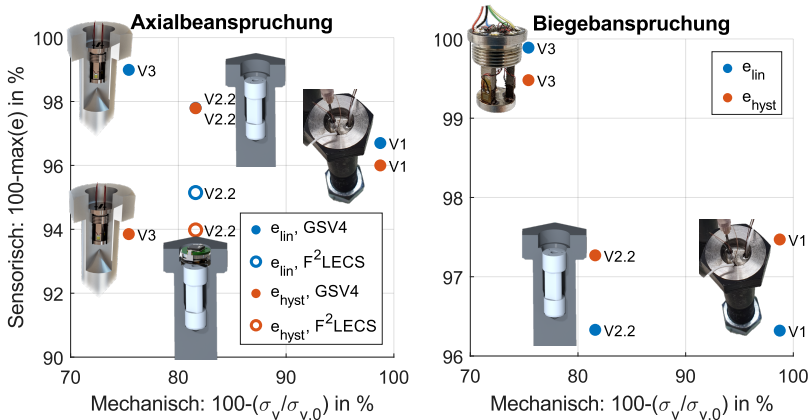


Abbildung 6.17: Vergleich des mechanisch- und des sensorisch-funktionalen Verhaltens anhand der Erhöhung der von-Mises-Spannung, bezogen auf die Vollschrabe, $\sigma_v / \sigma_{v,0}$ und der Linearitäts- und Hysteresemessfehler im reinen Zug (Testfall 1). Das beste Verhalten liegt im rechten oberen Bereich des Diagramms. V3 weist den besten Linearitätsmessfehler sowohl bei Axial- als auch bei Biegebeanspruchung auf, allerdings auch den höchsten von-Mises-Spannungsanstieg. Bei V1 verhält es sich umgekehrt. Dies verdeutlicht den Zielkonflikt zwischen gutem mechanisch- und gutem sensorisch-funktionalen Verhalten. Dieser ist besonders ausgeprägt in axialer Richtung bei V1, V2.2, V3 und in Biegerichtung bei V1, V3. Die miniaturisierte, energieeffiziente Elektronikplattform F²LECS erhöht die Fehlerwerte geringfügig im Vergleich zum Stand der Technik entsprechenden GSV. Abbildung übersetzt aus Peters et al. (2026).

6.4 Diskussion

Zusammenhang von mechanisch- und sensorisch-funktionalem Verhalten:

Insgesamt reduziert die Sensorintegration das mechanisch-funktionale Verhalten im Bereich von 1 % (Prototyp V1) bis 28 % (Prototyp V3) gemessen an der Erhöhung der von-Mises-Spannung (Abbildung 6.17). Schrauben aus dem Stand der Technik, bei denen die Sensorik in die Schraubenstruktur integriert ist, zeigen ähnliche Einflüsse auf das mechanische Verhalten. So berichten beispielsweise Groche und Brenneis (2014) von einer Reduktion der Beanspruchbarkeit um 20 %. Um die Beanspruchbarkeit beizubehalten, müssen Gegenmaßnahmen getroffen werden, wie z. B. eine Erhöhung der Festigkeitsklasse des Materials. Das schlagen auch Groche und Brenneis (2014) vor. Alternativ kann geprüft werden, ob durch genauere Kenntnis der Beanspruchung der Schraube der Sicherheitsfaktor zwischen Beanspruchbarkeit und Beanspruchung reduziert werden kann.

Sensorisches funktionales Verhalten: Im Vergleich zum Stand der Technik mehraxialer Kraftsensoren mit ähnlichen Kraftbereichen von Feng, Lin, Zhang, Pang und Wang (2015) liegt der Linearitätsmessfehler von V3 mit etwa 1 % im vergleichbaren Bereich, die Hysteresemessfehler sind hier um ca. 0,9 % bis 5 % höher. Die Sensitivitäten von etwa $10 \mu\text{V/V/kN}$ (axial) und $1 \mu\text{V/V/Nm}$ (Biegung) liegen ebenfalls im ähnlichen Bereich. Auch im Vergleich zu Valdastrì et al. (2005) liegt der Linearitätsmessfehler im ähnlichen Bereich von bis zu 2,5 %.

Für ein gutes sensorisches funktionales Verhalten benötigt das Sensormodul konstruktive Freiheitsgrade in Bezug auf den Bauraum, etwa zur Realisierung des Konzepts der drei Biegebalken, wie in Herbst et al. (2022) vorgestellt, sowie für die miniaturisierte Elektronikplattform zur Signalaufnahme und -übertragung F²LECS, wie in Riehl et al. (2024) beschrieben. Dies reduziert den verfügbaren Bauraum für die mechanische Funktion, was sich in einer Erhöhung der Bewertungsgröße von-Mises-Spannung zeigt und den Zielkonflikt unterstreicht.

Position der DMS für Biegemessungen: Bezüglich der Höhe sind die DMS bei allen Iterationen im Schaft positioniert, da dort eine nahezu homogene Dehnungsverteilung der Schraube vorliegt (Peters, Mirbach et al., 2024). Hinsichtlich des Abstands der DMS zur Schraubenmittellachse zeigen die Ergebnisse zu V1 und V2.2, dass die Sensitivitäten der DMS-Messdaten mit zunehmendem Abstand ansteigen (Abbildung 6.15). Dies entspricht dem zugrunde liegenden physikalischen Prinzip der Dehnungsverteilung in Körpern unter Biegebeanspruchung (Böge & Böge, 2024).

Verbesserung von V2.1 zu V2.2 durch Nachgeben: Ein besonderer Aspekt ist der Übergang von V2.1, der einen großen Hysteresemessfehler aufwies, zu V2.2. Der Grund lag in der versagenden Presspassung, die die Verformung bei hohen Kräften nicht mehr auf den Verformungskörper übertragen konnte. Ein höheres Übermaß oder geringere Toleranzen sind aufgrund von Materialbeanspruchbarkeit und Fertigungstoleranzen nicht mehr möglich. Wenn die Toleranzen jeweils ihre ungünstigsten Extremwerte annehmen, kann die Kraftübertragung nicht gewährleistet werden. Eine gezielte Schwächung des Verformungskörpers durch eine Bohrung konnte das Problem beheben, da der Verformungskörper nachgiebiger wird und somit der Verformung auch bei hohen Kräften noch folgen kann.

Biegemomente beim Anziehen und durch Neigungswinkel: Die mehraxial kraftmessenden sensorintegrierenden Schrauben beweisen ihr Potenzial bereits durch Messung eines überlagerten Biegemoments beim Anziehen mit Verfahren, die prinzipbedingt Querkräfte auf die Schraube einleiten (siehe V1 und V2.2 in Abbildung 6.14). Dieses Verhalten gleicht den Erkenntnissen von Seybold (2006). Das statisch wirkende Biegemoment ist für die Beanspruchbarkeit bei der Montage nur bedingt von Bedeutung und findet in der Berechnung der zulässigen Montagevorspannkraft nach VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 keine Berücksichtigung (Kapitel 2.2.3). Allerdings kann die Querkraft dazu führen, dass sich der Schraubenkopf oder die Mutter verschiebt oder dass sich der Schraubenschaft an die Mantelfläche der Bohrung drückt, wodurch sich die Reibwerte ändern oder zusätzliche Reibmomente entstehen, was zu Abweichungen in der erreichten Montagevorspannkraft führt (VDI 2230 Blatt 3: 2024-07 - Entwurf). Dies gefährdet die Funktion der Schraubenverbindung.

Biegemomente treten ebenfalls bei Winkelabweichungen der Kontaktoberflächen der verspannten Bauteile auf, die durch toleranzbedingte Abweichungen in Ebenheit oder Lage entstehen können (siehe Abbildung 6.6). Dies bestätigt Beobachtungen von Hosokawa (2006), der ebenfalls Biegemomente bei verschiedenen Neigungswinkeln mit schrägen Unterlegscheiben vermessen hat: Bereits bei einer Winkelabweichung von $0,1^\circ$ wurde ein Biegemoment von 15 Nm an der Schraube gemessen, der in grober Näherung linear mit dem Winkel ansteigt (Hosokawa, 2006). Dies passt von der Größenordnung mit den Messungen im Rahmen dieser Arbeit zusammen: Beim Vergleich des reinen Zugs (Testfall 1) wurde der Biegemoment zu 21 Nm berechnet (Abbildung 6.6). Das entspricht nach dem Zusammenhang von Hosokawa einer Winkelabweichung von rund $0,13^\circ$, was aufgrund der Anzahl der Trennfugen der vorliegenden Schraubenverbindung im Toleranzbereich liegt.

Zusammen mit den Erkenntnissen von Abid und Nash (2006) sowie Blachowski und Gutkowski (2016) zur Existenz von Biegemomenten im Betrieb, z. B. bei

Flanschverbindungen, unterstreicht dies die Notwendigkeit, Biegemomente innerhalb von Schrauben zu messen. Die sensorintegrierenden Schrauben sind in der Lage, diesen Biegemomenteinfluss zu quantifizieren und können dadurch die Sicherheit der Auslegung gewährleisten.

Torsionsmomente beim Anziehen: Beim Anziehen wirkt ein überlagertes Torsionsmoment zwischen Kopf/Werkzeug und Gewinde (Kapitel 2.2.3) zusätzlich zur axialen Klemmkraft und den oben beschriebenen Biegemomenten. Das hier vorgestellte Messprinzip der sensorintegrierenden Schrauben ist nicht zur Messung von Torsionsmomenten ausgelegt, wird von diesen jedoch auch nicht negativ beeinflusst, da die Bewertungsgrößen Sensitivität und Messfehler sowohl beim Anziehen als auch bei reiner axialer Beanspruchung vergleichbar sind.

Verringerung der Überdimensionierung durch Daten-Koppelung der sensorintegrierenden Schrauben mit Montagewerkzeug: Darüber hinaus ermöglichen die in diesem Projekt entwickelten sensorintegrierende Schrauben eine Koppelung per Bluetooth mit einem Montagewerkzeug, sodass beim Anziehvorgang direkt auf eine gewünschte Vorspannkraft angezogen werden kann, die die eigentliche Zielgröße beim Auslegen einer Schraubenverbindung ist (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11). Gängige Verfahren mit Drehmomentschlüsseln oder elektrisch angetriebenen Werkzeugen müssen die erreichte Vorspannkraft aus der Messung der Hilfsgröße Drehmoment errechnen. Dies ist jedoch unsicherheitsbehaftet, da die Berechnung von Reibwerten abhängt, die oft nicht genau bekannt sind und geschätzt werden müssen. Dies ruft eine Streuung in den erreichten Vorspannkraften hervor, die im Rahmen der VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 als Anziehfaktor berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 2.2.3). Diese erzwingen eine Überdimensionierung der Schraubenverbindungen. Drehmomentgesteuerte Verfahren haben Anziehfaktoren von 1,6 für dynamisch messende Drehmomentschlüssel oder -schrauber und bis zu 4 für Schlagschrauber oder Anziehen von Hand (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11). Anziehverfahren mit Messung der Längung bspw. durch Ultraschall werden bei einer Streuung von 5 % mit einem Anziehfaktor von 1,1 beaufschlagt (VDI 2230 Blatt 1: 2015-11). Die hier vorgestellten sensorintegrierenden Schrauben haben Messfehler von unter 6 %, die Streuung wurde noch nicht quantifiziert. Im besten Fall können diese eine ähnliche Streuung und somit einen Anziehfaktor von 1,1 erreichen. Dadurch eröffnen sie in Koppelung mit einem Montagewerkzeug **das Potenzial einer Reduktion der Überdimensionierung von 31 % (Anziehfaktor 1,6 → 1,1) bis zu 73 % (Anziehfaktor 4 → 1,1)**. Das bedeutet bspw. für einen Schlagschrauber, dass die für die Auslegung relevante maximale Montagevorspannkraft nur um 10 % statt um 400 % erhöht werden muss.

Vergleich mit Werten des Verhandlungsmodells aus Forschungsfrage 1: In Forschungsfrage 1 wurde auf Basis von Modellwerten eine minimale auflösbare Kraft von 8 N berechnet. Für selbige Messkettenspezifikationen wird hier mit einer Sensitivität von $10 \mu\text{V/V/kN}$ eine minimal auflösbare Kraft von 6 N erreicht. Dies ist in einem ähnlichen Bereich und sogar geringfügig besser als die Prognose. Gründe dafür können Ungenauigkeiten in den Modell- oder Materialparametern der Modellgleichungen aus Forschungsfrage 1 sein.

6.4.1 Einschränkungen

Prototyp **V3** wurde in einer **anderen Testing-Umgebung** bei Herbst et al. (2024) untersucht. Es handelt sich in beiden Fällen um Universalprüfmaschinen mit Referenzkraftsensoren in ähnlicher Genauigkeitsklasse. Trotzdem ist nicht auszuschließen, dass die Genauigkeiten der Beanspruchungsaufbringung oder der Referenzkraftmessung voneinander abweichen. Weiterhin können die Aufnahmen oder die verspannten Platten für die zu untersuchenden Schrauben in ihren Toleranzen voneinander abweichen. Dies kann insbesondere zum Problem werden, wenn bei reiner axialer Belastung überlagerte Biegemomente durch Abweichung in der Ebenheit oder Lage der Aufnahmen entstehen, wie hier bei V1 gezeigt (Abbildung 6.6). Somit beeinflusst dieser überlagerte Biegemoment die Bewertungsgrößen im axialen Fall. Darüber hinaus wurden für den Vergleich der Messfehler im Biegefall die Daten des Verformungskörpers ohne die Schraube verwendet. Für die axiale Richtung sind die Messfehler beim Vergleich zwischen Verformungskörper ohne Schraube und integriert in der Schraube in der Linearität ähnlich, in der Hysterese um rund 5 % schlechter (Herbst et al., 2024).

Prototyp **V3** verwendet eine **Klebeschicht** zur Montage des Verformungskörpers am unteren Ende. Die Langzeitstabilität dieser Klebeverbindung muss noch untersucht werden. Es besteht das Risiko, dass diese insbesondere unter Temperatureinfluss ihre Eigenschaften verändern könnte.

Die sensorische Bewertung beschränkt sich bislang auf Linearitäts- und Hysteresemessfehler sowie Sensitivität. Für mehraxiale Kraftsensoren ist jedoch auch das Kopplungsverhalten zwischen den Achsen („Cross-Talk“) von Bedeutung. Dieses kann durch eine Entkopplungsmatrix quantifiziert werden, mit der der mehraxiale Kraftvektor aus den Sensorsignalen berechnet werden kann. Diese Analyse ist Bestandteil zukünftiger Arbeiten. Im Zuge des Testfalls 2 wurde bei V1 und V2.1 mit 150 Nm angezogen, bei V2.2 mit 100 Nm, 150 Nm und 200 Nm. Somit steht bei V2.2 ein breiterer Messbereich zur Bewertung zur Verfügung als bei V1 und V2.1.

6.5 Zwischenfazit zur Beantwortung der Forschungsfrage 2

In diesem Kapitel wurde die **Forschungsfrage 2** untersucht:

Forschungsfrage 2: *Welches quantitative mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten erreichen iterativ entwickelte Prototypen der sensorintegrierenden Schraube?*

Die Frage kann beantwortet werden: Die entwickelten Prototypen der sensorintegrierenden Schrauben erreichen ein sensorisches funktionales Verhalten mit einer Sensitivität von bis zu $10 \mu\text{V/V/kN}$ in axialer Richtung, was einer Auflösung der Kraft von ca. 6 N unter idealen Bedingungen entspricht. Das übertrifft die Modellberechnung aus Forschungsfrage 1 um 2 N. Damit können auch Vorspannkraftverluste in der Höhe typischer Setzkraftverluste erkannt werden. In Biegerichtung wird eine Sensitivität von bis zu $1,3 \mu\text{V/V/Nm}$ erreicht, was einer Auflösung des Biegemoments von ca. 46 mNm im reinen Biegefall unter idealen Bedingungen entspricht. Der Linearitätsmessfehler konnte von 3,3 % auf 1 % des Messbereichsendes (v. E.) in axialer Richtung und von 3,7 % auf 0,1 % v. E. in Biegerichtung verbessert werden. Die integrierbare Messkette mit drahtloser Datenkommunikation (F²LECS) führt zu einer geringen Verschlechterung der Linearitäts- und Hysteresemessfehler um 2,7 % bzw. 3,8 %.

Das mechanisch-funktionale Verhalten, bewertet durch die Erhöhung der von-Mises-Spannung, ist dabei je nach Modell um 25 % bzw. 29 % reduziert. Die Iterationen konnten dabei fortlaufend das sensorisch-funktionale Verhalten verbessern, allerdings mit einhergehend schlechterem mechanisch-funktionalem Verhalten. Bezüglich des Zielkonflikts führt das zur Erkenntnis, dass ein besseres sensorisches- ein geringeres mechanisch-funktionales Verhalten bedingt.

Das aufgebaute Konstruktionswissen im Rahmen der FF2 umfasst neben der Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens und den daraus abgeleiteten Verbesserungen

- den Effekt der Position der DMS auf die Sensitivität bei der Biegemessung,
- die Montage der Verformungskörper in der Schraube und die Auswirkung eines versagenden Pressverbands auf das Messsignal in Form von Hysteresefehlern sowie die Kraftaufteilung zwischen Verformungskörper und Rest der Schraube,
- das Auftreten von Biegemomenten beim Anziehen mit dem Drehmomentschlüssel.

Die Messdaten zeigen, dass auch bei Belastungen, die eigentlich eine rein axiale Kraft einleiten sollten, bereits überlagerte Biegemomente auftreten. Mögliche Ursachen sind einerseits toleranzbedingte Abweichungen in den Kontaktflächen, wie sie auch im Stand der Forschung beobachtet wurden (Kapitel 6.4). Andererseits kann ein Biegemoment auch durch eine Querkraft auf den Schraubenkopf eingeleitet werden, die durch das Anziehen mittels Drehmomentschlüssel oder Drehmomentschrauber mit einarmiger Abstützung verursacht werden. In der Formel zur Berechnung der zulässigen Montagevorspannkraft nach VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 ist dies nicht berücksichtigt. Die sensorintegrierende Schraube kann das Biegemoment quantifizieren, wodurch in Zukunft der Einfluss auf die zulässige Montagevorspannkraft beim Anziehen bewertet werden kann.

Weiterhin konnten die sensorintegrierenden Schrauben ihre Funktionsfähigkeit der drahtlosen Datenübertragung auf Basis der miniaturisierten Elektronik (F²LECS) mittels „Bluetooth Low Energy“ (BLE) zeigen. Das sensorisch-funktionale Verhalten wird dadurch nur sehr gering beeinflusst. Dadurch wird das Potenzial einer Koppelung mit Montagewerkzeugen eröffnet, wodurch die Überdimensionierung von Schraubenverbindungen durch genaueres Anziehen reduziert werden kann. Das bedeutet bspw. für einen Schlagschrauber, dass die für die Auslegung relevante maximale Montagevorspannkraft nur um 10 % statt um 400 % erhöht werden muss. Die Reduktion der mechanischen Funktion durch die integrierte Sensorik kann dadurch mehr als ausgeglichen werden.

7 Ansatz zur methodischen Unterstützung der Sensorintegration in Maschinenelemente am Beispiel einer Befestigungsschraube

In diesem Kapitel wird die **Forschungsfrage 3** untersucht und beantwortet:

Forschungsfrage 3: *Welcher methodische Ansatz kann aus der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube abgeleitet werden, der bei der Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten durch den Aufbau von Konstruktionswissen unterstützt?*

Die Inhalte dieses Kapitels zur Beantwortung der Forschungsfrage 3 basieren auf einer wissenschaftlichen Veröffentlichung des Autors der vorliegenden Arbeit:

Peters, J., Doellken, M., Grauberger, P., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K., Matthiesen, S. (2025). Design Support and Strategies for Integrating Sensing Functions into Machine Elements. *Procedia CIRP 24-01104R3*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.090> (VÖ4).

Die Abbildungen sowie wesentliche Textabschnitte zu Methode, Ergebnissen, Diskussion und Einschränkungen sind in übersetzter Form aus dem Englischen sinngemäß übernommen. Die Begrifflichkeiten wurden an die vorliegende Forschungsarbeit angepasst. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Gegensatz zu den Abbildungen auf eine gesonderte Kennzeichnung der Texte verzichtet.

7.1 Kurzzusammenfassung

Die Integration sensorischer Funktionen bei gleichzeitiger Erhaltung des mechanisch-funktionalen Verhaltens führt häufig zu einem Zielkonflikt zwischen mechanischer und elektrischer Disziplin, dessen Lösung derzeit methodisch nicht ausreichend unterstützt wird. Es wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, um fehlendes Wissen zur Integration von sensorischen Funktionen in Maschinenelemente am Beispiel einer Schraube aufzubauen und damit den Zielkonflikt zu analysieren und zu verhandeln. Dazu wurde das etablierte V-Modell

um eine Sensordisziplin erweitert und mit der Methodik des Testing kombiniert. Das fehlende Wissen betrifft insbesondere das sogenannte Konstruktionswissen, das die Merkmale der Gestalt und ihre Auswirkung auf das funktionale Verhalten zusammenführt (Kapitel 2.6). Der Aufbau des fehlenden Wissens wird durch systematische Formulierung und Definition von Wissenslücken, Hypothesen und Zielen sowie der Durchführung von Aktivitäten und dem Betrieb, der Beobachtung und der Bewertung von Testing-Objekten über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg vollbracht. Mithilfe dieses Vorgehens, das auf Ergebnisse von Forschungsfragen 1 und 2 zurückgreift, konnte der Zielkonflikt zwischen den Disziplinen untersucht und verhandelt werden und ermöglichte damit eine erfolgreiche Integration der Sensorik. Es wurden Muster in der Abfolge der Schritte zum Wissensaufbau wie die Zeitpunkte des empirischen Testing identifiziert, die entscheidender Treiber der Kosten und der Zeit sind. Produktentwickelnde erhalten mit dieser Fallstudie ein Referenzvorgehen, das die Produktentwicklung von sensorintegrierenden Maschinenelementen unterstützen kann.

7.2 Methode

Der methodische Ansatz wird beispielhaft anhand der Entwicklung einer sensorintegrierenden M20-Schraube basierend auf den zuvor vorgestellten Ergebnissen zur Bauraumidentifikation (Forschungsfrage 1 in Kapitel 5) sowie der Quantifizierung des funktionalen Verhaltens (Forschungsfrage 2 in Kapitel 6) entwickelt. Sie fußt auf der VDI/VDE 2206 und der darin vorgestellten Unterteilung in Makro- und Mikroebene. In der Makroebene ist das übergeordnete Vorgehen zur Entwicklung der sensorintegrierenden Schraube enthalten, veranschaulicht durch das V-Modell. Um der Bedeutung der Sensorik in diesem Entwicklungsprozess Rechnung zu tragen, wurde in der Schnittstelle zwischen der Mechanik- und Elektronikdisziplin eine vierte Disziplin für Sensorik eingeführt. Ein vergleichbares Vorgehen wurde erfolgreich von Ley et al. (2022) im Bereich der optischen Disziplin angewendet (Kapitel 2.5.1). Abbildung 7.1 zeigt den methodischen Ansatz. Der Fokus liegt auf der Phase der disziplinspezifischen Entwicklung und der Systemintegration, die anderen Phasen des V-Modells werden nicht verändert.

In der Mikroebene wird der Aufbau von fehlendem Wissen im Detail unterstützt. In das V-Modell der Makroebene wird dazu die Methodik des Testing (Matthiesen & Grauberger, 2024), die speziell auf den Aufbau von Wissen im Konstruktionsprozess eingeht (Kapitel 2.6), integriert. Diese Herangehensweise orientiert sich am Vorgehen von Zheng et al. (2017), die das V-Modell mit einer Kompatibilitätstestphase zur Unterstützung der Subsystemintegration

verschiedener Disziplinen erweitert haben (Kapitel 2.5.1). Im Gegensatz zu Zheng et al. (2017) wird das Testing nicht auf die Systemintegrationsphase beschränkt.

Der Prozess in der Mikroebene (Abbildung 7.1) umfasst folgende Schritte:

- Situationsanalyse: Spezifikation des **fehlenden Wissens** (Lücke), das notwendig ist, um synthesesfähig zu werden.
- Darauf aufbauend wird ein **Ziel** festgelegt: *erkunden*, *eingrenzen* oder *prüfen*.
- Zusätzlich werden, wo sinnvoll, **Hypothesen** nach dem Formulierungsmodell „Wenn ..., dann ..., weil ...“ formuliert. Dies basiert auf den von Matthiesen und Grauberger (2024) herangezogenen Gestalt-Funktions-Zusammenhängen zur Strukturierung des Wissens. Dadurch wird der Aufbau von White-Box-Wissen gewährleistet, da die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion mit ihren Erklärungen direkt verknüpft werden.
- Anschließend wird die Art und Weise des Wissensaufbaus in **recherchierende, modellbasierte (analytische) und empirische Aktivitäten** kategorisiert. Bei den beiden letztgenannten Kategorien wird ein virtuelles oder physisches Testobjekt analysiert, was den Betrieb, die Beobachtung und die Bewertung umfasst. Abhängig vom Ziel führt dies zur Generierung neuer Hypothesen (*erkunden*), zur Reduktion bestehender Hypothesen (*eingrenzen*) oder zur Bestätigung respektive Zurückweisung einer Hypothese (*prüfen*). Dadurch wird neues Wissen aufgebaut.
- Nun wird geprüft, ob die zuvor formulierte Lücke im Wissen geschlossen werden kann. Falls ja, kann entlang des V-Modells weitergearbeitet werden. Falls nein, wird der Prozess erneut durchlaufen.

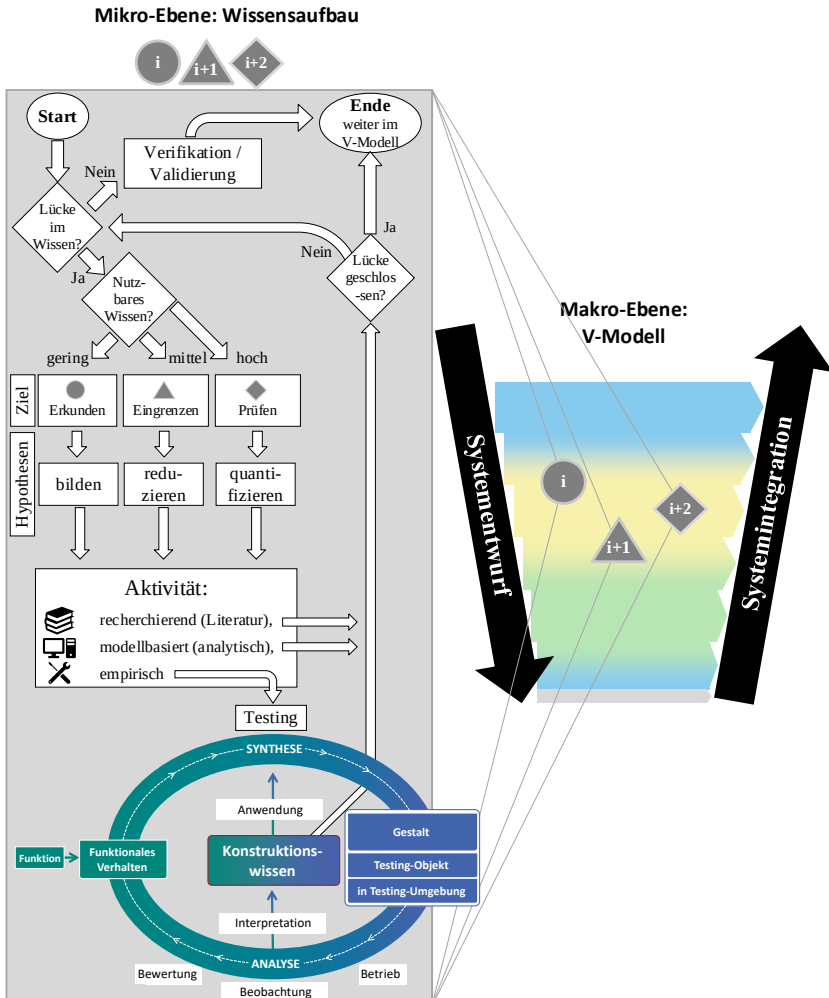


Abbildung 7.1: Prozess zum Wissensaufbau in der Mikroebene innerhalb des V-Modells, basierend auf Matthiesen und Graubeger (2024). Der Prozess wird an verschiedenen Stellen des V-Modells durchgeführt, um fehlendes Wissen aufzubauen. Abbildung angelehnt an (Peters et al., 2025).

7.3 Ergebnisse

Der Aufbau fehlenden Wissens zur Sensorintegration in eine Schraube wird anhand von 32 Schritten als Fallstudie im Projekt SiSmaK beschrieben. Das Ergebniskapitel enthält eine grafische Übersicht und Zuordnung der Schritte zum Wissensaufbau in die Makroebene des V-Modells (siehe Abbildung 7.2) sowie eine Beschreibung ausgewählter Schritte in der Mikroebene. Der Fokus liegt dabei auf der Interaktion zwischen den Disziplinen und der Analyse sowie Verhandlung des Zielkonflikts zwischen der Erhaltung des mechanisch-funktionalen Verhaltens und der Bereitstellung von mehraxialen Sensordaten mit geringem Messfehler.

Die Abfolge der Schritte in parallelen Disziplinen ist nicht zwangsweise sequenziell zu verstehen. Die Nummerierung der Schritte ist fortlaufend. Eine Iteration bspw. aufgrund einer verworfenen Hypothese (rote Rauten in Abbildung 7.2) führt trotzdem zu einer erhöhten Schrittnummerierung. Die Informationstechnik-Disziplin wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Abbildung 7.5 gibt einen Überblick über die Abfolge zur Identifikation von Mustern in den Aktivitäten.

7.3.1 Fallstudie sensorintegrierende Schraube: Aufbau von Wissen

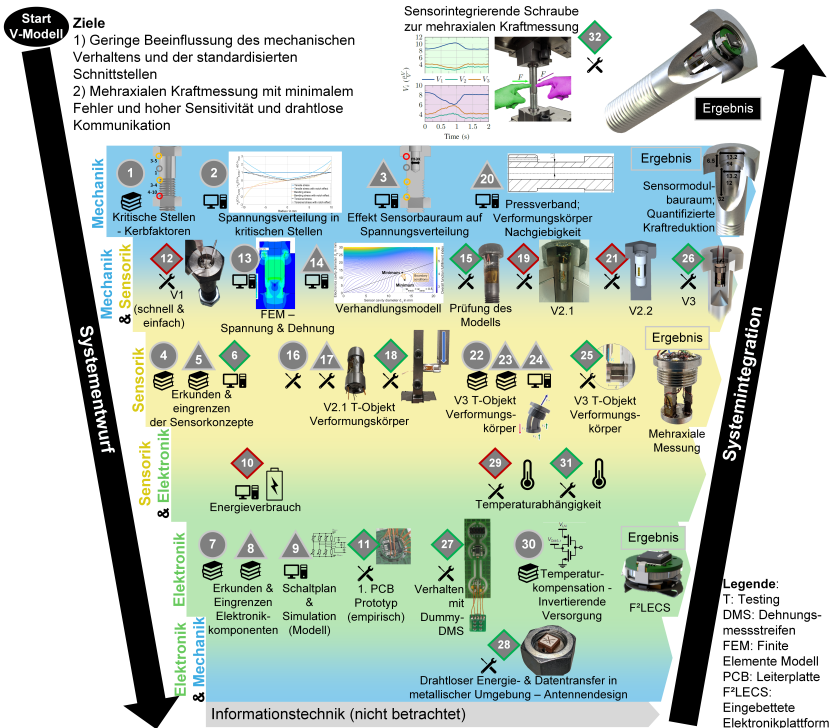


Abbildung 7.2: V-Modell als Vorgehen in der Makroebene mit markierten Schritten zum Wissensaufbau, kategorisiert nach den Zielen *Erkunden* (Kreis), *Eingrenzen* (Dreieck) und *Prüfen* (Raute) sowie in recherchierende (Buch), modellbasierende (PC) und empirische (Werkzeug) Aktivitäten. Rote Rauten zeigen eine abgelehnte Hypothese und somit eine Iteration. Abbildung angelehnt an (Peters et al., 2025).

Im Folgenden wird ein Auszug aus den durchgeführten Schritten zum Wissensaufbau in Form der Tabelle 7.1 gezeigt. Die Tabelle umfasst alle im Rahmen dieser Forschungsarbeit behandelten Schritte. Daran anschließend sind

ausgewählte Schritte mit dem Fokus auf den disziplinübergreifenden Interaktionen beschrieben, um die Analyse und Verhandlung des Zielkonflikts zu zeigen. Eine Übersicht über alle durchgeführten Schritte befindet sich in Tabelle C.1. In Kapitel 7.3.2 sind Muster und Beobachtungen erläutert.

Tabelle 7.1: Auszug der durchgeführten Schritte zum Wissensaufbau (komplette Auflistung in Tabelle C.1). D: Disziplin, M: mechanisch, S: sensorisch, E: elektronisch.

Nr.	D	Fehlendes Wissen	Ziel und Aktivität	Aufgebautes Wissen
1	M	Kritische Stellen in der Schraube, die vom Sensormodul vermieden werden sollen.	Erkunden der kritischen Stellen mittels Recherche.	Kritische Stellen sind die Kerben, Kerbfaktoren (Kapitel 2.2.5).
2	M	Spannungsverlauf an den kritischen Stellen, um initial Gestaltmerkmale festzulegen.	Analytische Berechnungen zum Erkunden der Spannungen in Abhängigkeit des Radius und der Kerbfaktoren.	Spannungsverläufe an den Kerbquerschnitten lassen Rückschlüsse auf Gestaltmerkmale mit geringem Einfluss auf die Spannung zu (Kapitel 5.3.1).
3	M	Einfluss der Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums auf die Spannung im Querschnitt der Kerben.	Eingrenzung der Gestaltmerkmale durch analytische Berechnungen zum Einfluss auf den Spannungsverlauf.	Zusammenhang des kritischsten Gestaltmerkmals Hohlraumdurchmesser auf die Spannung im Querschnitt der Kerbe (Kapitel 5.3.3).
10	S & E	Energieverbrauch der Messschaltung.	Prüfung des Energieverbrauchs mittels eines Modells, das auf dem Schaltplan und Datenblattwerten der verwendeten DMS	Energieverbrauch ist zu hoch, da der Nennwiderstand der DMS mit 120 Ω relativ gering ist. Es werden DMS mit höherem Nennwiderstand benötigt.
11	E	Reales Verhalten der Messschaltung.	Aufbau und empirische Prüfung einer PCB	Reales Verhalten entspricht dem Modell.
12	M & S	Übertragbarkeit der analytischen Berechnungen auf realen Prototyp V1 und sensorisches Verhalten.	Empirische Prüfung mit einfach herstellbarem Prototyp V1.	Berechnungen sind gültig, Messfehler und Sensitivität sind akzeptabel, allerdings Unsicherheit durch die Applikation der gerollten DMS. Flache DMS auf Verformungskörper notwendig (Kapitel 6.3.1).

13	M & S	Auswirkungen der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale auf das mechanische und sensorisch-funktionale Verhalten.	Die analytischen Berechnungen aus 2,3 reichen nicht mehr aus, FE-Modell zur Erkundung der Auswirkung mit allen Gestaltmerkmalen des Sensormodulbauraums.	Gestaltmerkmale Durchmesser sind kritischer als Höhen. Größere Durchmesser führen zu höherem sensorischem und geringerem mechanisch-funktionalem Verhalten (Zielkonflikt), Kapitel 5.3.6, 5.4).
14	M & S	Auswahl von Gestaltmerkmalen, die beide Funktionserfüllungen optimieren.	Eingrenzung der Gestaltmerkmale durch Optimierungsfunktion (modellbasiert, numerisch).	Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale werden berechnet, die beide Funktionserfüllungen optimieren und sind verfügbar für die weitere Entwicklung (Kapitel 5.3, 5.4).
15	M & S	Wiedergabetreue des FE-Modells aus 13, 14.	Empirische Prüfung der Dehnungsmessung an ausgewählten Punkten mittels DMS und Vergleich mit FE-Modell.	Die empirischen Daten ähneln dem Modell innerhalb einer tolerierbaren Abweichung (Kapitel 5.3.3, 5.3.5).
16	S	Gestaltmerkmale des Verformungskörpers für 3 DMS-Messachsen	Empirische Erkundung von DMS-Verformungskörpern	Runde Klebeflächen für DMS bergen Gefahr des Ablösens, Ebene Klebeflächen sind anzustreben
17	S	Anzahl an DMS und Verschaltung	Empirische Eingrenzung von DMS-Verformungskörpern	Halbbrücken als T-Rosette pro Achse passen vom verfügbaren Platz und bieten Kompensation von Temperatureffekten.
18	S	Sensorisches funktionales Verhalten des Verformungskörpers	Empirische Prüfung eines DMS-Verformungskörpers	Die Dehnungsmessungen zeigen unterscheidbare Axialkräfte sowie Biegemomente
19	M + S	Einfluss der Montage des Verformungskörpers mit Pressverband in der Schraube auf das sensorisch-funktionale Verhalten	Empirische Prüfung des Prototyps V2.1.	Die Kennwerte ändern sich nichtlinear und eine Hysterese tritt auf, da die Kraft nicht ausreichend durch den Pressverband übertragen wird. Beschädigung der Pressflächen möglich (Kapitel 6.3.2, 6.3.3)

20	M	Auslegung des Pressverbands unter Fertigungsrestriktionen, sodass ausreichend Kraft übertragen werden kann	Analytisches Eingrenzen	Übermaß nicht erhöhbar, Toleranzfelder nicht verkleinerbar, Verformungskörper muss nachgiebiger und Pressflächen getrennt werden.
21	M & S	Kraftübertragung des Pressverbands in Realität.	Empirisches Prüfen des Prototyps V2.2.	Pressverband ausreichend, sensorisches Verhalten gut, nur Sensitivität für Biegung verschlechtert Im Vergleich zu V1 aufgrund des Abstands der DMS zur Mittelachse.
22	S	Messkonzept mit hoher Biegesensitivität	Recherchierendes Erkunden	DMS als Halbbrücke in Biegekonfiguration, vorne und hinten auf Balken.
23	S	Gestaltmerkmale eines Verformungskörpers für hohe Biegesensitivität.	Recherchierendes Eingrenzen	Minimale Breite der Balken, sodass DMS appliziert werden können. Montageverfahren des Verformungskörpers Schrauben und Kleben.
24	S	Unterscheidung zwischen Biegemoment und Axialkraft	Modellbasiertes Eingrenzen	Je nach Durchbiegung der Balken sind Axialkraft und Biegemomente messbar.
25	S	Sensorisches funktionales Verhalten des Verformungskörpers V3	Empirisches Prüfen des Verformungskörpers V3	Unterscheidbarkeit zwischen Axialkraft und Biegemomenten, Messfehler, Sensitivitäten (Herbst et al., 2022)
26	M & S	Einfluss der Montage in der Schraube auf sensorisches Verhalten	Empirisches Prüfen des Prototyps V3	Linearitätsmessfehler gleich, Hysteresemessfehler erhöht (Herbst et al., 2024)

7.3.1.1 Schritte 1 – 3: Bauraum für Sensormodul identifizieren

In Schritt 1 **fehlt das Wissen** zu den kritischen Stellen in der Schraube, die vom Sensormodul vermieden werden sollen. Das **Ziel** ist die Erkundung der kritischen Stellen einer metrischen Normschraube mit Hilfe von einer Literaturrecherche (**Aktivität**) von anwendbaren Normen und Publikationen. Kritische Stellen sind Sprünge der Querschnittsfläche, da diese als Kerbe wirken und die Spannung lokal erhöhen, wodurch es zu Schäden kommen kann. Es wird die **Hypothese** aufgestellt: Existierende Kerben mit großer Wirkung sollten nicht zusätzlich mit Hohlräumen für das Sensormodul versehen werden, weil sich sonst der spannungsrelevante

Querschnitt weiter verringert und sich die Spannung erhöht. Das **aufgebaute Wissen** ist die Lage und Wirkung der Kerben. Die kritischste Kerbe befindet sich am Übergang Gewinde/Mutter, gefolgt von Kopf/Schaft (Kapitel 2.2.5). Der Sensormodulbauraum sollte deshalb die Kerbe Gewinde/Mutter vermeiden.

In Schritt 2 wird deutlich, dass **Wissen** über den Spannungsverlauf an den kritischen Stellen der Schraube unter Beanspruchung **fehlt**, um die Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums festzulegen. Das **Ziel** lautet, den Spannungsverlauf in einem Querschnitt der Schraube zu erkunden. Die **Aktivitäten** umfassen analytische Berechnungen der Zug-, Biege- und Torsionsspannung in Abhängigkeit vom Radius und der Kerbwirkung. Es werden folgende **Hypothesen** aufgestellt: Wenn die Hohlräume für Sensoren und Elektronik zentriert, zylindrisch und weit von Kerben entfernt sind, dann ist die Spannungsüberhöhung gering, da die wenig beanspruchten Bereiche der Schraube genutzt werden. Die kritischste Kerbe ist nun im Übergang Kopf/Schaft. Das **aufgebaute Wissen** ist der Spannungsverlauf in der Kerbe, die Rückschlüsse auf mögliche Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale zulässt, die die Spannung nicht übermäßig erhöhen (Forschungsfrage 1, Kapitel 5.3.1).

In Schritt 3 **fehlt Wissen** zu dem Einfluss der Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums auf die Spannung im Querschnitt der Kerben, um die Gestaltmerkmale eingrenzen zu können. Das **Ziel** ist die Eingrenzung der Gestaltmerkmale durch die Berücksichtigung des Einflusses des Gestaltmerkmals Hohlraumdurchmesser auf die Spannung. Die **Aktivität** ist die analytische Berechnung der des Verlaufs der Spannung im Querschnitt der Kerbe Kopf/Schaft mit variablem Hohlraumdurchmesser. Die **Hypothese** kann aus dem vorherigen Schritt übernommen werden. Das **aufgebaute Wissen** umfasst den Zusammenhang des kritischsten Gestaltmerkmals Hohlraumdurchmesser zum Verlauf der Spannung im Querschnitt der Kerbe (Forschungsfrage 1, Kapitel 5.3.3).

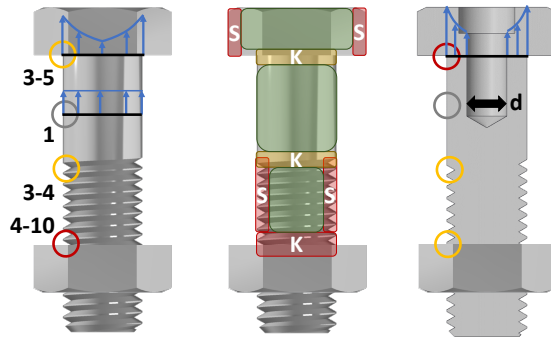


Abbildung 7.3: Darstellung des qualitativen Spannungsverlaufs für Beanspruchungsart Zug mit Kerbfaktoren (links), Markierung geeigneter Bauräume (Mitte) und ein möglicher Sensorbaureaum mit Spannungsverlauf und Hohlraumdurchmesser d (rechts). Mögliche Bauräume sind grün gekennzeichnet, ausgeschlossene Bauräume rot mit Begründung Schnittstelle (S) oder Kerbfaktor (K). Die kritischste Kerbe wandert aufgrund des Sensorbaureaums vom Übergang Mutter/Gewinde zu Kopf/Schaft. Abbildung basierend auf Ergebnissen aus Kapitel 5.3.1, 5.3.3.

7.3.1.2 Schritt 10: Energieverbrauch der Messauswerteschaltung modellhaft prüfen

Aus den Schritten 1-3 sind Abschätzungen zum verfügbaren Bauraum bekannt. Daraufhin wurden in den Schritten 4-9 bereits initialer Weise DMS sowie ein ADC inklusive Beschaltung ausgesucht. Nun **fehlt Wissen** zum Energieverbrauch der Messauswerteschaltung. Es wird das **Ziel** aufgestellt, den Energieverbrauch der Schaltung von DMS und ADC zu prüfen. Die **Hypothese** lautet wie folgt: Der Energiebedarf hängt maßgeblich von dem Nennwiderstand der DMS und der Messdauer ab. Die **Aktivität** ist eine modellhafte Prüfung mit Datenblattwerten und Formeln aus der einschlägigen Literatur. Die **Hypothese wird bestätigt** und es kann **Wissen aufgebaut** werden: Um den Energieverbrauch zu reduzieren, werden im Folgenden DMS mit einem hohen Nennwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ verwendet und es soll versucht werden, die DMS-Brücke abzuschalten, um die Messzeit verringern zu können.

7.3.1.3 Schritt 11: Empirische Prüfung der Elektronik

Nachdem mit den Informationen aus dem vorherigen Schritt die Messauswerteschaltung finalisiert werden kann, **fehlt Wissen**, ob das Verhalten der realen Schaltung dem Modell entspricht. Die **Hypothese** ergibt sich direkt: Wenn das Verhalten der realen Schaltung ähnlich dem des Modells ist, dann bildet das Modell die Realität hinreichend genau ab, weil alle relevanten Einflüsse berücksichtigt sind. Die **Aktivität** ist eine empirische Prüfung der Schaltung mittels Breakout-Boards und Dummy-DMS (Festwiderstände bzw. Potenziometer). Die **Hypothese** kann bestätigt werden, die reale Schaltung verhält sich ähnlich wie die Modellberechnungen bzw. Datenblattwerte. Das **Wissen** zum Verhalten der realen Schaltung und den Einflüssen ist nun verfügbar.

7.3.1.4 Schritt 12: Empirische Prüfung des Sensorkonzepts V1 in der Schraube

In Anknüpfung an Schritt 6 wird das Sensorkonzept in die Schraube (mechanische Struktur) integriert, wodurch zwei Disziplinen integriert werden. Es **fehlt das Wissen**, ob die analytisch nachgewiesenen Überlegungen zur Sensorik auf einen realen Aufbau mit DMS übertragbar sind. Daraus wird das **Ziel** abgeleitet, das Sensorkonzept unter mehrachsiger Belastung zu überprüfen. Die **Hypothese** wird formuliert: Wenn sich der reale Sensor so verhält, wie es die analytischen Formeln vorhersagen, dann war das Modell hinreichend genau und das Sensorkonzept ist anwendbar. Die **Aktivität** ist die empirische Durchführung von Messungen mit einer einfach herzustellenden sensorintegrierenden Schraube (Prototyp V1), die aus drei gerollten DMS mit kleinem Volumen besteht, die in drei Bohrungen einer M20-Schraube eingeklebt werden (Kapitel 6.3.1). Die Schraube wird in einer Testing-Umgebung mit Axialkraft und mit Biegemomenten beansprucht. Die DMS-Messungen im Vergleich zur aufgebrachten Last werden mit Fokus auf Messfehler und Sensitivität analysiert. Die **Hypothese** wird nur teilweise bestätigt und führt zu folgendem **aufgebautem Wissen**: Das Sensorkonzept funktioniert in einem realen Aufbau. Allerdings besteht eine Unsicherheit in der Applikation der DMS durch die schwer zu kontrollierende Dicke der Klebeschicht. Ein Verformungskörper mit flachem DMS (Abbildung 7.4) ist eine Möglichkeit, um die DMS beim Aushärten an die Kontaktfläche anpressen zu können und somit die Unsicherheit zu verringern (Kapitel 6.3.1). Daher sind quantitative Bauraumbetrachtungen notwendig.

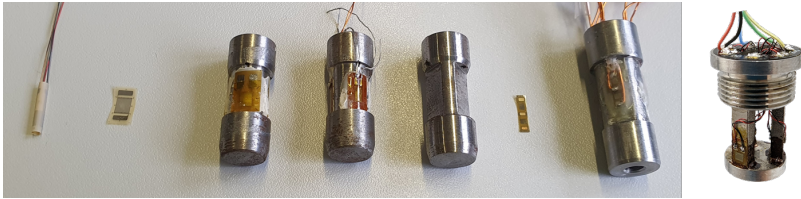


Abbildung 7.4: Evolution der DMS und Verformungskörper. V. l. n. r. gerollte DMS aus Prototyp V1, flacher DMS als Einzelgitter, zwei Verformungskörper mit flachen DMS auf runden Flächen (Gefahr des Ablösens, Schritt 16), Verformungskörper mit flachen Ebenen für die DMS aus Prototyp V2.1 (Schritt 17, 18), DMS mit zwei Messgittern als Halbbrücke in Form einer T-Rosette, Verformungskörper mit Hohlbohrung zur Erhöhung der Nachgiebigkeit aus Prototyp V2.2, Verformungskörper mit Biegebalken aus Prototyp V3, entworfen von Herbst et al. (Herbst et al., 2024; Peters, Herbst et al., 2024).

7.3.1.5 Schritt 13: Untersuchung der Auswirkungen von Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen auf mechanisch- und sensorisch-funktionales Verhalten

Um die Unsicherheit der Sensorfunktion zu verringern, ist ein Verformungskörper erforderlich, der im Inneren der Schraube Bauraum in Form von Hohlräumen benötigt. Dies reduziert jedoch die mechanische Funktion. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Disziplin. Um eine optimale Kompromisslösung zu identifizieren, **fehlt das Wissen** um die Auswirkungen der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale auf das mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten. Das **Ziel** besteht darin, die Auswirkungen variierender Gestaltmerkmale auf das funktionale Verhalten zu erforschen. Die **Aktivität** beinhaltet eine modellbasierte FE-Simulation. Dabei werden die von-Mises-Spannung zur Bewertung des mechanisch-funktionalen Verhaltens und die Dehnung am Schaft zur Bewertung des sensorisch-funktionalen Verhaltens analysiert. Das **fehlende Wissen** kann in folgende **Hypothesen** formuliert werden: Mehr Bauraum für die Sensorik und Elektronik führt zu einem höheren sensorisch- und einem geringeren mechanisch-funktionalen Verhalten und umgekehrt, da sich beide Funktionen dieselben Gestaltmerkmale teilen (Hohlraum im Schaft), was ein gegenläufiges Verhalten der beiden Funktionen bewirkt (Forschungsfrage 1, Kapitel 5.3.2). Der Zielkonflikt manifestiert sich hier im Streit um den Bauraum.

7.3.1.6 Schritte 14 – 15: Eingrenzung der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale und empirisches Prüfen des virtuellen Modells

Hinsichtlich des gegenläufigen Verlaufs des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens in Abhängigkeit von den Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmalen **fehlt das Wissen** zur Auswahl der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale, um den Zielkonflikt fundiert zu verhandeln. Daher **zielt** das Testing darauf ab, die Gestaltmerkmale einzugrenzen, um einen Kompromiss zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung zu erreichen. Dies führt zur folgenden **Aktivität**: Modellierung einer Funktion auf Basis der FE-Daten, die das mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten in Abhängigkeit der Gestaltmerkmale beschreibt. Die **Hypothese** zum Eingrenzen des Lösungsraums lautet: Wenn das mechanisch- und das sensorisch-funktionale Verhalten gegenläufig sind, dann gibt es ein Optimum in den Gestaltmerkmalen, das einem Kompromiss zwischen mechanisch und sensorisch-funktionalem Verhalten gleicht. Mithilfe von Gewichten lässt sich das Optimum je nach Anwendungsfall anpassen (Forschungsfrage 1, Kapitel 5.3.6).

In Schritt 15 wird das virtuelle Modell durch empirisches Testing punktuell **überprüft**. Es werden bestimmte Parametersätze ausgewählt, die eine einfache Applikation von DMS ermöglichen und somit die Unsicherheit reduzieren. Die **Hypothese**, dass die empirischen Daten dem Modell innerhalb einer tolerierbaren Abweichung ähneln, wird bestätigt.

7.3.1.7 Schritt 19: Prüfung V2.1 in der Schraube

Aufbauend auf der in Schritt 11 fehlgeschlagenen Prüfung des Sensorkonzepts und dem in Schritt 14 ermittelten Bauraum wird ein Sensorkonzept mit flachen DMS auf einem Verformungskörper zur Presspassung betrachtet (Kapitel 6.3.2). In den Schritten 16–18 wird das Konzept in der Disziplin Sensorik empirisch erkundet, eingegrenzt und geprüft, wodurch das funktionale Verhalten des Sensors ermittelt werden kann. Es **fehlt** jedoch **Wissen** über den Einfluss der Montage des Verformungskörpers in der Schraube auf das sensorisch-funktionale Verhalten, also zur Interaktion zwischen mechanischer und sensorischer Disziplin. Daraus wird folgendes **Ziel** abgeleitet: Prüfung des sensorisch-funktionalen Verhaltens im Vergleich zum vorherigen Schritt. Darauf aufbauend wird die folgende **Hypothese** aufgestellt: Wenn sich das Sensorverhalten nach der Montage des Verformungskörpers nur linear ändert, dann hat sich die Presspassung als Montagemethode bewährt. Die **Aktivität** zur Überprüfung dieser Hypothese ist eine empirische Prüfung der Schraube mit montiertem Verformungskörper in der Zugprüfmaschine.

Durch die Prüfung wird folgendes **Wissen aufgebaut**: Die Kennwerte ändern sich nichtlinear und eine Hysterese tritt auf. Damit wird die Hypothese verworfen. Die Verformung der Schraube wird durch den eingesetzten Pressverband nicht ausreichend auf den Verformungskörper übertragen. Der Verlauf der Messdaten lässt ein Durchrutschen vermuten. Dies kann entweder an nicht eingehaltenen Toleranzen in Durchmesser oder Rauigkeit der Pressflächen liegen. Eine weitere Erklärung wäre die Beschädigung oder Einebnung der unteren Pressfläche des Verformungskörpers beim Einpressen, da diese über die komplette Pressfläche der Bohrung gezogen wird. Eine Verkleinerung der Toleranzfelder ist aufgrund von Fertigungsrestriktionen nicht möglich, ein höheres Übermaß ist aufgrund der Materialbeanspruchbarkeit der Nabe (Restschraube) nicht möglich.

7.3.1.8 Schritt 20 – 21, Prototyp V2.2

Deshalb muss in einer weiteren Iteration mit V2.2 der Verformungskörper für die Kraftübertragung mittels Pressverband verbessert werden. Es **fehlt Wissen**, wie die Gestaltmerkmale des Verformungskörpers gewählt werden müssen, um eine ausreichende Kraftübertragung durch den Pressverband zu gewährleisten. Das **Ziel** ist die ausreichende Kraftübertragung des Pressverbands. Die **Aktivität** sind analytische Berechnungen zur Eingrenzung der Gestaltmerkmale des Verformungskörpers. Das **aufgebaute Wissen** kann als **Hypothese** formuliert werden: Wenn die Querschnittsfläche des Verformungskörpers verringert wird, sinkt die durch den Pressverband auf ihn übertragene Kraft, weil die Nachgiebigkeit erhöht wird (Kapitel 6.3.3). Die Kraft zwischen Verformungskörper und dem Rest der Schraube teilt sich im Verhältnis der Nachgiebigkeiten auf, die bei konstantem Querschnitt durch das Querschnittsverhältnis ausgedrückt werden kann.

Prototyp V2.2 hat Erfolg in der Integration der Disziplinen Mechanik und Sensorik. Das **aufgebaute Wissen**: Die Hysterese ist nun sehr gering, vergleichbar mit V1. Allerdings ist die Sensitivität für Biegemomentmessung gegenüber V1 reduziert, aufgrund des geringeren Abstands der DMS zur Schraubenmittellachse (neutrale Faser). Dies soll in der nächsten Iteration mit Prototyp V3 verbessert werden.

7.3.1.9 Schritte 22 – 26: Prototyp V3

Es wird ein neuer Verformungskörper für Prototyp V3 auf explorative Weise untersucht. Dieses Mal wird zusätzlich eine modellbasierte Eingrenzung durchgeführt, um geeignete Gestaltmerkmale des Verformungskörpers zu ermitteln. Das Ergebnis ist ein Verformungskörper mit drei Biegebalken, die höhere Sensitivitäten speziell für die Messung des Biegemoments ermöglichen (siehe Forschungsfrage 2, Kapitel 6.3.4). Ähnlich wie bei V2.2 wird eine empirische Überprüfung in der Disziplin Sensorik durchgeführt, um das funktionale Verhalten

des Sensors zu quantifizieren, bevor der Verformungskörper in die Schraube integriert wird. Eine Presspassung zur Montage wird verworfen, da die Biegebalken beim Einpressen knicken können. Deshalb soll der Verformungskörper oben verschraubt und unten geklebt werden. Nun **fehlt das Wissen** über den Einfluss der Montage, diesmal durch Kleber, auf das zuvor ermittelte funktionale Verhalten des Sensors. Das **Ziel** ist daher, das Verhalten zu prüfen. Es wird eine ähnliche **Hypothese** wie zuvor formuliert: Wenn sich das Sensorverhalten nach der Montage des Verformungskörpers nur linear ändert, dann ist der Kleber als Montageverfahren geeignet. Die **Aktivität** besteht in der empirischen Prüfung des in der Schraube integrierten Verformungskörpers unter Axial- und Biegebeanspruchung. Das **aufgebaute Wissen**: Der Hysteresemessfehler ist klein (Kapitel 6.3.5). Die Hypothese wird bestätigt. Der Klebstoff ist jedoch anfällig für Langzeitinstabilität, weshalb die Hysterese genau beobachtet werden muss.

7.3.2 Muster und Beobachtungen im Vorgehen

Abbildung 7.5 zeigt die Kategorisierung der Ziele und Aktivitäten zum gezielten Wissensaufbau.

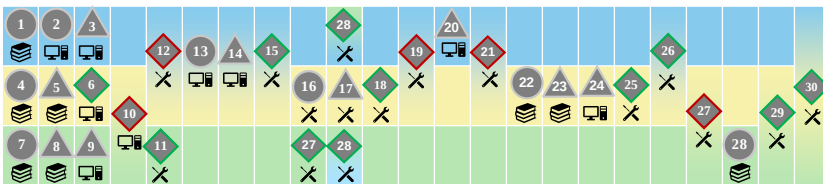


Abbildung 7.5: Abfolge der Schritte zum Aufbau von Wissen, kategorisiert nach den Zielen *Erkunden* (Kreis), *Eingrenzen* (Dreieck) und *Prüfen* (Raute) sowie in recherchierende (Buch), modellbasierende (PC) und empirische (Werkzeug) Aktivitäten. Die Farben geben die Disziplinen Mechanik (blau), Sensorik (gelb) und Elektrotechnik (grün) an, Farbverläufe zeigen eine Interaktion der Disziplinen. Abbildung angelehnt an (Peters et al., 2025).

Anfangs steht das Ziel „Erkunden“ des Lösungsraums mit literatur- oder modellbasierten Aktivitäten im Vordergrund. Dann folgt das Ziel „Eingrenzen“ durch Modelle (z. B. Schritt 3, 9), mit Anforderungen aus der Literatur (z. B. Schritt 5, 8) oder empirisch (z. B. Schritt 15). Danach folgt das Ziel „Prüfen“ mittels modellbasierter (z. B. Schritt 6) oder empirischer Aktivitäten (z. B. Schritt 11). Dadurch wird entschieden, ob die aktuelle Hypothese bestätigt oder verworfen wird.

und somit, ob eine Iteration erforderlich ist. Fehlgeschlagene Prüfungen traten vor allem bei disziplinenübergreifenden Interaktionen auf, erkennbar an den roten Rauten in Abbildung 7.2 oder Abbildung 7.5. Mit Projektfortschritt verschieben sich die Aktivitäten von literaturbasierten zu modellbasierten und empirischen Aktivitäten. Dies zeigt, dass das recherchierbare bzw. verfügbare Wissen in Form von Literatur oder Modellen im Projektfortschritt abnimmt.

Auffallend ist, dass in der Disziplin Mechanik (Schritte 1–3) bis zur Integration mit der Disziplin Sensorik (Schritt 12) kein empirisches Testing durchgeführt wurde. Dies liegt daran, dass es viel recherchierbares und modellbasiertes Wissen gibt, sodass empirisches Testing nicht erforderlich ist. Empirisches Testing wurde erst mit der Integration von mechanischer und sensorischer Disziplin nötig, weil kein recherchierbares Wissen oder abgesichertes Modell für diesen Fall verfügbar war.

Frühes empirisches Testing wurde in der Disziplin Elektronik durchgeführt. Einerseits existiert viel recherchierbares Wissen zu den einzelnen Bauteilen, darüber hinaus gibt es auch Modelle und Simulationsprogramme für Schaltungen und Leiterplatten. Durch die hohe und günstige Verfügbarkeit von elektronischen Bauteilen ist die Hürde für empirisches Testing jedoch niedrig und sinnvoll durchzuführen, um Modellungenauigkeiten auszuschließen und das reale Verhalten zu untersuchen. Weiteres empirisches Testing konzentriert sich auf die Sensordisziplin (Schritt 16–18, 23) oder die Integration von mehreren Disziplinen (15, 19, 24), wie in Abbildung 7.5 zu sehen ist.

Aufgrund der unabdingbaren Unsicherheiten im Umgang mit DMS, bspw. beim Ausrichten und Applizieren des Klebstoffs, ist empirisches Testing innerhalb der Sensordisziplin erforderlich. Hier führte der Ansatz zum Erfolg, zuerst innerhalb einer Disziplin zu prüfen, bis die entsprechenden Hypothesen angenommen werden, dann mit einer anderen Disziplin zu integrieren und die dadurch entstehenden Unsicherheiten erneut zu prüfen. Dies wurde bspw. bei der Montage des Verformungskörpers mittels eines zylindrischen Pressverbands erfolgreich umgesetzt (z. B. Schritte 18 und 19, 25 und 26).

Nachdem Sensorkonzept V1 in der empirischen Prüfung (Schritt 12) Unzulänglichkeiten aufwies, wurde bei der Interaktion der Disziplinen Mechanik und Sensorik ein modellbasierter Ansatz für V2 verfolgt. Damit konnte Bauraum für das Sensormodul identifiziert und empirisch geprüft werden (Schritt 13 ff.). Darauf aufbauend wurden in der Sensorik-Disziplin Verformungskörper mit DMS empirisch erkundet, eingegrenzt und geprüft (Schritte 16–18). Die Integration mit der Disziplin Mechanik (Schritt 19) scheiterte jedoch aufgrund unvorhersehbarer Interaktionen in

der Montage des Verformungskörpers (Abbildung 7.5). Jede Integrationsebene erfordert erneut Aktivitäten zur Prüfung der Disziplininteraktionen.

7.4 Diskussion

Einführung einer neuen Disziplin: Ähnlich wie bei Ley et al. (2022) führte die Einführung einer neuen Disziplin im V-Modell zum Erfolg. Sensorelemente wie DMS sind die Schnittstelle zwischen Mechanik und Elektronik (Kapitel 2.3). Die neue Sensorik-Disziplin hilft im vorgestellten Vorgehen, die ansonsten überlastungsgefährdete Schnittstelle zwischen Mechanik und Elektronik zu entzerren. Weiterhin wird ein Fokus auf das Neue in der Entwicklung gesetzt, wo aller Wahrscheinlichkeit nach die meisten Fehlschläge passieren.

Einführung zusätzlicher Testing-Phasen: Zheng et al. (2017) schlagen Kompatibilitätstest am Anfang der Systemintegrationsphase vor, um eine korrekte Integration der Subsysteme zu gewährleisten. Ein ähnliches Vorgehen wurde hier ebenfalls angewendet, jedoch mit dem Unterschied, dass die Testphasen, wie in Kapitel 7.2 definiert, nicht nur auf Kompatibilität beschränkt sind und auch schon während der disziplinspezifischen Entwurfsphase stattfinden können. Dies soll eine Überformalisierung verringern und dazu führen, dass Testing flexibel während des kompletten Prozesses eingesetzt werden kann. Im Allgemeinen führte hier der Ansatz zum Erfolg, Testing-Aktivitäten bis hin zum Prüfen von (Teil-)Lösungen zuerst innerhalb einer Disziplin durchzuführen, dann mit einer anderen Disziplin zu integrieren und die dadurch entstehenden Unsicherheiten erneut zu prüfen. Bei Bedarf kann in die einzelnen Disziplinen zurückgesprungen werden.

Bedeutung der Zeitpunkte von empirischem Testing. Tahera, Wynn, Earl und Eckert (2019) schreiben bereits, dass empirisches Testing nicht nur am Ende des Entwicklungsprozesses stattfinden soll, sondern überlappend mit der Entwurfsphase. Zheng et al. (2017) führen aus, dass ihre neu ins V-Modell eingeführten Kompatibilitätstests die Anzahl an Iterationen in späten Phasen reduzieren, was die Entwicklungskosten und -zeit senkt. Der hier vorgestellte Ansatz gibt darüber hinaus Erkenntnisse zu den Zeitpunkten: Wenn empirisches Testing zu früh stattfindet, ist der Lösungsraum groß und folglich müssen viele Testing-Objekte gefertigt werden, was hohe Kosten verursachen kann. Weiterhin ist der Erfolg des Testing fraglich, wenn Zusammenhänge noch nicht in Form von prüfbaren Hypothesen formuliert werden können. Es ist bereits bekannt, dass zu spätes empirisches Testing hohe Iterationskosten verursacht. Im hier vorgestellten Vorgehen folgte das erste empirische Testing nach einer Literaturrecherche und eine Eingrenzung durch analytische/modellbasierte Aktivitäten, bei denen bereits

Wissen erworben wurde. Daher ist der Lösungsraum klein genug. Prüfbare Hypothesen konnten formuliert werden. Daraus lässt sich ableiten, dass einerseits empirisches Testing nur dann durchgeführt werden sollte, wenn die anderen Analysemethoden nicht zum Ziel geführt haben, der Lösungsraum hinreichend klein ist und prüfbare Hypothesen formuliert werden können. Andererseits sollte das empirische Testing nicht zu spät stattfinden, ansonsten besteht die Gefahr, dass der Erkenntnisgewinn zu spät erfolgt und dadurch große Iterationen verursacht werden.

Nutzung von vorhandenem Wissen: Insbesondere zu Maschinenelementen wie Schrauben existiert viel verfügbares, recherchierbares Wissen in Form von Normen und Büchern oder sogar Modellen. Ebenso gibt es über Sensorelemente wie Dehnungsmessstreifen einen breiten Stand der Technik. In der Elektronik sind verfügbare Bauteile wie Analog-Digital-Konverter in Standardtestverfahren in ihrem funktionalen Verhalten quantifiziert und ausführlich dokumentiert. Deshalb wird im hier vorgestellten methodischen Ansatz die Nutzung von solch vorhandenem Wissen forciert, indem die recherchierenden und modellbasierten Aktivitäten prädestiniert im Mikroprozess aufgeführt werden (Abbildung 7.1). Somit können vorhandene analytische Gleichungen und Modelle verwendet werden, um Wissen über das mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten zu erlangen. Dies ist auf andere Projekte mit sensorintegrierten Maschinenelementen übertragbar, bei denen Informationen über das Maschinenelement und die Sensorelemente vorhanden sind.

Modellbasiertes (virtuelles) und empirisches (physisches) Testing in der Interaktion von Disziplinen baut Wissen für die Zielkonfliktverhandlung auf: Im Stand der Forschung zur VDI/VDE 2206 und zum Testing (Tahera et al., 2019) ist die virtuelle Ausprägungsart von Testing-Objekten bereits etabliert. Der hier vorgestellte methodische Ansatz geht darüber hinaus, indem das frühe und iterative Testing zur Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten und zur frühzeitigen Erkennung unvorhergesehener Abhängigkeiten verwendet wird, die insbesondere bei der Interaktion von Disziplinen auftreten. Hierbei sind in der vorgestellten Fallstudie die meisten Prüfungen erfolgt, die zur Ablehnung einer Hypothese führten. Das Auftreten von Zielkonflikten zwischen den Disziplinen ist wahrscheinlich, insbesondere wenn der Sensor in ein bestehendes Maschinenelement integriert wird und dadurch die mechanische Funktion beeinträchtigt wird. Um diesen Konflikt zu verhandeln und einen optimalen Kompromiss zu finden, wurde mithilfe eines Verhandlungsmodells Wissen über den Einfluss der Gestaltmerkmale auf das funktionale Verhalten von beiden im Konflikt stehenden Disziplinen aufgebaut.

Opferung von mechanischer Funktion für eine bessere sensorische Funktion:

Eine weitere Ausprägung des Zielkonflikts zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung, der hier zutage tritt, manifestiert sich in der Kraftübertragung des Pressverbands von V2.1. Der verwendete Pressverband konnte in den fertigungsbedingten Toleranzen bei Eintreten von ungünstigen Extremwerten keinen reproduzierbar ausreichenden Kraftschluss zwischen Verformungskörper und Schraube herstellen, was dazu führt, dass sich der Verformungskörper nicht wie die Schraube verformt und sich deshalb die Messwerte verfälschen. Fertigungsrestriktionen verhindern kleinere Toleranzfelder. Die Beanspruchbarkeit des Materials der Schraube verhindert ein höheres Übermaß des Pressverbands. Eine mögliche Lösung des Problems ist die Reduktion der Kraftübertragung auf den Verformungskörper. Dies wird durch eine Reduktion des Querschnitts des Verformungskörpers erreicht, da sich die Kraft im Querschnittsverhältnis von Verformungskörper und Schraube aufteilt. Dies verursacht jedoch auch eine geringere Beanspruchbarkeit des Gesamtsystems. Es wurde ein Teil der mechanischen Funktion geopfert, um die sensorische Funktion besser zu erfüllen.

7.4.1 Einschränkungen

Als Einschränkungen sind folgende Punkte zu nennen: Die Abfolge der Schritte zum Aufbau von Wissen hängt vom jeweils fehlenden Wissen ab, welches systemspezifisch ist. Der vorgestellte methodische Ansatz wurde am Einzelfall der Sensorintegration in M20-Schrauben erstellt. Der methodische Ansatz an sich, insbesondere der Prozess zum Wissensaufbau in der Mikroebene, ist unabhängig von spezifischen Geometrien und Krafteinleitungen formuliert. Die Übertragbarkeit wurde für den Teil der Bauraumidentifikation durch das Verhandlungsmodell untersucht und zeigte Erfolg bei Ähnlichkeit der Geometrie (geschlossenes, zylindrisches Maschinenelement) und der Bewertungsgrößen (von-Mises-Spannung, Dehnung) (Peters, Menning et al., 2024). Bei Abweichungen in den verwendeten Größen muss darauf geachtet werden, dass diese den Zielkonflikt abbilden.

Weiterhin wird im vorgestellten methodischen Ansatz nicht auf alle Phasen des V-Modells eingegangen. Im Fokus stehen die disziplinspezifische Entwicklung sowie die Systemintegrationsphase. Für die hier nicht vorgestellten Phasen kann auf die VDI/VDE 2206 und auf die darauf aufbauenden Erweiterungen oder Spezifikationen im Stand der Forschung zurückgegriffen werden.

7.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die **Forschungsfrage 3** untersucht:

Forschungsfrage 3: *Welcher methodische Ansatz kann aus der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube abgeleitet werden, der bei der Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten durch den Aufbau von Konstruktionswissen unterstützt?*

Die Forschungsfrage kann wie folgt beantwortet werden: Durch Nutzung des V-Modells (VDI/VDE 2206), kombiniert mit einer strukturierten Testing-Methodik zum Aufbau von Wissen (Matthiesen & Graubeger, 2024), konnte ein funktionierender Prototyp einer sensorintegrierten Schraube entwickelt werden. Die systematische Formulierung fehlenden Wissens und prüfbarer Hypothesen sowie die Definition von Zielen und Aktivitäten, unterstützt durch das strukturierende Rahmenwerk des V-Modells, ermöglichten den gezielten Wissensaufbau. Folglich war die Fallstudie erfolgreich. Es konnten sich wiederholende Muster in den Schritten zum Aufbau von Wissen identifiziert werden. Weiterhin wurden Erkenntnisse zu den Zeitpunkten für ein effizientes empirisches Testing gewonnen. Diese können in zukünftigen Projekten helfen, effizienter Wissen aufzubauen, indem sie aufwendige empirische Testing-Aktivitäten reduzieren oder besser zeitlich einordnen.

Der einzigartige Beitrag dieses methodischen Ansatzes besteht darin, die Integration neuartiger sensorischer Funktionen in standardisierte Maschinenelemente zu unterstützen, indem der Konflikt zwischen Erhaltung des mechanisch-funktionalen Verhaltens und Bereitstellung von mehraxialen Sensordaten mit geringem Fehler verhandelbar gemacht wird. Dies wird durch die Kombination des V-Modells mit einer strukturierten Testing-Methodik erreicht, die fehlendes Wissen formuliert, prüfbare Hypothesen aufstellt, damit Wissen aufbaut und somit Zielkonflikte verhandelbar macht. Dadurch können optimale Kompromisse identifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit manifestiert sich der Zielkonflikt zunächst hauptsächlich im Streit um den Bauraum, aber auch in der Art der Sensorkonfiguration und der -montage.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Abschnitt fasst die Kernerkenntnisse dieser Arbeit zusammen. Weiterhin werden zukünftige Forschungsrichtungen aufgezeigt, welche auf dieser Arbeit aufbauen können.

8.1 Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit, den Zielkonflikt zwischen hoher mechanischer und hoher sensorischer Funktionserfüllung bei der Sensorintegration in Maschinenelementen durch den methodischen Aufbau von Konstruktionswissen verhandelbar zu machen, wurde erreicht. Das Ziel wurde am Beispiel der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube, welche die mehraxiale Beanspruchung in Form von Kräften und Biegemomenten auf eine Schraubenverbindung misst, erarbeitet. Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanische Funktion, bedingt durch die hier beschriebene Sensorintegration, nicht vollständig erhalten werden kann. Allerdings wurde die Reduktion im Rahmen dieser Arbeit quantifiziert. Sie kann durch die Erhöhung der Schraubenfestigkeitsklasse oder eine Verringerung der Überdimensionierung durch Verringerung des Anzugsfaktors ausgeglichen werden. Die damit verbundenen Nachteile wurden zuvor diskutiert. Die sensorische Funktion kann erfüllt werden: Messdaten zur mehraxialen Beanspruchung der Schraube können mit geringem Messfehler und hoher Sensitivität kommuniziert werden. Ein methodischer Ansatz zur Unterstützung der Sensorintegration in Schrauben durch Aufbau von Wissen wurde an der Entwicklung der sensorintegrierenden Schraube erarbeitet.

Das Ziel wurde durch die Beantwortung der drei aufeinander aufbauenden Forschungsfragen erreicht, deren Ergebnisse in dieser Zusammenfassung dargestellt werden.

Forschungsfrage 1: *Wie kann der Bauraum für das Sensormodul in der Schraube im Zielkonflikt zwischen einer hohen Erfüllung der mechanischen und sensorischen Funktion identifiziert werden?*

Forschungsfrage 2: *Welches quantitative mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten erreichen iterativ entwickelte Prototypen der sensorintegrierenden Schraube?*

Forschungsfrage 3: *Welcher methodische Ansatz kann aus der Entwicklung einer sensorintegrierenden Schraube abgeleitet werden, der bei der Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten durch den Aufbau von Konstruktionswissen unterstützt?*

In **Forschungsfrage 1** wurde untersucht, wie der Bauraum für das Sensormodul innerhalb der Schraube im Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung identifiziert werden kann. Es zeigte sich, dass eine gleichzeitige Erfüllung beider Ziele nicht ohne weiteres möglich ist, wenn die geometrischen Schnittstellen der Schraube wie Kopf- und Gewindeform beibehalten werden sollen. Zur Verhandlung dieses Zielkonflikts wurde ein Modell entwickelt, das ein Finite-Elemente-Modell mit einer gewichteten Optimierungsfunktion kombiniert. Dieses Modell bildet den Einfluss ausgewählter Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale auf Bewertungsgrößen des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens ab, wodurch die Funktionserfüllung bewertet werden kann. Dabei wurde der Einfluss der Sensorbauraum-Gestaltmerkmale Hohlraumdurchmesser im Kopf und im Schaft sowohl auf die mechanische Funktion, bewertet durch die von-Mises-Spannung als auch auf die sensorische Funktion, bewertet durch die Dehnung an der Sensorposition im Schaft quantifiziert und ist als Konstruktionswissen bereitgestellt. Durch Variation der Gewichtung der Optimierungsfunktion kann entweder die mechanische oder die sensorische Funktionserfüllung priorisiert werden.

Das Optimum mit gleicher Gewichtung der mechanischen und sensorischen Funktionserfüllung liegt bei einem Durchmesser von jeweils 13,2 mm unter Berücksichtigung montagetechnischer Randbedingungen. Dies führt zu einer Erhöhung der von-Mises-Spannung um 29 % und zu einer Steigerung der Dehnung an der Sensorposition um 80 %. Die Lage des Optimums ist stark abhängig von der gewählten Gewichtung, was einer Priorisierung der mechanischen Funktionserfüllung gegenüber der sensorischen Funktionserfüllung oder umgekehrt entspricht. Bei einer Begrenzung der von-Mises-Spannungserhöhung auf 25 %, die durch die Erhöhung der Schraubenfestigkeitsklasse wieder kompensiert werden kann, ergeben sich Hohlraumdurchmesser für den Sensor im Schaft von 12 mm und für die Elektronik im Kopf von 14 mm. Das führt zu einer Erhöhung der Dehnung an der Sensorposition im Schaft um 59 %, was in minimal auflösbare Kraftstufen von 8 N bei einem ADC mit einer effektiven Bitzahl von 24 mündet. Damit bietet das Verhandlungsmodell eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Ermittlung der optimalen Sensorbauraum-Gestaltmerkmale im Spannungsfeld mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung und bildet die Ausgangsbasis für die weitere Ausgestaltung der Sensorkonzepte.

In der **Forschungsfrage 2** wurde das funktionale Verhalten von iterativ entwickelten Prototypen der sensorintegrierenden Schraube mit komplett integrierbarer Messkette und drahtloser Datenkommunikation quantifiziert. Die Erkenntnisse und Verbesserungen für jede Iteration der Prototypen wurden detailliert beschrieben und tragen zum Konstruktionswissen bei. Dazu zählen die Art, Applikation und Positionierung der Sensorelemente und deren Einfluss auf die mechanischen und sensorischen Bewertungsgrößen. Die Untersuchung erfolgte an vier Iterationen von Prototypen der sensorintegrierenden Schraube, von denen die ersten drei im Rahmen dieser Arbeit gefertigt und analysiert wurden. Alle Prototypen basieren auf M20-Schrauben, in denen drei Messachsen jeweils mit einer DMS-Halbbrücke als Sensorelement installiert sind. Die Analysen erfolgten sowohl mit einem DMS-Messaufnehmer aus dem Stand der Technik als auch mit der komplett in den Schraubenkopf integrierbaren Elektronikplattform F²LECS, die eine energiesparende Messung und drahtlose Kommunikation der Messdaten ermöglicht.

Die Ergebnisse der Prototypen V1, V2.2 und V3 zeigen, dass die DMS-Signale der aufgetragenen Beanspruchung zuverlässig folgen und bei mehrfacher axialer sowie Biegebeanspruchung ein lineares und reproduzierbares Verhalten aufweisen. Die Iterationen verbessern dabei kontinuierlich die sensorische Funktion, allerdings reduzieren sie gleichzeitig die mechanische Funktion. Der Linearitätsmessfehler im Testfall 1 konnte von 3,3 % auf 1 % des Messbereichs in axialer Richtung und von 3,7 % auf 0,1 % des Messbereichs in Biegerichtung verbessert werden. Die Sensitivitäten im Testfall 1 erreichen bis zu 10 $\mu\text{V/V/kN}$ in axialer Richtung, was einer Auflösung der Kraft von 6 N unter idealen Bedingungen entspricht. In Biegerichtung erreichen die Sensitivitäten bis zu 1,3 $\mu\text{V/V/Nm}$, was einer Auflösung von 46 mNm im reinen Biegefall unter idealen Bedingungen entspricht. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der modellhaft errechneten Auflösung von 8 N in axialer Richtung aus der Forschungsfrage 1. Eine Ausnahme stellt V2.1 dar, der wesentlich schlechtere Bewertungsgrößen aufgrund des versagenden Pressverbands des Verformungskörpers aufweist.

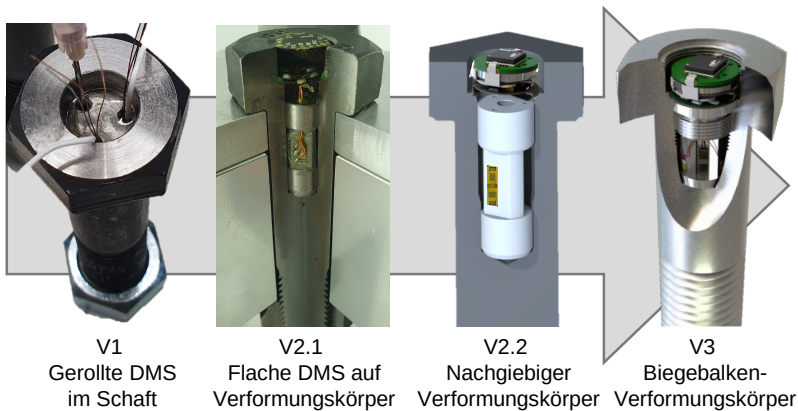


Abbildung 8.1: Evolution der sensorintegrierenden Schraube.

Die Bewertungsgröße für das mechanisch-funktionale Verhalten (von-Mises-Spannung) zeigt eine Reduktion von 1 % (V1) bis zu 24 % bzw. 29 % je nach Modell (V3). Das verdeutlicht den bestehenden Zielkonflikt im Vergleich der Prototypen: Geringere Messfehler von V3 bedingen eine höhere von-Mises-Spannung und damit eine geringere mechanische Funktionserfüllung.

Die Messdaten zeigen, dass sowohl durch toleranzbedingte Abweichungen in den Kontaktoberflächen der verspannten Bauteile als auch durch querkraftverursachende Anziehverfahrenen Biegebeanspruchungen auftreten können. Letztere sind in der Berechnung der zulässigen Montagevorspannkraft nach VDI 2230 Blatt 1: 2015-11 (Gleichung 2.1) nicht berücksichtigt und beeinflussen die Reibwerte beim Anziehen, was zukünftigen Forschungsbedarf aufzeigt.

Die drahtlose Datenübertragung der Messsignale über Bluetooth Low Energy (BLE) mit der Plattform F²LECS konnte erfolgreich demonstriert werden. Sie beeinflusst die Sensitivität nicht und den Messfehler nur gering. Durch die Möglichkeit zur Koppelung mit Montagewerkzeugen zum Zweck des vorspannkraftgesteuerten Anziehens eröffnet sich das Potenzial, die Überdimensionierung von Schraubenverbindungen um bis zu 73 % zu reduzieren. Dadurch bietet die

sensorintegrierende Schraube das Potenzial einer Einsparung von Kosten und Gewicht, was der Nachhaltigkeit zugutekommt. Weiterhin ist dies ein Ansatz, durch genauere Kenntnis der Belastung der Schraube die Reduktion der mechanischen Funktion durch die Sensorintegration auszugleichen.

In **Forschungsfrage 3** wurde untersucht, welcher methodische Ansatz zur Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten bei der Sensorintegration in Schrauben durch den Aufbau von Konstruktionswissen entwickelt werden kann. Es wurde gezeigt, dass die Kombination des V-Modells nach VDI/VDE 2206 mit einer strukturierten Testing-Methodik (Matthiesen & Grauberger, 2024) einen gezielten und effizienten Wissensaufbau ermöglichte. Durch die systematische Formulierung von Zielen, die explizite Benennung fehlenden Wissens sowie die Entwicklung und Überprüfung von Hypothesen konnte die Entwicklung der sensorintegrierenden Schraube erfolgreich durchgeführt werden.

Die beobachteten Muster der Schritte zum Aufbau von Wissen lassen sich künftig für Entwicklungsprojekte nutzen, da sie helfen können, empirische Testing-Aktivitäten zu reduzieren oder gezielt zu terminieren. Dabei spielt die Terminierung von empirischen Aktivitäten eine bedeutende Rolle aufgrund des Aufwands und der Tragweite. Empirisches Testing sollte nur dann durchgeführt werden, wenn die anderen verfügbaren Wissensquellen genutzt wurden und der Lösungsraum hinreichend klein ist. Fast alle Fehler in Form von abgelehnten Hypothesen traten in der Interaktion der Disziplinen auf, z. B. der Sensorik und Mechanik. Deshalb sollte insbesondere dort das Testing forciert werden, um frühzeitig Wissen aufzubauen und iterieren zu können. Neben der Analyse und Verhandlung des Zielkonflikts in der Bauraumidentifikation durch Quantifizierung der relevanten Abhängigkeiten der Gestaltmerkmale konnte ein weiterer Zielkonflikt in der Verformungskörpermontage durch Erhöhung der Nachgiebigkeit überwunden werden. Der Beitrag dieses methodischen Ansatzes liegt darin, die Integration neuartiger sensorischer Funktionen in standardisierte Maschinenelemente zu unterstützen und dabei den Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung verhandelbar zu machen, um einen optimalen Kompromiss zu finden.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass durch eine strukturierte Modellbildung, gezieltes empirisches Testing und methodische Wissensgenerierung der Zielkonflikt zwischen mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung in einer Schraube überwindbar ist. Dies wird demonstriert durch die vorgestellten Iterationen der Prototypen der sensorintegrierenden Schrauben, die in der Lage sind, mehraxial die Beanspruchung zu messen, die Messdaten drahtlos zu kommunizieren sowie die mechanische Funktion in einer Höhe zu erhalten, die durch Erhöhung der

Festigkeitsklasse kompensiert werden kann. Dadurch leisten die Ergebnisse einen Beitrag zum Entwurf sensorintegrierender Maschinenelemente.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistete durch die Analyse und Verhandlung der Zielkonflikte sowie der Quantifizierung des mechanisch- und sensorisch-funktionalen Verhaltens einen elementaren Beitrag zur Entwicklung einer neuartigen sensorintegrierenden Schraube, die sowohl die Axialkraft als auch den Biegemomentvektor hochsensitiv messen und drahtlos kommunizieren kann. Auf dieser Basis eröffnen sich vielfältige Perspektiven für zukünftige Forschung und Anwendung. Diese teilen sich in die Nutzung und weitere Optimierung dieser sensorintegrierenden Schraube sowie die Nutzung und Übertragbarkeit des methodischen Ansatzes auf andere Projekte zur Sensorintegration auf.

8.2.1 Weiterentwicklung der sensorintegrierenden Schraube

Die neue sensorintegrierende Schraube wurde bisher im statischen Fall vermessen. Es fehlen noch empirische Analysen zum Verhalten bei **dynamischen Belastungen**, zur **Zuverlässigkeit** und **Lebensdauer**. Hierbei muss sowohl die mechanische als auch die sensorische Funktion überprüft werden und jeweils kritische Einflussfaktoren in den Untersuchungen abgebildet werden. Dazu zählen Vibrationen, die sich sowohl auf die mechanische Struktur als auch auf die Sensormodule, insbesondere in deren Kleb- und Lötstellen auswirken. Weiterhin müssen der Einfluss der Temperatur und elektromagnetischer Störungen auf das Sensormodul, insbesondere auf die Klebstellen und die Lebensdauer der Elektronik untersucht werden. Diesbezüglich sind Untersuchungen im DFG-finanzierten Nachfolgeprojekt „SiSmaK 2“ geplant.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die **mechanische Funktionserfüllung** durch das funktionale Verhalten konservativ bewertet. Eine Kompensation der von-Mises-Spannungserhöhung durch den Verformungskörper, eine Reduktion der Betriebsbeanspruchung durch die erhöhte Elastizität sowie eine potenzielle Reduktion des Sicherheitsfaktors durch die Messung der realen Belastung der Schraube wurden nicht berücksichtigt. Diese Faktoren können dazu führen, dass der Erhalt der mechanischen Funktion besser bewertet werden kann.

Um den Mehrwert im Rahmen der **Kreislauffabrik** zu heben, muss die Eignung des Speichers der sensorintegrierenden Schraube zur Aufzeichnung der Beanspruchungshistorie geprüft werden. Hierfür muss zunächst der Bedarf an

Aufzeichnungskapazität aus den Anforderungen der Kreislauffabrik ermittelt werden, beispielsweise anhand der datengetriebenen Modelle von Afifi et al. (2025). Daraus kann ein Speicher dimensioniert werden. Sollte der im Mikrocontroller von F²LECS integrierte Speicher nicht ausreichen, kann die Integration eines größeren Speichers geprüft werden. Hierzu ist die Kooperation mit einem Institut für integrierte elektronische Systeme zielführend.

Das bisher gewählte **Kommunikation** überdurch Bluetooth Low Energy (BLE) hat den Vorteil der breiten Etablierung: Nahezu jedes mobile Endgerät verfügt über eine entsprechende Schnittstelle und kann somit mit der sensorintegrierenden Schraube kommunizieren. Allerdings hat es Nachteile in gekapselten metallischen Umgebungen, was die Reichweite angeht, und es kann keine Energie in das System gespeist werden. Als neuartige Alternative erscheint die Energie- und Datenübertragung durch Körper-Ultraschall durch Piezoelemente auf Stahl als Medium sinnvoll. Dabei besteht keine Gefahr durch metallische Abschirmung und elektromagnetische Störungen. Ein prinzipieller Funktionsnachweis zur Energieversorgung eines komplett in Metall verkapselten Sensormoduls wurde bereits demonstriert (Suppelt et al., 2025). Es besteht prinzipiell die Möglichkeit, mehrere in einem Stahlbau o. Ä. verbaute Schrauben mit einer Basisstation abzufragen. Auch die Kopplung mit einem Montagewerkzeug wäre durch Ausstattung einer Nuss mit Piezoelementen und entsprechender Schaltung möglich. Die Reichweite, Datenrate und Energieeinkopplungseffizienz müssen noch ermittelt werden.

8.2.2 Nutzung der sensorintegrierenden Schraube

Nutzung der Kraftmesswerte beim Anziehen: Die Konstruktionszielgröße einer Schraubenverbindung ist die Vorspannkraft, die bei der Montage („Anziehen“) aufgebracht wird. Gängige Verfahren zum Anziehen basieren jedoch häufig auf einer Steuerung des Drehmoments, wodurch Unsicherheiten in der erreichten Vorspannkraft entstehen, da Parameter wie die Reibung oft nur ungenau bekannt sind. Dies führt in der Auslegung einer Schraubenverbindung nach VDI 2230 zu einer Überdimensionierung durch den Anziehfaktor. Kraftmessende Schrauben bieten hierfür eine Lösung, da sie direkt die Konstruktionszielgröße erfassen können und die genaue Kenntnis der Reibparameter zur Umrechnung des Anziehdrehmoments in die Vorspannkraft hinfällig wird. Dadurch lässt sich der Anziehfaktor wesentlich verringern und die Überdimensionierung um bis zu 73 % reduzieren. Existierende Kraftmessschrauben haben jedoch das Problem der Anwendbarkeit aufgrund der Verletzung von standardisierten Schnittstellen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte sensorintegrierende Schraube löst dieses Problem und bietet eine standardisierte drahtlose Schnittstelle wie Bluetooth

Low Energy (BLE) zur Kommunikation der Daten an. Dadurch wird die Kopplung zu einem Montagewerkzeug wesentlich vereinfacht. Im DFG-finanzierten Nachfolgeprojekt „SiSmaK 2“ soll diese Koppelung realisiert werden und ein Montagewerkzeug so umgerüstet werden, dass es auf Basis der Kraftmesswerte aus der sensorintegrierenden Schraube auf eine konfigurierbare Vorspannkraft abregelt. Weiterhin muss die Streuung dieses gekoppelten Systems in der erreichten Vorspannkraft ermittelt werden, um den Anziehfaktor zu bestimmen und in der VDI 2230 zu etablieren. Dadurch kann die neue sensorintegrierende Schraube einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten, indem sie die Überdimensionierung von Schraubenverbindungen aufgrund des Anziehfaktors reduziert. Eine zukünftige Integration solcher Methoden in Richtlinien wie die VDI 2230 wäre ein bedeutender Schritt hin zu einer datengestützten, adaptiven Auslegung von Schraubenverbindungen.

Ein **anderer Ansatz zur Messung der Montagevorspannkraft** ist die **Verlagerung des Sensormoduls** aus der Schraube hinaus **in das Werkzeug**. Das hätte den Vorteil, dass nicht in jeder zu montierenden Schraube ein Sensormodul installiert werden müsste, wodurch Kosten gespart werden können. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist natürlich, dass die Messung nur bei der Montage genauer gesagt bei der mechanischen Verbindung des Werkzeugs mit der Schraube möglich ist. Ein möglicher Ansatz ist die Messung der Kopfverformung. Der Stand der Forschung zeigt, dass die Ermittlung der Vorspannkraft anhand der Kopfverformung mittels auf dem Kopf applizierter DMS möglich ist (Frank et al., 2019; Wang et al., 2024). Die Herausforderung besteht darin, die Kopfverformung durch einen im Werkzeug bspw. in einer Nuss eingebetteten Sensor zu messen. Potenzial dafür bieten bspw. optische oder ultraschallbasierte Abstandsmessungen an verschiedenen Punkten des Schraubenkopfes. Um diese Herausforderung zu meistern, müssen Kompetenzen aus dem Schraubenfachgebiet zur Verformung des Kopfes, aus dem Werkzeugfachgebiet zur Steuerung von Anzugswerkzeugen sowie aus dem Sensor- und Mikroelektronikfachgebiet zum Entwurf und der Integration eines geeigneten Sensorsystems in das Werkzeug kombiniert werden.

Erforschung des Einflusses von Biegemomenten beim Anziehen mit querkraftverursachenden Anziehwerkzeugen: Die Messungen im Rahmen von Forschungsfrage 2 haben gezeigt, dass beim manuellen Anziehen mit Schlüsseln bereits Biegemomente in die Schraube eingeleitet werden. In der aktuellen Richtlinie VDI 2230 werden diese bei der Berechnung der zulässigen Montagevorspannkraft nicht berücksichtigt. Weiterhin beeinflussen sie die Reibwerte, sodass Unsicherheiten beim Erreichen der gewünschten Montagevorspannkraft entstehen können. In zukünftiger Forschung sollte der Einfluss dieser Biegebeanspruchung auf die Beanspruchbarkeit untersucht werden. Montageschrauber mit einarmiger

Abstützung eignen sich gut, da diese durch den recht kleinen Hebelarm eine relativ große Querkraft auf den Schraubenkopf oder die Mutter einleiten, was zu einem hohen Moment führt. Wird die Position der Abstützung variiert, wirkt die Querkraft und somit das Biegemoment aus verschiedenen Richtungen (Abbildung 8.2). Dadurch kann es vom Biegemoment der Lage- und Ebenheitstoleranzen separiert werden, da dieses seine Richtung nicht ändert. Aus den Messwerten der sensorintegrierenden Schraube kann die real erreichte Vorspannkraft ermittelt werden und mit der Kenntnis des Anziehmoments der Einfluss der Reibung untersucht werden. Weiterhin kann aus dem Gesamtkraftvektor die Spannung ermittelt werden und mit Materialkennwerten verglichen werden, um den Einfluss auf die Tragfähigkeit zu untersuchen.

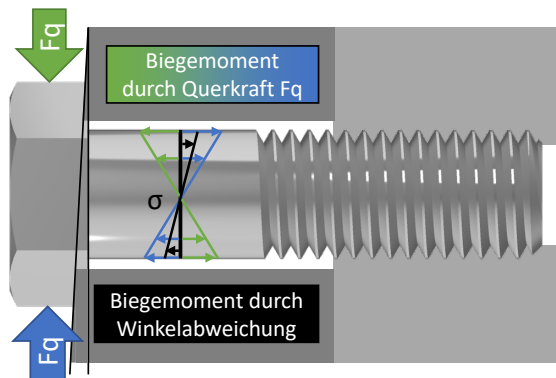


Abbildung 8.2: Qualitativer Darstellung von Spannungsverläufen durch Biegemomente beim Anziehen, verursacht von Winkelabweichungen und Querkraften aus zwei Richtungen (durch Anziehwerkzeug).

Detektion von Versagenszuständen von Schraubverbindungen: In der Quantifizierung des funktionalen Verhaltens konnte bereits gezeigt werden, dass Vorspannkraftverluste mit einer Auflösung von bis zu 6 N unter optimalen Bedingungen detektiert werden können. Weiterhin soll die Detektion von weiteren Versagenszuständen wie selbsttätigem Lösen untersucht werden. Durch wechselnde Querbelastungen führt dies zu kleinen Biegungen der Schraube, die sich dann wieder zurückverformen und dabei lösen. Die neue sensorintegrierende Schraube bietet sich insbesondere hierfür an, da sie Biegemomente mit hoher Auflösung messen kann.

Bereitstellung einer Beanspruchungshistorie im Rahmen der Kreislauffabrik:

Sensorintegrierende Maschinenelemente können einen zentralen Beitrag zur Kreislauffabrik leisten, indem sie eine Erfassung der individuellen Beanspruchungshistorie einzelner Maschinenelemente ermöglichen. Durch die kontinuierliche Erfassung von Beanspruchung, Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Betriebszuständen wird es möglich, den realen Lebenszyklus eines Bauteils präzise zu dokumentieren. Diese datenbasierte Zustandsbewertung erlaubt eine differenzierte Entscheidung über Wiederverwendung, Remanufacturing oder Recycling einzelner Maschinenelemente.

8.2.3 Nutzung des methodischen Ansatzes

Auch auf methodischer Ebene ergeben sich weiterführende Ansätze für die Produktentwicklung: Die Kombination aus V-Modell der VDI 2206 und strukturierter Testing-Methodik hat sich als leistungsfähiges Mittel zur Wissensgenerierung erwiesen. Der Bekanntheitsgrad des V-Modells, gerade auch in der Industrie, bietet die Chance der Anwendung und Akzeptanz dieses methodischen Ansatzes. Eine Formalisierung und softwaregestützte Umsetzung dieses Ansatzes könnten den Wissenstransfer und die Effizienz in frühen Entwicklungsphasen weiter verbessern, auch über den Anwendungsfall der sensorintegrierten Schraube hinaus.

Schließlich bietet sich die Übertragung der entwickelten Ansätze auf weitere Maschinenelemente an. Die hier erarbeiteten Methoden zur Analyse und Verhandlung von Zielkonflikten und zur Integration sensorischer Funktionen könnten auf andere normierte Komponenten wie Lager, Wellen oder Kupplungen übertragen werden. Die Bauraumidentifikation durch Optimierung kann dabei helfen, die bestmöglichen Kompromisslösungen im Zielkonflikt zu finden. Die Muster und das Terminieren des Testing können in zukünftigen Projekten dazu beitragen, methodisch Wissen zu generieren und dadurch als Unterstützung für die Sensorintegration in Maschinenelemente zu dienen. Damit trägt diese Arbeit nicht nur zur Weiterentwicklung eines konkreten Produkts bei, sondern auch zur Etablierung eines allgemeinen methodischen Rahmens für die Entwicklung smarter, mechatronischer Maschinenelemente. Somit kann die Verfügbarkeit hochwertiger Messdaten zum Zustand von Prozessen und Maschinen verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- Abid, M. & Nash, D. H. (2006). Bolt Bending Behaviour in a Bolted Flanged Pipe Joint: A Comparative Study. In American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.), *Volume 2: Computer Technology* (S. 299–306). New York City, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers. Verfügbar unter: doi.org/10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93965
- Abramovici, M. & Bellalouna, F. (2007). Integration and Complexity Management within the Mechatronics Product Development. In S. Takata & Y. Umeda (Hrsg.), *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses* (S. 113–118). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-935-4_20
- Afifi, N., Mas, V., Hemmerich, J., Leitenberger, F., Hoffmann, L., Darijani, A., ..., Matthiesen, S. (2025). Data-Driven Decision-Making: Leveraging Digital Twins for Reprocessing in the Circular Factory. <https://doi.org/10.5445/IR/1000180607>
- Antao, L., Reis, J. & Goncalves, G. (2018). Continuous Maintenance System for Optimal Scheduling Based on Real-Time Machine Monitoring. In *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (S. 410–417). New York, NY, USA: IEEE.
- Baki, P., Székely, G. & Kósa, G. (2013). Design and characterization of a novel, robust, tri-axial force sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 192, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.11.035>
- Bernstein, H. (2013). *Messelektronik und Sensoren. Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung* (Lehrbuch). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bickford, J. H. (2007). *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Non-gasketed joints* (4. Aufl.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849381874>

- Biehl, S., Paetsch, N., Meyer-Kornblum, E. & Bräuer, G. (2016). Wear resistant thin film sensor system for industrial applications. *International Journal of Instrumentation and Measurement*, (1), 6–11.
- Blachowski, B. & Gutkowski, W. (2016). Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring. *Engineering Structures*, 111, 93–103.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.018>
- Boehm, B. W. (1979). Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications. In P. A. Samet (Hrsg.), *Euro IFIP 79* (S. 711–719). North Holland.
- Böge, A. & Böge, W. (2024). *Formeln und Tabellen zur technischen Mechanik* (Lehrbuch, 28., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Bonaiti, L., Knoll, E., Otto, M., Gorla, C. & Stahl, K. (2022). The Effect of Sensor Integration on the Load Carrying Capacity of Gears. *Machines*, 10(10), 888.
<https://doi.org/10.3390/machines10100888>
- Bröhl, A. P. & Dröschel, W. (Hrsg.). (1993). *Das V-Modell. Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden* (Software - Anwendungsentwicklung - Informationssysteme). München: Oldenbourg.
- Budynas, R. G. & Nisbett, K. J. (2015). *Shigley's mechanical engineering design* (Mcgraw-Hill series in mechanical engineering, 10. ed. in SI units). New York, NY, USA: McGraw-Hill Education.
- ConSenses GmbH. (2026). *Zeitgemäße Industriemesstechnik - smarte Lösungen | ConSenses industrial intelligence*. Verfügbar unter:
<https://consenses.de/produkte/sensoren/kraft-und-vibrationssensoren/piezobolt-pb20/produkt>. Zugriff am 05.01.2026.
- Core Sensing GmbH. (2026). *coreIN Sensor integration*. Verfügbar unter:
<https://core-sensing.de/en/produktgruppe/sensoren/corein/>. Zugriff am 05.01.2026.

- Daneshi-Far, Z., Capolino, G. A. & Henao, H. (2010). Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators. In *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010* (S. 1–6).
- DIN 13-1:1999-11 (1999). *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde; Gewinde-Nenn Durchmesser von 1 mm bis 68 mm*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN 2244:2002-05 (2002). *Gewinde - Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN 743-2:2012-12 (2012). *Calculation of load capacity of shafts and axles - Part 2: Theoretical stress concentration factors and fatigue notch factors*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 376:2011 (2011). *Metallische Werkstoffe - Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung*.
- DIN EN ISO 4014:2022-10 (2022). *Verbindungselemente - Sechskantschrauben mit Schaft, Produktklassen A und B (Gewinde M1,6 bis M39)*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN EN ISO 7438:2021-03 (2021). *Metallische Werkstoffe - Biegeversuch (ISO_7438:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_7438:2020*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN EN ISO 898-1:2013-05 (2013). *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde*. Berlin: DIN Media GmbH.
- Djidrov, M. (2024). Application of condition-based monitoring in enhancing mechanical system reliability and proactive structural damage detection. *Technical Sciences*, 27. <https://doi.org/10.31648/ts.10826>
- Dörr, M., Ott, L., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2021). Prediction of Tool Forces in Manual Grinding Using Consumer-Grade Sensors and Machine Learning. *Sensors*, 21(21). <https://doi.org/10.3390/s21217147>

- Dörr, M., Peters, J. & Matthiesen, S. (2021). Data-Driven Analysis of Human-Machine Systems – A Data Logger and Possible Use Cases for Field Studies with Cordless Power Tools. In T. Ahram, R. Taiar, K. Langlois & A. Choplin (Hrsg.), *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III* (Advances in Intelligent Systems and Computing, Bd. 1253, S. 56–62). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_9
- Drent, C., Drent, M., Arts, J. & Kapodistria, S. (2023). Real-Time Integrated Learning and Decision Making for Cumulative Shock Degradation. *Manufacturing & Service Operations Management*, 25(1), 235–253. <https://doi.org/10.1287/msom.2022.1149>
- Dumstorff, G., Paul, S. & Lang, W. (2014). Integration Without Disruption: The Basic Challenge of Sensor Integration. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2102–2111. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2294626>
- Feng, L., Lin, G., Zhang, W. [Weigong], Pang, H. & Wang, T. [Tie]. (2015). Design and optimization of a self-decoupled six-axis wheel force transducer for a heavy truck. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(12), 1585–1610. <https://doi.org/10.1177/0954407014566439>
- Fleischer, J., Klee, B., Spohrer, A. & Merz, S. (2018). Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0. Wege zu kostengünstigen Sensorsystemen. In H. Rauen & J. Binzer (Hrsg.), *VDMA Forum Industrie 4.0* (S. 2–26). Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.
- Fotso, A. B. & Rettberg, A. (2012). State of the art for mechatronic design concepts. In *Proceedings of 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications* (S. 232–240). New York, NY, USA: IEEE.
- Frank, T., Grün, A., Kermann, M., Cyriax, A., Steinke, A., Ortlepp, T. & Reschke, G. (2019). 2.2.4 Hybridintegration von Mikrodehnungssensoren. In *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme* (S. 153–158). Wunstorf: AMA Service GmbH.
- Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST. (2026). *Smart screw connection – Wireless and energy-autonomous monitoring solution*. Verfügbar unter:

https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/2022/jb2022_de_intelligente-schraubverbindung-qbo.pdf. Zugriff am 05.01.2026.

- Gausemeier, J. & Moehring, S. (2003). New Guideline VDI 2206 - A Flexible Procedure Model for the Design of Mechatronic Systems. *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*.
- Graessler, I. & Hentze, J. (2020). The new V-Model of VDI 2206 and its validation. *at - Automatisierungstechnik*, 68(5), 312–324. <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0015>
- Grauberger, P., Dörr, M., Lanza, G., Kaiser, J.-P., Albers, A., Düser, T., ..., Matthiesen, S. (2024). Enabling the vision of a perpetual innovative product – predicting function fulfillment of new product generations in a circular factory. *at - Automatisierungstechnik*, 72(9), 815–828. <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0010>
- Groche, P. & Brenneis, M. (2014). Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes. *Measurement*, 53, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.042>
- Guo, Y., Hu, Z., Xiong, L., Zhou, X. & Zhu, P. (2022). Fiber Bragg grating based quasi-distributed bolt force sensor with torque resistance. *Measurement*, 195, 111063. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111063>
- Hausmann, M., Breimann, R., Fett, M., Kraus, B., Schmitt, F., Welzbacher, P. & Kirchner, E. [Eckhard]. (2023). Systematic approaches for sensor selection and integration – A systematic literature review. *Procedia CIRP*, 119, 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.121>
- Hausmann, M., Häfner, L. & Kirchner, E. [E.]. (2022). A Procedure Model for the Systematic Sensor Selection and Integration into Technical Systems. *Proceedings of the Design Society*, 2, 445–454. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.46>
- Herbst, F., Chadda, R., Hartmann, C., Peters, J., Riehl, D., Gwosch, T., ..., Kupnik, M. (2022). Multi-axis Force Sensor for Sensor-integrating Bolts. In *2022 IEEE Sensors* (S. 1–4). New York, NY, USA: IEEE.

- Herbst, F., Chadda, R., Peters, J., Riehl, D., Hartmann, C., Suppelt, S., ..., Kupnik, M. (2024). Sensor-Integrating Bolt for Multiaxial Force Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 24(17), 27265–27274. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3427833>
- Hibbeler, R. C. (2021). *Technische Mechanik 2 - Festigkeitslehre (Mechanics of Materials)* (Pearson ing, Maschinenbau, Bd. 4409, 10., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Hofmann, K., Keil, F., Matthiesen, S., Gwosch, T., Kupnik, M., Kirchner, E. [Eckhard], ..., Stahl, K. (2022). Potenziale und Herausforderungen Energieautonomer Sensorsysteme für den Einsatz in sensorintegrierenden Maschinenelementen. In O. Schecker (Hrsg.), *EASS. Energieautonome Sensorsysteme* (Bd. 102, S. 36–38). VDE Verlag GmbH.
- Horn, S. (2022). Entwicklungsmethode zur Mechatronisierung von bautechnisch bewerteten Befestigungsmitteln am Beispiel eines chemischen Befestigungsmittels zur Integration eines Verschiebungssensors. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 144). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000145883>
- Horn, S., Zimprich, S., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Ermittlung eines Designraums zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln am Beispiel von Verbundankern. *Beton und Stahlbau*, 115. <https://doi.org/10.1002/best.202000022>
- Hosokawa, S. (2006). Studies on Bending Moment of Bolt Shank Caused by Tightening of Threaded Fasteners. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 72(10), 1242–1246. <https://doi.org/10.2493/jspe.72.1242>
- Hottinger Brüel & Kjaer GmbH.. *EP70 Gebrauchsanweisung*. Verfügbar unter: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A05629.pdf>. Zugriff am 26.07.2025.
- IEEE-Std-610.12-1990. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. Piscataway, NJ, USA: IEEE.

Illgner, K. H. & Esser, J. (2001). *Schrauben Vademecum* (9. vollst. neu überarb. und erw. Aufl. (40. - 45. Tsd.)). Bramsche: Rasch.

Intellifast. (2026). *Intellifast System - Intellifast*. Verfügbar unter: <https://www.intellifast.de/intellifast-system/>. Zugriff am 05.01.2026.

Jun, H.-B., Shin, J.-H., Kim, Y.-S., Kiritsis, D. & Xirouchakis, P. (2009). A framework for RFID applications in product lifecycle management. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(7), 595–615. <https://doi.org/10.1080/09511920701501753>

Kanoun, O., Khriji, S., Naifar, S., Bradai, S., Bouattour, G., Bouhamed, A., El Houssaini, D. & Viehweger, C. (2021). Prospects of Wireless Energy-Aware Sensors for Smart Factories in the Industry 4.0 Era. *Electronics*, 10(23), 2929. <https://doi.org/10.3390/electronics10232929>

Keil, S. (2017). *Dehnungsmessstreifen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13612-3>

Kim, Y. H., Ye, W., Kumar, R., Bail, F., Dvorak, J., Tan, Y. [Yanchao], ..., Nath, C. (2024). Unlocking the Potential of Remanufacturing Through Machine Learning and Data-Driven Models—A Survey. *Algorithms*, 17(12), 562. <https://doi.org/10.3390/a17120562>

Kirchner, E. [Eckhard], Martin, G. & Vogel, S. (2018). Sensor Integrating Machine Elements. Key to In-Situ Measurements in Mechanical Engineering. In Klaus Schützer (Hrsg.), *23° Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Desenvolvimento de Produtos Inteligentes: Desafios e novos requisitos*.

Kirchner, E. [Eckhard], Wallmersperger, T., Gwosch, T., Menning, J. D. M., Peters, J., Breimann, R., ..., Stahl, K. (2024). A Review on Sensor-integrating Machine Elements. *Advanced Sensor Research*, 3(4), 2300113–2300150. <https://doi.org/10.1002/adrs.202300113>

Kleckers, T. (2013). A1.1 - Electrical Strain Gauges, Piezoelectric Sensors or Fiber Bragg Sensors for Force Measurement: Prospects and Potentials. In *Proceedings SENSOR 2013* (S. 23–27). AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany.

- Knöchelmann, M. (2020). *Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme*. <https://doi.org/10.15488/11351>
- Kupnik, M. (2024). *Messkette aus der Perspektive der Sensorfunktionsintegration. Beitrag zur SummerSchool des SPP2305*, Garching bei München.
- Läpple, V. (2016). *Einführung in die Festigkeitslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10611-9>
- Ley, P.-P., Knöchelmann, M., Wolf, A. & Lachmayer, R. (2022). Tailoring the V-Model for Optics: A Methodology for Optomechatronic Systems. *Applied Sciences*, 12(15), 7798. <https://doi.org/10.3390/app12157798>
- Li, T., Liu, W., Gao, H., Wang, N., Xia, K., Li, R., Tan, Y. [Yuegang] & Zhou, Z. (2024). FBG-based force sensing with temperature self-compensation for smart bolts. *Sensors and Actuators A: Physical*, 379, 115872. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115872>
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S. & Grauberger, P. (Hrsg.). (2024). *Konstruktionswissen für Ingenieure. Innovative Produkte zielgerichtet entwickeln* (1. Auflage 2024). Berlin: Springer Berlin. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/978-3-662-68985-1>
- Montgomery, J. (2008). Boundary Condition Influences on Shank Stress in 3D Solid Bolt Simulation. In *Abaqus Users' Conference* (S. 19–22). Verfügbar unter: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110656071>
- Moradzadeh, M. & Vandevelde, L. (2024). A Review of Condition Monitoring of Offshore Wind Turbines. In *2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)* (S. 1–5). New York, NY, USA: IEEE.
- Noh, Y., Bimbo, J., Sareh, S., Wurdemann, H., Fraš, J., Chathuranga, D. S., ..., Rhode, K. (2016). Multi-Axis Force/Torque Sensor Based on Simply-Supported Beam and Optoelectronics. *Sensors*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/s16111936>

- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2>
- Peters, J., Doellken, M., Grauberger, P., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K. & Matthiesen, S. (2025). Design Support and Strategies for Integrating Sensing Functions into Machine Elements. *Procedia CIRP*, 136, 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.090>
- Peters, J., Herbst, F., Riehl, D., Chadda, R., Hofmann, K., Kupnik, M. & Matthiesen, S. (2024). Sensorintegrierende Schrauben: Bauraumidentifikation und -ausnutzung. In Berthold Schlecht (Hrsg.), *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2024* (S. 212–218). Göttingen: sierke WWS GmbH.
- Peters, J. & Matthiesen, S. (2024). *Procedure to Identify Optimal Design Space for Integration of Sensors into Machine Elements* (Repository KITopen, Hrsg.) (1000169793). Karlsruhe, Germany. <https://doi.org/10.5445/IR/1000169793>
- Peters, J., Menning, J. D. M., Ewert, A., Prokopchuk, A., Breimann, R., Herbst, F., ..., Matthiesen, S. (2024). Design Space Optimization for Sensor-Integration in Standardized Machine Elements. In American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.), *Proceedings of ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Acoustics, Vibration, and Phononics; Advanced Design and Information Technologies* (V001T02A005). American Society of Mechanical Engineers.
- Peters, J., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K. & Matthiesen, S. (2024). Overcoming Conflicts of Objectives between Sensory and Mechanical Domain in the Development of Sensor-Integrating Machine Elements Using the Example of Bolts. *IEEE Access*, 12, 93975–93992. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3423674>
- Peters, J., Rappenecker, K., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Leiacker, D., ..., Matthiesen, S. (2026). The Role of Testing and Characterization in the Methodical Development of Sensor-integrating Bolts for Multi-axial Force Measurement. *Sensors*, 26(14). <https://doi.org/10.3390/s26144415>
- Peters, J., Zimmerer, C., Gwosch, T., Herbst, F., Hartmann, C., Chadda, R., ..., Matthiesen, S. (2022). Test-driven Development to Overcome Challenges in the Design of Sensor-integrating Machine Elements. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)*. Glasgow, UK: The Design Society.

- Rahman, R. B. A., Pulm, U. & Stetter, R. (2007). Systematic Mechatronic Design of a Piezo-Electric Brake. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *DS 42: Proceedings of ICED 2007* (S. 705–706). Glasgow, UK: The Design Society.
- Rajput, S. & Singh, S. P. (2021). Industry 4.0 – challenges to implement circular economy. *Benchmarking: An International Journal*, 28(5), 1717–1739. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0430>
- Rappenecker, K., Peinhardt, F., Geiser, F., Peters, J., Kachel, G., Isele, A. & Matthiesen, S. (2025). Vorstellung einer sensorintegrierten Schraube zur Bestimmung der Gesamtzusatzspannung. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Schraubenverbindungen. Berechnung, Gestaltung, Montage, Anwendung* (Bd. 2466, S. 297–311). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Süle, E., Hassoun, A. & Keogh, J. G. (2025). Knowledge flows in industry 4.0 research: a longitudinal and dynamic analysis. *Journal of Data, Information and Management*, 7(2), 123–145. <https://doi.org/10.1007/s42488-025-00146-3>
- Riehl, D., Herbst, F., Peters, J., Leiacker, D., Matthiesen, S., Kupnik, M. & Hofmann, K. (2025). Flexible Ultra-Low Power Strain Gauge Readout Platform for Sensor-Integrating Bolts. In *2025 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (S. 1–6). IEEE.
- Riehl, D., Korner, D., Keil, F., Peters, J., Matthiesen, S. & Hofmann, K. (2024). Flexible Modular Electronic Platform for Sensor-Integrating Bolts. In VDE/VDI-GMM & DVS (Hrsg.), *GMM-Fb. 107: EBL 2024 – Elektronische Baugruppen und Leiterplatten* (GMM-Fachbericht, vol. 107, pp. 313–316). Berlin: VDE-Verlag.
- Riehl, D., Peters, J., Herbst, F., Leiacker, D., Kupnik, M., Matthiesen, S. & Hofmann, K. (2025). Design of a sensor integrating bolt for multiaxial force measurement and development of a design methodology. *Forschung im Ingenieurwesen*, 89(1). <https://doi.org/10.1007/s10010-025-00924-w>
- Rousseau, R. I. & Bouzid, A.-H. (2024). The Tightening and Untightening Modeling and Simulation of Bolted Joints. *Machines*, 12(9), 654. <https://doi.org/10.3390/machines12090654>

- Sahib, M. A. & Ahmed, B. S. (2016). A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms. *Journal of Advanced Research*, 7(1), 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004>
- Sanli, A., Demirkale, B. & Kanoun, O. (2025). Real-time detection of loosening torque in bolted joints using piezoresistive pressure-sensitive layer based on multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy nanocomposites. *Scientific Reports*, 15(1), 4830. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89290-9>
- Sensorise GmbH. (2026). *Sensorise S.Bolt XP*. Verfügbar unter: https://www.sensorise.de/_files/ugd/ab90ac_40b55d7a3e0647f6886440e76e5d7177.pdf. Zugriff am 05.01.2026.
- Seybold, R. (2006). *Finite-Elemente-Simulation örtlicher Beanspruchungen in Schraubengewinden* (Berichte aus der Werkstofftechnik, 2006,2, 1. Aufl.). Technische Universität Darmstadt, Diss., 2005. Aachen: Shaker.
- Ștefănescu, D. M. (2011). *Handbook of force transducers. Principles and components*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ștefănescu, D. M. (2020). *Handbook of Force Transducers*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35322-3>
- Steinhilper, W. & Sauer, B. (2012). *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24301-1>
- Stranghöner, N., Makevičius, L., Henkel, K.-M., Glienke, R. & Dörre, M. (2018). Vorspannkraftverluste geschraubter Verbindungen infolge beschichteter Kontaktflächen. *Stahlbau*, 87(10), 991–1009. <https://doi.org/10.1002/stab.201810014>
- Strauss, P., Schmitz, M., Wostmann, R. & Deuse, J. (2018). Enabling of Predictive Maintenance in the Brownfield through Low-Cost Sensors, an IIoT-Architecture and Machine Learning. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (S. 1474–1483). New York, NY, USA: IEEE.
- Suppelt, M., Herbst, F., Schaumann, S., Riehl, D., Leiacker, D., Peters, J., ..., Kupnik, M. (2025). Acoustic Energy Transfer for Integrated Sensor Systems. *IEEE Sensors Letters*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/LSENS.2025.3588606>

- Tahera, K., Wynn, D. C., Earl, C. & Eckert, C. M. (2019). Testing in the incremental design and development of complex products. *Research in Engineering Design*, 30(2), 291–316. <https://doi.org/10.1007/s00163-018-0295-6>
- Templeman, J. O., Sheil, B. B. & Sun, T. (2020). Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 304, 111772. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111772>
- Valdastri, P., Roccella, S., Beccai, L., Cattin, E., Menciassi, A., Carrozza, M. C. & Dario, P. (2005). Characterization of a novel hybrid silicon three-axial force sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 123-124, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.01.006>
- VDI 2230 Blatt 1: 2015-11. *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2230 Blatt 3: 2024-07 - Entwurf. *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*. Berlin: DIN Media GmbH.
- VDI/VDE, 2206 (2021). *VDI/VDE 2206:2021-11 Development of mechatronic and cyber-physical systems*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Vorwerk-Handing, G., Gwosch, T., Schork, S., Kirchner, E. [E.] & Matthiesen, S. (2020). Classification and examples of next generation machine elements. *Forschung im Ingenieurwesen*, 84(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00382-1>
- Wang, T. [Tao], Zhang, W. [Wenxin], Yang, D., Wang, H., Lu, G. & Lu, M. (2024). Head surface strain measurement based wireless bolt sensor with self temperature compensating. *Measurement Science and Technology*, 35(7), 75109. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad3e9e>
- Weber, C. (2014). Modelling Products and Product Development Based on Characteristics and Properties. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design* (S. 327–352). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_16
- Wheatstone, C. (1843). An Account of Several new Instruments and Processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

- Wiegand, H., Kloos, K.-H. & Thomala, W. (2007). *Schraubenverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung* (Konstruktionsbücher, Bd. 5, 5., völlig neubearb. und erw. Aufl.). Berlin: Springer.
- Yang, W., Tavner, P. J., Crabtree, C. J., Feng, Y. & Qiu, Y. (2014). Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges. *Wind Energy*, 17(5), 673–693. <https://doi.org/10.1002/we.1508>
- Zheng, C., Hehenberger, P., Le Duigou, J., Bricogne, M. & Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 28(3), 333–356. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0243-2>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden

Abdulbaki, O. (2021). *Zustandsüberwachung eines in Parallelkinematiken verwendeten Antriebsstrangs mittels Vibrationsanalyse* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Bheda, R. M. (2021). *Entwicklung eines maßgeschneiderten Agile-Hybrid Frameworks für interdisziplinäre Systementwicklung in einem ressourcenlimitierten Start-up* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Hasenöhl, S. (2022). *Experimentelle Verifikation eines sensorintegrierenden Zahnrad*s [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

He, J. (2021). *Optimierung eines Algorithmus für maschinelles Lernen zur Vorhersage des Getriebezustands in einem einstufigen Getriebeprüfstand* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Hilmer, L. (2023). *Untersuchung eines bipolaren Koagulationsprozesses zur sicheren und reproduzierbaren Gewebebehandlung* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Huang, L. (2022). *Konzeptstudie und Aufbau eines Prüfstands zum Testing von sensorintegrierenden Schrauben mit mehraxialer Kraftmessung* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

- Ji, K. (2022). *Verifizierung von sensorintegrierenden Zahnrädern in Prüfstandsversuchen* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kaiser, D. (2023). *Testen von sensorgeregelten linksventrikulären Herzunterstützungssystemen für ein zuverlässiges und robustes Betriebsverhalten* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kistner, S. (2025). *Konstruktion und Inbetriebnahme einer portablen und skalierbaren Messvorrichtung zur Ermittlung von Reibungszahlen von kurzen Schrauben* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kral, I. (2024). *Optimierung der Elektronik eines Wasserstoffschraubers in Zuverlässigkeit und Baugröße* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Liu, S. (2022). *Ressourcenoptimierte Programmierung eines Sensormoduls für Zahnräder* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Mirbach, N. (2023). *Entwicklung von sensorintegrierenden Schrauben: Designraumanalyse und Tests* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Ott, L. (2021). *Konzeptstudie zur Integration eines neuartigen Messverfahrens zur Bewertung von Schwingungen und Verschleiß bei Zahnrädern* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Pezina, L. (2025). *Sensorintegrierende Schraube zur direkten Anzeige kritischer Belastungszustände* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Roschka, P. (2021). *Verschleißklassifizierung bei Zahnrädern mittels Deep Learning Modellen* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Sekhar Naik, A. V. (2023). *Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Überwachung und Manipulation eines Synchronmotors über eine Motorsteuerung* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Velasquez, N. (2024). *Optimierung von sensorintegrierenden Schrauben für die Messung von Mehrachskräften* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Volk, O. (2022). *Entwicklung von sensorintegrierenden Schrauben: Designraumfindung und Gestaltung von Verformungskörpern* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Zuidberg, M. (2023). *Mechanisch-elektrische Emulation von Fehlern in mechatronischen Testsystemen* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind

Doellken, M., Peters, J. & Matthiesen, S. (2024). Experimental Investigation of the Influence of Restrictive and Dual Methods for Design for Manufacturing. In *Volume 1: Acoustics, Vibration, and Phononics; Advanced Design and Information Technologies*. American Society of Mechanical Engineers.

Dörr, M., Peters, J. & Matthiesen, S. (2021). Data-Driven Analysis of Human-Machine Systems – A Data Logger and Possible Use Cases for Field Studies with Cordless Power Tools. In T. Ahram, R. Taiar, K. Langlois & A. Choplin (Hrsg.), *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III* (Advances in Intelligent Systems and Computing, Bd. 1253, S. 56–62). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_9

Gwosch, T., Peters, J., Pehlivan, J. & Naber, C. (2022). Reliability Model of an Automatically Switching Radon Exposimeter for System Design Evaluation. In M. C. Leva, E. Patelli, L. Podofilini & S. Wilson (Hrsg.), *Book of Extended Abstracts for the 32nd European Safety and Reliability Conference* (S. 1739–1746). Singapore: Research Publishing Services.

Hasenoehrl, S., Peters, J. & Matthiesen, S. (2024). Integration of Sensors for Enhanced Condition Monitoring in Polymer Gears: A Comparative Study of Acceleration and Temperature Sensors. *Applied Sciences*, 14(6), 2240. <https://doi.org/10.3390/app14062240>

Herbst, F., Chadda, R., Hartmann, C., Peters, J., Riehl, D., Gwosch, T., Hofmann, K., Matthiesen, S. & Kupnik, M. (2022). Multi-axis Force Sensor for Sensor-integrating Bolts. In *2022 IEEE Sensors* (S. 1–4). IEEE. (VÖ7).

Herbst, F., Chadda, R., Peters, J., Riehl, D., Hartmann, C., Suppelt, S., Breimann, R., Kirchner, E. [Eckhard], Hofmann, K., Matthiesen, S. & Kupnik, M. (2024). Sensor-Integrating Bolt for Multiaxial Force Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 24(17), 27265–27274. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3427833> (VÖ8).

- Kirchner, E. [Eckhard], Wallmersperger, T., Gwosch, T., Menning, J. D. M., Peters, J., Breimann, R., Kraus, B., Welzbacher, P., Küchenhof, J., Krause, D., Knoll, E., Otto, M., Muhammedi, B., Seltmann, S., Hasse, A., Schäfer, G., Lohrengel, A., Thielen, S., Stiemcke, Y., Koch, O., ... Matthiesen, S., ... Stahl, K. (2024). A Review on Sensor-integrating Machine Elements. *Advanced Sensor Research*, 3(4), 2300113–2300150. <https://doi.org/10.1002/adsr.202300113> (VÖ5).
- Peters, J., Doellken, M., Grauberger, P., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K., Matthiesen, S. (2025). Design Support and Strategies for Integrating Sensing Functions into Machine Elements. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.090> (VÖ3).
- Peters, J., Herbst, F., Riehl, D., Chadda, R., Hofmann, K., Kupnik, M., Matthiesen, S. (2024). Sensorintegrierende Schrauben: Bauraumidentifikation und -ausnutzung. In Berthold Schlecht (Hrsg.), *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2024* (S. 212–218). Göttingen: sierke WWS GmbH. (VÖ11).
- Peters, J., Hölz, K., Li, J., Schröder, T., Steck, M., Leitenberger, F., Grauberger, P., Matthiesen, S. (2024). Testing-Objekte – Prototypen, Referenzprodukte und mehr. In S. Matthiesen & P. Grauberger (Hrsg.), *Konstruktionswissen für Ingenieure* (S. 143–176). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-68986-8_4
- Peters, J. & Matthiesen, S. (2024). *Procedure to Identify Optimal Design Space for Integration of Sensors into Machine Elements* (Repository KITopen) (1000169793). Karlsruhe, Germany. <https://doi.org/10.5445/IR/1000169793>
- Peters, J., Menning, J. D. M., Ewert, A., Prokopchuk, A., Breimann, R., Herbst, F., Riehl, D., Döllken, M., Vorrath, E.-F. M., Wallmersperger, T., Schlecht, B., Kirchner, E. [Eckhard], Kupnik, M., Hofmann, K. & Matthiesen, S. (2024). Design Space Optimization for Sensor-Integration in Standardized Machine Elements. In *Proceedings of ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Acoustics, Vibration, and Phononics; Advanced Design and Information Technologies* (V001T02A005). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2024-145345> (VÖ2)
- Peters, J., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Kupnik, M., Hofmann, K., Matthiesen, S. (2024). Overcoming Conflicts of Objectives between Sensory and Mechanical Domain in the Development of Sensor-Integrating Machine

Elements Using the Example of Bolts. *IEEE Access*, 12, 93975–93992.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3423674> (VÖ1).

Peters, J., Ott, L., Dörr, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Design of sensor integrating gears: methodical development, integration and verification of an in-situ MEMS sensor system. *Procedia CIRP*, 100, 672–677.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.142>

Peters, J., Ott, L., Dörr, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2022). Sensor-integrating gears: wear detection by in-situ MEMS acceleration sensors. *Forschung im Ingenieurwesen*, (86), 421–432. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00575-7>

Peters, J., Ott, L., Gwosch, T. & Matthiesen, S. Requirements for Sensor Integrating Machine Elements: A Review of Wear and Vibration Characteristics of Gears. In *KIT Scientific Working Papers* (2194-1629, vol. 157). Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000127139>

Peters, J., Rappenecker, K., Mirbach, N., Herbst, F., Riehl, D., Leiacker, D., Kupnik, M., Hofmann, K. & Matthiesen, S. (2026). The Role of Testing and Characterization in the Methodical Development of Sensor-integrating Bolts for Multi-axial Force Measurement. *Sensors*, 26(14), 4415.
<https://doi.org/10.3390/s26144415> (VÖ3).

Peters, J., Zimmerer, C., Gwosch, T., Herbst, F., Hartmann, C., Chadda, R., Riehl, D., Keil, F., Kupnik, M., Hofmann, K. & Matthiesen, S. (2022). Test-driven Development to Overcome Challenges in the Design of Sensor-integrating Machine Elements. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)*. Glasgow, UK: The Design Society. (VÖ6).

Rappenecker, K., Peinardt, F., Geiser, F., Peters, J., Kachel, G., Isele, A. & Matthiesen, S. (2025). Vorstellung einer sensorintegrierten Schraube zur Bestimmung der Gesamtzusatzspannung. In *VDI Schraubenfachtagung 2025*. Leipzig.

Riehl, D., Herbst, F., Peters, J., Leiacker, D., Matthiesen, S., Kupnik, M., Hofmann, K. (2025). Flexible Ultra-Low Power Strain Gauge Readout Platform for Sensor-Integrating Bolts. In *2025 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (S. 1–6). IEEE. (VÖ9).

- Riehl, D., Korner, D., Keil, F., Peters, J., Matthiesen, S. & Hofmann, K. (2024). Flexible Modular Electronic Platform for Sensor-Integrating Bolts. In *EBL 2024: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten* (GMM-Fachbericht, vol. 107, pp. 313–316). VDE-Verlag. Retrieved from <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/143735/> (VÖ10).
- Riehl, D., Peters, J., Herbst, F., Leiacker, D., Kupnik, M., Matthiesen, S. & Hofmann, K. (2025). Design of a Sensor Integrating Bolt for Multiaxial Force Measurement and Development of a Design Methodology. *Forschung im Ingenieurwesen*. (VÖ12).
- Suppelt, M., Herbst, F., Schaumann, S., Riehl, D., Leiacker, D., Peters, J., Wismath, S., Suppelt, S., Hofmann, K., Matthiesen, S. & Kupnik, M. (2025). Acoustic Energy Transfer for Integrated Sensor Systems. *IEEE Sensors Letters*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/LSENS.2025.3588606>

VÖ1-4 bilden den Kern dieser Forschungsarbeit und sind in den Ergebniskapiteln dieser Forschungsarbeit referenziert. **VÖ5,6** behandeln Anforderungen und Literaturrecherchen zu sensorintegrierenden Maschinenelementen und sind in den Kapiteln 2.1, 2.4, 2.5.2 referenziert. **VÖ7,8** behandeln ein Teilergebnis des biegunsoptimierten Sensorkonzepts (V3) des Projektpartners MUST unter Prof. Kupnik und sind in den Kapiteln 6,7 referenziert. **VÖ9,10** behandeln das Teilergebnis der Elektronik zur eingebetteten Messdatenerfassung (F²LECS) des Projektpartners IES unter Prof. Hofmann und sind in den Kapiteln 6,7 referenziert. **VÖ11,12** bilden den Projektfortschritt ab.

Glossar

Begriff	Definition
Drift	Veränderung eines Messsignals über einen Zeitraum, ohne dass sich die physikalische Größe ändert (Kleckers, 2013).
Eigenschaft	Die nicht direkt beeinflussbaren Parameter eines technischen Systems (Weber, 2014).
Funktion	Beschreibt den Zweck, die Antwort auf die Frage: „Wozu dient das System?“ (Matthiesen & Grauberger, 2024). Im Fall der Befestigungsschraube ist die Funktion die Herstellung einer lösbaren Verbindung zwischen Bauteilen (Steinhilper & Sauer, 2012).
Funktionales Verhalten	Beinhaltet die Antwort auf die Frage: „Was tut das Produkt?“ (Matthiesen & Grauberger, 2024). Es resultiert aus der Gestalt eines Produkts und trägt zur Funktionserfüllung bei (Matthiesen & Grauberger, 2024). Im Fall der Befestigungsschraube wird durch das Eindrehen des Gewindes eine elastische Verspannung und damit einhergehend eine Vorspannkraft bzw. Klemmkraft aufgebaut (Steinhilper & Sauer, 2012).
In-situ	Nahe am eigentlichen Prozess oder Ort des Interesses (Kirchner et al., 2018).
Mehraxiale Kraftmessung	Eine mehraxiale Kraftmessung gibt Kräfte und Momente aus, die in mehr als einer Raumrichtung auftreten (Templeman et al., 2020).
Merkmal (Gestaltmerkmal)	Die direkt beeinflussbaren Parameter eines technischen Systems (Weber, 2014). „Sie können Einfluss auf das funktionale Verhalten eines Produkts haben. Für Konstruierende sind Merkmale die Stellgrößen für das funktionale Verhalten.“ (Matthiesen & Grauberger, 2024) Gestaltmerkmale „beziehen sich auf alles, was für die Gestaltung des Produkts definiert werden muss. Gestaltmerkmale können konstruktiv festgelegte Geometrien, eingesetzte Werkstoffe und zugekaufte Maschinenelemente sowie Elektronikbauteile sein.“ (Matthiesen & Grauberger, 2024)
Residuum, Residuen	Abweichung vom gewünschten Ergebnis bei Näherungslösungen.

Sensitivität	Empfindlichkeit eines Sensors, bzw. eines Messaufnehmers.
Testing	„Der Prozess des Betriebs eines Systems oder einer Komponente unter bestimmten Bedingungen, Beobachtung oder Aufzeichnung der Ergebnisse und eine Bewertung eines bestimmten Aspekts des Systems oder der Komponente.“ (IEEE-Std-610.12-1990) Spezifiziert durch Matthiesen und Grauberger (2024): „Testing zum Konstruktionswissen beinhaltet den Betrieb des Testing-Objekts in der Testing-Umgebung, die Beobachtung des funktionalen Verhaltens und die Bewertung durch Vergleich mit dem gewünschten funktionalen Verhalten. Es kann zu den Zielen „Erkunden“, „Eingrenzen“ und „Prüfen“ durchgeführt werden.“
Zielkonflikt	Gegenläufiges Verhalten von mechanischer und sensorischer Funktionserfüllung bzw. mechanisch- und sensorisch-funktionalem Verhalten bei Variation der Gestaltmerkmale

Anhang A

Formeln zur Berechnung des Verlaufs der mechanischen Spannungen mit Kerbeinfluss für Querschnitte ohne Hohlraum

Ansatz zweiter Ordnung

$$\sigma_{z,Kerbe}(r) = ar^2 + br + c \quad \text{A.1}$$

Diese Gleichung kann unter Verwendung von Symmetrie-Randbedingungen und bekannten Randwerten am äußeren Rand $\sigma_{z,Kerbe}(r = R) = \alpha_z \sigma_n$ sowie dem Erhalt der Gesamtspannung (nach Kapitel 2.2.5)

$$\int_{-R}^R \sigma_n \, dr = \int_{-R}^R \sigma_{z,Kerbe}(r) \, dr \quad \text{A.2}$$

gelöst werden. Daraus ergibt sich die Zugspannung mit Kerbeinfluss wie folgt:

$$\sigma_{z,Kerbe}(r) = \frac{\sigma_{z,max}}{2} \left(\frac{3}{R^2} (\alpha_z - 1) r^2 + \frac{1}{2} (3 - \alpha_z) \right) \quad \text{A.3}$$

Die Biegespannung mit Kerbeinfluss ergibt sich analog:

$$\sigma_{b,Kerbe}(r) = 3 \frac{\sigma_{b,max}}{R^5} \left(\alpha_b - \frac{3}{2} \right) r^5 + 2 \frac{\sigma_{b,max}}{R^3} (2 - \alpha_b) r^3 + \frac{\sigma_{b,max}}{2R} \quad \text{A.4}$$

Die Torsionsspannung mit Kerbeinfluss ähnelt formal der Biegespannung und ergibt sich zu:

$$\tau_{t,Kerbe}(r) = \left| 3 \frac{\tau_{t,max}}{R^5} \left(\alpha_t - \frac{3}{2} \right) r^5 + 2 \frac{\tau_{t,max}}{R^3} (2 - \alpha_t) r^3 + \frac{\tau_{t,max}}{2R} r \right| \quad A.5$$

Einfluss der Höhe auf normierte von-Mises-Spannung

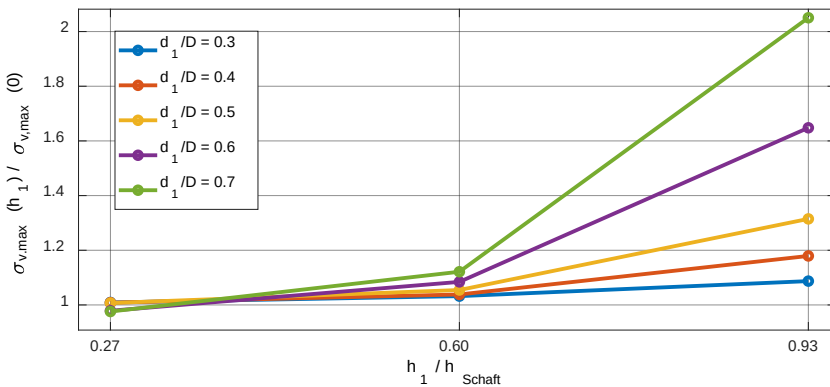


Abbildung A.1: Einfluss des Gestaltmerkmals h_1 , Höhe des Sensorbauraums, auf die Erhöhung der von-Mises-Spannung bezogen zur Vollschraube. Wenn h_1 in die Kerbe Schaft/Gewinde vordringt ($h_1/h_{\text{Schaft}} \approx 0.9$), erhöht sich die Spannung um bis zu Faktor 2 je nach Durchmesser der Bohrung. Abbildung übersetzt aus Peters und Mirbach et al. (2024).

Elementarten und -anzahl des FE-Modells

Tabelle A.1: Elementarten und -anzahl pro Bauteil im FE-Modell, Tabelle angelehnt an Peters und Mirbach et al. (2024).

Bauteilname	Elementanzahl	C3D8R	C3D8	C3D10
Schraube	168873	163653	5220	-
Obere Platte	49125	3888	2730	42507
Untere Platte	45006	7360	-	37760

Koeffizienten der kurvenangepassten Funktionen der von-Mises-Spannung und der Dehnung

Tabelle A.2: Koeffizienten der kurvenangepassten Funktion, die die von-Mises-Spannung in Abhängigkeit von d_1 , d_2 beschreibt, angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024).

Koeffizient		Wert	Koeffizient		Wert
p_{00}		468,6 N/mm ²	p_{02}		-0,344 N/mm ⁴
p_{10}		0,856 N/mm ³	p_{30}		0,0758 N/mm ⁵
p_{01}		4,098 N/mm ³	p_{21}		-0,0259 N/mm ⁴
p_{20}		-0,347 N/mm ⁴	p_{12}		0,0096 N/mm ⁴
p_{11}		-0,0014 N/mm ⁴	p_{03}		0,0234 N/mm ⁴

Tabelle A.3: Koeffizienten der kurvenangepassten Funktion, die die Dehnung an der Sensorposition in Abhängigkeit von d_1 , d_2 beschreibt, angelehnt an (Peters, Mirbach et al., 2024).

Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert
p_{00}	$5,95 \cdot 10^{-4}$	p_{02}	$8,276 \cdot 10^{-7} \text{ 1/mm}^2$
p_{10}	$2,055 \cdot 10^{-5} \text{ 1/mm}$	p_{30}	$3,472 \cdot 10^{-7} \text{ 1/mm}^3$
p_{01}	$-5,537 \cdot 10^{-6} \text{ 1/mm}$	p_{21}	$5,787 \cdot 10^{-8} \text{ 1/mm}^3$
p_{20}	$-3,562 \cdot 10^{-6} \text{ 1/mm}^2$	p_{12}	$2,876 \cdot 10^{-9} \text{ 1/mm}^3$
p_{11}	$-6,418 \cdot 10^{-7} \text{ 1/mm}^2$	p_{03}	$-3,005 \cdot 10^{-8} \text{ 1/mm}^3$

Anhang B

Technische Zeichnungen der Testing-Umgebung

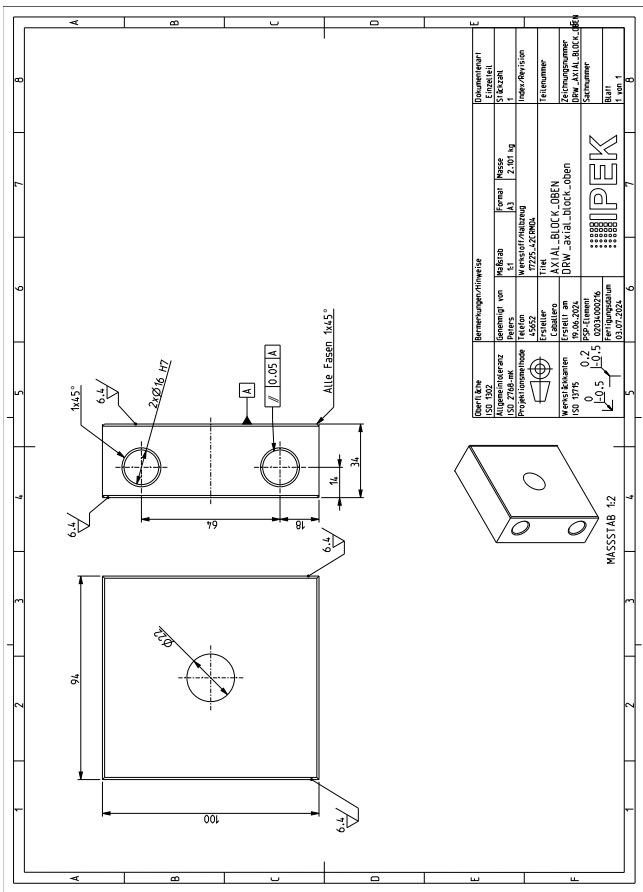
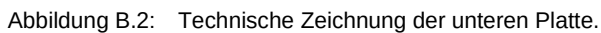


Abbildung B.1: Technische Zeichnung der oberen Platte.



[illegible]

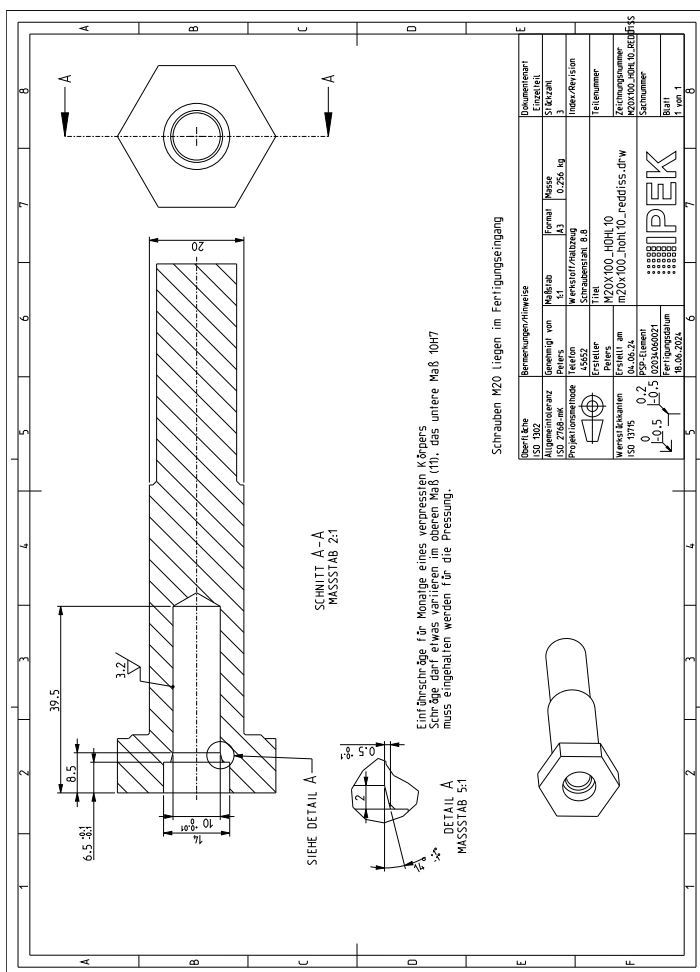
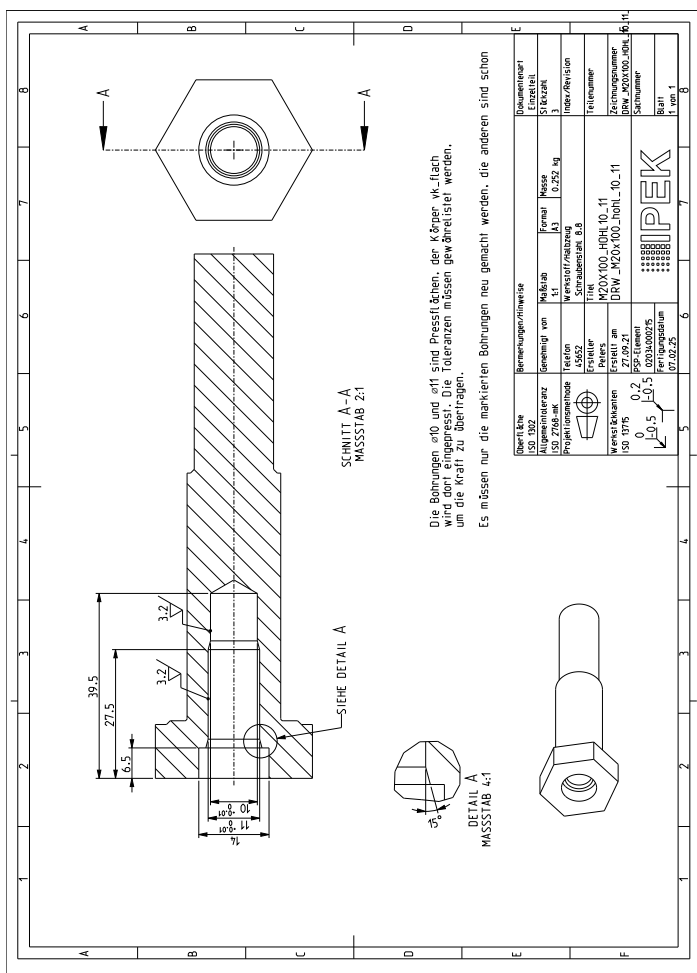


Abbildung B.4: Technische Zeichnung des Prototyps V2.1.



Zeitverläufe der Testfälle

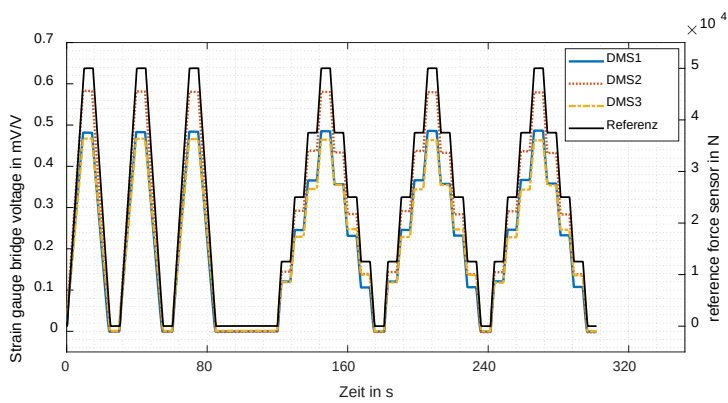


Abbildung B.8: Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V1: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

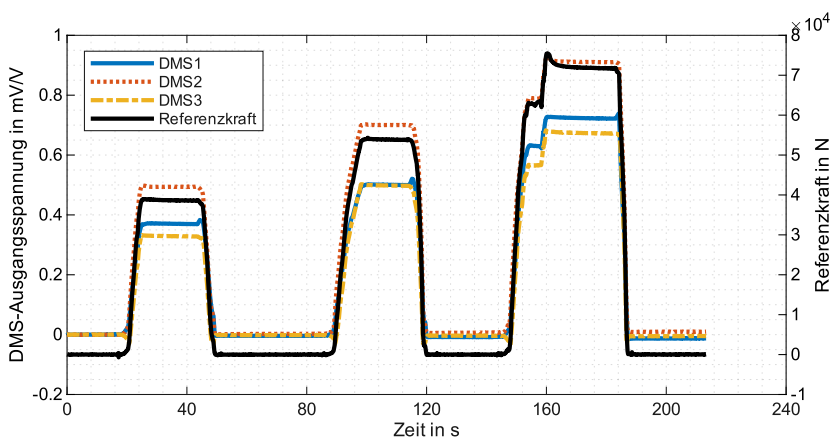


Abbildung B.9: Testfall 2 (Anziehen mit 100 Nm, 150 Nm und 200 Nm) für V1: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit. Variation der DMS-Signale zueinander beobachtbar, durch überlagerte Biegemomente erklärbar. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

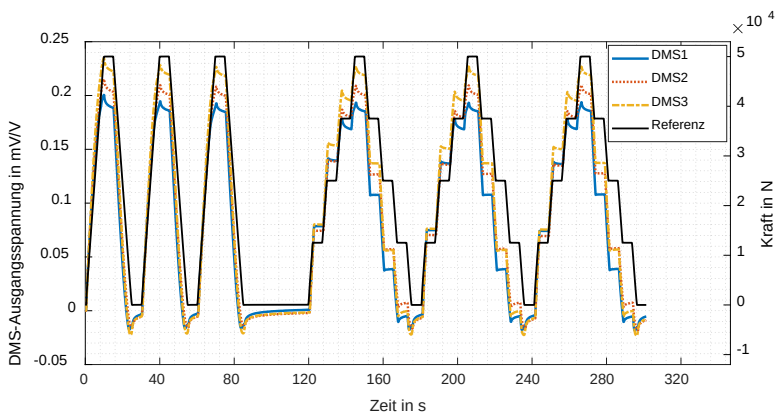


Abbildung B.10: Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V2.1: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit. Abfallende DMS-Spannung aufgrund des durchdruchsenden Pressverbands. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

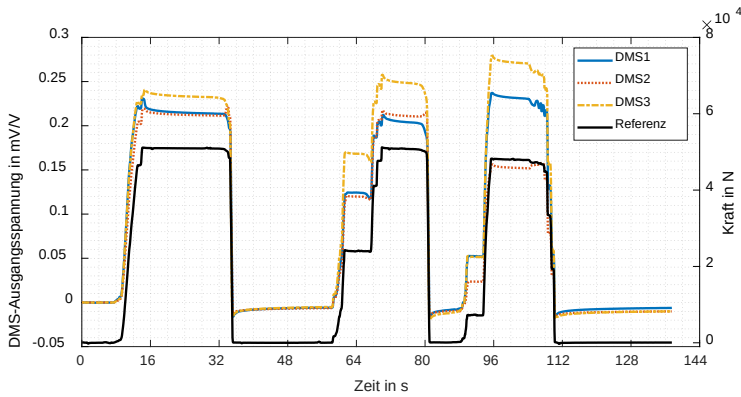


Abbildung B.11: Testfall 2 (Anziehen mit 150 Nm) für V2.1: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit. Abweichungen der Referenzkraft beobachtbar, durch manuelles Anziehen begründbar. Größere Variation der DMS-Signale zueinander beobachtbar, durch überlagerte Biegemomente erklärbar. Abfallende DMS-Spannung aufgrund des durchdrutschenden Pressverbands. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

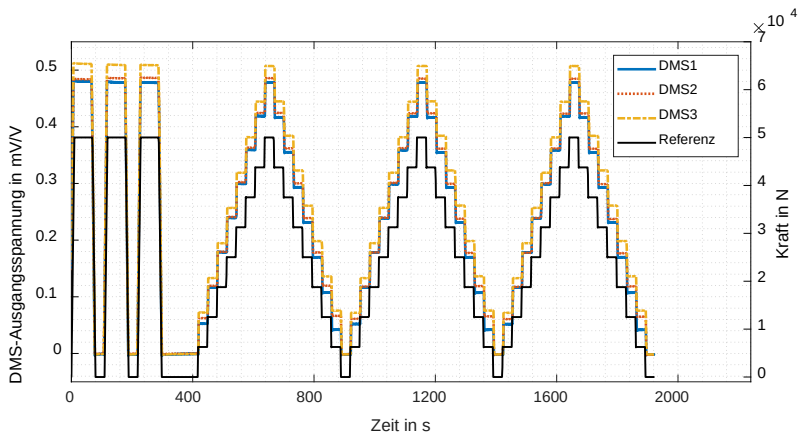


Abbildung B.12: Testfall 1 (Axialbeanspruchung) für V2.2: DMS-Ausgangsspannung über der Zeit. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

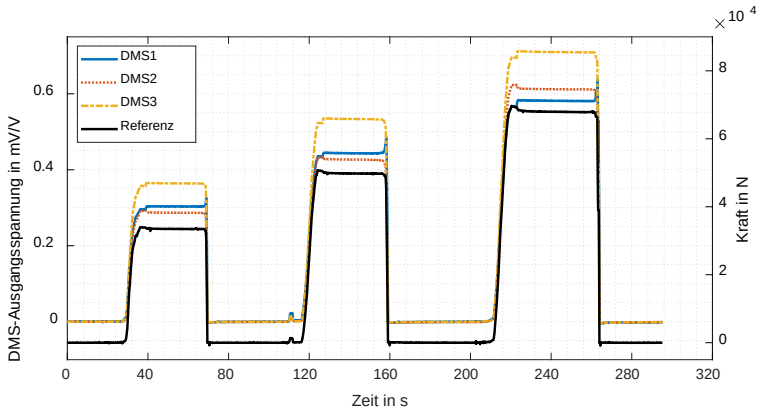


Abbildung B.13: Testfall 2 (Anziehen mit 100 Nm, 150 Nm, 200 Nm) für V2.2: DMS-Ausgangsspannung über Zeit. Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

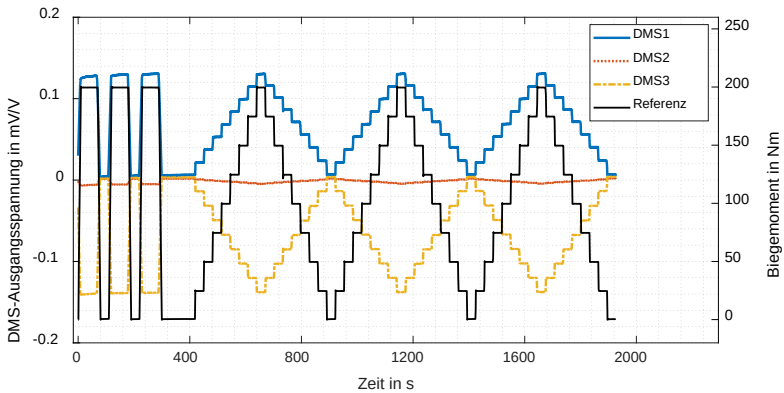


Abbildung B.14: Testfall 3 (Dreipunkt-Biegung aus 33° zu DMS1, Vgl. Abbildung 6.15) für V2.2: DMS-Ausgangsspannung über Zeit. DMS2 liegt nahe der neutralen Faser Abbildung angelehnt an Peters et al. (2026).

Anhang C

**Komplette Liste der Fallstudie zur Entwicklung der
Sensorintegrierenden Schraube**

**Tabelle C.1: Übersicht über die durchgeführten Schritte zum Wissensaufbau;
D: Disziplin, M: mechanisch, S: sensorisch, E: elektronisch**

Nr.	D	Fehlendes Wissen	Ziel und Aktivität	Aufgebautes Wissen
1	M	Kritische Stellen in der Schraube, die von Sensormodul vermieden werden sollen.	Erkunden der kritischen Stellen mittels Recherche.	Kritische Stellen sind die Kerben, Kerbfaktoren (Kapitel 2.2.5).
2	M	Spannungsverlauf an den kritischen Stellen, um initial Gestaltmerkmale festzulegen.	Analytische Berechnungen zum Erkunden der Spannungen in Abhängigkeit des Radius und der Kerbfaktoren.	Spannungsverlauf an den Kerbquerschnitten lassen Rückschlüsse auf Gestaltmerkmale mit geringem Einfluss auf die Spannung zu (Kapitel 5.3.1).
3	M	Einfluss der Gestaltmerkmale des Sensormodulbauraums auf die Spannung im Querschnitt der Kerben.	Eingrenzung der Gestaltmerkmale durch analytische Berechnungen zum Einfluss auf die Spannung.	Zusammenhang des kritischsten Gestaltmerkmals Hohlraumdurchmesser auf die Spannung im Querschnitt der Kerbe (Kapitel 5.3.3).
4	S	Mögliche Sensorkonzepte zur mehraxialen Kraftmessung	Erkunden durch Recherche.	Mindestens drei Dehnungsmessachsen sind erforderlich (Kapitel 2.3.3).
5	S	Geeignete Sensoren für statische Kraftmessungen im Messbereich von über 100 kN.	Eingrenzen durch Recherche.	DMS sind geeignet, Ausschluss von Piezoelementen wegen Drift und FBGS wegen Kosten (Kapitel 2.3.1)
6	S	Berechnung von Axialkraft und Biegemomentvektor aus 3 Dehnungen.	Prüfen durch analytische Berechnungen.	Axialkraft und Biegemomentvektor können aus 3 Dehnungen berechnet werden (Kapitel 2.3.3).
7	E	Mögliche Messschaltungen für DMS.	Erkunden durch Recherche.	Wheatstone'sche Brückenschaltung (Kapitel 2.3.1)

8	E	Geeignete Varianten der Brückenschaltung.	Erkunden durch Recherche.	Halb- oder Vollbrücke zwecks Kompensation zu bevorzugen, Notwendigkeit einer Referenzbrücke (Kapitel 2.3.1).
9	E	Geeigneter ADC und Verschaltung.	Schaltplanerstellung und -Simulation.	ADS1220 für 3 DMS Messungen und 1 Referenzbrücke geeignet (Riehl et al., 2024).
10	S & E	Energieverbrauch der Messschaltung.	Prüfung des Energieverbrauchs mittels eines Modells, das auf dem Schaltplan und Datenblattwerten der verwendeten DMS und elektronischen	Energieverbrauch ist zu hoch, da der Nennwiderstand der DMS mit 120 Ω relativ gering ist. Es werden DMS mit höherem Nennwiderstand benötigt.
11	E	Reales Verhalten der Messschaltung.	Aufbau und empirische Prüfung einer PCB	Reales Verhalten entspricht dem Modell.
12	M & S	Übertragbarkeit der analytischen Berechnungen auf realen Prototyp V1 und sensorisches Verhalten.	Empirische Prüfung mit einfach herstellbarem Prototyp V1.	Berechnungen sind gültig, Messfehler und Sensitivität sind akzeptabel, allerdings Unsicherheit durch die Applikation der gerollten DMS. Flache DMS auf Verformungskörper notwendig (Kapitel 6.3.1).
13	M & S	Auswirkungen der Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale auf das mechanisch- und sensorisch-funktionale Verhalten.	Die analytischen Berechnungen aus 2,3 reichen nicht mehr aus, FE-Modell zur Erkundung der Auswirkung mit allen Gestaltmerkmalen des Sensormodulbauraums.	Gestaltmerkmale Durchmesser sind kritischer als Höhen. Größere Durchmesser führen zu höherem sensorischem und geringerem mechanischem funktionalem Verhalten (Zielkonflikt), Kapitel 5.3.6, 5.4).
14	M & S	Auswahl von Gestaltmerkmalen, die beide Funktionserfüllungen optimieren.	Eingrenzung der Gestaltmerkmale durch Optimierungsfunktion (modellbasiert, numerisch).	Sensormodulbauraum-Gestaltmerkmale werden berechnet, die beide Funktionserfüllungen optimieren und sind verfügbar für die weitere Entwicklung (Kapitel 5.3, 5.4).

15	M & S	Wiedergabetreue des FE-Modells aus 13, 14.	Empirische Prüfung der Dehnungsmessung an ausgewählten Punkten mittels DMS und Vergleich mit FE-Modell.	Die empirischen Daten ähneln dem Modell innerhalb einer tolerierbaren Abweichung (Kapitel 5.3.3, 5.3.5).
16	S	Gestaltmerkmale des Verformungskörpers für 3 DMS-Messachsen	Empirische Erkundung von DMS-Verformungskörpern	Runde Klebeflächen für DMS bergen Gefahr des Ablösens, Ebene Klebeflächen sind anzustreben
17	S	Anzahl an DMS und Verschaltung	Empirische Eingrenzung von DMS-Verformungskörpern	Halbbrücken als T-Rosette pro Achse passen vom verfügbaren Platz und bieten Kompensation von Temperatureffekten.
18	S	Sensorisches funktionales Verhalten des Verformungskörpers	Empirische Prüfung eines DMS-Verformungskörpers	Die Dehnungsmessungen zeigen unterscheidbare Axialkräfte sowie Biegemomente
19	M + S	Einfluss der Montage des Verformungskörpers mittels Pressverband in der Schraube auf das sensorisch-funktionale Verhalten	Empirische Prüfung des Prototyps V2.1.	Die Kennwerte ändern sich nichtlinear und eine Hysterese tritt auf, da die Kraft nicht ausreichend durch den Pressverband übertragen wird. Beschädigung der Pressflächen möglich (Kapitel 6.3.2, 6.3.3)
20	M	Auslegung des Pressverbands unter Fertigungsrestriktionen, sodass ausreichend Kraft übertragen werden kann	Analytisches Eingrenzen	Übermaß kann nicht erhöhbar, Toleranzfelder nicht verkleinerbar, Verformungskörper muss nachgiebiger und Pressflächen getrennt werden.
21	M & S	Kraftübertragung des Pressverbands in Realität.	Empirisches Prüfen des Prototyps V2.2.	Pressverband ausreichend, sensorisches Verhalten gut, nur Sensitivität für Biegung verschlechtert Im Vergleich zu V1 aufgrund des Abstands der DMS zur Mittelachse.

22	S	Messkonzept mit hoher Biegesensitivität	Recherchierendes Erkunden	DMS als Halbbrücke in Biegekonfiguration, vorne und hinten auf Balken.
23	S	Gestaltmerkmale eines Verformungskörpers für hohe Biegesensitivität.	Recherchierendes Eingrenzen	Minimale Breite der Balken, sodass DMS appliziert werden können. Montageverfahren des Verformungskörpers Schrauben und Kleben.
24	S	Unterscheidung zwischen Biegemoment und Axialkraft	Modellbasiertes Eingrenzen	Je nach Durchbiegung der Balken sind Axialkraft und Biegemomente messbar.
25	S	Sensorisches funktionales Verhalten des Verformungskörpers V3	Empirisches Prüfen des Verformungskörpers V3	Unterscheidbarkeit zwischen Axialkraft und Biegemomenten, Messfehler, Sensitivitäten (Herbst et al., 2022)
26	M & S	Einfluss der Montage in der Schraube auf sensorisches Verhalten	Empirisches Prüfen des Prototyps V3	Linearitätsmessfehler gleich, Hysteresemessfehler erhöht (Herbst et al., 2024)
27	E	Verhalten der realen Schaltung mit Dummy-DMS.	Empirisches Prüfen	Rauschen, Energieverbrauch
28	M & E	Einfluss einer metallischen Umgebung auf drahtlose Energie- und Datenübertragung	Empirisches Prüfen	Übertragung mit LoRa gut, mit BLE reduzierte Reichweite in teilweiser metallischer Abschirmung.
29	S & E	Einfluss von Temperaturänderung auf Messsignale.	Empirisches Prüfen	Hoher Einfluss von Temperaturänderungen auf DMS-Messsignale
30	E	Verringerung des Temperatureinflusses auf DMS-Messsignale.	Recherchierendes Erkunden	Einfluss auf Messsignale kann durch Invertieren der Versorgungsspannung reduziert werden, Antennen möglichst nahe am Rand platzieren.
31	S & E	Einfluss von Temperaturänderung auf DMS-Messsignale.	Empirisches Prüfen	Einfluss auf Messsignale wird durch Invertieren der Versorgungsspannung reduziert.

M	Verhalten der		
&	mechanischen,		
32	S sensorischen und	Empirisches Prüfen	Verhalten ähnlich zu
&	elektronischen		Teilergebnissen,
E	Teilergebnisse in		vernachlässigbare
	Kombination		

Beschreibung weiterer Schritte

Schritt 10: Energieverbrauch der Messschaltung prüfen

Schritt 10 ist die erste Integration der Disziplin Elektronik mit der Sensorik. Ausgehend vom Sensorkonzept aus Schritt 6 sowie den elektrischen Bauteilen und dem Schaltplan (Modell) aus Schritt 9 **fehlt** noch **Wissen** über den Energieverbrauch. Dieser ist für die zuverlässige Bereitstellung der Sensorfunktion wichtig. Das **Ziel** ist die Überprüfung des Energieverbrauchs mittels eines Modells, das auf dem Schaltplan und Datenblattwerten der verwendeten DMS und elektronischen Bauteile basiert. Die **Hypothese** lautet: Wenn der Dehnungsmessstreifen (DMS) in Kombination mit der Messelektronik einen bestimmten Grenzwert (aus Energy Harvesting Ansätzen berechnet) nicht überschreitet, dann ist eine dauerhafte Messung möglich, da die Energie schneller gewonnen als verbraucht werden kann. Dazu wird eine modellbasierte Simulation der Schaltung (Schritt 9) mit DMS-Kennwerten (Schritt 6) durchgeführt. Die Hypothese wird verworfen. Das **aufgebaute Wissen**: Der Energieverbrauch mit den ausgewählten DMS ist zu hoch, da deren Nennwiderstand von 120 Ω relativ gering ist. Es werden andere DMS mit höherem Nennwiderstand benötigt, um den Verbrauch zu senken.

Schritt 28: Überprüfung der drahtlosen Daten- und Energieübertragung

Bei der Kombination von Elektronik und Mechanik **fehlt** das **Wissen** über die Auswirkungen des Schraubenmaterials Stahl auf die drahtlose Daten- und Energieübertragung. Daher ist das **Ziel**, diesen Effekt zu prüfen und zu parametrisieren. Die **Hypothese** lautet: Wenn die Antenne im Schraubenkopf nahe der Außenseite montiert wird, können genügend elektromagnetische Wellen übertragen werden, um eine ausreichende Kommunikation und Energieübertragung zu ermöglichen, da die Antenne nur teilweise abgeschirmt ist. Die **Aktivität**: Es werden empirische Messungen einer Breakout-Board-Antenne in einem gefrästen Abschnitt eines Schraubenkopfes als Testing-Objekt mit den aus Schritt 14 eingegrenzten Abmessungen für die Elektronik durchgeführt. Folgendes **Wissen** wurde **aufgebaut**: Es konnte bestätigt werden, dass genügend Energie und Daten

übertragen werden können, wenn der Sender vom Schraubenkopf innerhalb einer bestimmten Entfernung sichtbar ist. LoRa zeigt weniger Reduktion durch teilweise metallische Abschirmung als BLE.

Schritte 29-31: Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der Messung

Nach den erfolgreichen Elektronik-Testing mit Breakout-Boards in Schritt 11 und der Bauraumidentifikation aus Schritt 14 wird eine Leiterplatte entworfen, gefertigt und in Schritt 27 auf ihre elektrischen Eigenschaften wie Leistungsaufnahme und Rauschen bei generierten Eingangssignalen erfolgreich geprüft. Um den Sensor mit der Elektronik zu kombinieren, **fehlt** das **Wissen** über die Wechselwirkung zwischen den DMS und den Messeigenschaften der Elektronik, wobei die Temperaturabhängigkeit eine große Rolle spielt. Das **Ziel** ist die Prüfung der Temperaturabhängigkeit. Die **Hypothese** lautet: Wenn die Sensoren und die Elektronik einer Temperaturänderung ohne Laständerung ausgesetzt werden, ändert sich das Messsignal nicht. Dies wird in der empirischen Durchführung von Messungen mit dem Teilsystem der Elektronik (Leiterplatte) mit Dummy-DMS (Festwiderstände) in der Klimakammer überprüft. Die Hypothese wird verworfen, da eine nicht vernachlässigbare Temperaturdrift auftritt (Riehl, Herbst et al., 2025). In Schritt 30 werden Strategien zur Optimierung der Leiterplatten hinsichtlich einer geringeren Temperaturabhängigkeit recherchiert und in Schritt 31 erneut geprüft. Der letzte Schritt 32 ist eine Kombination aus allen Bereichen. Der Sensor und die Elektronik werden in die Schraube integriert. Ähnlich wie in den Schritten 19, 21 und 26 wird das Verhalten der mehraxialen Messungen analysiert, wobei dieses Mal der Einfluss der Elektronik auf die Messeigenschaften sowie mögliche Änderungen der Fehler oder der Sensitivität untersucht wird.