

Forschungsbericht 2023-05

**Entwurfsmethodik für adaptive
Strukturen mit multilateralen
Konformitätskriterien**

Christian Behr

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau
Braunschweig



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2023-05

Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien

Christian Behr

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau
Braunschweig

103 Seiten
77 Bilder
9 Tabellen
45 Literaturstellen



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2023-05
Erscheinungsjahr 2023

DOI: <https://doi.org/10.57676/nnwg-6y40>

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ – Keine kommerzielle Nutzung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland zugänglich.

Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/legalcode> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Lizenz



Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland

Adaptronik, Multifunktionswerkstoffe, Piezokeramiken, multilaterale Konformität

Christian Behr
DLR, Institut für Systemleichtbau, Braunschweig

Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien

Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Es wird eine Methode zum Entwurf von formvariablen, hochbelasteten Strukturen vorgestellt, die die Restriktionen, die sich aus den multilateralen Anforderungen an Festigkeit, Steifigkeit, Gewicht, Auslenkung, Bauraum und Robustheit ergeben, berücksichtigt. Multifunktionale Strukturen, die mehrere Funktionen in einem Bauteil vereinen, bieten häufig komplexe Anforderungen an Struktur und integrierte Funktionskomponenten. Am Beispiel einer dynamisch aktuierten Ausblaslippe eines Wasserkanalmodells sollen alle multilateralen Konformitäten identifiziert und deren gegenseitige Interaktion durch Kopplungsfaktoren beschrieben und bei der Auslegung berücksichtigt werden. Die Auswahl und Integration der benötigten Aktuatorik bilden die Grundlage für das Konzept der adaptiven Ausblaslippe. Das Design der Ausblaslippe wird durch eine Finite-Elemente-Analyse bestimmt. Die berechnete Auslenkung und Blockierkraft werden an Funktionsmustern verifiziert. Mögliche Beschichtungen werden in Auslagerungsversuchen, in einer Klimakammer und in einem Wasserbad auf ihre Diffusionseigenschaften untersucht. Abschließend werden Funktionsmuster der Ausblaslippe unter realen harschen Umgebungsbedingungen auf Funktionskonformität und Robustheit getestet.

adaptronics, smart materials, piezoceramics, multilateral conformity

(Published in German)

Christian Behr
German Aerospace Center (DLR), Institute of Lightweight Systems, Braunschweig

Design methodology for adaptive structures with multilateral conformity criteria

Doctoral Thesis Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

This work presents a methodology for the design of shape adaptable, highly stressed structures, taking into account the restrictions, which result from the multilateral requirements for strength, rigidity, weight, deflection, installation space and robustness. Multifunctional structures that combine several functions in one component often put complex requirements on structure and integrated functional components. Using the example of a dynamically actuated blowing slot of a water tunnel model, all multilateral conformities and their mutual interaction described by coupling factors are to be identified and taken into account for the design. The selection and integration of the required actuators are the basis for the concept of the adaptive blowing slot. The design of the blowing slot is determined by a Finite-Element-Analysis. The calculated deflection and blocking force are verified with functional models. The diffusion properties of different coatings are evaluated by exposure tests in a climatic chamber and in a water bath. Finally, the functional conformity and robustness of the blowing slot are verified with functional models under real harsh environmental conditions.

TU Braunschweig – Niedersächsisches
Forschungszentrum für Luftfahrt

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Forschungsbericht 2023-02

**Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit
multilateralen Konformitätskriterien**

Christian Behr

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau
Braunschweig

Diese Veröffentlichung wird gleichzeitig in der Berichtsreihe „NFL
- Forschungsberichte“ geführt.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für Ma-
schinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu
Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Behr

geboren am 4. März 1983 in Engelskirchen

eingereicht am: 08.07.2021
Disputation am: 23.02.2022

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs
Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Monner

Das Wichtigste ist, dass man nicht aufhört zu fragen.

Albert Einstein
(Physiker, 1879–1955)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Funktionsintegration und Adaptronik (iAF) an der Technischen Universität Braunschweig, sowie am Institut für Systemleichtbau am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Braunschweig. Sie wurde im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs 880 – Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge* durchgeführt.

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius bedanken. Sie haben mich in den letzten Jahren auf meinem Weg begleitet und mir in regelmäßigen Diskussionen wertvolle Hinweise und Impulse gegeben. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner für das Interesse an meiner Dissertation und seine Arbeit als Gutachter. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Sebastian Geier für seine Hinweise zur schriftlichen Ausarbeitung dieser Dissertation. Mein Dank gilt auch meinem ehemaligen Abteilungsleiter am DLR Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Experimente.

Von ganzen Herzen danken möchte ich meinen Eltern und meiner Schwester, die mich seit Lebzeiten unterstützen.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand einer adaptiven Tragflügelhinterkante eine Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien erarbeitet. Am Beispiel einer dynamisch aktuierbaren Ausblaslippe eines Wasserkanalmodells sollen alle multilateralen Konformitäten identifiziert und deren gegenseitige Interaktion durch Kopplungsfaktoren beschrieben und bei der Auslegung berücksichtigt werden. Manche Anforderungen sind konträr, z. B. wird einerseits eine hohe Steifigkeit der Ausblaslippe gefordert um auch unter aerodynamischen Belastungen eine gewisse Konturkonformität zu gewährleisten, andererseits soll die Ausblaslippe flexibel sein um bei Aktuierung eine hohe Auslenkung generieren zu können um eine effiziente Anströmung der Coanda-Klappe zu ermöglichen. Hier soll über eine Gewichtung der Kriterien (Steifigkeit, Auslenkung usw.) eine Priorisierung der Anforderungen erfolgen. Das Ziel bei der Berücksichtigung von Kopplungen der Konformitätskriterien ist die Optimierung des Gesamtsystems (Ausblaslippe).

Multifunktionale Strukturen, die mehrere Funktionen in einem Bauteil vereinen, bieten häufig komplexe Anforderungen an Struktur und integrierte Funktionskomponenten (z. B. Aktuatorik, Sensorik, Energiespeicher usw.). In der vorliegenden Arbeit bildet die Ausblaslippe die adaptive Struktur, die sowohl die auftretenden mechanischen Lasten trägt als auch ihre Form zur Strömungsbeeinflussung verändern kann. Zudem muss die Ausblaslippe, mit der strukturkonform integrierten Aktuatorik und Sensorik, mit einer diffusionsdichten Beschichtung gegen harsche Umgebungseinflüsse versiegelt werden. Die Auswahl und Integration der benötigten Aktuatorik bilden die Grundlage für das Konzept der adaptiven Ausblaslippe. Das Design der Ausblaslippe wird durch eine FE-Analyse bestimmt. Die berechnete Auslenkung und Blockierkraft werden an Funktionsmustern verifiziert. Mögliche Beschichtungen werden in Auslagerungsversuchen, in einer Klimakammer und in einem Wasserbad, auf ihre Diffusionseigenschaften untersucht. Abschließend werden Funktionsmuster der Ausblaslippe unter realen harschen Umgebungsbedingungen auf Funktionskonformität und Robustheit getestet.

Die in dieser Arbeit angewendete Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien soll eine Grundlage für die Auslegung zukünftiger formvariabler Strukturen bilden.

Abstract

Within the scope of this work, based on an adaptive wing trailing edge a design methodology for adaptive structures with multilateral conformity criteria is developed. Using the example of a dynamically actuated blowing slot of a water tunnel model, all multilateral conformities and their mutual interaction described by coupling factors are to be identified and are taken into account for the design. Some requirements are contrary, e.g. on the one hand, to ensure a certain contour conformity even under aerodynamic loads a high rigidity of the blowing slot is required, on the other hand, the blowing slot should be flexible to generate a high deflection to enable an efficient flow to the Coanda flap by actuation. The requirements should be prioritized by weighting factors for the criteria (stiffness, deflection, etc.). The goal is the optimization of the overall system (blowing slot) by considering the coupling of the conformity criteria.

Multifunctional structures that combine several functions in one component often put complex requirements on structure and integrated functional components (e.g. actuators, sensors, energy storage, etc.). In the present work, the blowing slot forms the adaptive structure that carries mechanical loads and at the same time changes its shape for flow control. In addition, the blowing slot with the structure integrated actuators and sensors must be sealed with a diffusion-proof coating against harsh environmental influences. The selection and integration of the required actuators are the basis for the concept of the adaptive blowing slot. The design of the blowing slot is determined by a FE analysis. The calculated deflection and blocking force are verified with functional models. The diffusion properties of different coatings are evaluated by exposure tests in a climatic chamber and in a water bath. Finally, the functional conformity and robustness of the blowing slot are verified with functional models under real harsh environmental conditions.

The design methodology used in this thesis for adaptive structures with multilateral conformity criteria is intended to provide a basis for the design of future shape adaptable structures.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Nomenklatur	viii
1 Einleitung	1
2 Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen unter den Gesichtspunkten der multilateralen Konformität	2
2.1 These.....	3
2.2 Ziel der Arbeit	3
2.3 Gewichtung der Konformitätskriterien mittels Kopplungsmatrix.....	4
2.3.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)	5
2.3.2 VDI Richtlinie 2225 – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.....	9
2.4 Multilaterale Konformität als Bewertungsmethode für die funktionskonforme Gestaltung.....	11
3 Fallstudie zur multilateralen Konformität	13
3.1 Multilaterale Konformität in der Luftfahrt.....	14
4 Stand der Forschung zur funktionskonformen Gestaltung adaptiver Strukturen	24
4.1 Wandlerwerkstoffe als Grundlage für adaptive Strukturen	24
4.2 Grundlagen piezoelektrischer Keramiken	25
4.3 Degradation piezoelektrischer Aktuatoren	35
5 Entwurf hochbelasteter adaptiver Strukturen für harsche Umgebungsbedingungen	36
5.1 Wasserkanalmodell	36
5.2 Anforderungsanalyse	36
5.3 Aktuatorkonzept	38
5.4 Charakterisierung des Aktuatorkonzepts	43
5.4.1 Bestimmung der freien Dehnung der Multilayerstacks	43
5.4.2 Bestimmung der Blockierkraft der Multilayerstacks	45

5.4.3	Bestimmung der freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe	47
5.4.4	Bestimmung der Blockierkraft der aktuierten Ausblaslippe	49
5.4.5	Bestimmung der Steifigkeit der passiven Ausblaslippe	50
5.4.6	Schubverluste bei der Dehnungsübertragung.....	51
5.4.7	Bestimmung des Arbeitspunktes der aktuierten Ausblaslippe.....	54
5.4.8	Verifizierung des FE-Modells	55
5.4.9	Untersuchung eines geeigneten Messprinzips zur Auslenkungsbestimmung der Ausblaslippe im Wasserkanal	58
5.4.10	Untersuchung der Diffusionseigenschaften von DuraAct Power Flächenwandlern.....	60
6	Diffusionsbarrieren für Piezokeramiken für einen Unterwasserbetrieb	63
6.1	Beschichtungsmethoden	64
6.2	Anforderungen an die Beschichtung	65
6.3	Auswahl geeigneter Beschichtungen.....	66
6.4	Herstellung von beschichteten Faserverbundprobekörpern.....	68
6.4.1	Lackierung mit Acryl-Schutzlack.....	68
6.4.2	Beschichtung mit Flüssiggummi.....	69
6.4.3	Lackierung mit 2-Komponenten-Teerepoxyd.....	70
6.4.4	Sputtern mit Gold	71
6.5	Auslagerungsversuche von beschichteten Faserverbundprobekörpern.....	73
6.6	Herstellung von beschichteten Piezokompositen.....	77
6.6.1	Atomlagenabscheidung mit Al ₂ O ₃	78
6.7	Bestimmung der freien Auslenkung der beschichteten Aktuatoren.....	80
6.8	Auslagerungsversuche von beschichteten Piezokompositen	82
6.9	Auslagerungsversuche der beschichteten Ausblaslippe	84
6.10	Untersuchung der abrasiven Wirkung der Seeding-Partikel im Wasserkanal auf die Diffusionsbeschichtung.....	88
6.11	Test eines finalen Lippensegments unter realen Wasserkanalbedingungen.....	89
6.12	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	91
7	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis.....	95
	Anhang.....	99

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Prinzipskizze der Ausblaslippe [2]	2
Abb. 2.2: Bewertungsschema von multilateralen Konformitätskriterien	4
Abb. 2.3: Hierarchische Struktur des Bewertungsprozesses	5
Abb. 3.1: Verhalten eines Biegebalkens unter Last	13
Abb. 3.2: Zeichnung aus Lilienthals Buch <i>Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst</i> [10]	14
Abb. 3.3: Flügelverwindung beim Wright Flyer [11]	15
Abb. 3.4: Konzepte eines formvariablen Tragflügels [12]	15
Abb. 3.5: Hauptbaugruppen eines modernen Tragflügels [13]	16
Abb. 3.6: Funktionsmuster einer formvariablen Flügelvorderkante des DLR [20]	18
Abb. 3.7: FlexFoil™, flexible spaltfreie Hinterkante von FlexSys Inc. [21]	18
Abb. 3.8: Tragflügelkonzept des Referenzflugzeugs im SFB 880 [22]	19
Abb. 3.9: Referenzkonfiguration des SFB 880 Flugzeugentwurfs [2]	20
Abb. 3.10: Gegenüberstellung von unterschiedlichen Hochauftriebskonzepten [2]	21
Abb. 3.11: Hochauftriebskonzept SFB 880 [20]	22
Abb. 3.12: Prinzip der Ausblaslippe [2]	23
Abb. 4.1: Leistungsdichte über Effizienz und Frequenz von Funktionswerkstoffen [25] ..	24
Abb. 4.2: Elementarzelle eines PZT-Kristalls [3]	25
Abb. 4.3: Schematisches Phasendiagramm von PZT [3]	26
Abb. 4.4: Unpolarisierte (links) und polarisierte Domänenstruktur (rechts) eines Kristallits [3]	26
Abb. 4.5: Dielektrische Hysterese [27]	27
Abb. 4.6: Schmetterlingskurve (bipolare Hysterese) [28]	28
Abb. 4.7: Spannungs-Dehnungskurve (Hysterese) einer Piezokeramik	28
Abb. 4.8: Piezoelektrischer Effekt (oben) und inverser piezoelektrischer Effekt (unten) [26]	31
Abb. 4.9: Piezoelektrische richtungsabhängige Teileffekte [30]	31
Abb. 4.10: d33-Aktuator mit Kammelektroden [30]	32
Abb. 4.11: Aktuator arbeitet gegen eine geringe Federsteifigkeit [31]	33
Abb. 4.12: Aktuator arbeitet gegen eine große konstante Last [31]	34
Abb. 4.13: Aktuator arbeitet gegen einen Druck [31]	34

Abb. 4.14: a) Schematische Darstellung des Degradationsprozesses; b) Dendritenwachstum in einer Piezokeramik [31]	35
Abb. 5.1: FE-Analyse einer Monomorph- und einer Trimorphkonfiguration.....	40
Abb. 5.2: Zeichnung der Ausblaslippe	40
Abb. 5.3: a) Standard PICMA® Multilayerstack, b) Elektrodenfinger und bearbeiteter Multilayerstack (rechts)	41
Abb. 5.4: Zeichnung der Ausblaslippe bestehend aus mehreren Segmenten.....	42
Abb. 5.5: Einzelnes Segment der Ausblaslippe	42
Abb. 5.6: Vergleich der freien Dehnung der einzelnen Aktuatoren.....	44
Abb. 5.7: Vergleich der freien Auslenkung der einzelnen Aktuatoren	44
Abb. 5.8: Kurzschluss in der Piezokeramik.....	45
Abb. 5.9: Vergleich der Blockierkraft zweier baugleicher Aktuatoren.....	46
Abb. 5.10: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der freien Auslenkung	47
Abb. 5.11: Aktive Auslenkung von Ober- und Unterseite der Ausblaslippe	48
Abb. 5.12: Vergleich der freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe	48
Abb. 5.13: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der Blockierkraft.....	49
Abb. 5.14: Vergleich der Blockierkraft der aktiven Ausblaslippe	50
Abb. 5.15: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der Steifigkeit.....	50
Abb. 5.16: Vergleich der Steifigkeit der passiven Ausblaslippe	51
Abb. 5.17: Mikroskopaufnahme der Klebschicht	52
Abb. 5.18: Dehnungsverlauf zwischen Aktuator und Substrat	53
Abb. 5.19: Arbeitsdiagramm der Ausblaslippe	54
Abb. 5.20: FE-Analyse der Ausblaslippe unter Last.....	55
Abb. 5.21: a) Schaubild des Versuchsaufbaus zur Bestimmung eines geeigneten Messprinzips der Lippenauslenkung; b) Anordnung von Hall-Sensor (grün) und Magnet (rot) im Wasserkanalmodell.....	59
Abb. 5.22: Validierung der Messgenauigkeit des Hall-Sensors mittels Lasertriangulation.....	59
Abb. 5.23: Schematischer Aufbau von DuraAct Flächenwandlern [31]	60
Abb. 5.24: Gewichtszunahme und Änderung der Kapazität der Aktuatoren über Zeit....	61
Abb. 5.25: Vergleich der freien Auslenkung der drei konditionierten Proben mit drei Referenzproben	62
Abb. 6.1: Schematische Darstellung des Magnetronsputterns [42]	72
Abb. 6.2: Vergrößertes Schlibfbild einer besputterten Probe	73
Abb. 6.3: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Wasserbad bei 23 °C	74
Abb. 6.4: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Wasserbad bei 50 °C	75
Abb. 6.5: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Klimaprüfstand bei 70 °C und 85 % rel. Luftfeuchtigkeit	76

Abb. 6.6: Schematische Darstellung eines ALD-Reaktionszyklus [45]	79
Abb. 6.7: Dehnungshysterese der unterschiedlich beschichteten Aktuatoren	81
Abb. 6.8: Lebensdauer der Aktuatoren unter Wasser mit (ausgefüllt) und ohne (schraffiert) Last	83
Abb. 6.9: Lebensdauer der Ausblaslippe im Wasserbad mit unterschiedlichen Diffusionsbarrieren.....	85
Abb. 6.10: Elektrischer Kurzschluss zwischen Aktuatorelektrode und Goldbeschichtung.....	86
Abb. 6.11: Ausblaslippe mit mehrschichtiger Diffusionsbarriere.....	86
Abb. 6.12: Freie Auslenkung der Lippenspitze; blau) Lippensegment mit applizierten Aktuatoren; grün) Lippensegment mit Polymerbeschichtung; rot) Lippensegment mit Polymerbeschichtung und applizierter Metallfolie	87
Abb. 6.13: a) Einbauposition im Wasserkanal; b) Probekörper	88
Abb. 6.14: Mikroskopaufnahme der Goldschicht a) vor und b) nach dem Test.....	88
Abb. 6.15: Testaufbau zur Bestimmung der Auslenkung der Ausblaslippe unter realen Wasserkanalbedingungen mit Wasserausblasung	89
Abb. 6.16: Reduzierte Auslenkung der Ausblaslippe aufgrund des Druckanstieges beim Schließen des Ausblasespaltes	90
Abb. 6.17: Arbeitsdiagramm zur Bestimmung des Arbeitspunktes der Ausblaslippe unter realen Wasserkanalbedingungegn	90
Abb. 6.18: Grafische Darstellung der Kopplungsfaktoren auf dem Einheitskreis.....	93
Abb. C-1: Gewichtszunahme der Referenzproben im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen	101
Abb. C-2: Gewichtszunahme der Proben mit Goldbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen	101
Abb. C-3: Gewichtszunahme der Proben mit Teerepoxidbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen	102
Abb. C-4: Gewichtszunahme der Proben mit Acryllackbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen	102
Abb. C-5: Gewichtszunahme der Proben mit Gummibeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen	103

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: 9-Punkte-Skala für die Paarvergleiche [5].....	5
Tab. 2.2: Beispiel einer Präferenzmatrix zur Bestimmung von Kopplungsfaktoren.....	10
Tab. 5.1: Anforderungen an die Ausblaslippe für ein Wasser- und ein Windkanalmodell.....	37
Tab. 5.2: Einfluss der Randbedingungen auf Dehnung und Blockierkraft im FE-Modell.....	56
Tab. 6.1: Übersicht über Beschichtungsverfahren, unterschieden nach Aggregatzustand des Beschichtungsstoffes unmittelbar vor dem Beschichtungsvorgang.....	65
Tab. 6.2: Anforderungsliste für die Aktuatorik.....	66
Tab. 6.3: Prozentuale Gewichtszunahme der Proben bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen	77
Tab. 6.4: Ergebnisse der Dehnungsmessung	82
Tab. 6.5: Lebensdauer und Lastwechsel der belasteten Aktuatoren	84

Nomenklatur

Abkürzungen

ADIF	Adaptiver Flügel
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVW	Faserverbundwerkstoff
GFK	Glasfaser verstärkter Kunststoff
PIV	Particle Image Velocimetry
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
SADE	Smart High Lift Devices for Next Generation Wings
SARISTU	Smart Intelligent Aircraft Structures
SFB	Sonderforschungsbereich

Formelzeichen

A	Fläche
\dot{A}	Ängström
b	Breite
C	Kapazität
D_i	dielektrische Verschiebung
d	charakteristische Länge
$d_{k\lambda}$	piezoelektrische Ladungskonstante (auch Verzerrungskoeffizient genannt)
Δ	Differenz
E	Elastizitätsmodul
E_k	elektrische Feldstärke
$\varepsilon_{k\lambda}$	relative Dehnung
ε_r	remanente Dehnung
ε_0	Permittivität im Vakuum
ε_{ki}^σ	Permittivität
ε_a	Dehnung der Piezokeramik
ε_λ	freie Dehnung der Piezokeramik
ε_s^s	Dehnung am Übergang zwischen Substrat und Klebschicht

F	Kraft
F_B	Blockierkraft
$G_k G_k$	Schubmodul
Γ	Schubverlustfaktor
h	Höhe
$I_{el.}$	elektrischer Strom
I	Flächenträgheitsmoment
k	Federkonstante
L	Länge des Biegeelements
l	Länge
l_0	Ausgangslänge
N	Anzahl Merkmale
$N_{Prä}$	Anzahl Vergleiche
η	dynamische Viskosität
P	Polarisation
P_r	remanente Polarisation
Ψ	Steifigkeitsverhältnis
R	elektrischer Widerstand
Re	Reynoldszahl
ρ	Dichte
$s_{\mu\lambda}^E$	Elastizitätskonstante
σ_μ	mechanische Spannung
t	Zeit
t_a	Aktuatordicke
$t_{Elektrode}$	Elektrodenabstand
t_k	Klebschichtdicke
t_s	Substratdicke
T_c	Curie-Temperatur
U	elektrische Spannung
u	Auslenkung
u_0	freie Auslenkung
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
ν	kinematische Viskosität
W	Arbeit, Energie
w	Kopplungsfaktor
X	Beschichtungsdicke
x	Kriterium
y	Anforderung
z	Gesamtsystem

1 Einleitung

Seit den Anfängen der Luftfahrt stehen Forscher vor der Herausforderung, die aerodynamischen Profile von Luftfahrzeugen dem jeweiligen Flugzustand der einzelnen Phasen einer Flugmission optimal anzupassen, um für eine optimale Effizienz einen gewünschten Strömungszustand zu erreichen. Eines der geläufigsten Beispiele hierfür sind die Vorflügel (slats) und Landeklappen (flaps) von Verkehrsflugzeugen, mit denen sich eine Anpassung des Flügels an den Flugzustand mit niedrigen Geschwindigkeiten erreichen lässt.

Eine eingehende Analyse heutiger Verkehrsflugzeuge ergibt einen zukünftigen Bedarf für Hochauftriebssysteme, der nicht durch die derzeitige vorherrschende, evolutionäre Technologieentwicklung abgedeckt werden kann. Dieses gilt vor allem in den Bereichen der Lärminderung und der verbesserten Skalierbarkeit der Leistungsparameter von Hochauftriebssystemen bei Start- und Landung. Längerfristig führen diese Anforderungen zur Entwicklung der technologischen Grundlagen für ein neues Segment ziviler, lärmarmen Verkehrsflugzeuge für kurze Start- und Landebahnen, das die Integration stadtnaher Flughäfen in die zukünftige Verkehrsinfrastruktur der Industriegesellschaft ermöglicht. Für künftige Verkehrsflugzeuge mit aktiver Strömungsbeeinflussung besteht der Bedarf, große, komplex geformte Flächen mit Sensorik und Aktuatorik auszustatten. Die genaue Kenntnis und die Beeinflussung der Strömung z. B. an den Vorderkanten und Oberflächen von Tragflügeln sowie innerhalb von Spalten und Kanälen bietet ein enormes Potential für zukünftige, effiziente Luftfahrzeuge. Anforderungen an solche adaptiven Systeme sind z. B. eine hohe Oberflächengüte der umströmten Fläche, hohe Zuverlässigkeit sowie einfache, kosteneffektive Integration in komplex gekrümmte Oberflächen. Gegenwärtig werden hierfür Sensorik und Aktuatorik getrennt voneinander und als Einzelkomponenten betrachtet, wodurch die Erfüllung der zuvor genannten Anforderung schwierig bis unmöglich wird.

Einen Ansatz bietet die Adaptronik in Kombination mit der Faserverbundtechnologie und Mikrosystemtechnik. Damit können kompakte und hochintegrale, aber dennoch großflächige Systeme realisiert werden. Damit ist es möglich, Strömungsverhältnisse während des Betriebes, d. h. an Referenzprofilen im Wasser- und Windkanal bzw. später während des Fluges, sensorisch zu erfassen und mit Hilfe von geeigneten Aktuatoren zu beeinflussen. Die Auslegung und Integration solcher Systeme erfordern eine neue Entwurfsmethodik, die hier am Beispiel einer adaptiven Tragflügelhinterkante erarbeitet werden soll.

2 Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen unter den Gesichtspunkten der multilateralen Konformität

Bei dem Ansatz mikrotechnische Systeme mit der Faserverbundtechnologie zu verknüpfen werden sensorische Mikrosysteme während des Faserverbundherstellungsprozesses in großer Zahl in einen flexiblen Werkstoff in den Lastpfad eingebettet und können beispielsweise mit piezoelektrischen Aktuatoren kombiniert werden. Die funktionskonforme Integration solcher Komponenten in hoch belastete Faserverbundstrukturen stellt die Grundlage für eine hochverdichtete Funktionalität zukunftsweisender Flugzeugstrukturen dar. Die Auslegung hochbelasteter, formvariabler, umströmter Strukturen, wie z. B. einer adaptiven Tragflügelhinterkante, ist eine ingenieurwissenschaftliche Herausforderung. Etablierte Entwurfsmethoden adaptiver Systeme berücksichtigen zumeist bilaterale Wechselwirkungen wie z. B. von Systemfunktion und –gestalt [1].

Die Integration mikrotechnischer Systeme, eingeschränkter Bauraum, hohe Lasten und die Adaption der Struktur an sich ändernde Umgebungsbedingungen stellen hingegen multilaterale Konformitätsanforderungen an das Gesamtsystem.

Am Beispiel einer dynamisch aktuierten Ausblaslippe (Abb. 2.1) werden die für die Umsetzung einer solchen Methodik erforderlichen Erkenntnisse erarbeitet und demonstriert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Entwurfsmethode zur Auslegung hoch beanspruchter Faserverbundstrukturen mit integrierten Funktionskomponenten abgeleitet.

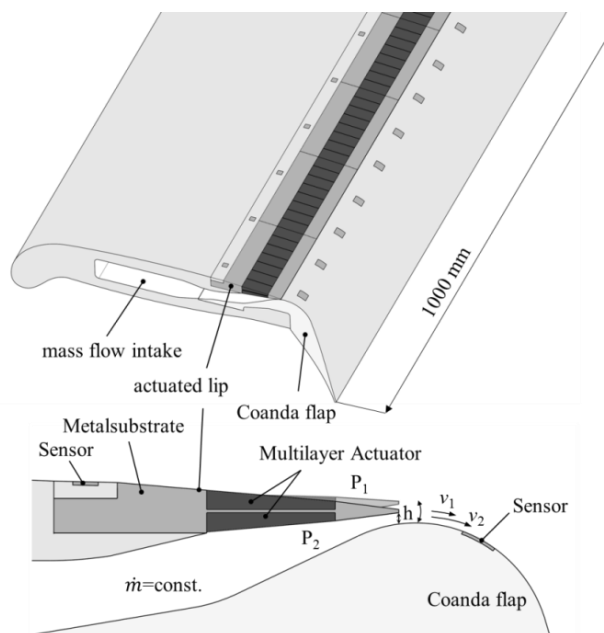


Abb. 2.1: Prinzipskizze der Ausblaslippe [2]

2.1 These

Die Herausforderung beim Entwurf von aerodynamischen, formvariablen Profilen besteht in der Herstellung der Funktionskonformität zwischen der erforderlichen Steifigkeit für ausreichende Konturtreue bei äußeren Lasten und der aktiven Verformung des Profils zur gewünschten Strömungsbeeinflussung. Durch eine strukturkonforme Integration von Funktionskomponenten in lasttragende Strukturen, sollen Komponente und Struktur so aufeinander abgestimmt werden, dass weder das Gewicht der Struktur noch die Funktionalität des Gesamtsystems negativ durch die Multifunktionalisierung beeinflusst werden. Aus dem Anspruch der Multifunktionalität entsteht die Forderung nach Strukturkonformität für adaptive Systeme [3, Zitat, Sinapius: Adaptronik, S. 2], welche um die multilateralen Konformitätsanforderungen aus allen Strukturfunktionen erweitert werden muss, um die teilweise konträren Anforderungen schon im Entwurfsprozess berücksichtigen zu können. Auf dieser Aufgabenstellung basierend, wird die dieser Arbeit zugrundeliegende zentrale These formuliert:

These

Mit Hilfe von Kopplungskriterien, die die Wechselwirkungen zwischen konträren Anforderungen im Entwurf adaptiver Strukturen abbilden, lassen sich diese im Sinne einer multilateralen Konformität harmonisieren. Durch die Überführung der einzelnen Kopplungsfunktionen in eine Kopplungsmatrix kann eine Bewertung der Konformität des Gesamtsystems durchgeführt werden.

2.2 Ziel der Arbeit

Zur Verifikation der Thesen wird eine methodische Vorgehensweise für den Entwurf einer funktionskonformen, adaptiven Ausblaslippe entwickelt. Ziel ist die Bereitstellung einer allgemeinen Vorgehensweise für den schrittweisen Entwurf von adaptiven Strukturen unter der Berücksichtigung von Restriktionen, die sich aus den multilateralen Anforderungen an Festigkeit, Steifigkeit, Gewicht, Auslenkung, Bauraum und Robustheit ergeben. Aufgrund der starken Wechselwirkung der einzelnen Anforderungen untereinander ist eine Technologiebewertung unerlässlich, um die größtmögliche Schnittmenge innerhalb des Lösungsraums zu finden. Hierfür muss zunächst ein adäquates Bewertungsschema gefunden werden, welches eine qualitative Aussage über die Erfüllung der teilweise konträren Anforderungen zulässt.

Ein mögliches Bewertungsschema wird an Abb. 2.2 erläutert. Trägt man die Konformitätskriterien in gleichen Abständen auf einen Einheitskreis ein, entsteht ein regelmäßiges Polygon. Als Lösungsraum bietet sich der Flächeninhalt des Polygons an, wobei der maximal erreichbare Flächeninhalt des Polygons das Optimum darstellt. Die Bewertung der unterschiedlichen Konzepte erfolgt relativ zueinander, wobei die Mindestanforderungen der einzelnen Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass die für die unterschiedlichen Konformitätskriterien jeweils beste Lösung auf dem Einheitskreis bei 1 liegt und alle anderen Konfigurationen relativ dazu bewertet werden. Erreicht z. B. eine zweite Konfiguration nur ein Viertel einer bestimmten Konformität der ersten Variante,

wird der entsprechende Wert bei 0,25 eingetragen. Die hierbei entstehende Fläche ermöglicht nun eine qualitative Aussage über die Erfüllung der multilateralen Konformitätskriterien von verschiedenen Konfigurationen. In der Auslegung werden üblicherweise funktionskritische Kriterien (z. B. Fest- und Mindestanforderungen) stärker berücksichtigt als funktionsunkritische Systemanforderungen (Wunschanforderungen). Dies kann durch eine Gewichtung einzelner Kriterien in der Bewertung berücksichtigt werden.

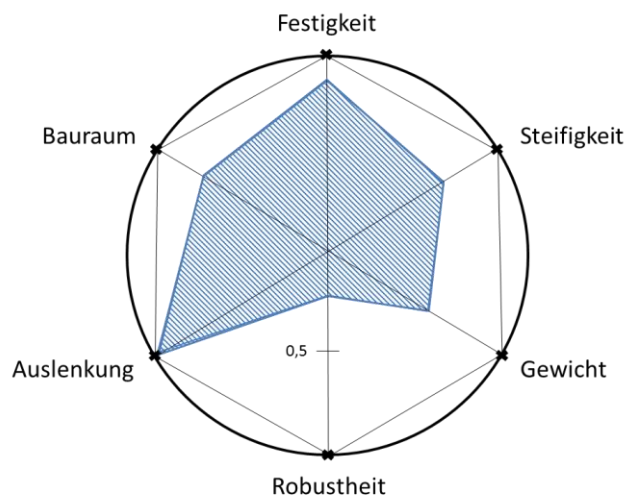


Abb. 2.2: Bewertungsschema von multilateralen Konformitätskriterien

Um eine Gesamtbewertung der Konformität zu erlangen, können die einzelnen Zielfunktionen als Kopplungsmatrix zusammengefasst werden (Kapitel 2.3.1).

2.3 Gewichtung der Konformitätskriterien mittels Kopplungsmatrix

Durch eine gezielte Anforderungsanalyse der Einsatzbedingungen, können einzelne Strukturfunktionen zu einer Gesamtsystemfunktion zusammengefasst werden. Diese Behauptung wird in der folgenden Arbeitsthese manifestiert.

Arbeitsthese

Die multilaterale Konformität kann mit Hilfe einer Kopplungsmatrix dargestellt werden. Über die Optimierung eines globalen Kriteriums der Kopplungsmatrix, können unterschiedliche Designs auf ihre multilaterale Konformität hin bewertet und miteinander verglichen werden.

Die Ermittlung der technischen Wertigkeit setzt voraus, dass die bewerteten Eigenschaften von etwa gleicher Bedeutung (gleicher Gewichtung) sind. Allerdings muss gerade bei der Auslegung adaptiver Strukturen die unterschiedliche Wertigkeit der multilateralen Konformitätskriterien berücksichtigt werden. Eine Gewichtung der einzelnen Kriterien kann mit Hilfe von Kopplungsfaktoren erfolgen, die mittels einer Kopplungsmatrix ermittelt werden. In diesem Kapitel werden zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Gewichtung der Anforderungen und Kriterien durch eine Kopplungsmatrix beschrieben.

2.3.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Zur Aufstellung der Kopplungsmatrix kann der Analytic Hierarchy Process (AHP) von Saaty [4] verwendet werden. Bei dieser Vorrangmethode handelt es sich um einen Bewertungsprozess, der in verschiedene Ebenen – Hierarchien – aufgeteilt ist. Im Gegensatz zur Nutzwertanalyse werden beim AHP Anforderungen und deren Kriterien paarweise miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieser paarweisen Vergleiche werden in einer Kopplungsmatrix dargestellt. Sofern keine deterministisch erfassbaren Maßzahlen miteinander verglichen werden, wird für diese Paarvergleiche eine 9-Punkte-Skala verwendet die in Tab. 2.1 dargestellt ist.

Tab. 2.1: 9-Punkte-Skala für die Paarvergleiche [5]

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächst höhere Element.
3	etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit gezeigt.
9	absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	Zwischen zwei benachbarten Urteilen muss eine Übereinkunft getroffen werden, ein Kompromiss.

Wie in Abb. 2.3 zu sehen ist, wird das Entscheidungsproblem in einer hierarchischen Struktur abgebildet. Die oberste Hierarchieebene stellt das übergeordnete Ziel dar. Dem Ziel (z. B. adaptive Ausblaslippe) werden Anforderungen (Auslenkung, maximale Verformung unter Last, Dauerfestigkeit, Wasserdichtigkeit usw.) und den Anforderungen werden Kriterien (Stellweg vom Aktor, Steifigkeit, Blockierkraft, Eigenfrequenz, Feuchtigkeitsaufnahme usw.) untergeordnet.

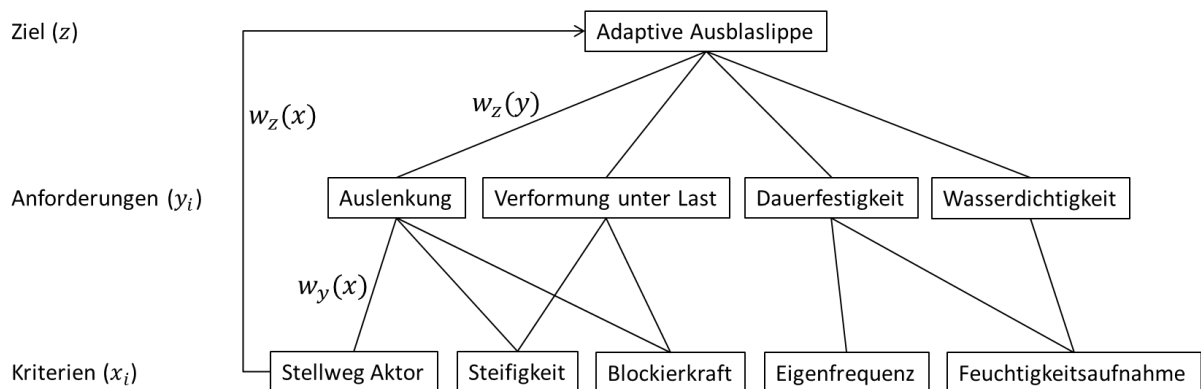


Abb. 2.3: Hierarchische Struktur des Bewertungsprozesses

Jetzt können Kriterien multilateralen Einfluss auf die Konformität von Anforderungen haben. Zum Beispiel resultiert aus einer hohen Steifigkeit zwar eine geringe Verformung der passiven Struktur unter Last, allerdings wird dadurch die aktive Auslenkung reduziert, da der Aktuator gegen die hohe Steifigkeit der Struktur anarbeiten muss. Um diesen Einfluss gewichten zu können, müssen die Kopplungsfaktoren von den Kriterien bestimmt werden. Im ersten Schritt werden alle Elemente einer Hierarchieebene jeweils paarweise im Hinblick auf das übergeordnete Element der nächst höheren Ebene bewertet. Die Bewertung erfolgt dabei nach der in Tab. 2.1 dargestellten 9-Punkte-Skala. Die Ergebnisse aller dieser Paarvergleiche werden in einer Kopplungsmatrix zusammengefasst. Je nach Komplexität des hierarchischen Kopplungssystems entsteht so eine ganze Reihe von Matrizen, denn für jedes Element, das noch mindestens eine untergeordnete Hierarchieebene hat, muss eine solche Matrix erstellt werden (Gl. 2.1) [6].

$$A = \begin{pmatrix} x_{ii} & x_{ij} & x_{ik} & x_{il} & x_{im} \\ x_{ji} & x_{jj} & x_{jk} & x_{jl} & x_{jm} \\ x_{ki} & x_{kj} & x_{kk} & x_{kl} & x_{km} \\ x_{li} & x_{lj} & x_{lk} & x_{ll} & x_{lm} \\ x_{mi} & x_{mj} & x_{mk} & x_{ml} & x_{mm} \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Die Elemente der Matrix haben, bedingt durch den paarweisen Vergleich miteinander, die folgenden Eigenschaften:

$$x_{ii} = 1 \quad (\text{Gl. 2.2})$$

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ji}} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Die Elemente in der Diagonalen der Matrix haben also den Wert „1“ und es handelt sich um eine reziproke Matrix. Wenn alle Paarvergleiche völlig widerspruchsfrei sind, ist die Matrix konsistent und es gilt die Konsistenzbedingung:

$$x_{ik} \cdot x_{kj} = x_{ij} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Dies bedeutet, dass wenn ein Kriterium X_1 einen dreimal so hohen Einfluss auf die übergeordnete Anforderung hat wie Kriterium X_3 und dieses wiederum einen doppelt so hohen Einfluss wie Kriterium X_2 hat, dann hat Kriterium X_1 einen sechsmal so hohen Einfluss auf die Anforderung wie Kriterium X_2 .

Um die Kopplungsfaktoren der Kriterien zu erhalten, muss das Eigenwertproblem der Kopplungsmatrix gelöst werden. Da die Matrix konsistent ist, kann der Eigenvektor nach folgender vereinfachten Berechnungsmethode ermittelt werden [4].

1. Die Matrix wird sukzessive quadriert
2. Die Reihensumme wird berechnet und normalisiert
3. Diese Berechnung wird so lange wiederholt, bis der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgender Rechenschritte minimal ausfällt
4. Der gewonnene Eigenvektor enthält die Kopplungsfaktoren

Im ersten Schritt findet eine Priorisierung der Anforderungen statt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Abhängigkeiten der Anforderungen von den untergeordneten Kriterien durch Kopplungsfaktoren w für jede Matrix A . Über die Kopplungsfaktoren können die multilateralen Abhängigkeiten der Anforderungen von einzelnen Kriterien beschrieben werden. Wenn die Matrix völlig konsistent ist, lässt sich zeigen, dass w sich aus A durch folgende Normierung einer beliebigen Spalte von A berechnen lässt.

$$w_i = \frac{x_{ij}}{\sum_{k=1}^n x_{kj}} \quad \text{für alle } i \text{ mit } 1 \leq i \leq n \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Um eine Bewertung des Gesamtsystems (Ziel) durchführen zu können, müssen die einzelnen Kopplungsfaktoren aller Paarvergleichsmatrizen miteinander kombiniert werden. Der Kopplungsfaktor $w_z(x_i)$ vom Kriterium x_i in Bezug auf das Gesamtsystem (Ziel) z ergibt sich zu:

$$w_z(x_i) = \sum_{j=1}^n w_{y_j}(x_i) \cdot w_z(y_j) \quad \text{für alle } i \text{ mit } 1 \leq i \leq n \quad (\text{Gl. 2.6})$$

Dabei ist $w_{y_j}(x_i)$ der Kopplungsfaktor vom Kriterium x_i bezogen auf die Anforderung y_j und $w_z(y_i)$ ist der Kopplungsfaktor von der Anforderung y_j im Hinblick auf das Gesamtsystem (Ziel) z [7].

Bei diesem Bewertungsschema handelt es sich um einen iterativen Prozess. Dies bedeutet, dass auch während der Entwicklung sich ändernde oder neue Anforderungen in das Bewertungssystem aufgenommen werden können und über die jeweiligen Kriterien und dessen Kopplungsfaktoren eine stete Bewertung von einzelnen Entwicklungsschritten bezogen auf das Gesamtsystem erfolgen kann. Dadurch lässt sich der Einfluss von sich ändernden Kriterien während des Entwurfsprozesses auf die Anforderungen erfassen und somit die Konformität des Gesamtziels optimieren.

Zuerst werden die Anforderungen, Auslenkung y_i , Verformung unter Last y_j , Dauerfestigkeit y_k und Wasserdichtigkeit y_l , gewichtet. Dazu stellen wir die Kopplungsmatrix mit Hilfe von Paarvergleichen (Tab. 2.1) auf und berechnen im Anschluss den Eigenvektor.

$$\begin{array}{cccc}
 \text{Auslenkung} & & & \\
 \text{Verformung} & & & \\
 \text{Dauerfestigkeit} & & & \\
 \text{Wasserdichtigkeit} & & & \\
 \left(\begin{array}{cccc}
 1 & 3 & 7 & 5 \\
 0,333 & 1 & 5 & 3 \\
 0,143 & 0,200 & 1 & 0,333 \\
 0,200 & 0,333 & 3 & 1
 \end{array} \right) & \begin{array}{l}
 \text{Auslenkung} \\
 \text{Verformung} \\
 \text{Dauerfestigkeit} \\
 \text{Wasserdichtigkeit}
 \end{array} & \text{(Gl. 2.7)}
 \end{array}$$

Die Matrix wird quadriert und anschließend die Reihensumme gebildet. Der normalisierte Eigenvektor enthält die Kopplungsfaktoren $w_z(y_i)$ der Anforderungen bezogen aufs Ziel.

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{l}
 0,565 \\
 0,264 \\
 0,053 \\
 0,114
 \end{array} \right) \begin{array}{l}
 \text{Auslenkung} \\
 \text{Verformung} \\
 \text{Dauerfestigkeit} \\
 \text{Wasserdichtigkeit}
 \end{array} \quad \text{(Gl. 2.8)}
 \end{array}$$

Nun stellen wir die Kopplungsmatrizen für die darunterliegende Hierarchieebene auf. Für jede Anforderung muss dazu eine eigene Kopplungsmatrix aufgestellt werden, die die Einflussfaktoren der Kriterien auf die jeweilige Anforderung enthält. Der Einfluss der Kriterien, Stellweg Aktuator (x_i), Steifigkeit (x_j), Blockierkraft (x_k), Eigenfrequenz (x_l) und Feuchtigkeitsaufnahme (x_m), wird für jede Anforderung separat in einer Kopplungsmatrix gewichtet (Gl. 2.1). Dargestellt ist die Kopplungsmatrix für die Auslenkung.

$$\begin{array}{cccccc}
 \left(\begin{array}{cccccc}
 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \\
 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \\
 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \\
 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \\
 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1
 \end{array} \right) & \text{(Gl. 2.9)}
 \end{array}$$

Durch Quadratur der Kopplungsmatrix mit anschließender Bildung der Reihensumme lässt sich der auf 1 normierte Eigenvektor der Auslenkung y_i bestimmen und enthält die Kopplungsfaktoren $w_{y_i}(x_i, x_j, x_k, x_l, x_m)$.

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{l}
 0,313 \\
 0,313 \\
 0,313 \\
 0,031 \\
 0,031
 \end{array} \right) \begin{array}{l}
 \text{Stellweg} \\
 \text{Steifigkeit} \\
 \text{Blockierkraft} \\
 \text{Eigenfrequenz} \\
 \text{Feuchtigkeitsaufnahme}
 \end{array} \quad \text{(Gl. 2.10)}
 \end{array}$$

Die Berechnungen der Eigenvektoren für die Anforderungen, Verformung, Dauerfestigkeit und Wasserdichtigkeit, sind im Anhang A zu finden.

Um die Kopplungsfaktoren der Kriterien zu erhalten, werden die Eigenvektoren der einzelnen Anforderungen in einer einzigen Kopplungsmatrix zusammengeführt und mit den Gewichtungen der Anforderungen multipliziert (Gl 2.6).

	Auslenkung	Verformung	Dauerfestigkeit	Wasserdichtigkeit	Gewichtung	
Stellweg	$0,313$	$0,076$	$0,076$	$0,076$	$\cdot \begin{pmatrix} 0,565 \\ 0,264 \\ 0,053 \\ 0,114 \end{pmatrix}$	Auslenkung
Steifigkeit	$0,313$	$0,697$	$0,076$	$0,076$		Verformung
Blockierkraft	$0,313$	$0,076$	$0,076$	$0,076$		Dauerfestigkeit
Eigenfrequenz	$0,031$	$0,076$	$0,697$	$0,076$		Wasserdichtigkeit
Feuchtigkeit	$0,031$	$0,076$	$0,076$	$0,697$		

(Gl. 2.11)

$$= \begin{pmatrix} 0,210 \\ 0,374 \\ 0,210 \\ 0,083 \\ 0,121 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{matrix} \quad \text{(Gl. 2.12)}$$

Der Kopplungsvektor beschreibt die multilaterale Konformität zwischen den einzelnen Kriterien, bezogen auf die Funktionskonformität des Gesamtsystems. Aus dem berechneten Kopplungsvektor ergeben sich die Kopplungsfaktoren w_z zwischen den einzelnen Kriterien x und dem Ziel z :

$w_z(x_i)$ (Stellweg Aktuator)	= 0,210
$w_z(x_j)$ (Steifigkeit)	= 0,374
$w_z(x_k)$ (Blockierkraft)	= 0,210
$w_z(x_l)$ (Eigenfrequenz)	= 0,083
$w_z(x_m)$ (Feuchtigkeitsaufnahme)	= 0,121

Die Steifigkeit hat hiernach den größten Einfluss auf die Funktionskonformität der Ausblaslippe, gefolgt von der Auslenkung und der Blockierkraft des Aktuators. Die Aktuatorik gegen Feuchtigkeit abzudichten wird als unproblematisch angesehen und die Eigenfrequenz spielt, aufgrund der hohen Steifigkeit der Struktur, nur eine untergeordnete Rolle.

2.3.2 VDI Richtlinie 2225 – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren

In der VDI Richtlinie 2225 “Technisch-wirtschaftliches Konstruieren“ [8] wird ebenfalls eine Gewichtung der einzelnen Kriterien mittels einer Präferenzmatrix beschrieben. Dabei werden alle Bewertungsmerkmale miteinander verglichen und so deren jeweilige relative Wichtigkeit ermittelt. Dies soll einen gewissen Abstraktionsgrad schaffen um sicherzustellen, dass die Relevanz einzelner Kriterien möglichst objektiv und ohne den Einfluss einer subjektiven Auswahl erfolgt.

Zur Ermittlung der relativen Präferenzen wird eine Matrix erstellt, deren jeweils erste Zeile und Spalte sämtliche Kriterien enthalten. Nun werden in der oberen Halbmatrix die Aspekte miteinander verglichen und der als wichtiger erachtete in das korrespondierende Feld eingetragen. Das gesamte Verfahren wird in Tab. 2.2 dargestellt. Im Fall der Ausblaslippe wird hier A (Stellweg Aktor) und B (Steifigkeit) als gleichwertig eingestuft und somit wird A/B eingetragen und beide Kriterien erhalten jeweils 0,5 Punkte. Beim nächsten Vergleich wird A wichtiger erachtet als C und somit wird A in dem Vergleichsfeld eingetragen.

Nachdem alle Kriterien miteinander verglichen wurden, werden die Nennungen sowohl zeilen- als auch spaltenweise ausgezählt und notiert. Als Summe aus den beiden Ergebnissen berechnet sich der Kopplungsfaktor. Da die Punktzahl aber je nach Anzahl der verglichenen Elemente stark schwanken kann und somit nicht sehr intuitiv ist, wird abschließend der auf Eins normierte Faktor F_x gebildet. Dazu wird die Gesamtpunktzahl durch die Anzahl der insgesamt getätigten Vergleiche geteilt. Die Gesamtzahl der Vergleiche $N_{Prä}$ berechnet sich mit der Anzahl der verglichenen Merkmale N zu:

$$N_{Prä} = \frac{N^2 - N}{2} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

Es entstehen somit Kopplungsfaktoren, die ein intuitives Gefühl für die Relevanz der einzelnen Kriterien bieten. Im Beispiel in Tabelle 2.2 wird folglich der Stellweg des Aktuators mit 0,35 Punkten als das wichtigste Kriterium bewertet, gefolgt von der Steifigkeit mit 0,30 Punkten und der Blockierkraft mit 0,25 Punkten. Die Eigenfrequenz wird mit 0,10 Punkten eine untergeordnete Relevanz zugeordnet und die Feuchtigkeitsaufnahme wird mit null Punkten den anderen Kriterien gegenüber als unwichtig erachtet und wird im späteren Verlauf keinen Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung haben.

Tab. 2.2: Präferenzmatrix zur Bestimmung von Kopplungsfaktoren

		A	B	C	D	E			
	Ausblaslippe	Stellweg Aktor	Steifigkeit	Blockierkraft	Eigenfrequenz	Feuchtigkeitsaufnahme	Summe	Gesamt	Faktor
A	Stellweg Aktor	%	B	A/C	A	A	2,5	2,5	0,25
B	Steifigkeit		%	B	B	B	4	4,0	0,40
C	Blockierkraft			%	C	C	2,5	2,5	0,25
D	Eigenfrequenz				%	E	0	0	0,00
E	Feuchtigkeitsaufnahme					%	0	0	0,10
	Summe	0	1	0,5	0	1		10	

Vergleicht man die Kopplungsfaktoren aus dem Analytic Hierarchy Process mit denen aus der VDI Richtlinie, wird festgestellt, dass beide Bewertungen in der Tendenz übereinstimmen, sich aber in den absoluten Werten leicht unterscheiden. Dies resultiert aus dem höheren Detaillierungsgrad des AHP beim Paarvergleich, welcher eine feinere Abstufung bei der Gewichtung der Kriterien erlaubt.

Mit den ermittelten Kopplungsfaktoren kann schon beim Entwurf einer adaptiven Struktur eine Gewichtung der multilateralen Konformitätskriterien erfolgen und somit eine Fehlkonstruktion bezüglich der Funktionskonformität vermieden werden.

Am Anwendungsfall einer funktionskonform integrierten Ausblaslippe für ein Wasserkanalmodell wird ein Konzept zur Entwurfsoptimierung erarbeitet. Ziel ist die Bereitstellung eines Leitfadens, welcher die Vorgehensweise bei der Auslegung adaptiver Strukturen unter der Berücksichtigung von multilateralen Konformitätskriterien beschreibt.

Die Definition der Begriffe Struktur- und Funktionskonformität wird in Kapitel 2.4 erläutert.

2.4 Multilaterale Konformität als Bewertungsmethode für die funktionskonforme Gestaltung

Bei der bisherigen Gestaltung adaptiver Strukturen werden erst während des Auslegungsprozesses die komplexen Anforderungen an die jeweiligen Randbedingungen angepasst, um so eine Strukturkonformität zu erzielen. Die Strukturkonformität ist ein adaptives Kennzeichen, ein Grad der Adaptionsfähigkeit. Strukturkonforme Aktuatoren sind insbesondere hinsichtlich ihrer Steifigkeit mit der Struktur konform [3, Zitat, Sinapius: Adaptronik, S. 26]. Der Begriff der Strukturkonformität lässt sich auf Funktionskonformität erweitern, wenn weitere Eigenschaften der Funktionskomponenten (Sensorik und Aktuatorik) mit Eigenschaften der Struktur harmonisiert werden [3, Zitat, Sinapius: Adaptronik, S. 26]. Der Begriff Funktionskonformität wurde erstmals von Opitz [9] verwendet und als die gegenseitige Abstimmung aller Funktionen einer adaptiven Struktur während des Entwurfs beschrieben. Funktionskonformität bezeichnet das Optimum der konkurrierenden und nicht konkurrierenden Zielgrößen aller Funktionen einer adaptiven Struktur. Aufbauend auf der Funktionskonformität, wird in dieser Arbeit die multilaterale Konformität als ein mögliches Bewertungskriterium für adaptive Strukturen hergeleitet. Bei der multilateralen Konformität liegt der Fokus auf Konformitätskriterien, die während der Anforderungsanalyse zwischen konträren Anforderungen und Randbedingungen über Kopplungsfaktoren hergestellt werden. Statt einer getrennten Betrachtung von Anforderungen und Randbedingungen rücken nun deren Wechselwirkungen in den Vordergrund, welche unter dem Begriff der multilateralen Konformität zusammengefasst werden. Durch eine Verknüpfung von konträren Anforderungen und Randbedingungen durch Konformitätskriterien, eröffnet sich ein neuer Lösungsraum für Konstruktionen, mit dessen Hilfe eine erleichterte Bewertung von unterschiedlichen Konzepten durchgeführt werden kann. Bei der funktionskonformen Gestaltung spielt somit die Anforderungsanalyse schon eine zentrale Rolle im Auslegungsprozess.

Die für den Entwurf adaptiver Strukturen relevanten Begriffe werden auf der nächsten Seite noch einmal zusammengefasst.

Definitionen:

Strukturkonformität

Die Strukturkonformität ist ein adaptronisches Kennzeichen, ein Grad der Adaptionfähigkeit. Strukturkonforme Aktuatoren sind insbesondere hinsichtlich ihrer Steifigkeit mit der Struktur konform.

Funktionskonformität

Der Begriff der Strukturkonformität lässt sich auf Funktionskonformität erweitern, wenn weitere Eigenschaften von Funktionskomponenten mit Eigenschaften der Struktur harmonisiert werden. Funktionskonformität bezeichnet das Optimum der konkurrierenden und nicht konkurrierenden Zielgrößen aller Funktionen einer adaptiven Struktur.

Multilaterale Konformität

Bei der multilateralen Konformität liegt der Fokus auf Konformitätskriterien, die während der Anforderungsanalyse zwischen konträren Anforderungen und Randbedingungen über Kopplungsfaktoren hergestellt werden. Kopplungsfaktoren beschreiben die Wechselwirkungen zwischen Anforderungen und Kriterien und deren Einfluss auf das Gesamtsystem. Mit Hilfe der Kopplungsfaktoren kann ein Entwurf hinsichtlich seiner Funktionskonformität bewertet werden.

3 Fallstudie zur multilateralen Konformität

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Auslegung hochbelasteter adaptiver Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien erarbeitet.

Dabei geht der Begriff der multilateralen Konformität über das übliche Verständnis einer Anforderungsliste hinaus. In einer Anforderungsliste werden lediglich einzelne Kriterien festgelegt, die zur späteren Aufgabenerfüllung erreicht werden müssen. Bei reinen Strukturelementen, bei denen teilweise nur wenige Hauptanforderungen (z. B. Steifigkeit und Masse) im Vordergrund stehen, reicht dies im Allgemeinen aus. Häufig haben diese Kriterien einen konträren Einfluss auf einander. Soll z. B. die Steifigkeit eines Bauelements erhöht werden, wird dies im Regelfall durch einen Massenzuwachs erkauft. In einer herkömmlichen Auslegung wird in einer Parameterstudie unter Berücksichtigung der Fest- und Mindestanforderungen das Optimum beider Parameter ermittelt. Im Gegensatz dazu, werden bei der multilateralen Konformität den einzelnen Kriterien Kopplungsfaktoren zugewiesen, die als Funktionen der Einstellparameter oder der konträren Bewertungskriterien dargestellt werden können. So kann z. B. die Biegesteifigkeit EI eines Biegebalkens als Funktion seiner Masse m_B dargestellt werden (siehe Gl. 3.1).

$$EI = E \frac{bh^3}{12} = EA \frac{h^2}{12} \quad \text{mit } m_B = A \cdot l \cdot \rho \quad (\text{Gl. 3.1})$$

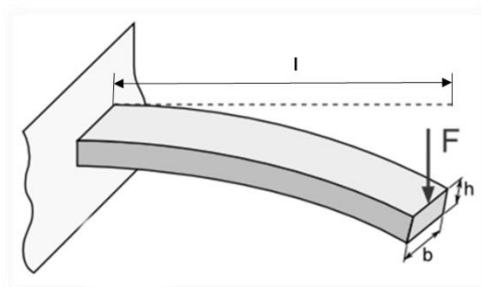


Abb. 3.1: Verhalten eines Biegebalkens unter Last

Durch Verdoppelung der Wandstärke des Biegebalkens in Biegerichtung, verdoppelt sich ebenfalls sein Gewicht, sein Flächenträgheitsmoment steigt hingegen mit der dritten Potenz und verachtfacht sich somit. Zusätzlich kann durch eine geschickte Wahl der Geometrie bei gleichbleibender Querschnittsfläche A das Flächenträgheitsmoment angehoben werden. Hier wird die Steifigkeit des Biegebalkens als Funktion der Wandstärke betrachtet. Halbiert man z. B. die Breite des Biegebalkens, verdoppelt dafür aber seine Höhe in Biegerichtung, bleibt der Flächeninhalt konstant, das Flächenträgheitsmoment steigt

hingegen quadratisch. Durch diese einfache Maßnahme kann das Flächenträgheitsmoment eines Biegebalkens vervierfacht werden ohne einen Massenzuwachs in Kauf nehmen zu müssen. Allerdings sind die meisten lasttragenden Strukturen schon so weit geometrisch optimiert, dass für eine Versteifung der Struktur zusätzliches Material eingesetzt werden muss.

3.1 Multilaterale Konformität in der Luftfahrt

Die Anfänge der Luftfahrt sind geprägt von einer Funktionskopplung, aber auch Funktionstrennung unterschiedlichster Anforderungen in einer einzigen Struktur. Beispielhaft sei hier der Tragflügel von Lilienthals Normalsegelapparat erwähnt, der dem Flügelprofil von Störchen nachempfunden ist (siehe Abb. 3.2). Hier sorgt die integrale Flügelstruktur durch eine über Seile induzierte Verformung des Profils für einen erhöhten Auftrieb bei Start und Landung. Bei einseitiger Betätigung wird im Flug ein Kurvenflug ermöglicht, zugleich werden die aerodynamischen Lasten von dem gesamten Flügel getragen.

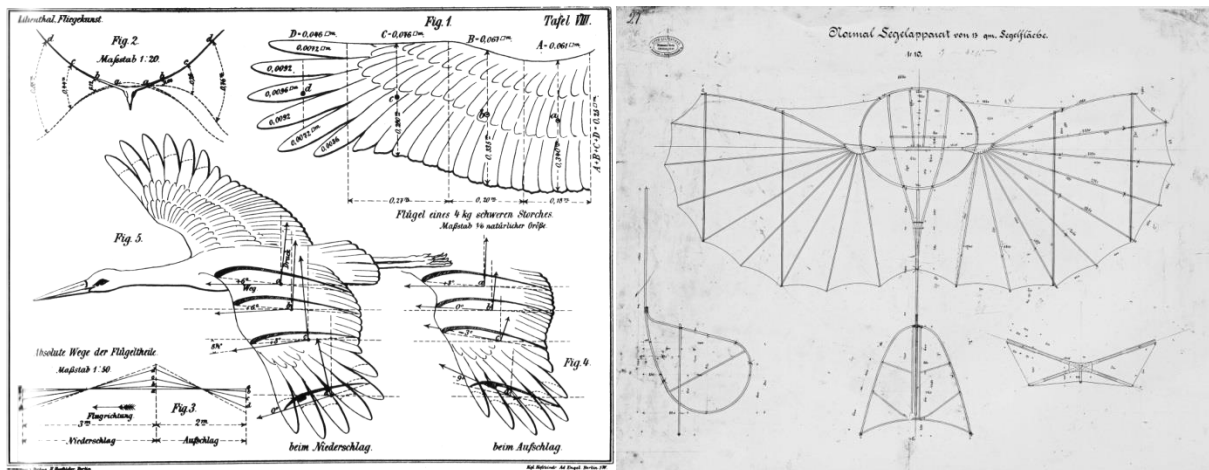


Abb. 3.2: Zeichnung aus Lilienthals Buch *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* [10]

Auch der Wright Flyer der Brüder Wright wurde durch Flügelverwindung gesteuert. Dabei werden die beiden Tragflächen über Seilzüge gegensinnig in sich verdreht, wodurch sich durch die unterschiedlichen Anstellwinkel eine Auftriebsdifferenz zwischen beiden Flügeln und damit ein Rollen des Flugapparates ergeben (siehe Abb. 3.3).

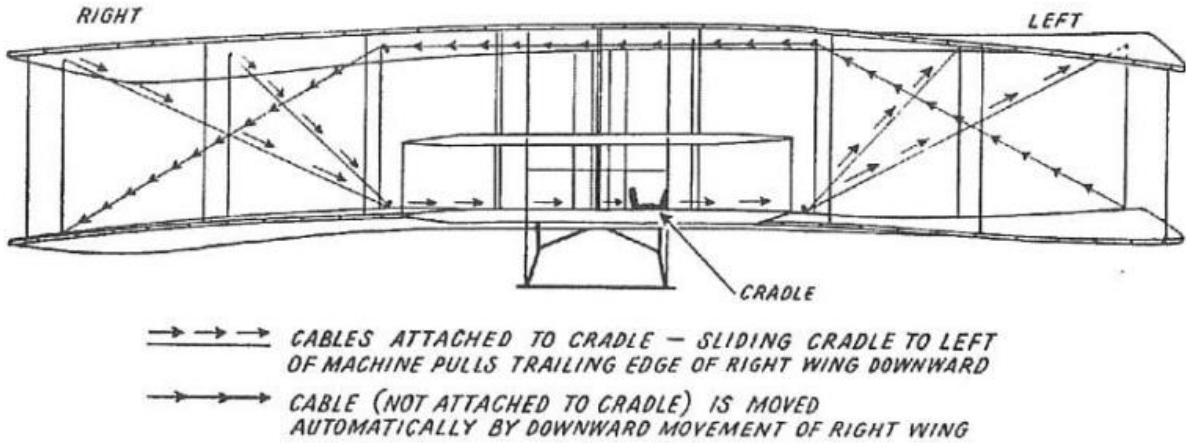


Abb. 3.3: Flügelverwindung beim Wright Flyer [11]

Die Flügelverwindung hat gegenüber der Verwendung von Querrudern den Vorteil, dass keine durch die Ruderklappen bedingten Spalten in der Tragfläche auftreten und dass die Profiltreue erhalten bleibt. Somit kann der aerodynamische Widerstand reduziert werden. Die Verwindung ist jedoch konstruktiv schwer mit der notwendigen Torsionsfestigkeit moderner, üblicherweise gefeilten Tragflächen vereinbar.

Im Laufe der Entwicklung und mit dem Motorflug wurden die Fluggeräte immer schwerer. Diese Entwicklung hatte zur Folge, dass auch die Flügelstruktur immer größeren Belastungen ausgesetzt war. Um den gestiegenen strukturellen Anforderungen gerecht zu werden, wurde verstärkt Aluminium beim Flugzeugbau eingesetzt. Die ersten Konzepte sahen eine Übertragung des bisherigen Steuerungskonzepts vor. Dabei sollte die aktive Anpassung der Flügelkontur an den jeweiligen Flugzustand erreicht werden, indem eine Funktions- und Strukturkopplung mittels komplexer Kinematik auf steifere Materialien übertragen wird, wie in den aufwendigen Konzepten von Judge und Lyon in Abb.3.4 zu sehen ist.

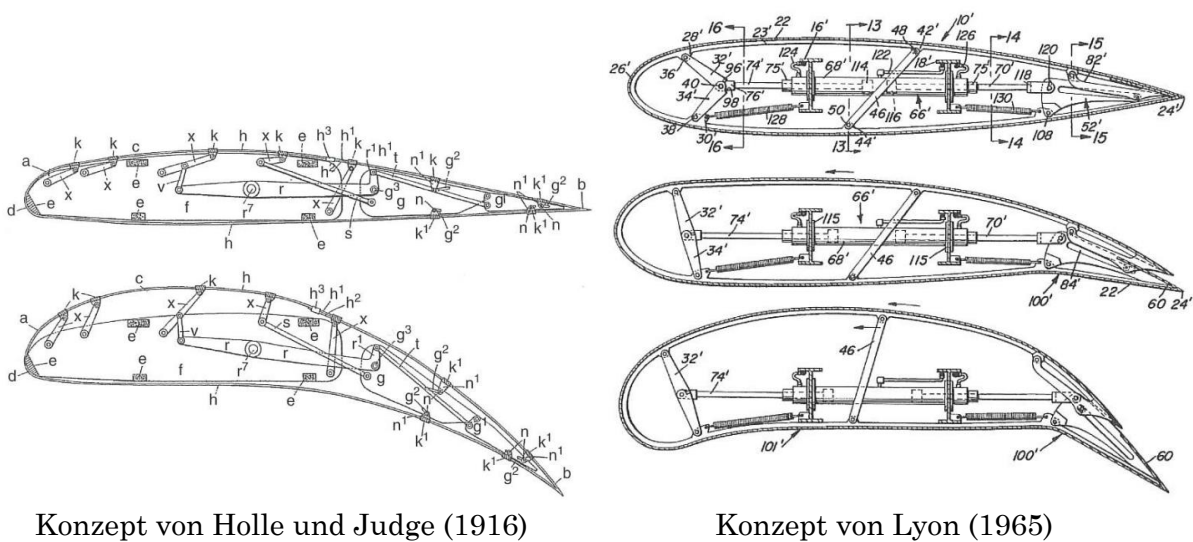


Abb. 3.4: Konzepte eines formvariablen Tragflügels [12]

Diese Konzepte hatten alle eine aufwendige, großen Bauraum beanspruchende Kinematik gemein. Durch gestiegene Anforderungen an Reichweite und Reisezeit wurden Triebwerke immer größer, womit auch der Treibstoffbedarf anstieg und somit der damit verbundene Platzbedarf für Treibstofftanks ebenfalls immer größer wurde. Da die Flügelstruktur beim Start durch das hohe Abfluggewicht die höchsten Belastungen während eines Fluges erfährt, bietet sich der Hohlraum in den Flügeln als idealer Treibstofftank an, da das Gewicht des Treibstoffs der Belastung des Flügels in Auftriebsrichtung entgegenwirkt.

Dies hatte allerdings zur Folge, dass bei der Konstruktion eine Funktionstrennung vorgenommen werden musste. So wurden und werden bis heute moderne Verkehrsflugzeuge mit funktionsentkoppelten Tragflügeln ausgerüstet. Die Lasten werden von dem Flügelkasten getragen, die Vorflügel (slats) und Hintekantenklappen (flaps) dienen zur Auftriebserhöhung bei Start und Landung, die Querruder dienen dem Kurvenflug und die Störklappen (spoiler) erhöhen den Luftwiderstand zur Geschwindigkeitsminderung. In Abb. 3.5 wird deutlich, dass das Hochauftriebssystem, bestehend aus den Vorflügeln (slats) und Hintekantenklappen (flaps) vom lasttragenden Flügelkasten funktionsentkoppelt ist. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass jedes System einzeln und leicht ausgetauscht werden kann, allerdings erhöht dies die Komplexität des Gesamtsystems.

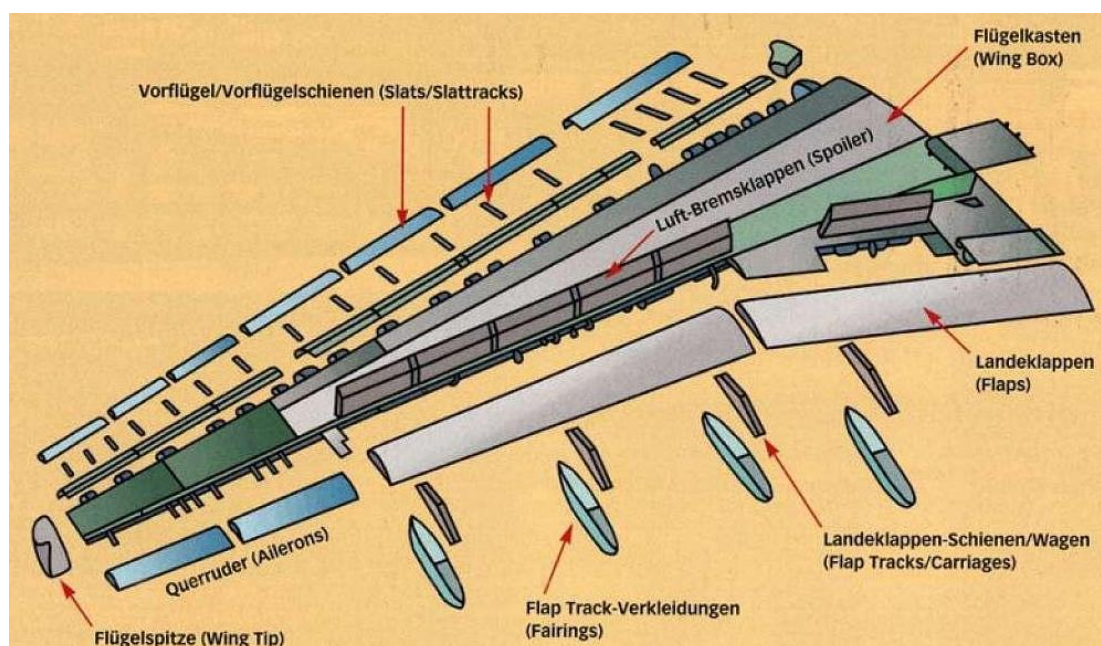


Abb. 3.5: Hauptbaugruppen eines modernen Tragflügels [13]

Viele Forschungen der letzten 25 Jahre fokussieren sich auf eine Funktionszusammenführung mehrere Systeme in eine einzige Struktur. Gerade der Einsatz neuer Materialien eröffnen neue Konstruktionsmöglichkeiten und ebnen den Weg für adaptive Strukturen. Bei den Konzepten für formvariable Vorder- und Hinterkanten gibt es zwei unterschiedliche Zielsetzungen. Zum einen wird an eine Widerstandsreduktion im Reiseflug geforscht, hier reichen aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeit schon kleine Verformungen aus, zum anderen soll der Auftrieb bei Start und Landung durch große Verformungen an Vorder- und Hinterkante erhöht werden.

Im Rahmen des Leitprojektes *Adaptiver Flügel* (ADIF) wurde beim DLR der Einsatz teiladaptiver Konturen zur aerodynamischen Leistungssteigerung an transsonischen Tragflügeln untersucht. Hier wird durch eine Absaugung durch kleine Löcher in der Flügel-nase eine längere Aufrechterhaltung der laminaren Strömung auf der Flügeloberseite erreicht, gleichzeitig werden durch die Erzeugung einer Beule (Bump) Druckstöße im transsonischen Bereich beeinflusst [14], beides dient der Widerstandsreduzierung im Reiseflug. Die Verformung der Hinterkante ermöglicht eine geschlitzte Haut, die mittels dem Fingerkonzept von Monner [15] verformt wird.

Aufgrund der geometrischen Einschränkungen und den hohen Anforderungen an die Dehnungseigenschaften sind formvariable Hinterkantenkonzepte mit ungeschlitzter Haut selten. Ein Konzept mit ungeschlitzter Haut wurde im EU FP7 Projekt *Smart High Lift Devices for Next Generation Wings* (SADE) bestehend aus einer auxetischen Struktur und einer Silikonhaut entwickelt [16].

Durch den Einsatz neuer Werkstoffe mit anisotropen Eigenschaften wie z. B. Faserverbundwerkstoffe, kann eine strikte Funktionstrennung teilweise aufgehoben und mehrere Funktionen wieder in einem Bauteil zusammengefasst werden. Ein Beispiel ist hierfür die im Rahmen des EU Projekts *Smart Intelligent Aircraft Structures* (SARISTU) am DLR in Braunschweig entwickelte formvariable Flügelvorderkante, die sogenannte Smart Droop Nose (siehe Abb. 3.6), die durch einen geschickten Materialmix sich dem jeweiligen Flugzustand anpassen kann, zugleich aber auch aerodynamische Lasten aufnimmt und sie in den Flügelkasten weiterleitet. Zudem soll durch eine verteilte Einleitung der Lasten Strukturgewicht eingespart werden [17]. Dagegen besitzen herkömmliche Systeme wie z. B. die Tracks bei Vorflügeln und Landeklappen diskrete, sehr schwere Krafteinleitungsstellen. Für die Spaltabdeckung kommt eine Materialkombination aus Synthesekautschuk (EPDM) und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) zum Einsatz. Das extrem dehnbare EPDM dient als Materialgrundlage für die Haut. Durch die individuelle Größe und Positionierung von GFK-Streifen in der EPDM-Haut können lokale Steifigkeitsanpassungen der Haut vorgenommen werden, dies ermöglicht Dehnungen von bis zu 5 % [18]. Erst durch diese Flexibilität in Senkrichtung kann die Vorderkante bis zu 20° abgesenkt werden, wobei in Spannweitenrichtung eine ausreichend hohe Steifigkeit zur Aufnahme der aerodynamischen Lasten gewährleistet ist [19].

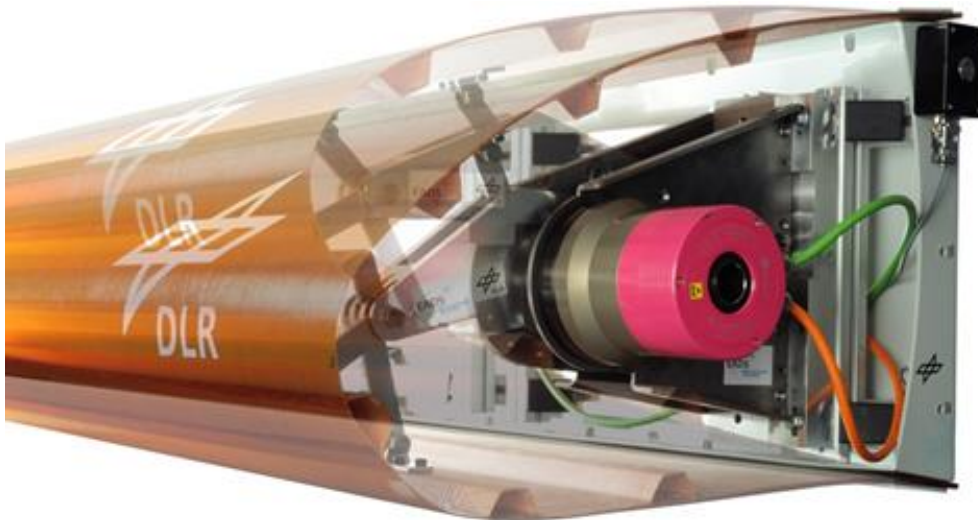


Abb. 3.6: Funktionsmuster einer formvariablen Flügelvorderkante des DLR [20]

Mittlerweile erkennen auch Unternehmen den wirtschaftlichen Nutzen von spaltfreien formvariablen Flügelvorder- und -hinterkanten. So forscht z. B. FlexSys Inc., ein Unternehmen aus den USA, an Steuerflächen mit variabler Geometrie.

Der entwickelte Flügel - FlexFoil™ - ermöglicht große Deformationen von -9° bis $+40^\circ$ für Start und Landung als auch hohe Ansprechraten (bis zu $30^\circ/\text{s}$) um den induzierten Widerstand und externe Lasten im Reiseflug zu reduzieren. In Zusammenarbeit mit der Air Force und der NASA wurde der FlexFoil™ im Flugversuch mit einer Gulfstream GIII im Jahr 2017 erfolgreich getestet [21]. Die Gulfstream GIII mit integrierter FlexFoil™ ist in Abb. 3.7 zu sehen.



Abb. 3.7: FlexFoil™, flexible spaltfreie Hinterkante von FlexSys Inc. [21]

Die aktive Veränderung des Flügelprofils während des Fluges ist aktueller Forschungsschwerpunkt im *Sonderforschungsbereich 880 – Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge*. Ziel ist die Erforschung eines spaltfreien konturvariablen Tragflügels, dessen Profil sich an den jeweiligen Flugzustand anpasst und somit eine adaptive Strömungskontrolle bietet (siehe Abb. 3.8).

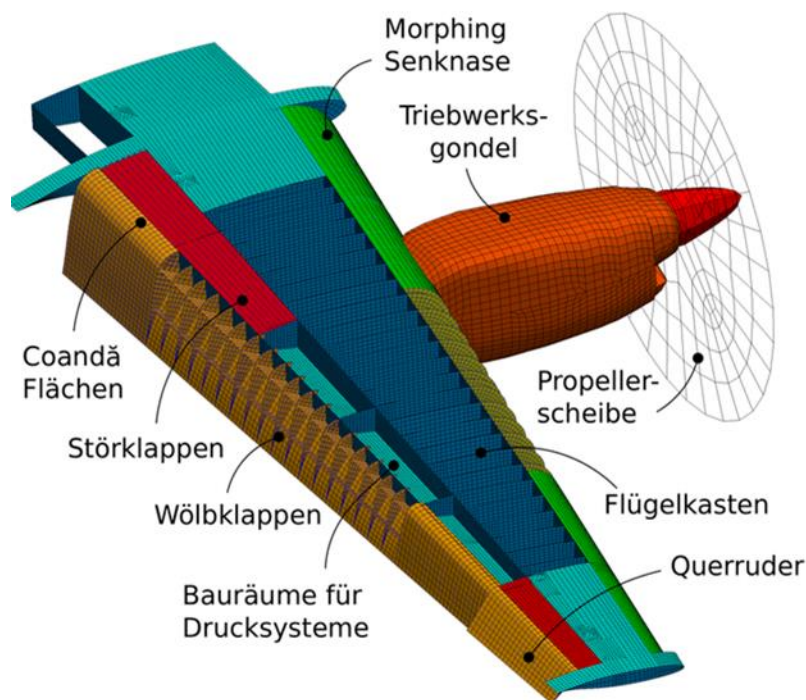


Abb. 3.8: Tragflügelkonzept des Referenzflugzeugs im SFB 880 [22]

Aufgrund des steigenden Flugverkehrsaufkommens wächst das Bedürfnis Luftverkehrsmittel in die Infrastruktur der Metropolregionen zu integrieren. Innerhalb Europas werden über 50 % des kommerziellen Luftverkehrs mit Flugzeugen der Klasse A320/B737 abgewickelt, wobei 90 % der Streckenlänge unterhalb von 2000 km liegen. Um dem steigenden Luftverkehrsaufkommen gerecht zu werden, sollen zukünftig auch kleinere Städte über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen miteinander verbunden werden. Hierbei möchte man auf Flugplätze in der nahen Umgebung von Städten zurückgreifen, die meistens eine Start- und Landebahn mit einer Länge von circa 800 m haben. Dies bedeutet, dass die neu angestrebte Flugzeugklasse der 100-Sitzer über eine entsprechende Kurzstart- und -landefähigkeit (STOL) verfügen muss. In Abb. 3.9 ist das im SFB 880 entworfene Flugzeugkonzept schematisch dargestellt.

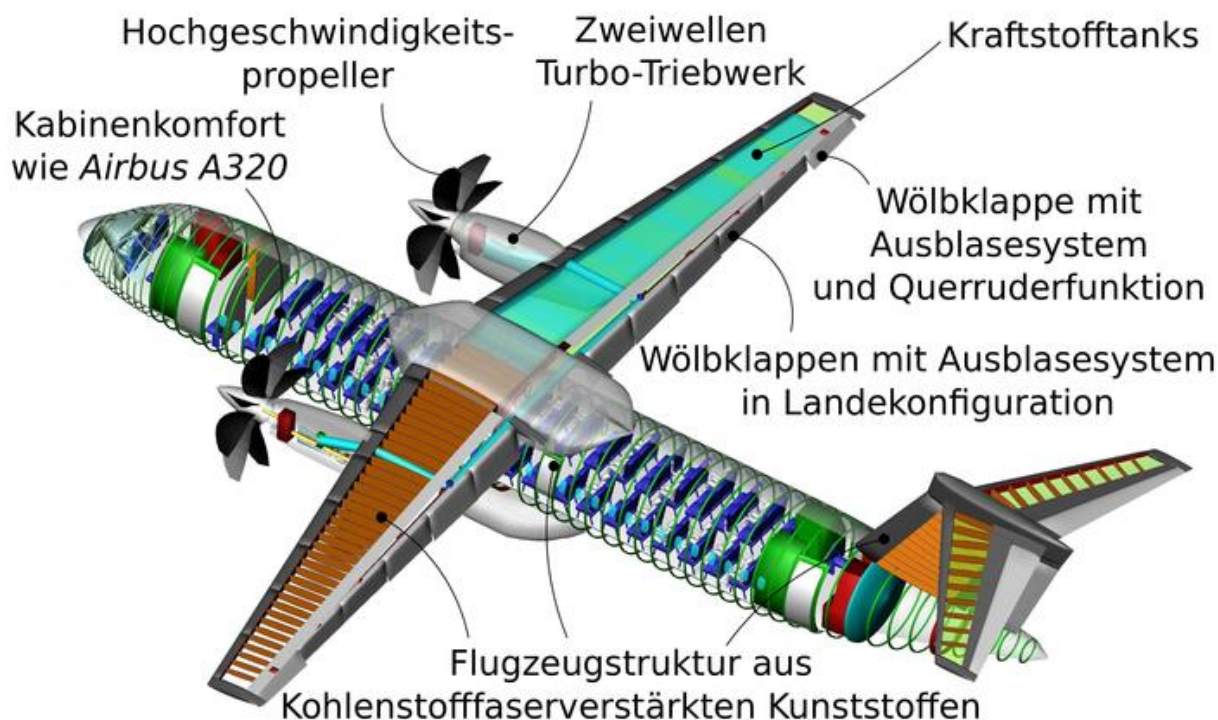


Abb. 3.9: Referenzkonfiguration des SFB 880 Flugzeugentwurfs [2]

Des Weiteren besteht die Herausforderung den Fluglärm drastisch zu reduzieren, um einem Nachtflugverbot wegen immer schärferer Umweltschutzgesetze zuvor zu kommen. Dabei ist zu beachten, dass kommerzielle Hochauftriebssysteme, bestehend aus Vorflügeln (Slats) und Hochauftriebsklappen (Flaps), mit ihren durchströmten Spalten zusammen mit Triebwerk und Fahrwerk eine der drei relevanten Lärmquellen am Flugzeug darstellen.

Um eine Beeinträchtigung der Lebensqualität durch Fluglärm auszuschließen, bedarf es einer Reduzierung der Lärmemissionen, bei Start um 20 dB und bei Landung um 15 dB. Dies entspräche einem Lärmpegel von etwa 60 dB am Boden bei Überflügen, der dem Lärm heutiger Großstädte entspricht und noch nicht als störend empfunden wird und nicht als gesundheitsschädlich gilt. Sollen die stadtnahen Flugplätze mit ihren kürzeren Start- und Landebahnen in den kommerziellen Luftfahrtverkehr aufgenommen werden, erfordert dies auch eine Kurzstart- und -landefähigkeit zukünftiger Verkehrsflugzeuge. Nach diesen Betrachtungen stellt sich die Frage, welche Konzepte aktiver Hochauftriebssysteme für zukünftige Verkehrsflugzeuge die notwendige Reduzierung der Lärmbelastung bei gesteigertem Auftriebsbeiwert bieten.

Die Vorteile des aktiven Ausblasens bei Tragflügeln zur Erzeugung zusätzlichen Auftriebes ist schon seit den späten 1920er Jahren bekannt. Klassische Methoden der Grenzschichtkontrolle an Profilen versuchen die potentialtheoretischen Grenzen des Auftriebsbeiwerts durch Spaltabsaugung und -ausblasung erreichbar zu machen (Abb. 3.10a). Weitergehende Methoden versuchen die Superzirkulation nutzbar zu machen. Allerdings ist der Auftriebszuwachs einer Strahlklappe nach Abb. 3.10b, bei der an der Hinterkante ein Luftstrahl mit etwa 30° schräg nach unten ausgeblasen wird, im Verhältnis zum einge-

setzten Strahlimpuls sehr begrenzt. Die drei Konzepte in Abb. 3.10c nutzen extern angeblasenen Klappen zur Auftriebssteigerung. Diese Konzepte liefern mittlere Werte des gewünschten Auftriebszuwachses für ein gegebenes Schub zu Gewicht Verhältnis. Abb. 3.10c unten zeigt eine besonders effektive Strömungsführung, da hier der gesamte Triebwerksstrahl zum Überblasen der Klappenoberseite genutzt wird. Ein hoher Auftriebsgewinn lässt sich mit intern angeblasenen Klappen erreichen oder auch durch die Anordnung einer Coanda-Klappe hinter einem Ausblasespalt wie in Abb. 3.10d gezeigt. Bei diesen Lösungen kann mit einem dünnen Wandstrahl ein starker Einfluss auf den effektiven Abströmwinkel am Flügel genommen werden. Dadurch ergeben sich große Auftriebsbeiwerte bei kleinen Anstellwinkeln. Die Effizienz eines solchen Systems kann durch eine Absaugung, Verdichtung und Ausblasung mittels elektrisch angetriebenen Kompressors gesteigert werden. Konventionelle Zapflußsysteme reduzieren den Schub und führen zu größeren Triebwerken.

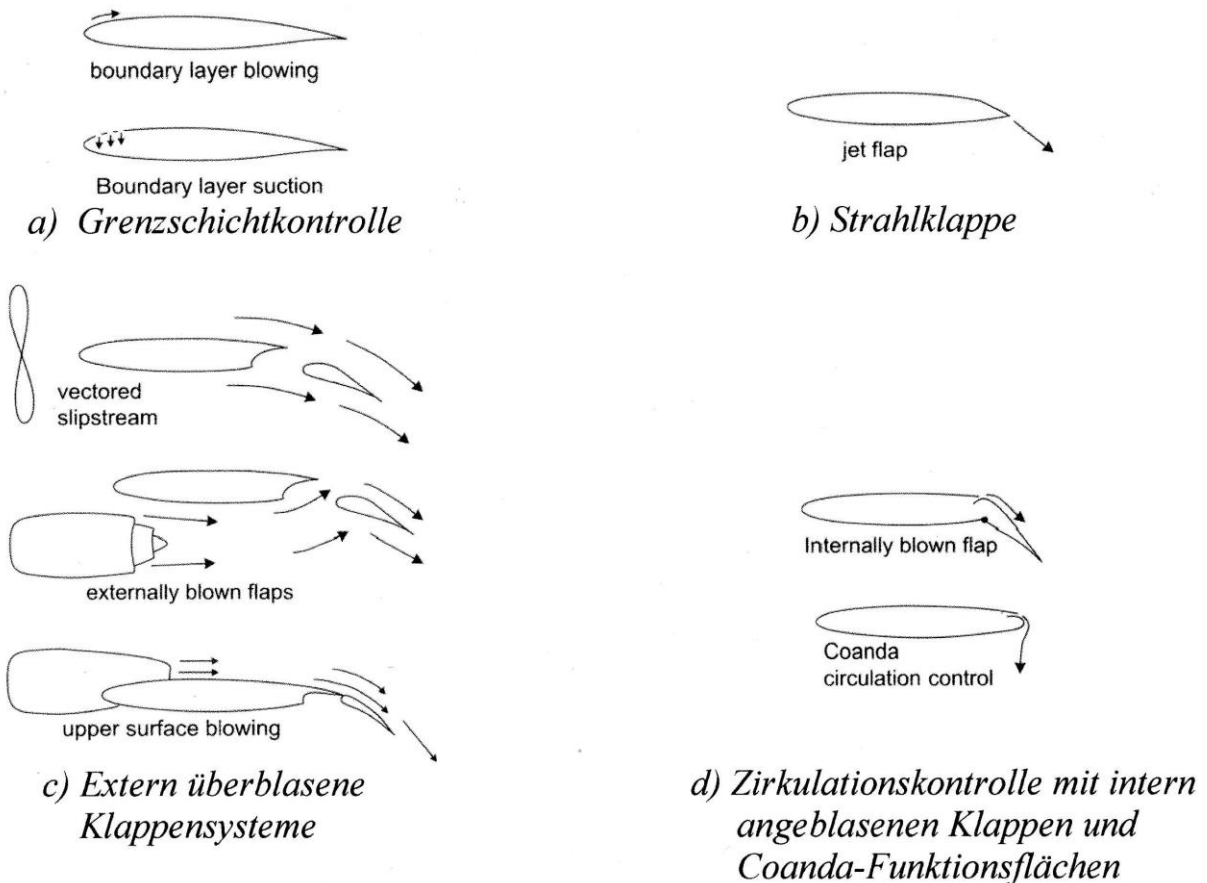


Abb. 3.10: Gegenüberstellung von unterschiedlichen Hochauftriebskonzepten [2]

Das im SFB 880 entworfene System besteht aus einer formvariablen Flügelvorderkante, einer Grenzschichtabsaugung auf der Oberseite des Flügels und einer dynamischen Ausblasung des abgesaugten Stroms an der Profilhinterkante, zu sehen in Abb. 3.11. Die Hinterkante ist als stark gekrümmten Wölbklappe ausgeführt, so dass der Coanda-Effekt zur Steigerung des Auftriebs genutzt werden kann. Zur Strömungserfassung dienen mikrotechnische Druck- und Heißfilmsensoren die flächig in die Coanda-Klappe integriert werden. Dies ermöglicht Rückschlüsse sowohl auf die örtliche Druckverteilung als auch auf

die Strömungsgeschwindigkeit. Mit diesen Informationen kann eine Strömungsablösung an der Hinterkante frühzeitig erkannt und mit einer angepassten Ausblasung entgegen gewirkt werden. Die Entwicklung des Sensorsystems wird von Beutel [23] und Schwerter [24] beschrieben.

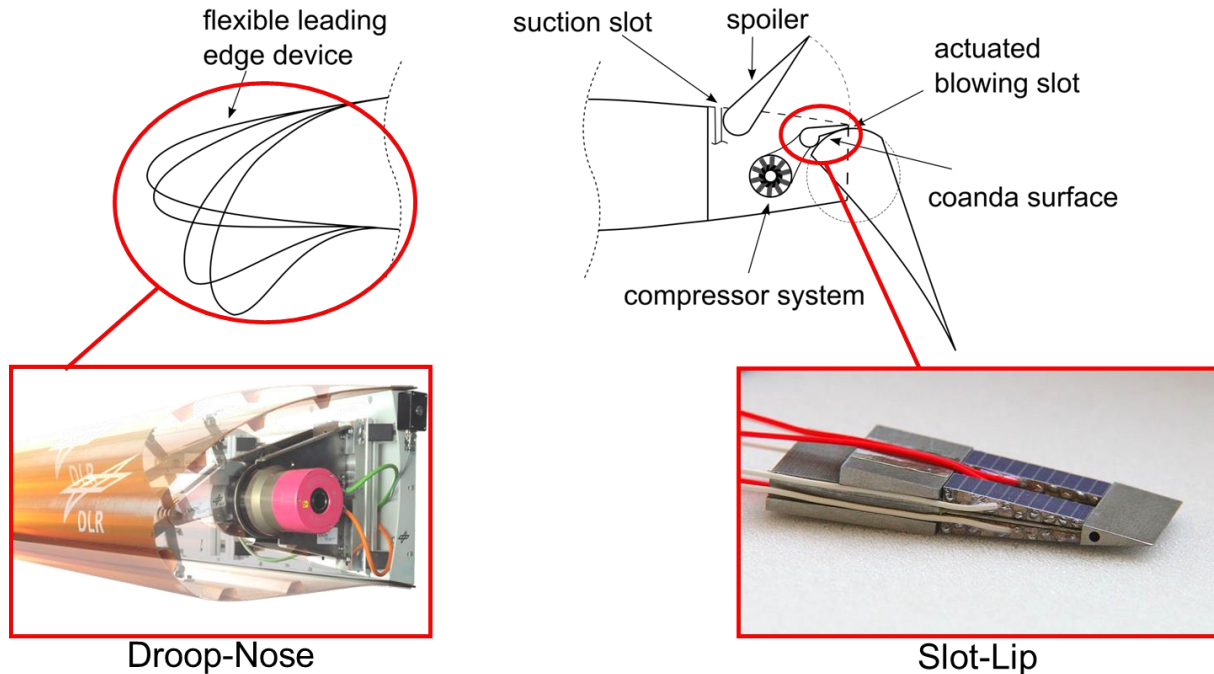


Abb. 3.11: Hochauftriebskonzept SFB 880 [20]

Die Herausforderung beim Entwurf von formvariablen Strukturen besteht in dem Kompromiss zwischen der notwendigen Steifigkeit für eine ausreichende Konturtreue unter Last, sowie einem geeigneten kinematischen Konzept zur Verformung der Struktur bei geringem Gewicht.

Bei der konventionellen Auslegung starrer Strukturen wird in der Regel ein Gewichts- und Steifigkeitsoptimum angestrebt. Dabei wird in einem iterativen Prozess durch die Anpassung der Materialdicke und -verteilung die erforderliche Steifigkeit bei einer ausreichenden Festigkeit ermittelt. Da beide Forderungen direkt miteinander gekoppelt sind, funktioniert diese Vorgehensweise sehr gut. Eine Erhöhung der Materialdicke hat eine Steigerung der Steifigkeit zur Folge, welche die Verformung der Struktur unter Last reduziert und somit die Spannungen im Material herabsetzt. Somit können beide Ziele durch Steuerung eines einzigen Parameters erreicht werden. Der Entwurf von formvariablen Strukturen bedarf allerdings eine andere Herangehensweise, da die Verformung explizit als Zielfunktion gefordert wird.

Auf Grund der teilweisen konträren Zielfunktionen und daraus resultierenden multilateralen Konformitätskriterien solcher Systeme bedarf es einer neuen Auslegungsmethodik für adaptive Strukturen. Ein geeigneter möglicher Auslegungsprozess wird in dieser Arbeit am Beispiel einer adaptiven Hinterkantenklappe zur aktiven Strömungskontrolle erarbeitet. Das Prinzip eines dynamisch aktiverbaren Ausblasespaltes zur Erzeugung einer Coanda-Strömung an einer stark gekrümmten Wölbklappe ist in Abb. 3.12 dargestellt.

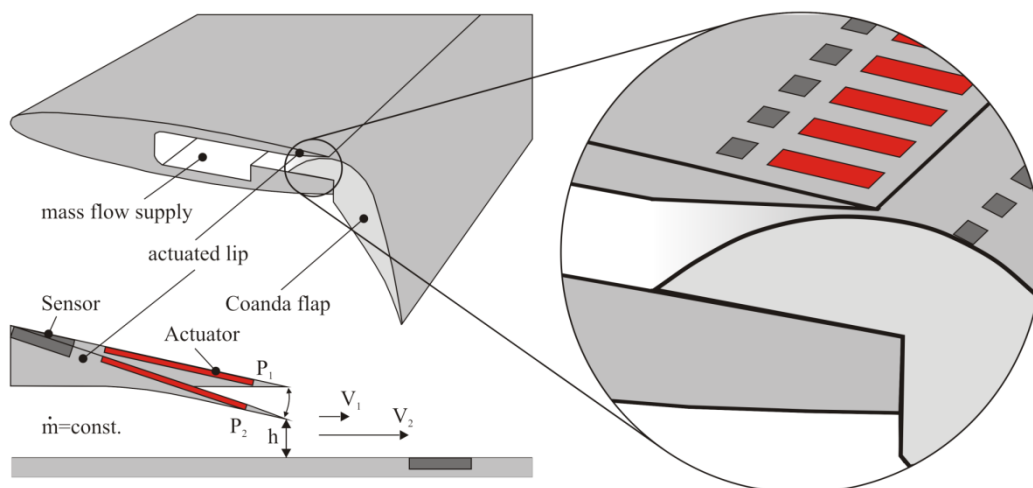


Abb. 3.12: Prinzip der Ausblaslippe [2]

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Validierung der Strömungssimulation ein Wasserkanalmodell entworfen, konstruiert und gefertigt. Der Vorteil eines Wasserkanals gegenüber einem Windkanal zur Untersuchung der Strömungsmechanik besteht in der höheren Fluidichte, die direkten Einfluss auf die Reynoldszahl Re hat, wie in Gl. 3.2 zu sehen ist.

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu} \quad \text{mit} \quad \eta = \nu \rho \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die Reynoldszahl Re kann als das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften verstanden werden und besagt, dass geometrisch ähnliche Körper bei gleicher Reynoldszahl identische Strömungseigenschaften aufweisen. Dies bedeutet, dass in einem Windkanal nur realistische Strömungseigenschaften an Modellen in Originalgröße durchgeführt werden können. Aufgrund der hohen Dichte von Wasser können hingegen in einem Wasserkanal auch mit einem stark maßstabsgetreu verkleinerten Modell aussagekräftige, experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden.

Wasser stellt allerdings eine extreme Randbedingung für elektrische Komponenten dar und muss deswegen schon im Entwurfsprozess berücksichtigt werden.

4 Stand der Forschung zur funktionskonformen Gestaltung adaptiver Strukturen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen der in dieser Arbeit betrachteten adaptiven Struktur beschrieben. Aufgrund der großen Anzahl an Wandlerwerkstoffen beschränkt sich hier die Beschreibung der intelligenten Werkstoffe auf piezoelektrische Keramiken, die die aktuatorische Grundlage der Ausblaslippe bilden.

4.1 Wandlerwerkstoffe als Grundlage für adaptive Strukturen

Bei der Wahl eines geeigneten Wandlerwerkstoffs müssen nicht nur die Anforderungen an die Aktuatorik, wie z. B. Auslenkung und Blockierkraft, berücksichtigt werden, sondern auch die äußeren Randbedingungen, wie z. B. Masse und Bauraum. In Abb. 4.1 sind die Leistungs- und Energiedichten unterschiedlicher Funktionswerkstoffe dargestellt. Aufgrund der hohen Leistungsdichte piezoelektrischer Keramiken, sind diese besonders geeignet, um bei geringem Bauraum hohe Kräfte und Stellwege bei hohen Frequenzen umzusetzen.

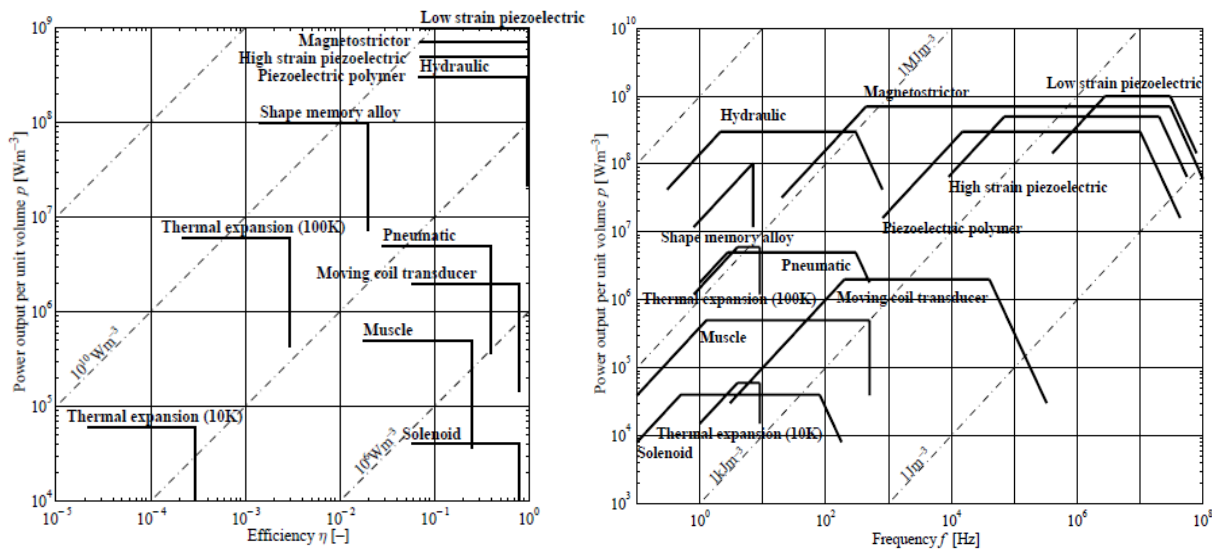


Abb. 4.1: Leistungsdichte über Effizienz und Frequenz von Funktionswerkstoffen [25]

4.2 Grundlagen piezoelektrischer Keramiken

Entdeckt wurde der piezoelektrische Effekt schon 1880 von den Brüdern Pierre und Jacques Curie bei Quarzkristallen. Sie beobachteten eine Änderung der elektrischen Polarisierung und somit das Auftreten einer elektrischen Spannung an Festkörpern, wenn diese elastisch verformt werden. Verursacht wird der Effekt durch Verschiebung von Ionen in den Kristallen und ist bei natürlichen Materialien sehr gering. Daher wurden verbesserte Werkstoffe, wie z. B. Blei-Zirkonat-Titanat-Mischkristalle (PZT) entwickelt, die heute in der Adaptronik Anwendung finden. [26]

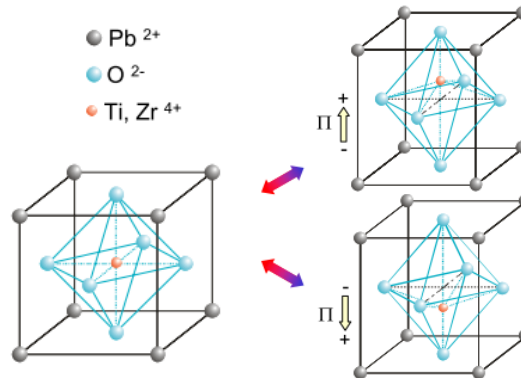


Abb. 4.2: Elementarzelle eines PZT-Kristalls [3]
 linkes Bild: oberhalb der Curie-Temperatur – elektrisch neutral
 rechtes Bild: unterhalb der Curie-Temperatur – elektrischer Dipol

Abb. 4.2 zeigt eine Elementarzelle, die kleinste räumliche Einheit von Atomen in PZT-Keramiken. Oberhalb der Curie-Temperatur T_c von etwa 350 °C liegen die Elementarzellen in einem kubisch-raumzentrierten Gitter vor (Abb. 4.2 linkes Bild). Bei Unterschreitung dieser materialspezifischen Temperatur, geht das Gitter abhängig vom Zirkonatanteil entweder in eine nicht mehr völlige symmetrische tetragonale Form oder rhomboedrische Form über (Abb. 4.2 rechtes Bild). Die Phasengrenze zwischen der tetragonalen und der rhomboedrischen Phase ist nahezu temperaturunabhängig und wird als morphotrop bezeichnet, wobei beide Phasen ferroelektrische Eigenschaften besitzen. Diese Grenze ist nicht scharf, stattdessen liegt ein schmaler Koexistenzbereich beider Phasen vor, zu sehen in Abb. 4.3.

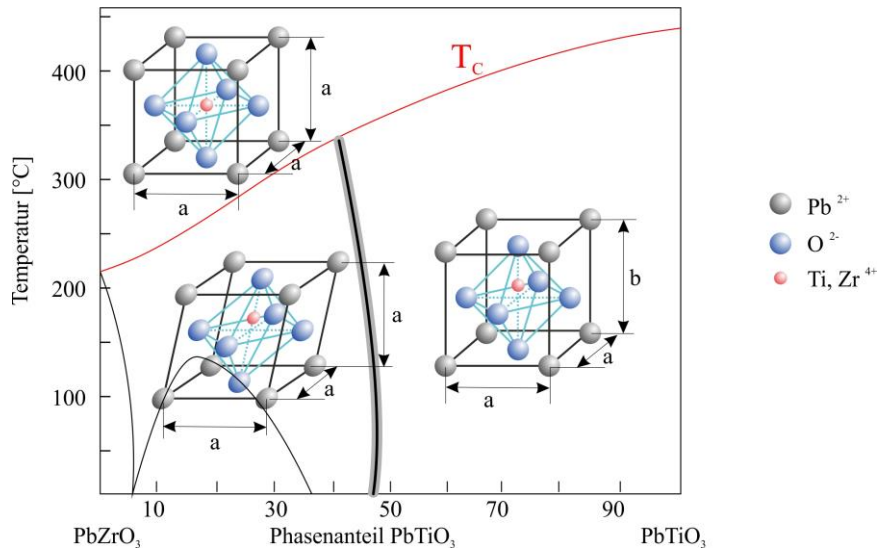


Abb. 4.3: Schematisches Phasendiagramm von PZT [3]

Da die Ladungsschwerpunkte der positiven (Pb, Ti, Zr) und der negativen (O_2) Ionen in einer tetragonal oder rhomboedrisch verzerrten Struktur der Elementarzelle nicht zusammenfallen, entsteht in jeder Elementarzelle ein elektrischer Dipol. Es bilden sich Bereiche gleicher Polarisation aber entgegengesetzter Orientierung, die sogenannten Domänen oder Weisschen Bezirke, aus. Aufgrund der statistisch verteilten Orientierung der Kristallite und damit der Weisschen Bezirke weist die Keramik nach außen keine Polarisation und somit auch keine piezoelektrischen Eigenschaften auf. Zur Polarisierung der Keramik wird ein starkes elektrisches Feld (ca. 2 kV/mm) angelegt, welches zu einem möglichst parallelen Ausrichten der Dipole zum Polarisationsfeld führt (Abb. 4.4).

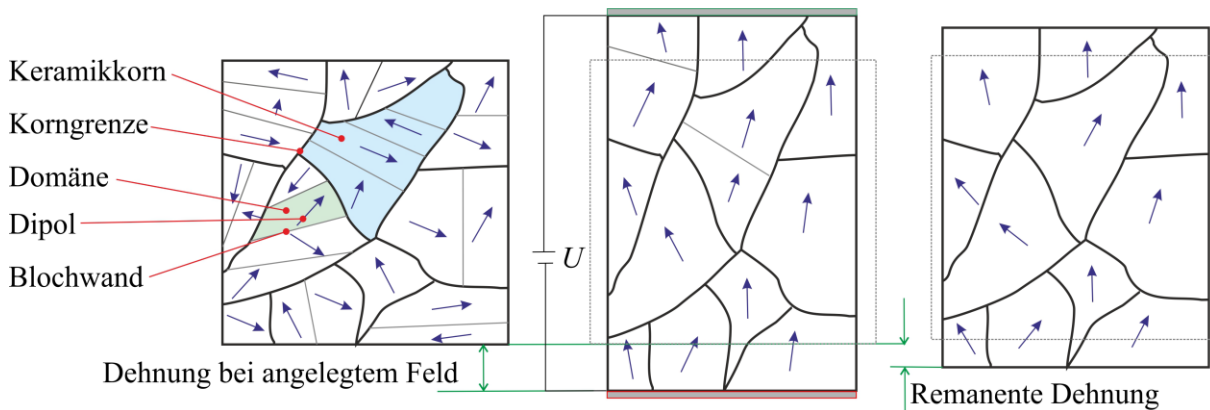


Abb. 4.4: Unpolarisierte (links) und polarisierte Domänenstruktur (rechts) eines Kristallits [3]

Dabei wachsen günstig orientierte Domänen auf Kosten ungünstig orientierterer und das Gitter wird in Polarisationsrichtung gedehnt. Wenn das elektrische Feld aufhört zu wirken, bleibt die Ausrichtung der Dipole weitgehend erhalten und wird als remanente Polarisation P_r bezeichnet. Die bleibende volumenkonstante Längung der Keramik in Polarisationsrichtung wird analog als remanente Dehnung S_r bezeichnet. Das Einsatzgebiet von

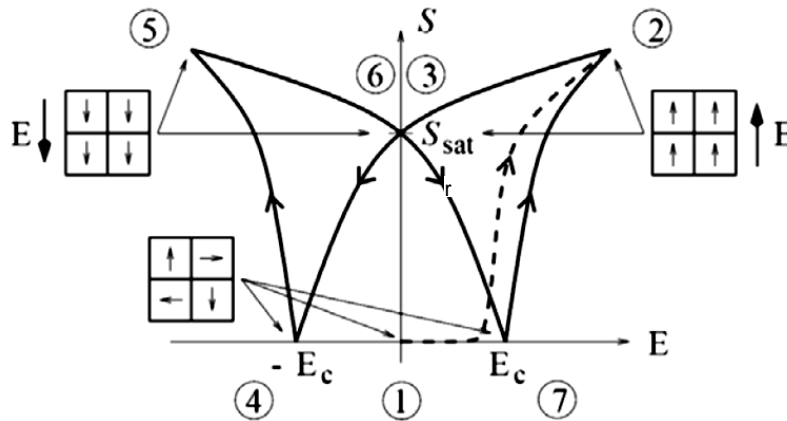


Abb. 4.6: Schmetterlingskurve (bipolare Hysterese) [28]

Für ein unpolarisiertes Material beginnt die Neukurve im Ursprung (1). Bei steigender Feldstärke richten sich, bei Erstpolarisation schlagartig, immer mehr Domänen entlang des elektrischen Feldes aus, was zu einer Dehnung in Richtung des Feldes führt, bis es zu einer Sättigungsercheinung kommt und der polarisierte Zustand in Punkt 2 erreicht ist. Reduziert man die Feldstärke bis $E_k = 0$ (3), werden nur wenige Umklappprozesse der Domänen beobachtet, was zu einer remanenten Dehnung S_r führt. Wächst das elektrische Feld nun in die entgegengesetzte Richtung, geht die Deformation der Keramik weiter zurück, bis die materialspezifische Koerzitivfeldstärke E_c erreicht wird (4), bei der das Kristallgitter umklappt und sich die Domänen erneut an dem Feld ausrichten. Bei steigender Feldstärke nimmt die Dehnung des Materials wieder zu, bis die Sättigung in Punkt 5 erreicht wird, an dem die Piezokeramik völlig unpolarisiert ist. Dreht sich das elektrische Feld erneut, werden wieder alle Dipole umgedreht und es zeigt sich symmetrisches Verhalten und eine vollständig geschlossene Schmetterlingshysterese bildet sich aus [28].

Die Umpolarisierung ist mit einer starken mechanischen Beanspruchung der Keramik verbunden und wird daher im Betrieb vermieden. In der Anwendung nutzt man das einigermaßen proportionale Verhalten der Längenänderung im positiven E-Feld aus. Der zulässige Betriebsbereich einer polarisierten Piezokeramik entspricht also dem Bereich zwischen Punkt 2 und Punkt 3 der Schmetterlingskurve. Abb. 4.7 zeigt die Dehnungshysterese eines zyklisch betriebenen Aktuators.

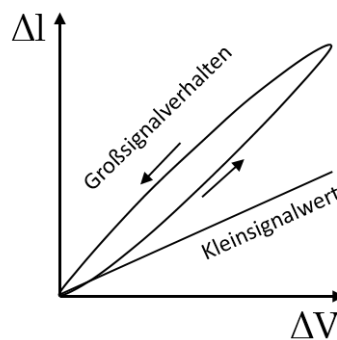


Abb. 4.7: Spannungs-Dehnungskurve (Hysterese) einer Piezokeramik

Das Dehnungsverhalten der Piezokeramik zeigt ein stark nichtlineares Verhalten. Lediglich für kleine elektrische Feldstärken und Dehnungen ergibt sich ein quasilineares Kleinsignalverhalten. Für technische Anwendungen ist aber insbesondere das Großsignalverhalten von Interesse, da hier die Keramik ihre maximalen Stellwege und Stellkräfte erreicht.

Allerdings ist das Großsignalverhalten sehr komplex und hängt von einer Vielzahl von Parametern sowie der Belastungsvorgeschichte der Keramik ab. Auf eine ausführliche mathematische Beschreibung des Großsignalverhaltens wird an dieser Stelle verzichtet, diese kann bei Pertsch [29] nachgeschlagen werden. Um das Verhalten von Piezokeramiken trotzdem mathematisch beschreiben zu können, wird auf ein linearisiertes Werkstoffmodell für den Kleinsignalbereich zurückgegriffen. Als Kleinsignalverhalten ist eine nahezu reversible Polarisations- und Dehnungsänderung definiert.

Beim direkten piezoelektrischen Effekt erzeugt eine auf die Piezokeramik angreifende Kraft in Richtung μ eine entsprechende mechanische Spannung σ_μ in der Keramik. Dies führt zu einer Ladungsverschiebung D_i der in Richtung i zeigenden Dipolmomente. Der piezoelektrische Ladungskoeffizient $d_{\mu i}$ verknüpft die mechanischen mit den elektrischen Eigenschaften und beschreibt den Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Ladungsmenge und resultierender Dehnung bzw. Kraft und deren Richtung. Der erste Index des piezoelektrischen Ladungskoeffizienten kennzeichnet die Richtung der Ursache (Richtung μ der einwirkenden Kraft) und der zweite die Richtung der damit erzeugten Wirkung (Richtung i der Ladungsverschiebung). Die Richtungsangaben beziehen sich auf das in Abb. 4.9 verwendete Koordinatensystem. Dabei ist die Polarisation immer in 3-Richtung festgelegt [3, 30].

$$D_i = d_{\mu i} \sigma_\mu \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Eine Piezokeramik ist ebenfalls ein Kondensator, in dem ein angelegtes elektrisches Feld zu Ladungsverschiebungen führt und dadurch elektrische Energie speichern kann. Wird an einer Piezokeramik ein elektrisches Feld E_k in Richtung k angelegt, so stellt sich eine dazu proportionale dielektrische Verschiebung D_i in Richtung i ein. Der Proportionalitätsfaktor ist die Permittivität ε_{ki}^σ (Dielektrizitätszahl), welche die Fähigkeit zur Speicherung von elektrischer Energie wiedergibt. Der hochgestellte Index σ verweist auf eine konstante mechanische Spannung ($\sigma = 0$) bei der Messung der Permittivität ε_{ki}^σ . Dadurch kann die mechanisch induzierte Ladungsverschiebung unabhängig von der elektrisch induzierten Ladungsverschiebung betrachtet werden [3, 30].

$$D_i = \varepsilon_{ki}^\sigma E_k \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Der indirekte piezoelektrische Effekt lässt sich ebenfalls im Kleinsignalbereich linearisiert beschreiben. Die relative Dehnung ε_λ in Richtung λ der Piezokeramik ergibt sich aus dem angelegten elektrischen Feld E_k in Richtung k und dem piezoelektrischen Ladungskoeffizienten $d_{k\lambda}$ des piezoelektrischen Materials. Der erste Index des piezoelektrischen Ladungskoeffizienten kennzeichnet die Richtung der Ursache (Richtung k des elektrischen Felds E) und der zweite die Richtung der damit erzeugten Wirkung (Richtung λ der Dehnung ε) [3, 30].

$$\varepsilon_\lambda = d_{k\lambda} E_k \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Betrachtet man die Piezokeramik bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften nach dem Hookeschen Gesetz, so stellt sich in Folge einer mechanischen Spannung σ_μ in Richtung μ proportional dazu eine mechanische Dehnung ε_λ in Richtung λ ein. Der Proportionalitätsfaktor ist die Elastizitätskonstante $s_{\mu\lambda}^E$ (ungefähr der Kehrwert des E-Moduls), die das Verhältnis von Dehnung und mechanischer Spannung angibt. Der hochgestellte Index E gibt an, dass die Bestimmung des Elastizitätskoeffizienten $s_{\mu\lambda}^E$ bei konstantem elektrischen Feld erfolgt. Somit erfolgt eine unabhängige Betrachtung der mechanisch induzierten Dehnung von der elektrisch induzierten Dehnung. Ein negativer Wert für ε_λ in Gl. 4.4 entspricht einer mechanischen Stauchung [3, 30].

$$\varepsilon_\lambda = s_{\mu\lambda}^E \sigma_\mu \quad (\text{Gl. 4.4})$$

Der piezoelektrische Effekt lässt sich durch die Verknüpfung der Mechanik und der Elektrostatik darstellen. Diese Verknüpfung wird durch die zwei folgenden gekoppelten Gleichungen beschrieben [3, 30].

$$\text{Sensoreffekt:} \quad D_i = d_{\mu i} \sigma_\mu + \varepsilon_{ki}^\sigma E_k \quad (\text{Gl. 4.5})$$

$$\text{Aktuatoreffekt:} \quad \varepsilon_\lambda = s_{\mu\lambda}^E \sigma_\mu + d_{k\lambda} E_k \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Eine ausführliche Herleitung des linearisierten Kleinsignalverhaltens ist im Adaptronik Buch von Sinapius zu finden [3].

Wie aus den Gl. 4.3 und 4.4 zu erkennen ist, wird zwischen zwei unterschiedlichen Anwendungen für piezoelektrischer Werkstoffe unterschieden. Wird auf eine mit Elektroden versehene piezoelektrische Keramik Druck oder Zug ausgeübt, werden innerhalb des Piezoelektrikums Ladungsschwerpunkte verschoben, wie in Abb. 4.8 a) bis c) zu sehen ist (direkter piezoelektrischer Effekt). An den Elektroden treten dabei Ladungen auf, wodurch sich ein elektrisches Feld ausbildet und eine elektrische Spannung messbar wird. Umgekehrt längt oder staucht eine angelegte elektrische Spannung die piezoelektrische Keramik, das in Abb. 4.8 die unteren drei Grafiken d) bis f) darstellen.

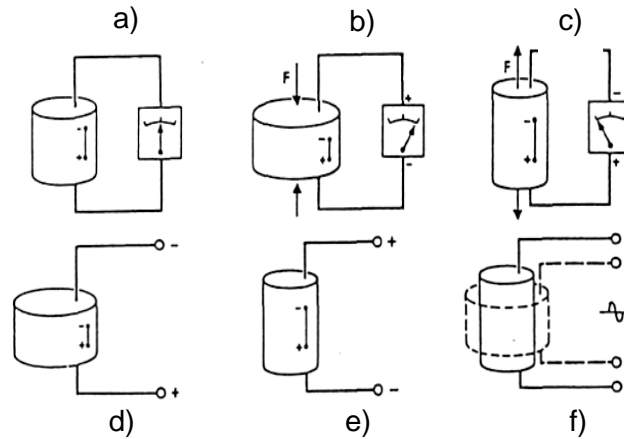


Abb. 4.8: Piezoelektrischer Effekt (oben) und inverser piezoelektrischer Effekt (unten) [26]

Mit dem piezoelektrischen Effekt lassen sich Verformungen messen oder mechanische Energie kann in elektrische Energie gewandelt werden. Wirkt eine mechanische Kraft parallel zur Polarisationsrichtung und verformt das piezoelektrische Material, kann eine elektrische Spannung zwischen den Elektroden gemessen werden. Diese Spannung ist proportional zur mechanischen Kraft.

Der inverse piezoelektrische Effekt kann genutzt werden, um elektrische in mechanische Energie umzuwandeln. Wird an den Elektroden eine elektrische Spannung aufgebracht, die ein elektrisches Feld parallel zur Polarisationsrichtung erzeugt, dehnt sich das piezoelektrische Material in Polarisationsrichtung. Das Verhalten eines piezoelektrischen Werkstoffes ist richtungsgebunden und seine Verformung hängt von der Richtung des elektrischen Feldes ab. Liegt das elektrische Feld parallel zu Achse 3 und in Polarisationsrichtung, dehnt sich die Keramik in Richtung der Achse 3 und verkürzt sich in den lateralen Richtungen (Abb. 4.9 a und b). Ist hingegen das elektrische Feld parallel zu Achse 1 ausgerichtet, schert die Keramik um Achse 2 (Abb. 4.9 c). Diese Verformungen werden als Längseffekt (d_{33} -Effekt), Quereffekt (d_{31} -Effekt) und Schereffekt (d_{15} -Effekt) bezeichnet. Dabei steht der erste Index für die Richtung des elektrischen Feldes und der zweite Index kennzeichnet die Richtung der Verformung. Der Längseffekt und der Quereffekt treten grundsätzlich in Kombination auf, um die Volumenkonstanz der Keramik bei der Ausdehnung zu gewährleisten [30].

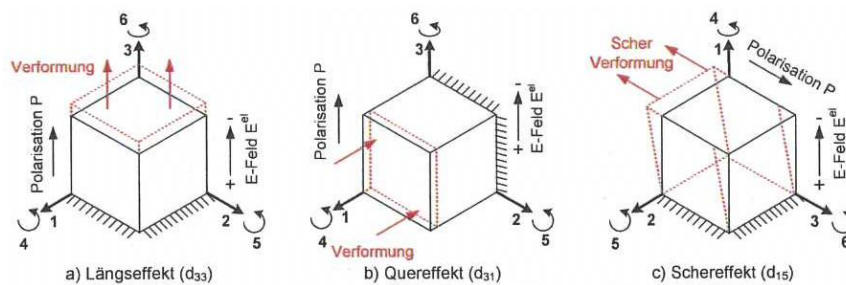


Abb. 4.9: Piezoelektrische richtungsabhängige Teileffekte [30]

Die drei richtungsabhängigen piezoelektrischen Teileffekte unterscheiden sich in ihrer Ausprägung und beeinflussen daher die Bauweisen von Piezoaktuatoren. Die Anordnung

der Elektroden ist dabei ausschlaggebend, welcher Effekt genutzt wird. Der einfachste Aufbau für einen Flächenaktuator ergibt sich für den Quereffekt. In diesem Fall reichen einfache flächige Elektroden, die beidseitig auf einer dünnen Piezokeramik aufgetragen werden. Das elektrische Feld bildet sich dann homogen zwischen den Elektroden aus (Abb. 3.10 a). Soll hingegen der Längseffekt ausgenutzt werden, mit dem bis zu dreifach höhere Dehnungswerte im Vergleich zum Quereffekt erreicht werden können, wird der Aufbau des Aktuators deutlich komplizierter. Bei bisherigen Stapelaktuatoren werden zwei ineinandergreifende Elektrodenkämme mit unterschiedlicher Polarität auf der Oberfläche der Keramik angebracht, so dass zwischen den Elektrodenfingern wechselnde elektrische Felder entstehen (Abb. 4.10 b).

Neuartige Aktuatoren sind piezokeramische Multilayerstapel, bei denen die Elektroden als sehr dünne Schichten ($3\ \mu\text{m}$) auf den keramischen Grundkörper aufgebracht und anschließend mit der Keramik gesintert werden (Abb. 4.10 c).

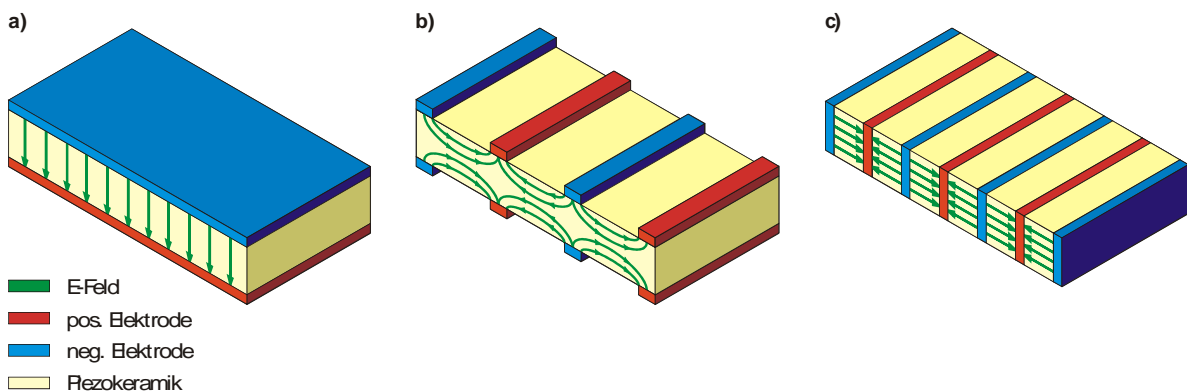


Abb. 4.10: d33-Aktuator mit Kammelektroden [30]

Dadurch ist die Elektrode Bestandteil des monolithischen Keramikkörpers. Weil keine Polymerwerkstoffe zum Aufbau des Aktuators benötigt werden, ist der Multilayerstapel deutlich steifer als ein konventioneller Stapelaktuator. Zusätzlich ermöglicht diese Bauweise eine Reduzierung der Betriebsspannung, da mehr Elektroden mit geringerem Abstand in den Stapel eingebracht werden können, ohne dass die Steifigkeit des Aktuators drastisch abnimmt. Im Gegensatz zu den kammartigen Oberflächenelektroden herkömmlicher Stapelaktuatoren, bedecken die Elektroden der am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR entwickelten Multilayer-Piezoaktuatoren den gesamten Querschnitt der Keramik. Dadurch bilden sich sehr homogene Felder zwischen den Elektroden aus und erlauben somit eine optimale Ausnutzung des keramischen Werkstoffes. Die Elektrodenabstände können so angepasst werden, dass mit Betriebsspannungen von unter 150 V bereits Dehnungswerte von $1200\ \mu\text{m}/\text{m}$ erreicht werden können.

Die Leistungsfähigkeit eines Aktuators wird durch seine freie Auslenkung und seine Blockierkraft definiert [3, Zitat, Sinapius: Adaptronik, S. 24,]. Dazu werden Auslenkung und Kraft in einem Arbeitsdiagramm dargestellt. Die an den Achsen des Diagramms aufgetragene freie Auslenkung und Blockierkraft werden durch eine Gerade miteinander verbunden. Die so entstandene Arbeitsgerade gibt an, bei welcher Auslenkung der Aktuator welche Kraft erzeugen kann. Dieses Diagramm gibt somit Auskunft über das Arbeitsvermögen eines Aktuators. Bei der Bewertung der Effizienz von piezoelektrischen Aktuatoren

spielt also die Bestimmung der freien Auslenkung und der Blockierkraft eine zentrale Rolle. Zur Bestimmung der freien Auslenkung wird der Aktuator frei (ohne Vorspannung) betrieben, so dass bei der Auslenkung keine Kraft erzeugt werden muss. Nach dem Anlegen der entsprechenden Spannung stellt sich die maximale (freie) Auslenkung ein.

Die Blockierkraft ist die maximal vom Aktuator erzeugbare Kraft. Diese Kraft wird erzielt, wenn die Auslenkung des Aktuators vollständig blockiert wird. Dies bedeutet, dass er gegen eine Last mit unendlich hoher Steifigkeit arbeiten muss. Da solch eine Steifigkeit nicht existiert, wird die Blockierkraft folgendermaßen gemessen: Die Aktuatorlänge vor Ansteuerung wird gemessen. Anschließend wird der Aktuator ohne Last maximal ausgelenkt und mit einer ansteigenden externen Kraft bis auf die Ausgangslänge zurückgedrückt. Die dafür notwendige Kraft ist die Blockierkraft.

Es gibt drei typische Lastfälle für den Betrieb von Piezoaktuatoren, die auch für die Untersuchungen in dieser Arbeit von Bedeutung sind:

1. Auslenkung ohne Vorspannung gegen eine Last mit geringer Steifigkeit

Arbeitet der Aktuator gegen eine Federsteifigkeit, verringert sich seine Auslenkung, da sich bei der Stauchung der Feder eine Gegenkraft aufbaut. Die Auslenkung-Kraft-Gerade in Abb. 4.11 rechts wird als Arbeitskennlinie bezeichnet. Der Anstieg der Arbeitskennlinie $F_{eff}/\Delta L$ entspricht der Laststeifigkeit k_L . Ist die Steifigkeit der Last k_L deutlich geringer als die Steifigkeit des Aktuators k_A , liegt die Auslenkung ΔL nahe an der Nominalauslenkung ΔL_0 wie Gl. 4.5 verdeutlicht.

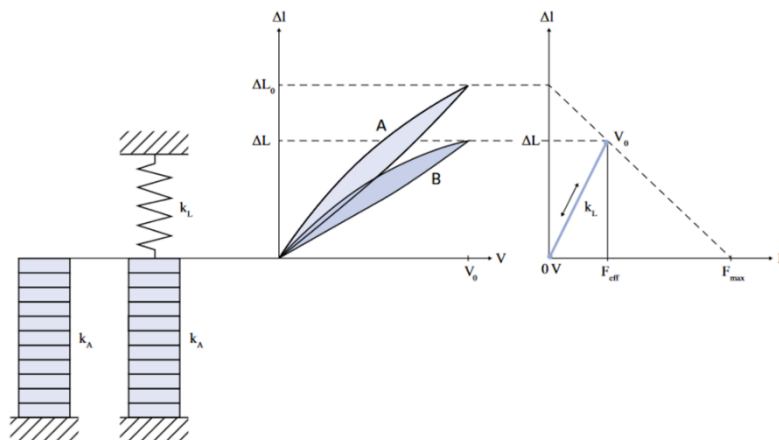


Abb. 4.11: Aktuator arbeitet gegen eine geringe Federsteifigkeit [31]

$$\Delta L = \Delta L_0 \left(\frac{k_A}{k_A + k_L} \right) \quad \text{Gl: 4.7}$$

2. Auslenkung gegen eine große konstante Last

Wird auf den Aktuator eine große Masse gelegt, führt die Gewichtskraft F_v zu einer Stauchung des Aktuators. Dadurch verschiebt sich die Nullposition entlang der Steifigkeitskennlinie des Aktuators. Während der Ansteuerung entsteht keine zusätzliche Kraft, so dass die Arbeitskennlinie dem Verlauf ohne Vorspannung entspricht.

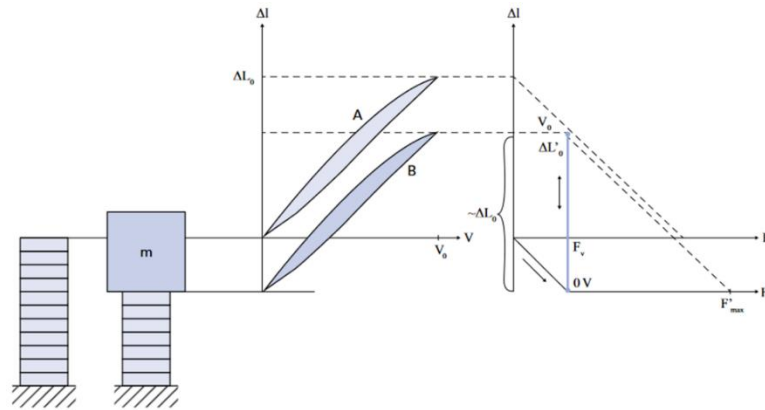


Abb. 4.12: Aktuator arbeitet gegen eine große konstante Last [31]

3. Auslenkung gegen einen Druck

Arbeitet der Aktuator gegen einen Druck, so entsteht z. B. beim Schließen eines Ventils eine immer größer werdende Kraft, dieses Verhalten resultiert in einer nichtlinearen Arbeitskennlinie. Der Start der Auslenkung entspricht dem Betrieb ohne Last. In der Nähe des Ventilschlusses wirkt eine stärkere Gegenkraft durch die Fluidströmung. Beim Erreichen des Ventilsitzes wird die Auslenkung nahezu vollständig blockiert, so dass sich nur die Kraft erhöht.

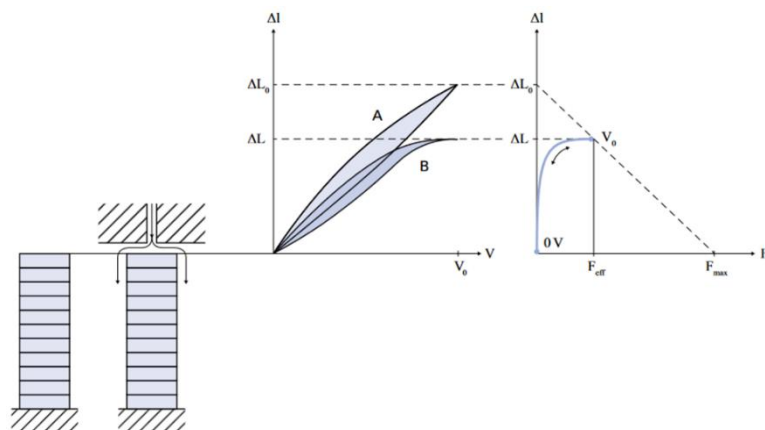


Abb. 4.13: Aktuator arbeitet gegen einen Druck [31]

Im Fall der Ausblaslippe wird bei der Auslegung von Fall 2, Auslenkung gegen eine große konstante Last, ausgegangen, da die Ausblaslippe im Wasserkanalmodell gegen einen konstanten Plenumsdruck von 6 bar agieren soll und keine Druckschwankungen im Ausblasespalt erwartet werden.

4.3 Degradation piezoelektrischer Aktuatoren

Beim Degradationsprozess piezoelektrischer Keramiken spielt die Diffusion von Feuchtigkeit eine entscheidende Rolle. Unter Diffusion wird die Bewegung von Atomen oder Molekülen ohne äußere Krafteinwirkung verstanden. Bei der Diffusion führt ein Konzentrationsunterschied von Atomen oder Molekülen zu einem Teilchenstrom, der den Konzentrationsunterschied ausgleicht [32]. Die Diffusionsprozesse in Keramiken beschreibt Pelleg [33]. Allerdings reicht die isolierte Betrachtung der Diffusion bei piezoelektrische Keramiken nicht aus um die Degradationsprozesse zu verstehen. Untersuchungen von Thongrueng [34] und Zhang [35] deuten darauf hin, dass die Degradation piezoelektrischer Aktuatoren durch Elektrolyse hervorgerufen wird. Durch eindringende Feuchtigkeit werden beim Anlegen einer elektrischen Spannung an den metallischen Elektroden des Aktuators Redoxreaktionen induziert, bei der die Oxidation an der Anode und die Reduktion an der Kathode erfolgen. Der Degradationsprozess ist schematisch in Abb. 4.14 a) dargestellt. An der Anode bilden sich Silberionen (Ag^+) die Richtung Kathode migrieren. Es wird vermutet, dass Feuchtigkeit durch kleine Hohlräume entlang der Korngrenzen tief in die Keramik diffundiert und somit elektrisch leitfähige Kanäle zwischen Anode und Kathode bildet. Ob die elektrische Leitfähigkeit dieser Kanäle schon ausreicht, um einen Kurzschluss zu erzeugen, kann nicht abschließend geklärt werden. Allerdings wird angenommen, dass die Silberionen entlang dieser Kanäle zur Kathode wandern und sich dort ablagern. Die Kathode dient dabei als Kristallisationskeim für Dendriten die Richtung Anode wachsen. Spätestens wenn solch ein Dendrit die Anode erreicht, entsteht ein elektrisch leitfähiger Kanal aus Silber der zum Kurzschluss führt. In Abb. 4.14 b) sind solche Dendriten in einer Piezokeramik zu sehen. Das Phänomen des Dendritenwachstums bei elektrochemischen Elementen ist aus der Akkumulatortechnologie bekannt. Dort führen Dendriten beim Durchdringen des Separators zwischen den Elektroden ebenfalls zum Kurzschluss oder in schwächer ausgeprägter Form zur Selbstentladung der Batteriezelle.

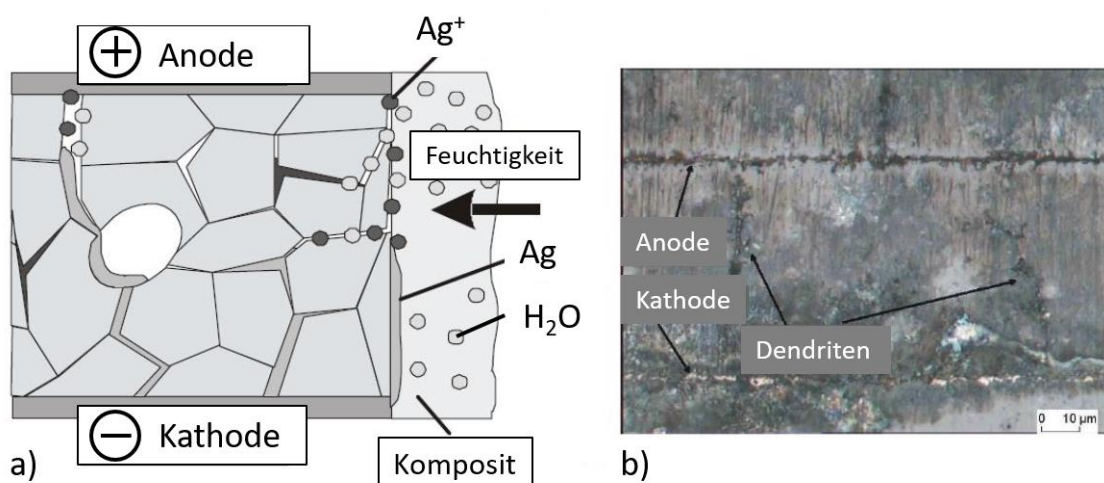


Abb. 4.14: a) Schematische Darstellung des Degradationsprozesses;
b) Dendritenwachstum in einer Piezokeramik [31]

5 Entwurf hochbelasteter adaptiver Strukturen für harsche Umgebungsbedingungen

Eine besondere Herausforderung stellt der Einsatz von adaptiven Strukturen in harschen Umgebungsbedingungen dar. Die Ausblaslippe soll für Strömungsuntersuchungen in einem Wasserkanalmodell integriert werden. Aufgrund der höheren Dichte von Wasser im Vergleich zu Luft, können in einem Wasserkanal selbst mit Modellen im Maßstab 1:10 noch realistische Strömungsverhältnisse simuliert werden, die sonst im Windkanal nur mit Full-Scale-Modellen möglich sind. Aufgrund des hohen Druckes im Plenum, der für die Ausblasung benötigt wird, müssen schon beim Entwurf der Ausblaslippe die multilateralen Kopplungsfaktoren für Auslenkung, Blockierkraft und Steifigkeit berücksichtigt werden, da sonst der Betrieb der Ausblaslippe im Experiment nicht im gewünschten Arbeitspunkt gewährleistet werden kann. In diesem Kapitel werden die Anforderungen, das Design und die Charakterisierung der Ausblaslippe beschrieben.

5.1 Wasserkanalmodell

Als Versuchsanlage für experimentelle Strömungsuntersuchungen des aktiven Hochauftriebskonzepts steht der Große Wasserkanal Braunschweig (GWB) der TU Braunschweig zur Verfügung. Er ist als geschlossener Kanal mit einem Messstreckenquerschnitt von 1 m x 1 m und einer Länge von 6 m ausgelegt. Der GWB wird mit Klarwasser betrieben und kann auf 2 bar gegenüber der Umgebung bedruckt werden, um Kavitation an Modell und Pumpe zu vermeiden. Außerdem kann das Wasser im Kanal zur Verringerung der Fluidviskosität auf 40 °C aufgeheizt werden. Mit einem 2D-Profilmodell der Streckung 3 und einer Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke 6 m/s können so Reynoldszahlen von etwa $3 \cdot 10^6$ erreicht werden. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Reynoldszahl können im GWB dynamische Messungen mit optischen Messmethoden, insbesondere Time Resolved-Particle Image Velocimetry (TR-PIV), angewendet werden.

5.2 Anforderungsanalyse

Es bedarf einer gründlichen Anforderungsanalyse um die multilateralen Funktionskonformitäten einer adaptiven Struktur frühzeitig zu erfassen und im Entwurfsprozess einfließen zu lassen. In der Anforderungsanalyse werden aus der Definition des Ziels, Anforderungen an das jeweilige System definiert und klar von den äußeren Randbedingungen unterschieden.

Tab. 5.1: Anforderungen an die Ausblaslippe für ein Wasser- und ein Windkanalmodell

Anforderung	Wert Wasser	Wert Luft
Design:		
Modulares Design	ja	ja
Einfache Erweiterung	ja (1 m Spannweite)	ja (1,5 m Spannweite)
Einfache Austauschbarkeit	ja	ja
Einstellbare Spalthöhe	nein	ja ($\pm 25 \mu\text{m}$)
Geometrie:		
Maße (Länge x Breite)	55 x 40 mm ²	110 x 30 mm ²
Konturgenauigkeit	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 50 \mu\text{m}$
Oberflächengüte	Ra = 0,1 μm	Ra = 0,4 μm
Max. Spalt zwischen zwei Lippensegmenten	1 mm	2 mm
Dicke der Lippenspitze	0,5 mm	0,4 mm
Spaltabdichtung	ja	ja
Kinematik:		
Max. Auslenkung	0,2 mm	0,5 mm
Max. Betriebsfrequenz	30 Hz	300 Hz
Auslenkungsgenauigkeit	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 25 \mu\text{m}$
Auslenkungsunterschied nebeneinanderliegender Lippensegmente	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 25 \mu\text{m}$
Sensor (Messung der Spalthöhe):		
Auflösung	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 25 \mu\text{m}$
Lasten:		
Max. statische Last	6 bar	1 bar
Max. dynamische Last	0.6 bar	0.2 bar
Umgebungsbedingungen:		
Max. Umgebungstemperatur	40 °C	40 °C
Min. Umgebungstemperatur	15 °C	15 °C
Relative Luftfeuchtigkeit	100 %	30 % (40 °C) – 70 % (15 °C)
Abdichtung	wasserdicht	spritzwassergeschützt
Mechanische Eigenschaften:		
Dehnungsgrenze für Aktor	0,3 %	033 %
Min. Lastzyklenzahl	10 Mio.	500 Mio.
Min. Lebensdauer	25 Tage	300 Tage
Energie:		
Betriebsspannung	0 – 200 V	0 – 1000 V
Max. Strom (peak)	500 mA	500 mA
Max. Leistung (peak)	100 W	500 W
Elektrischer Anschluss	BNC	BNC
Systemregelung:		
Regelsystem	dSpace System (2D)	dSpace System (3D)
Instandhaltung:		
Wartungsfrei	ja	ja

5.3 Aktuatorkonzept

Die adaptive Lippenspitze der Ausblaslippe wird in dem Wasserkanalmodell durch einen Plenumsdruck von 6 bar (Flächenlast) beaufschlagt. Da diese Art von Belastung in den experimentellen Untersuchungen mit dem aufgebauten Prüfstand nicht nachgestellt werden kann, wird der Druck in eine an der Spitze angreifende Kraft umgerechnet. Dazu wird die Ausblaslippe ohne äußere Belastung im FE-Modell durch die Aktuatoren voll ausgelenkt und mit einem Druck beaufschlagt. Der Druck wird solange erhöht, bis die Lippe wieder in ihre Ausgangsposition zurückgedrückt wird. Hiermit sind die maximale Auslenkung und der Blockierdruck bestimmt. Die Belastung wird anschließend in eine Kraft (Linienlast über die Lippenbreite) umgewandelt. Die resultierende Kraft wird als Blockierkraft definiert und ist das Äquivalent zum Blockierdruck. Diese Werte dienen als Referenzwerte. Im Anschluss wird die Ausblaslippe erneut ausgelenkt und dieses Mal durch eine Linienlast an der Lippenspitze wieder in ihre Ausgangslage zurückverformt. Die dafür aufgebrauchte Kraft ist die Blockierkraft. Ein Vergleich mit den Referenzwerten aus der Druckmessung zeigt Übereinstimmung. Damit entspricht die Auslegung den Anforderungen aus Kapitel 5.2. Die berechneten Werte sollen mit den experimentell ermittelten Daten aus dem Versuchsaufbau verglichen werden. Die Versuchsergebnisse dienen also zur Verifizierung des FE-Modells und sollen die Richtigkeit der Berechnung der Blockierkraft beweisen.

Für die konstante Kraftbelastung spricht, dass der Differenzdruck konstant sein soll, auch wenn die Lippe den Ausblasespalt schließt. Außerdem ist das Medium Wasser generell als inkompressibel anzusehen und funktioniert somit nicht als „Feder“, wie z. B. eine Gasdruckfeder.

Für eine Federwirkung könnte aber sprechen, dass sich durch das „Schließen“ (enger werden des Spaltes) ein Staudruck aufbauen könnte und somit die Lippe gegen eine immer größer werdende Belastung, bei größer werdender Auslenkung (in Richtung „Schließen“) arbeiten muss.

Aktuatoren und Sensoren auf Basis von Funktionswerkstoffe sind ein wesentlicher Bestandteil adaptiver Strukturen. Piezoelektrische Keramiken bilden aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften eine eigene Gruppe unter den technischen Keramiken. Ihr Einsatzgebiet ist sehr weit gefasst. Sie können sowohl als Sensoren als auch Aktuatoren verwendet werden. Aufgrund vielfältiger Vorteile wie z. B. gute Verfügbarkeit, großer Frequenzbereich und hohe Kräfte, werden piezokeramische Werkstoffe aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) am häufigsten für den Aufbau adaptiver Strukturen verwendet. Zur Verbesserung der Eigenschaften der spröden und bruchempfindlichen Keramiken sowie zur Vereinfachung der Handhabung, hat sich die Verwendung von Piezokompositen durchgesetzt. Piezokomposite sind eine Kombination aus der spröden Keramik mit einem duktilen Polymerwerkstoff und enthalten auch notwendige zusätzliche Komponenten wie Elektroden, Energiezuleitungen und Isolatoren. In der Adaptronik kommen insbesondere flächige Piezokomposite zum Einsatz, bei denen die Krafteinleitung nicht an diskreten Punkten, sondern flächig über eine Klebschicht erfolgt. Diese Art von Aktuator wird als Flächenaktuator bezeichnet. Im Gegensatz dazu werden Stapelaktuatoren meistens eingesetzt um hohe Stellkräfte zu übertragen, welche sie an diskreten Punkten in die Struktur einkoppeln. Aufgrund ihrer hohen Steifigkeit sind sie allerdings nicht für eine Applikation auf gekrümmten Oberflächen geeignet. In der Regel sind sie vom Werk aus mit einer passiven

keramischen Schicht elektrisch isoliert und somit widerstandsfähiger gegenüber Umwelteinflüssen.

Wegen der hohen Druckkräfte im Ausblasespalt und den daraus resultierenden hohen Stellkräfte an die Aktuatorik fällt die Wahl zur Umsetzung der aktiven Ausblaslippe auf Multilayerstacks. Die Realisierung einer geeigneten Aktuatorik für die Ausblaslippe geschieht durch Integration von Aktuatoren in die Struktur, die dann als aktive Struktur bezeichnet wird. Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten der Aktuierung unterschieden. Die diskrete Aktuierung sieht einzelne mechanische Stellglieder wie Hydraulikzylinder oder Servomotoren vor, die ihre Kraft über besondere Vorrichtungen in die Struktur ein-koppeln.

Diskrete Aktuatoren benötigen zusätzlichen Bauraum. Das ist bei Flügeln von Verkehrsflugzeugen ein Problem, da sich im Inneren des Flügelkastens der Kraftstoffvorrat befindet und zwischen Vorderholm und Vorflügel bzw. Hinterholm und Landeklappe sich die mechanische Ansteuerung der Hochauftriebssysteme und diverse Versorgungsleitungen befinden. Ein weiterer Nachteil der diskreten Aktuatorik liegt darin begründet, dass die Kraft konzentriert am Aktuator zu Verfügung gestellt wird. Neben der Zusatzmasse zur Ankopplung der Aktuatoren an die Struktur muss auch die Leichtbaustruktur verstärkt werden, da die Aufnahme großer lokaler Kräfte und Momente nur schwer mit aktuellen Leichtbaukonzepten vereinbar ist.

Die verteilte Aktuatorik dagegen verwendet Funktionswerkstoffe, die strukturkonform in das mechanische System integriert werden.

Die aktive Ausblaslippe soll ohne bewegliche Teile auskommen, da eine Integration von Stellgliedern in der Struktur aufgrund der geringen Maße des Wasserkanalmodells nicht möglich ist. Deshalb muss ein Moment direkt in der Struktur erzeugt werden, welches die Hinterkante verformt. Dazu wird ein Funktionswerkstoff benötigt, der seine Form ändert, indem er elektrische in mechanische Energie wandelt und gleichzeitig die auftretenden Lasten trägt. Typische Vertreter sind hier piezoelektrische Keramiken auf Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) -Basis, die bei entsprechender Konfektionierung entweder durch Applikation oder Integration in den Lastpfad einer Struktur eingebunden werden.

Vor dem Hintergrund der dynamischen Anforderungen und des geringen zur Verfügung stehenden Bauraumes werden piezokeramische Aktuatoren in einer Biegewandlerkonfiguration bevorzugt. Es stellt sich die Frage, ob die geforderte Auslenkung mit nur einem Aktuator erreicht werden kann oder ein Biegewandlerkonzept mit zwei Aktuatoren, jeweils einer auf Ober- und Unterseite, nötig ist. Eine FE-Analyse einer Monomorph- und einer Trimorphkonfiguration soll diese Fragestellung klären. Das Ergebnis ist in Abb. 5.1 zu sehen. Ohne Ausblasung liegt die Lippenspitze der Ausblaslippe auf dem Ausblasespalt auf und schließt diesen. Mit Ausblasung wird die Ausblaslippe mit steigendem Druck nach oben gebogen, bei einem Druck von 6 bar bedeutet dies eine Verformung an der Lippenspitze von ca. 60 μm . Es ist zu sehen, dass ein Monomorph mit einer Auslenkung von 120 μm die geforderte Auslenkung von 200 μm nicht erreicht. Der Trimorph hingegen erfüllt die Anforderung und bietet mit einer Auslenkung von 255 μm sogar noch Reserven in der Auslegung.

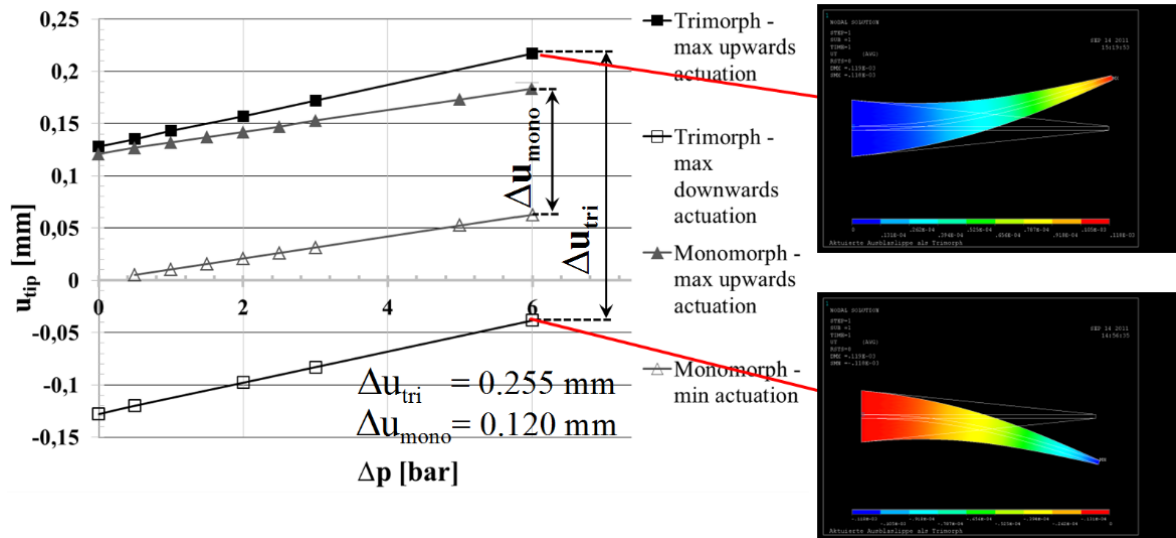


Abb. 5.1: FE-Analyse einer Monomorph- und einer Trimorphkonfiguration

Ein Biegewandler erreicht trotz der geringen aktiven Dehnung von piezoelektrischen Aktuatoren eine große Verformung, kann dafür aber nur eine relativ geringe Kraft übertragen. Die erreichbare Auslenkung des Biegewandlers wird von dessen Geometrie begrenzt. Je dünner ein Biegewandler ist, desto größer ist dessen maximaler Krümmungsradius, umso geringer ist aber auch seine Biegesteifigkeit. Bei konstanter Krümmung steigt die erreichbare Auslenkung am freien Ende des Biegewandlers quadratisch mit dessen aktiver Länge, gleichzeitig führt eine größere Länge aber auch zu größeren Biegemomenten an der Einspannung. Das Biegemoment im Biegewandler nimmt von der Hinterkante zur Wurzel hin zu. Deshalb erreicht ein Biegewandler mit variabler Dicke, die von der freien Hinterkante zur eingespannten Wurzel ansteigt, unter Belastung die maximale Auslenkung.

Die als Biegewandler ausgeführte Ausblaslippe besteht am Übergang zum Tragflügel aus einer passiven Wurzel, einem mittleren aktiven Bereich und einer passiven Hinterkante, die das Element am freien Ende abschließt (Abb. 5.2).

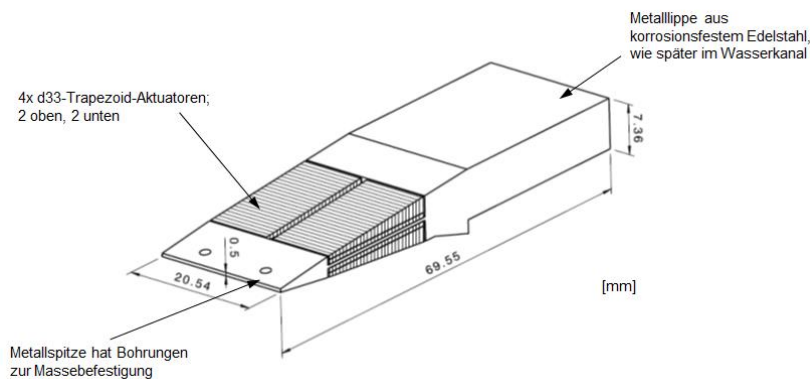


Abb. 5.2: Zeichnung der Ausblaslippe

Um eine möglichst große Wirksamkeit der aktiven Ausblaslippe zu ermöglichen, soll das Biegemodul aus piezokeramischen d_{33} -Aktuatoren realisiert werden. Die Leistungsfähigkeit eines Aktuators wird wesentlich durch seine freie Dehnung und seine Blockierkraft definiert. Der Vorteil von Piezokeramiken, die den d_{33} -Effekt nutzen, liegt insbesondere in der deutlich höheren Ladungskonstante des d_{33} -Effekts und den daraus resultierenden höheren Dehnungen von d_{33} -Wandlern. Daher fällt die Wahl auf PICMA® Multilayerstackelaktuatoren (Werkstoff PIC252) von PI, die den piezoelektrischen Längseffekt (d_{33} -Effekt) bei einer Betriebsspannung von 120 V ausschöpfen können. Die niedrige Ansteuerungsspannung resultiert aus der nötigen elektrischen Feldstärke von 2,5 kV/mm zur Dehnung der Keramik und dem geringen Elektrodenabstand von lediglich 53 μm . Da die gewünschten Aktuatoren nicht in der benötigten Geometrie erhältlich sind, müssen sie mechanisch bearbeitet werden, um sie der Tragflügelkontur anzupassen. In Abb. 5.3 a) sind kommerzielle Standardmultilayerstacks zusehen, b) zeigt ein Schnittbild eines Multilayerstacks mit den integrierten Elektrodenfingern und in c) ist ein in Kontur geschliffener Multilayerstack abgebildet.

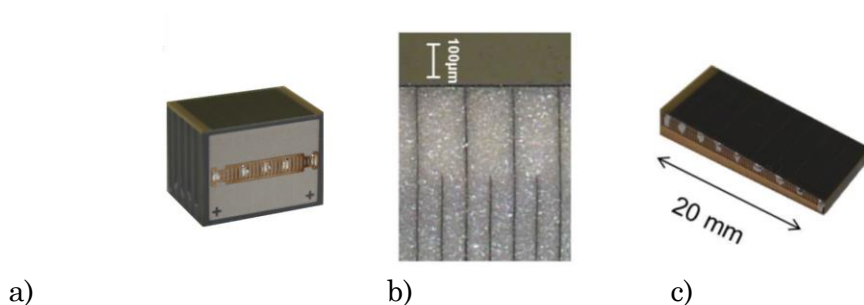


Abb. 5.3: a) Standard PICMA® Multilayerstack, b) Elektrodenfinger, c) bearbeiteter Multilayerstack (rechts)

Als geeigneter Werkstoff für die passive Struktur der Ausblaslippe kommen Faserverbund- und metallische Werkstoffe in Frage, die zum Tragflügel kompatibel sind. Deshalb wird die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen für das spätere Windkanalmodell angestrebt. Vorgesehen ist ein Prepreg-Aufbau aus CFK, da es gegenüber GFK eine höhere Steifigkeit besitzt.

Hier soll aber zunächst das Modell für den Wasserkanal erarbeitet werden, welches ein anderes Konzept als dem für das doppelt so große Windkanalmodell darstellt. Aufgrund der geringeren Maße wird das Substrat, auf dem die Aktuatoren appliziert werden sollen, sehr dünn, was eine nicht fasergerechte Gestaltung der Struktur zur Folge hätte, da nur zwei CFK-Lagen im Aufbau untergebracht werden könnten. Zudem ist bei der Bearbeitung der Aussparungen für die Aktuatoren mit Fertigungsschwierigkeiten zu rechnen, bei der eine Beschädigung der Substratlagen wahrscheinlich ist und zu einem späteren Versagen der Struktur führen würde.

Eine durchgeführte FE-Analyse ergibt, dass ein CFK-Substrat aus lediglich zwei Lagen nicht die benötigte Biegesteifigkeit aufweist, um die geforderte Verformungstoleranz im bedruckten Zustand zu gewährleisten. Daher fällt die Wahl des Werkstoffes für das Wasserkanalmodell auf korrosionsbeständigen Stahl (Ramax LH), bei dem die Taschen für die Aktuatoren durch Drahterodieren ausgeschnitten werden.

Für das Wasserkanalmodell wird aus Gründen der einfachen Handhabung und Austauschbarkeit im Fehlerfall ein modularer Aufbau der Ausblaslippe angestrebt (Abb. 5.4). Ein Modul besteht aus der passiven Lippe und jeweils zwei auf Ober- und Unterseite applizierten Aktuatoren. Die Module sollen später, über in die Struktur integrierte Stecker, miteinander verbunden werden.

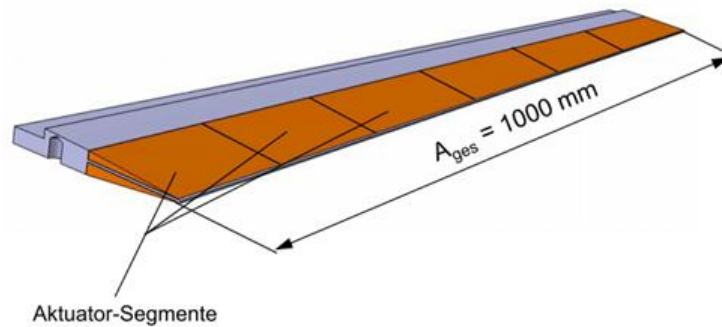


Abb. 5.4: Zeichnung der Ausblaslippe bestehend aus mehreren Segmenten

Durch die Einbettung der Multilayerstacks in die Struktur wird deren aktuatorische Dehnung in eine Biegeverformung der Lippenspitze der Ausblaslippe umgesetzt. Zur Bewertung der aktiven Eigenschaften der Multilayeraktuatoren werden diese auf passive Substratmaterialien (Stahl) appliziert und die freie Auslenkung und die Blockierkraft in der Biegewandlerkonfiguration bestimmt. Die Bestimmung der mechanischen Kennwerte, wie Steifigkeit und Blockierkraft werden im Rahmen von Druck- und Biegeversuchen mit einer Werkstoffprüfmaschine ermittelt. Die freie Dehnung der einzelnen Multilayerstacks sowie die freie Auslenkung der Ausblaslippe werden durch Lasertriangulation bestimmt. In Abb. 5.5 ist ein Segment der Ausblaslippe zu sehen. Auf Ober- und Unterseite sind jeweils zwei Multilayerstacks appliziert. Die Kontaktierung erfolgt an den Seiten über Lötstützpunkte, dabei werden die Aktuatoren, die nebeneinander liegen, zusammengeschlossen, da diese zusammen angesteuert werden sollen.

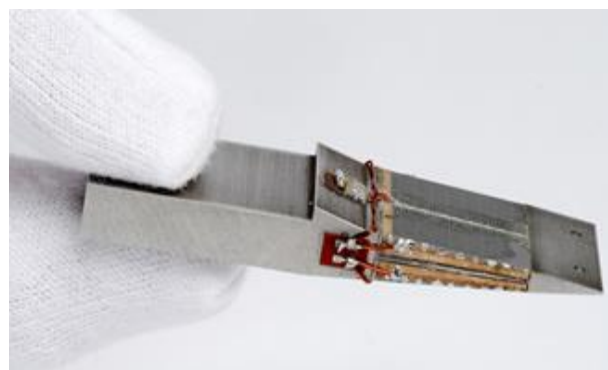


Abb. 5.5: Einzelnes Segment der Ausblaslippe

Die Strömungsuntersuchungen im Wasserkanal stellen eine besondere Herausforderung an die elektrische Isolation der Aktuatoren dar. Hierzu müssen geeignete Verfahren und

Materialien zur Isolierung der Aktuatoren gegen Wasser ermittelt werden. Die anschließende Erprobung der Isolierung erfolgt durch einen Funktionsnachweis im Wasser. Eine ausführliche Beschreibung der Auslagerungsversuche erfolgt in Kapitel 6.

5.4 Charakterisierung des Aktuatorkonzepts

Zu Beginn wird die freie Dehnung und die Dehnsteifigkeit der einzelnen Multilayerstacks ermittelt, um die im Datenblatt angegebenen Werte zu überprüfen.

Die wichtigsten Bewertungskriterien für die Effektivität der Aktuatorik sind die maximale freie Auslenkung und die Blockierkraft der voll aktuierten Struktur. Beide Werte geben aber für sich allein genommen noch keine Aussage über das Arbeitsvermögen der aktiven Ausblaslippe. Dazu müssen beide Werte gegeneinander in einem Arbeitsdiagramm aufgetragen werden, um den Arbeitspunkt bestimmen zu können.

Das Design der Ausblaslippe basiert auf der Auslegung der Aktuatorik mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) in ANSYS. Um das FE-Modell zu verifizieren, werden die experimentell ermittelten Werte für Auslenkung und Blockierkraft mit den berechneten Werten aus ANSYS verglichen. Da in der Modellrechnung von einer idealen Anbindung von Keramik und Substrat ausgegangen wird, muss der Einfluss einer schubweichen Klebschicht auf die Dehnungsübertragung untersucht werden. Auf Untersuchungen bezüglich der Lebensdauer der Aktuatorik wird an dieser Stelle verzichtet, da Forschungen von Gall keine erkennbaren Schädigungen bis 10^7 Lastwechseln zeigen [36].

5.4.1 Bestimmung der freien Dehnung der Multilayerstacks

Die Messung der freien Dehnung der einzelnen Multilayerstapelaktuatoren erfolgt mittels Lasertriangulation. Dazu werden die Aktuatoren an einem Ende fest eingespannt, während das andere Ende frei beweglich ist. Die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgt durch ein Dreieckssignal mit einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Maximalspannung von 120 V. Dies entspricht einer quasistatischen Auslenkung, mit einem linearen Spannungsverlauf von 0 V bis zur Maximalspannung von 120 V und zurück bei einer Periode von 10 s.

Die Ansteuerung der Aktuatoren mit einer Spannung von 120 V ist notwendig, um die für eine vollständige Auslenkung der Aktuatoren erforderliche Feldstärke von 2,5 kV/mm zu erreichen. Die Dehnungshysterese wird mit Hilfe eines Oszilloskops aufgezeichnet. In Abb. 5.6 werden fünf Aktuatoren (B1, B3, B8, B9, B10) miteinander verglichen.

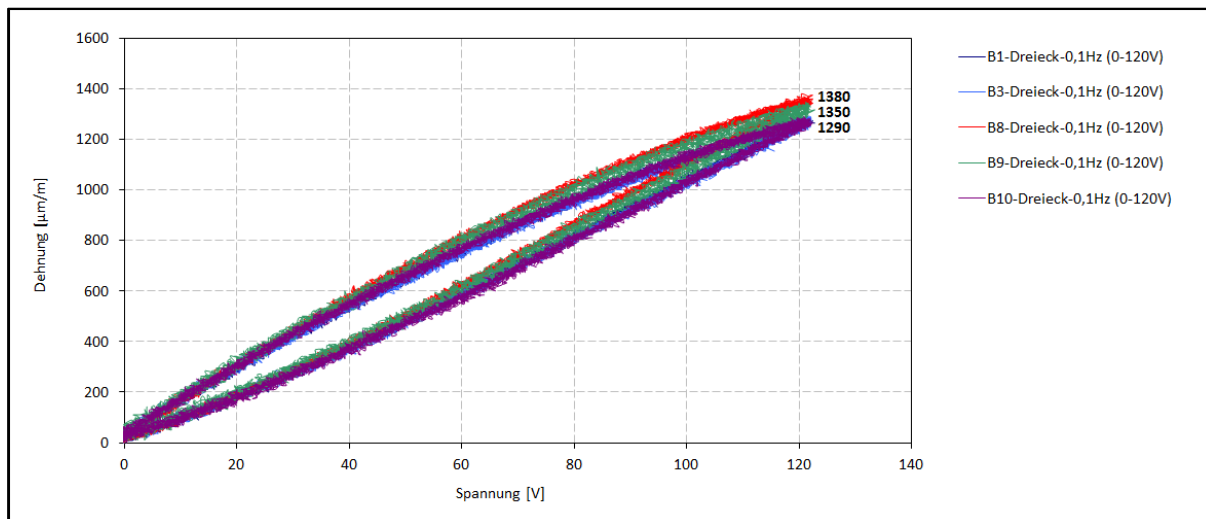


Abb. 5.6: Vergleich der freien Dehnung der einzelnen Aktuatoren

Die freie Dehnung der Trapezaktuatoren liegt im Mittel mit 1320 $\mu\text{m}/\text{m}$ sogar 10 % über den von PI angegebenen Werten für die PICMA® Multilayerstacks (1200 $\mu\text{m}/\text{m}$).

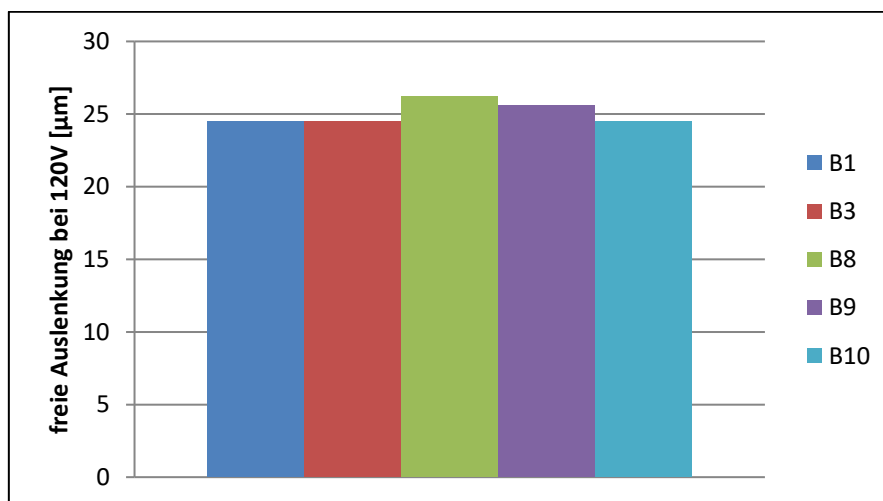


Abb. 5.7: Vergleich der freien Auslenkung der einzelnen Aktuatoren

Abb. 5.7 zeigt die geringen Abweichungen der gemessenen freien Auslenkung der einzelnen Aktuatoren, sie liegen bei lediglich 1 % vom ermittelten Mittelwert von 25 μm (Standardabweichung: \emptyset 25 $\mu\text{m} \pm 0,7 \mu\text{m}$). Die piezoelektrische Ladungskonstante d_{33} lässt sich aus der linearisierten Grundgleichung (Kleinsignalverhalten) für den inversen piezoelektrischen Effekt bestimmen:

$$\varepsilon_{\lambda} = s_{\mu\lambda}^E \sigma_{\mu} + d_{k\lambda} E_k \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Für den unbelasteten Fall ergibt sich daraus die freie Dehnung:

$$\varepsilon_{33} = d_{33} \cdot E_3 = d_{33} \frac{U}{t_{\text{Elektrode}}} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Die Umstellung nach dem piezoelektrischen Verzerrungskoeffizienten führt zu:

$$d_{33} = \frac{\varepsilon_{33}}{E_3} = \frac{\varepsilon_{33}}{U} t_{\text{Elektrode}} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Da der gemessene Wert für die freie Dehnung 10 % über dem von PI angegebenen Wert liegt, müsste der Verzerrungskoeffizient ebenfalls entsprechend größer sein. Dieser fällt mit $d_{33}=560 \cdot 10^{-12}$ m/V nur rund 8 % höher aus als der Katalogwert von $d_{33}=520 \cdot 10^{-12}$ m/V. Allerdings erfolgen alle Dehnungsmessungen im Großsignalbereich der Piezokeramiken, wobei die Berechnungen hingegen auf deren Kleinsignalverhalten beruhen, dies erklärt die restlichen 2 % Dehnungsabweichung.

Während der ersten Ansteuerung der Aktuatoren treten mehrere Kurzschlüsse an der bearbeiteten Keramikoberfläche auf. Abb. 5.8 zeigt die verbrannte Oberfläche durch einen Kurzschluss in einem Randbereich der Keramik. Die Kurzschlüsse sind vermutlich Folgen von verschmierten Elektroden durch den Schleifprozess. Eine weitere Ursache könnte auch das Eindringen von Luftfeuchtigkeit in die dünne Isolationsschicht (ca. 200 μm) aus Epoxidharz sein. Beide Ursachen begünstigen ein Überspringen der Ladungen zur nächsten Elektrode und haben somit eine Reduzierung der Durchschlagfeldstärke zur Folge.

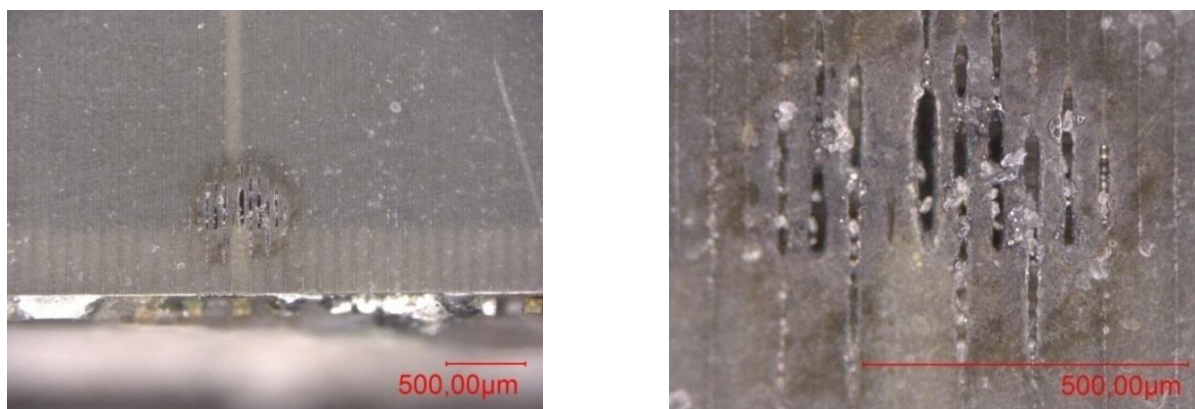


Abb. 5.8: Kurzschluss in der Piezokeramik

Die Kurzschlüsse haben einen kurzen Spannungs- und daraus resultierenden Dehnungseinbruch zur Folge. Einen langfristigen Einfluss auf die freie Dehnung wird nicht beobachtet.

5.4.2 Bestimmung der Blockierkraft der Multilayerstacks

Die Blockierkraft eines piezoelektrischen Wandlers ist die Kraft, die notwendig ist, um den voll ausgelenkten Aktuator auf seine Ausgangslänge zurückzudrücken. Zur Ermittlung dieser Kraft werden Druckversuche mit einer Materialprüfmaschine durchgeführt. Die einzelnen Aktuatoren werden senkrecht in die Druckprüfmaschine gestellt und mit einem statischen Signal von 120 V ausgelenkt. Die Prüfmaschine drückt den voll ausgelenkten Aktuator mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,1 mm/min zurück in seine Ausgangslänge und zeichnet die dafür aufgebrauchte Kraft auf. Die Blockierkraft der Piezoaktuatoren wird von ihrer Steifigkeit k_A und ihrer freien Dehnung ε_λ bestimmt.

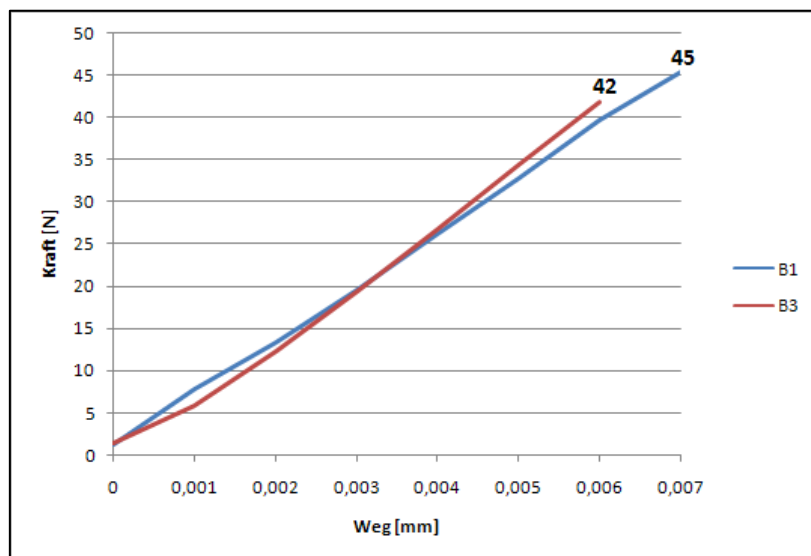


Abb. 5.9: Vergleich der Blockierkraft zweier baugleicher Aktuatoren

Abb. 5.9 zeigt die Blockierkraft der einzelnen Multilayerstacks. Aufgrund der sehr geringen Auslenkungen von etwa 6–7 μm sind die Stellkräfte allerdings nur schwer bestimmbar. Die in der Prüfmaschine über den Traversenweg ermittelte freie Auslenkung ist wesentlich geringer als die mit dem Lasertriangulator bestimmte freie Auslenkung. Dies liegt an der aufgebrachten Vorkraft von etwa 2 N, um den nichtlinearen Teil beim Anfahren der Prüfmaschine auszuklammern. Der nichtlineare Teil am Anfang entsteht wahrscheinlich wegen den geringen Kräften, die der Kraftaufnehmer nur unzureichend auflösen kann. Es liegen keine Vergleichswerte zum ermittelten Wert von ca. 45 N vor, da es sich bei den vermessenen Trapezaktuatoren um Einzelanfertigungen handelt und nicht um Standard-Multilayerstacks.

Zur Berechnung des E-Moduls wird die Keramik als linear elastische Feder mit der Federkonstante k_A angesehen:

$$k_A = \frac{EA}{l} \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Wird die voll ausgelenkte Piezokeramik um die freie Auslenkung Δl auf ihre Ausgangslänge l zurückverformt, ergibt sich die Blockierkraft aus:

$$F_B = k_A \cdot \Delta l \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Einsetzen von Gl. 5.4 in Gl. 5.5 ergibt:

$$F_B = EA \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Der Quotient aus der freien Auslenkung Δl und der Ausgangslänge l ist definiert als die aktive Dehnung ε_λ des Wandlers:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Damit ergibt sich der E-Modul der Multilayerstacks aus Gl. 5.6 zu:

$$E = \frac{F_B}{A \cdot \varepsilon_\lambda} \quad (\text{Gl. 5.8})$$

Die zur Berechnung notwendigen Kennwerte sind aus der durchgeführten Messung bekannt und ergeben einen E-Modul von $\sim 30 \text{ kN/mm}^2$. Der berechnete Wert liegt ungefähr 8 % unter dem angegebenen E-Modul von 36 kN/mm^2 für die PICMA® Multilayerstacks. Der Grund für diese Abweichung kann mit dem nicht konstanten Querschnitt der Piezokeramiken erklärt werden. Zur Berechnung des E-Moduls wird hier die mittlere Querschnittsfläche der trapezförmigen Piezokeramiken der Ausblaslippe herangezogen.

5.4.3 Bestimmung der freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe

Unter der freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe ist die Biegeverformung an deren Vorderkante bei angesteuerten Aktuatoren zu verstehen. Die Ausblaslippe wird an der Hinterkante bis zum Anschlag in einem unendlich steif angenommenen Prüfstand fest eingespannt. Die Verformung wird möglichst nah an der Hinterkante gemessen, da dort die maximale Auslenkung entsteht. Allerdings hat der Laserstrahl einen Durchmesser von ungefähr einem Millimeter, wodurch die Auslenkung nicht exakt am Abschluss der Kante gemessen werden kann, wobei dies im FE-Modell natürlich möglich ist und auch so erfolgt. Dadurch wird im Experiment eine geringfügig kleinere Auslenkung als in der Simulation erwartet. Der prinzipielle Aufbau wird in Abb. 5.10 schematisch dargestellt.

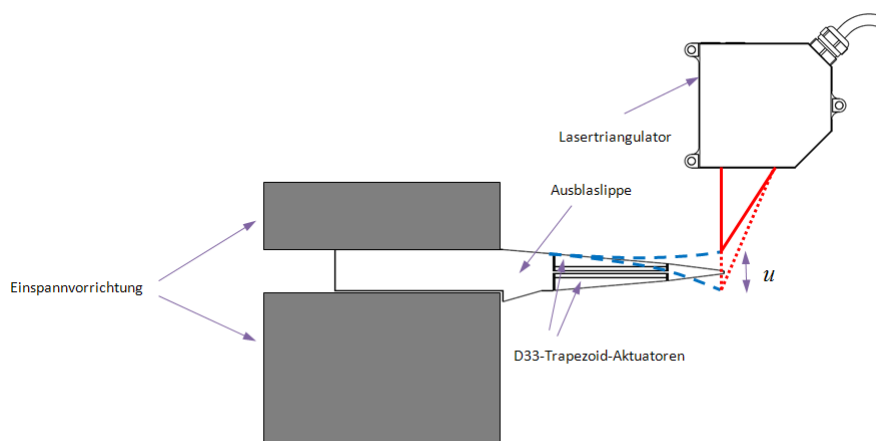


Abb. 5.10: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der freien Auslenkung

Die beiden Aktuatoren auf gleicher Seite sind untereinander parallel geschaltet und werden mit einem Dreieckssignal mit einer Frequenz von 0,1 Hz und einem Spannungsbereich von 0 bis 120 V angesteuert. Um die maximale Auslenkung zu messen, werden Ober- und Unterseite phasenverschoben angesteuert. Durch die Phasenverschiebung von 180° wird die Dehnung der Aktuatoren in ein oszillierendes Anheben und Absenken der Vorderkante umgesetzt, welche mit Lasertriangulation gemessen und am Oszilloskop aufgezeichnet wird.

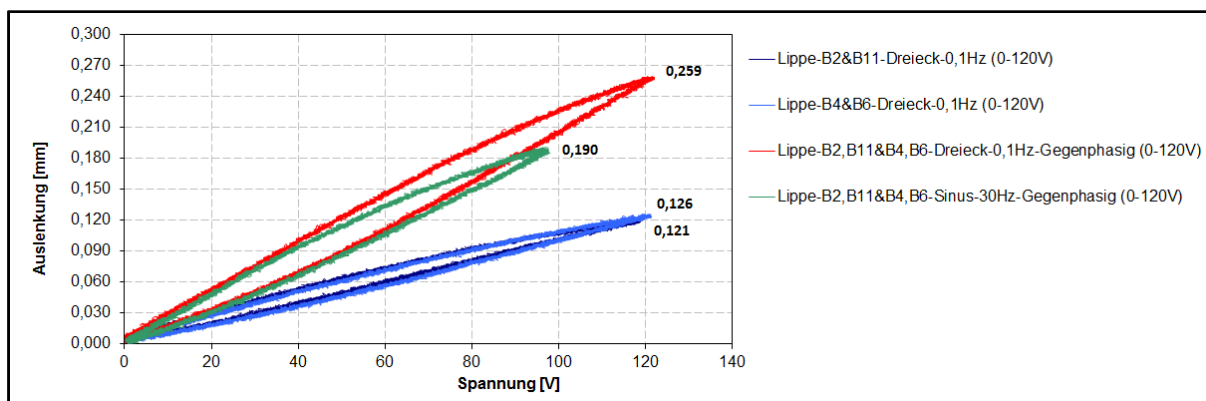


Abb. 5.11: Aktive Auslenkung von Ober- und Unterseite der Ausblaslippe

Die in Abb. 5.11 dargestellte Auswertung der Messungen ergibt, dass Ober- und Unterseite eine unterschiedliche Auslenkung bei gleicher Spannung aufweisen. Da die Ausblaslippe symmetrisch aufgebaut ist, wird vermutet, dass unterschiedliche Klebschichtdicken zwischen Keramik und Substrat die Ursache dafür ist. Aufgrund des geringen E-Moduls von 1718 N/mm^2 des Klebstoffs treten Schubverluste auf, die bei unterschiedlichen Klebschichtdicken zu unterschiedlichen Auslenkungen führen. Abb. 5.12 zeigt den Unterschied zwischen berechnetem und experimentell ermitteltem Wert für die Auslenkung.

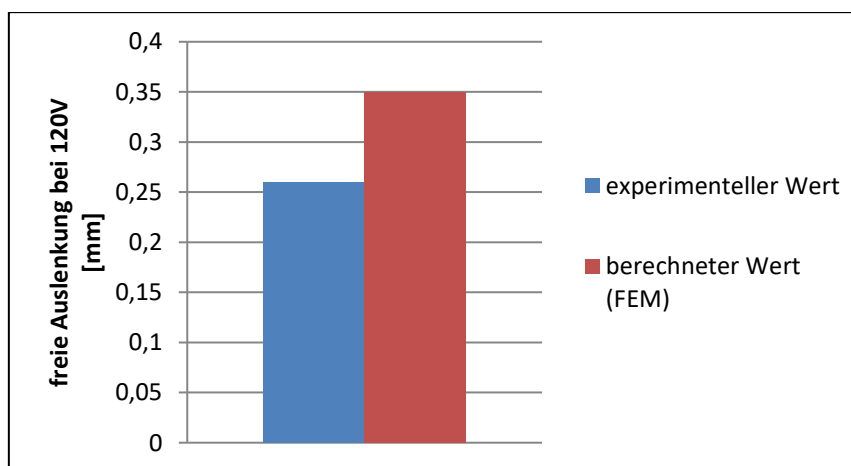


Abb. 5.12: Vergleich der freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe

Die experimentell ermittelte freie Auslenkung ohne Last beträgt $126 \mu\text{m}$ nach oben und $121 \mu\text{m}$ nach unten. Die gemessene Gesamtauslenkung von $259 \mu\text{m}$ liegt sogar leicht über dem addierten Wert der jeweiligen Auslenkungen. Wodurch diese Differenz zustande kommt, kann nicht eindeutig geklärt werden, könnte aber durch die phasenversetzte Ansteuerung von Ober- und Unterseite hervorgerufen werden. Wenn die Oberseite mit 120 V angesteuert wird, sollte an der Unterseite keine Spannung anliegen, allerdings wird im Versuch eine negative Spannung von 5 V gemessen, was eine Stauchung der Aktuatoren zur Folge hat und somit die Auslenkung begünstigt.

In der Gegenüberstellung in Abb. 4.11 liegt die gemessene Gesamtauslenkung 26 % unter dem berechneten Wert von 0,35 mm, aber über der geforderten minimalen Ausblasespalthöhe von 0,2 mm. Trotzdem muss die Ursache für die abweichenden experimentell ermittelten und berechneten Werte untersucht werden.

5.4.4 Bestimmung der Blockierkraft der aktuierten Ausblaslippe

Unter der Blockierkraft der aktuierten Ausblaslippe ist die im ausgelenkten Zustand benötigte Kraft zu verstehen, die aufgebracht werden muss, um die Ausblaslippe wieder in ihren Ausgangszustand zurück zu verformen. Die Messung der erforderlichen Kraft wird durch eine Druckprüfung ermittelt und durch einen Kraftaufnehmer aufgezeichnet. Die Ausblaslippe wird an der Hinterkante bis zum Anschlag in einem als unendlich steif angesehenen Versuchsstand fest eingespannt (Abb. 5.13).

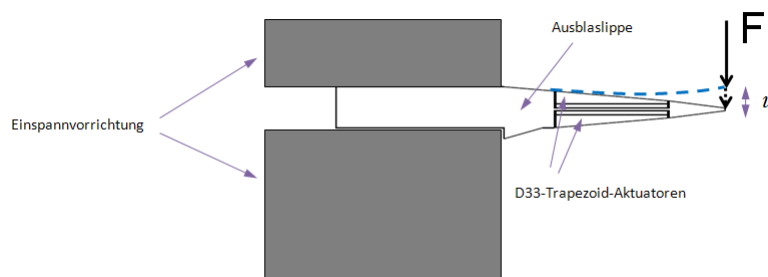


Abb. 5.13: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der Blockierkraft

Die beiden Aktuatoren auf der Unterseite werden statisch mit einer Spannung von 120 V angesteuert. Durch die Dehnung der Aktuatoren verformt sich die Ausblaslippe und die Vorderkante wird nach oben ausgelenkt. Mit einem Druckstempel wird eine Linienlast auf die Vorderkante aufgebracht und in ihre Ausgangsposition zurückgedrückt. Um einen Einfluss des elektrischen Zustands der passiven Piezokeramiken auf die Blockierkraft ausschließen zu können, wird der Versuch mit kurzgeschlossenen Elektroden durchgeführt. Der Einfluss des elektrischen Zustands der Piezokeramiken auf die Steifigkeit wird in Kapitel 5.4.5 genauer betrachtet.

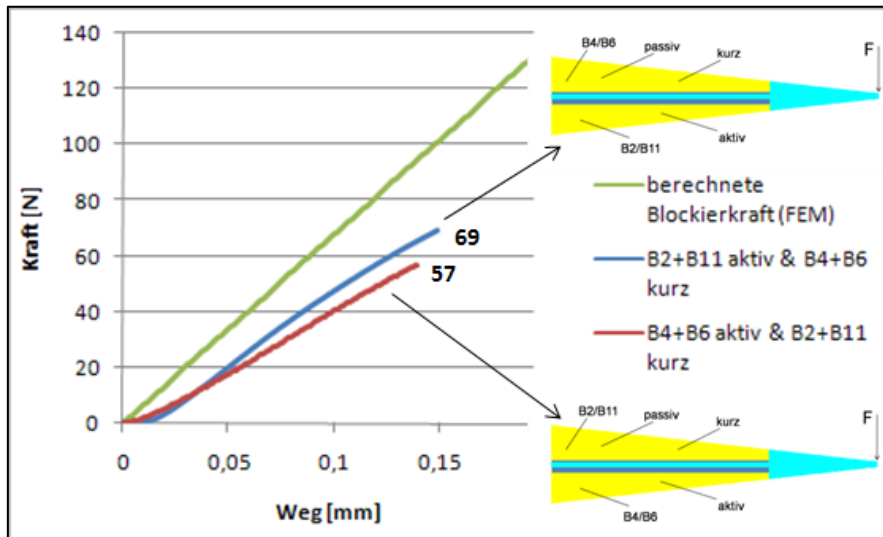


Abb. 5.14: Vergleich der Blockierkraft der aktiven Ausblaslippe

Die Kurven in Abb. 5.14 weisen eine unterschiedliche Steigung auf, welche repräsentativ für die Steifigkeit der Ausblaslippe ist. Obwohl die mechanische Arbeit der einzelnen Aktuatoren untereinander nur leicht variiert, weisen Ober- und Unterseite unterschiedliche Blockierkräfte auf. Es wird vermutet, dass unterschiedliche Klebschichtdicken auf Ober- und Unterseite dafür verantwortlich sind. Zudem liegt die ermittelte Blockierkraft von etwa 65 N nur bei knapp der Hälfte von der mit FEM berechneten Kraft (135 N bei idealer Anbindung zwischen Aktuatoren und Substrat). Dies ist ein Indiz für die nicht genaue Abbildung der aktiven Ausblaslippe in der Simulation.

5.4.5 Bestimmung der Steifigkeit der passiven Ausblaslippe

Um weitere Eingabeparameter für die Validierung des FEM-Modells zu generieren, wird ebenfalls die Steifigkeit der Ausblaslippe untersucht. Die Bestimmung erfolgt ähnlich der Messung der Blockierkraft nur mit passiven, nicht angesteuerten Aktuatoren (Abb. 5.15).

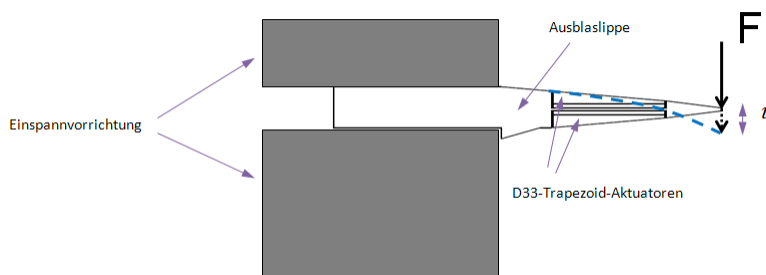


Abb. 5.15: Schema des Prüfaufbaus zur Bestimmung der Steifigkeit

Die Ausblaslippe wird aus ihrer Ausgangslage nach unten verformt, wobei die dafür aufgewendete Kraft in Abb. 5.15 zu sehen ist. Hier ist der Einfluss des elektrischen Zustandes der Piezokeramiken auf die Steifigkeit interessanter und muss bei der Messung berücksichtigt werden. Daher wird die Messung mit offenen und mit kurzgeschlossenen Elektroden durchgeführt.

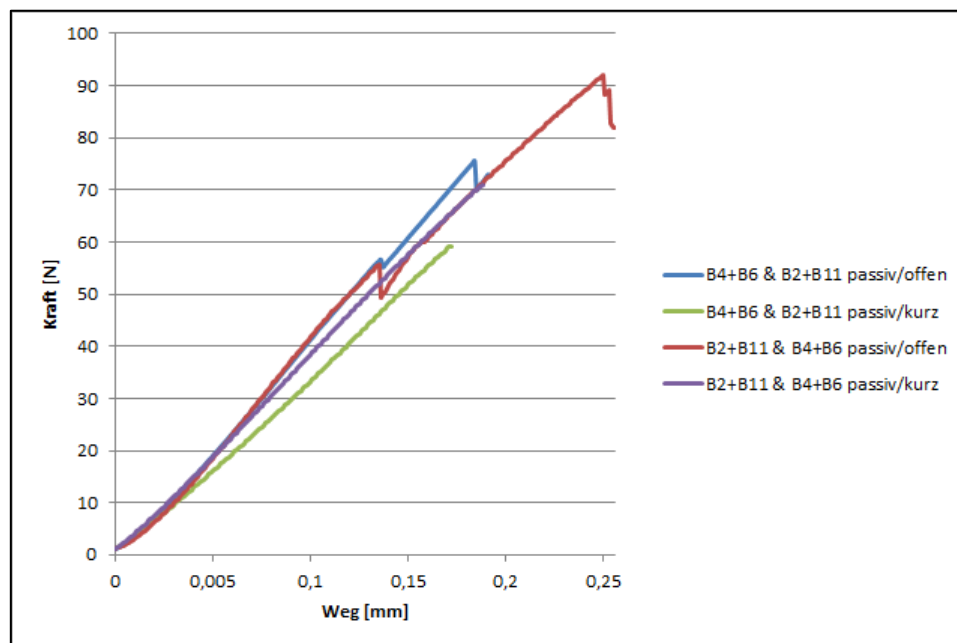


Abb. 5.16: Vergleich der Steifigkeit der passiven Ausblaslippe

Die Steigung der Kurve in Abb. 5.16 ist ein Maß für die Steifigkeit der passiven Ausblaslippe. Im Fall kurzgeschlossener Elektroden verringert sich die Steifigkeit. Durch die Verformung der Piezokeramiken laden sich die Elektroden der Keramik auf und können bei offenen Elektroden nicht abfließen und es bauen sich durch den piezoelektrischen Effekt Gegenkräfte auf, die zu einer Versteifung der Ausblaslippe führen. Die durch die Ladungsverschiebung entstehenden elektrischen Felder können dabei so hoch werden, dass sie die Durchschlagfeldstärke übersteigen und es zu einem spontanen Ladungsaustausch (Kurzschluss) zwischen den Elektroden kommt. Die Einbrüche in der Steifigkeit bei offenen Elektroden entstehen durch solche Kurzschlüsse in der Keramik. Dabei handelt es sich nur um eine kurzzeitige Verringerung der Steifigkeit, die durch den vorübergehenden Ladungsaustausch verursacht wird.

Für die Bestimmung der Biegesteifigkeit ist lediglich die Länge der Ausblaslippe L , die aufgebrachte Kraft F und die daraus resultierende Auslenkung u von Bedeutung. Die Biegesteifigkeit setzt sich aus dem E-Modul E und dem Flächenträgheitsmoment I zusammen und ergibt sich zu:

$$EI = \frac{L^3 \cdot F}{3 \cdot u} \quad (\text{Gl. 5.9})$$

Daraus berechnet sich die Biegesteifigkeit der gesamten Ausblaslippe im Mittel von Ober- und Unterseite zu 3585 Nmm^2 .

5.4.6 Schubverluste bei der Dehnungsübertragung

Aufgrund der großen Differenzen der theoretischen und praktischen freien Auslenkung wird der Dehnungsverlust der Aktuatoren auf die Struktur durch Schubverlust in der

Klebschicht betrachtet. Die Dicke der Klebschicht wird mit Hilfe eines Mikroskops untersucht und mit einer entsprechenden Software ausgewertet. In Abb. 5.17 ist deutlich erkennbar, dass die Klebschichtdicke von Ober- und Unterseite sich unterscheiden. Die obere Klebschichtdicke beträgt etwa 100 μm , wobei die untere mit ca. 360 μm über dreimal so dick ist.

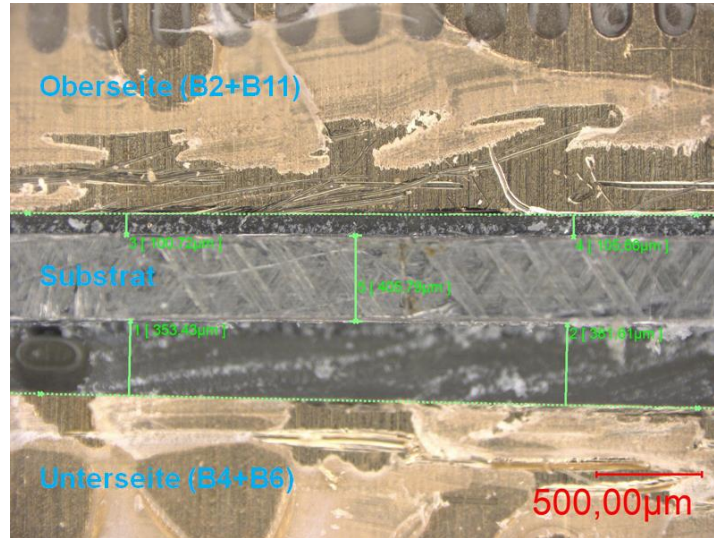


Abb. 5.17: Mikroskopaufnahme der Klebschicht

Den Einfluss einer Klebschicht auf die Dehnungsübertragung zweier gegenphasig angesteuerten Aktuatoren (Biegewandler) kann mit Hilfe des „Uniform Strain Modell“ beschrieben werden [37, 38]. Auf eine analytische Lösung der Fragestellung soll hier nicht näher eingegangen werden. Um die Dehnungsverluste trotzdem graphisch darstellen zu können, wird zur Vereinfachung die Gleichung zur Bestimmung des Schubverlustfaktors Γ als bekannt vorausgesetzt:

$$\Gamma^2 = \frac{G_k \cdot l^2}{E_a \cdot t_a \cdot t_k} \left(\frac{\Psi+6}{\Psi} \right) \quad (\text{Gl. 5.10})$$

Die Werte für den Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl sind aus der Literatur bekannt. Der Schubmodul G_k ergibt sich aus:

$$G_k = \frac{E_k}{2(1+\nu)} \quad (\text{Gl. 5.11})$$

Die Dehnung an den Rändern der Piezokeramik soll gleich ihrer freien Dehnung ε_λ sein, während ohne die Einwirkung äußerer Lasten die Dehnung des Substrats am Übergang zur Klebschicht gleich Null ist. Die Berücksichtigung dieser Randbedingungen führt zum Dehnungsverlauf im Aktuator und an der Oberseite des Substrates:

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_\lambda} = \frac{6}{\Psi+6} + \frac{\Psi}{(\Psi+6) \cosh \Gamma} \cosh(\Gamma \bar{x}) \quad (\text{Gl. 5.12})$$

$$\frac{\varepsilon_s^S}{\varepsilon_\lambda} = \frac{6}{\Psi+6} - \frac{6}{(\Psi+6) \cosh \Gamma} \cosh(\Gamma \bar{x}) \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Die Dehnungsverläufe nähern sich mit zunehmender Entfernung von den Rändern umso schneller einander an, je größer der Wert des Schubverlustfaktors ist. Die perfekte Klebung ohne Dehnungsverluste wird für einen unendlich großen Schubverlustfaktor erreicht:

$$\left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_\lambda}\right)_{\text{perfekt}} = \left(\frac{\varepsilon_s^S}{\varepsilon_\lambda}\right)_{\text{perfekt}} = \frac{6}{\psi+6} \quad (\text{Gl. 5.14})$$

$$\frac{u_{\text{Verlust}}}{u_{\text{perfekt}}} = \frac{1}{\Gamma} \tanh \Gamma \quad (\text{Gl. 5.15})$$

Abb. 5.18 zeigt den Dehnungsverlauf bei konstantem Steifigkeitsverhältnis ($\psi=20$). Die obere Kurve zeigt den Dehnungsverlauf in der Piezokeramik (Gl. 5.12), während die untere Kurve den Verlauf der Dehnung an der Oberseite des Substratwerkstoffes wiedergibt (Gl. 5.13). Die Ränder des Diagramms spiegeln die jeweils rechte und linke Seite der Keramik wider. Der Dehnungsverlauf gegenüber einer schubstarrten Klebung wird durch die Fläche zwischen dem verlustbehafteten Dehnungsverlauf des Substrates und der perfekten Klebung repräsentiert. Nach Gl. 5.15 nimmt der Verlust in der Dehnungsübertragung mit steigendem Schubverlustfaktor sehr schnell ab und nähert sich asymptotisch der perfekten Klebung. Dies bedeutet nach Gl. 5.10, dass große Werte für den Schubverlustfaktor erreicht werden, wenn die Klebschicht eine geringe Dicke sowie einen hohen Schubmodul aufweist. Die Länge der Klebschicht hat ebenfalls einen großen Einfluss, da diese quadratisch in den Schubverlustfaktor eingeht. Daher sollte die Piezokeramik in Wirkrichtung möglichst lang ausgeführt werden.

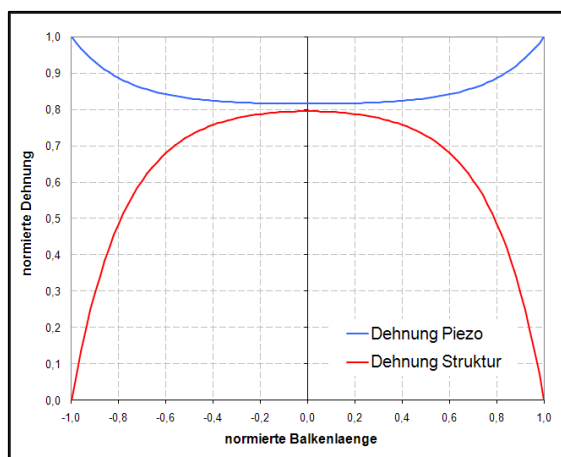


Abb. 5.18: Dehnungsverlauf zwischen Aktuator und Substrat

Der mittels „Uniform Strain Model“ berechnete Dehnungsverlust von 22 % durch die Klebschicht stimmt mit der beobachteten Differenz von 26 % zwischen der gemessenen freien Auslenkung der aktuierten Ausblaslippe und dem idealen Wert aus dem FE-Modell mit idealer Anbindung von Keramik und Substrat überein. Dies bedeutet, dass die unterschiedlichen Werte aus Experiment und Modell für die Auslenkung und der Blockierkraft der aktuierten Ausblaslippe von der unzureichenden Anbindung zwischen Piezokeramik und Substrat im FE-Modell in ANSYS herrührt. Bisher werden die Randbedingungen im

FE-Modell nur unzureichend abgebildet. Daher wird in Kapitel 5.4.8 der Einfluss der Randbedingungen auf die Arbeitsfähigkeit der Ausblaslippe näher betrachtet.

5.4.7 Bestimmung des Arbeitspunktes der aktuierten Ausblaslippe

Mit der einzeln bestimmten freien Auslenkung und der Blockierkraft der Ausblaslippe kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Aktuatorik in der Lage ist den Ausblasespalt von 0,2 mm Höhe bei einem Differenzdruck von 6 bar im Plenum schließen zu können. Dazu muss der Arbeitspunkt der Ausblaslippe im Arbeitsdiagramm bestimmt werden. Die Blockierkraft ist die maximal vom Aktuator erzeugte Kraft. Diese Kraft wird erzielt, wenn die Auslenkung des Aktuators vollständig blockiert wird. Die freie Auslenkung wird hingegen erreicht, wenn der Aktuator ohne eine Vorspannung durch eine Feder betrieben wird, so dass bei der Auslenkung keine Kraft erzeugt werden muss.

Aus Abb. 5.19 ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen freier Auslenkung und Blockierkraft. Der Arbeitspunkt liegt bei 23 N für die geforderte Auslenkung von 0,1 mm der Ausblaslippe in eine Richtung. Der Flächeninhalt des roten Rechtecks spiegelt die verrichtete Arbeit des Aktuators am Arbeitspunkt wieder.

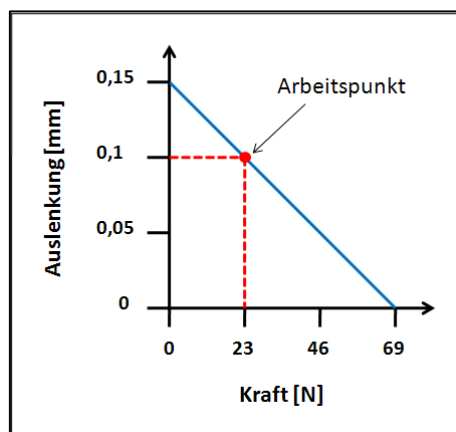


Abb. 5.19: Arbeitsdiagramm der Ausblaslippe

Wie in Abb. 5.20 zu sehen ist, wird die Auslenkung in Richtung „Schließen“ des Spaltes behindert und in Richtung „Öffnen“ durch den Druck begünstigt. Die Gesamtauslenkung der aktiven Ausblaslippe beträgt etwa 0,255 mm und zwar unabhängig vom Differenzdruck im Plenum. Da es sich nicht um einen dynamischen Druck, der die Auslenkung reduzieren würde, sondern um einen statischen Druck, wird lediglich die Nullpunkt-lage der Ausblaslippe verschoben und weiterhin die Nominalauslenkung erreicht.

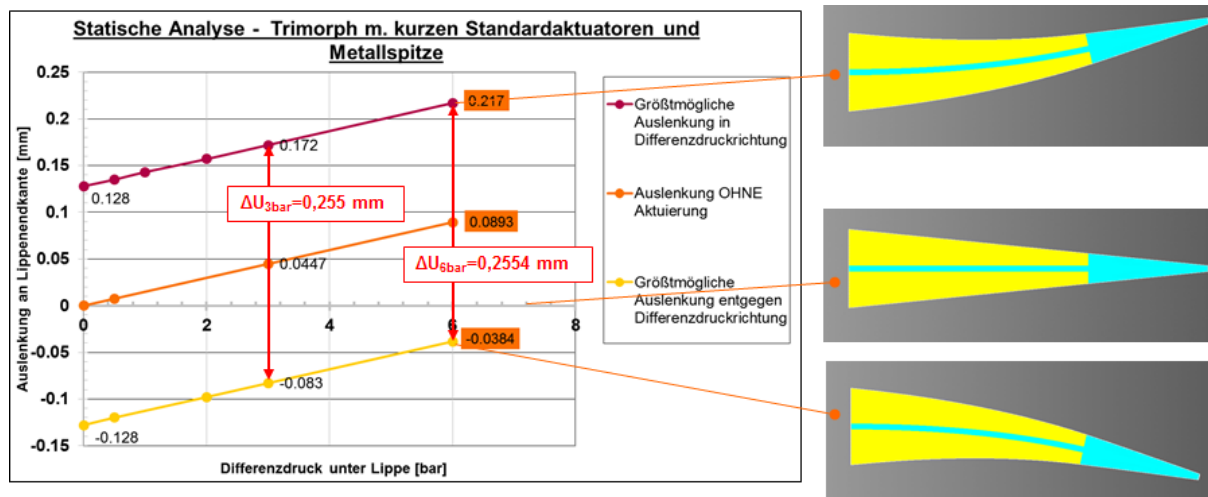
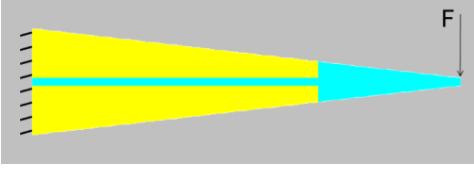
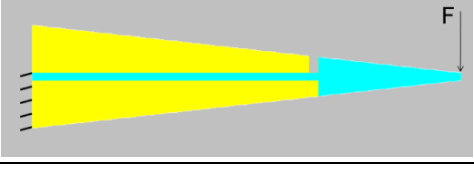
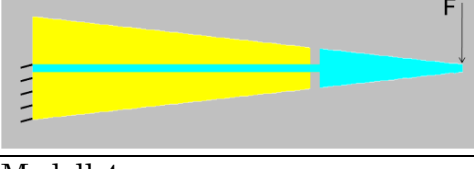
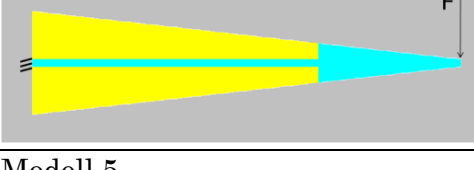
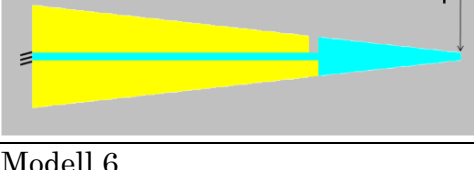
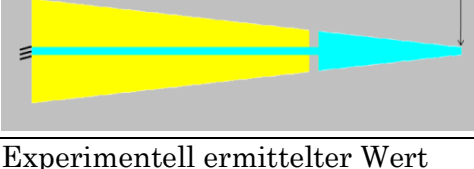


Abb. 5.20: FE-Analyse der Ausblaslippe unter Last

5.4.8 Verifizierung des FE-Modells

Die experimentell ermittelten Werte für die freie Auslenkung und die Blockierkraft dienen zur Verifizierung des FE-Modells, da bisher die Randbedingungen (Anbindung der Aktuatoren an die Struktur) nur unzureichend abgebildet werden. Im FE-Modell sind die Aktuatoren bisher direkt an die Struktur angekoppelt, wodurch die Dehnung der Piezokeramik ohne Verluste durch Schubspannungen auf die Struktur übertragen wird. Die plane Einbettung der Keramiken an den Köpfenden ermöglicht die Aufnahme externer Lasten durch Druckkräfte. Nun soll der Einfluss der Klebschicht an den Köpfenden auf die Dehnungs- und Kraftübertragung untersucht werden. Dazu werden 6 Modelle der Ausblaslippe mit unterschiedlichen Randbedingungen betrachtet, wobei die Keramiken zur Übertragung der Schubkräfte immer flächig ideal mit dem Substrat in der Mitte verbunden sind und lediglich die hinteren und vorderen Fugen freigeschnitten werden, um eine weiche Klebschicht an den Köpfenden zu simulieren. Tab. 5.1 zeigt die Unterschiede bezüglich der erreichbaren Blockierkräfte bei leicht veränderten Randbedingungen, wobei die freie Auslenkung weit weniger stark durch unterschiedliche Einspannungen beeinflusst wird als die Blockierkraft. In der Simulation wird wie in der experimentellen Untersuchung die Ausblaslippe ohne Last ausgelenkt und anschließend mit Hilfe einer Liniennlast, die an der Lippen Spitze angreift, wieder in die Nullposition zurückgedrückt.

Tab. 5.2: Einfluss der Randbedingungen auf Dehnung und Blockierkraft im FE-Modell

Modell	Spannung [V]	Auslenkung [mm]	Blockierkraft [N]
Modell 1 (Referenzmodell) 	120	0,349	131
Modell 2 	120	0,383	117
Modell 3 	120	0,371	80
Modell 4 	120	0,360	30
Modell 5 	120	0,371	31
Modell 6 	120	0,360	27
Experimentell ermittelter Wert	120	0,259	65

1. Modell (Referenzmodell)

Die Lippe ist komplett eingespannt und alle Fugen zwischen Keramik und Substrat sind ideal miteinander verbunden.

Diese ideale Auslegung erreicht natürlich die größtmöglichen Stellkräfte, wobei wegen der hohen Steifigkeit die maximale Auslenkung im Vergleich zu den anderen Modellen am geringsten ausfällt.

2. Modell

Hier ist die Lippe am Substrat und am unteren Aktuator eingespannt und nur die untere Fuge ist mit dem Substrat verbunden.

Wie zu erwarten, steigt hier die Auslenkung und erreicht im Vergleich zu den anderen Modellen den höchsten Wert, da der obere Aktuator die Auslenkung des unteren nicht behindert. Allerdings sinkt auch die maximal übertragbare Kraft wegen der geringeren Steifigkeit der Lippe.

3. Modell

Die hintere Lippe ist wieder am Substrat und am unteren Aktuator eingespannt, aber diesmal sind bei Fugen an der Lippenspitze freigeschnitten.

Die freie Auslenkung verringert sich nur leicht, was darauf schließen lässt, dass die Auslenkung hauptsächlich durch Schubspannungen hervorgerufen wird. Die Blockierkraft lässt schon deutlich nach, da an den vorderen Fugen keine extern angreifenden Lasten mehr in die Keramiken geleitet werden können.

4. Modell

Die Lippe ist nur noch am Substrat eingespannt, wobei alle Fugen mit dem Substrat verbunden sind.

Die erreichbare Auslenkung nimmt im Vergleich zu den Modellen mit freigeschnittener Fuge wieder etwas ab, da der untere Aktuator gegen die zusätzliche Steifigkeit des oberen Aktuators arbeiten muss. Die übertragbare Kraft nimmt bei dieser Betrachtung am drastischsten ab, da der Querschnitt des Substrats nur eine marginale Biegesteifigkeit besitzt und der untere Aktuator aufgrund der Entkopplung keine Druckkräfte in die Einspannung übertragen kann.

5. Modell

Die Lippe ist erneut nur am Substrat eingespannt, aber diesmal ist die obere Fuge vom Substrat gelöst.

Die Auslenkung steigt wegen der verringerten Steifigkeit wieder an, da der obere Aktuator den untern in seiner Verformung nicht behindert. Die Entkopplung der oberen Fuge hat keinen Einfluss auf die Blockierkraft im Vergleich zum vorigen Modell (Nr. 4). Entscheidend bei der Kraftübertragung in dem vorhandenen Lastfall ist vor allem die hintere Einspannung des unteren Aktuators. Im Falle einer idealen Einbettung arbeitet der Aktuator gegen eine unendlich hohe Steifigkeit am hinteren Ende und kann so am effektivsten äußere Lasten aufnehmen und zugleich die eigenen Kräfte auf die Lippenspitze aufbringen.

6. Modell

Die Lippe bleibt lediglich am Substrat eingespannt und zusätzlich sind beide Fugen vom Substrat entkoppelt.

Die freie Auslenkung reduziert sich nur geringfügig zum Wert aus dem vorigen Modell (Nr. 5). Dieses Verhalten stützt die Annahme, dass die Auslenkung der Lippe wesentlich durch Schubspannungen und die Blockierkraft primär über Druckspannungen übertragen werden. Da hier die untere Fuge die äußere Biegelast nicht aufnehmen und über den

Aktuator in die Einspannung weiterleiten kann, lässt die Blockierkraft im Vergleich zum vorigen Modell leicht nach. Die Einbußen in der Kraftübertragung sind so gering, dass dadurch die Vermutung gestützt wird, dass die Art der hinteren Einspannung ausschlaggebend für die übertragbaren Stellkräfte der Aktuatoren ist.

Durch einen Vergleich der unterschiedlichen Modellwerte mit den experimentell ermittelten Werten der Blockierkraft, zeigt sich, dass das 3. Modell die Realität am ehesten widerspiegelt. Dies bedeutet, dass es entscheidend ist die richtigen Randbedingungen in ANSYS zu wählen, um das reale Verhalten der Ausblaslippe abzubilden.

5.4.9 Untersuchung eines geeigneten Messprinzips zur Auslenkungsbestimmung der Ausblaslippe im Wasserkanal

Die Strömungsuntersuchungen im Wasserkanal sollen die Grundlage für die Auslegung zukünftiger angeblasener Tragflügelhinterkanten sein. In den Experimenten soll das Optimum aus ausgeblasenem Massenstrom, Strömungsgeschwindigkeit des Coandastrahls und Ausblasfrequenz ermittelt werden. Das Optimum soll durch Machine Learning gefunden werden. Dies bedeutet, dass das Regelungssystem auf Basis vorhandener Daten und Algorithmen Muster und Gesetzmäßigkeiten erkennt und daraus die bestmöglichen Lösungen entwickelt. Als eine regelungstechnische Eingangsgröße spielt daher die Kenntnis über die Spalthöhe eine entscheidende Rolle. Dem Wasser im Wasserkanal werden sogenannte „seeding“ Partikel zugeführt, diese dienen zur Streuung von Laserstrahlen für die PIV-Messungen. Daher kann auf das bisher verwendete Messprinzip der Lasertriangulation zur Auslenkungsbestimmung im Wasserkanal nicht zurückgegriffen werden. Als mögliches kontaktloses Messprinzip scheint der Hall-Effekt geeignet zu sein. Bei diesem Verfahren wird durch einen Hall-Sensor die magnetische Flussdichte gemessen. Der magnetische Fluss eines konstanten Magnetfeldes nimmt quadratisch mit dem Abstand ab. Durch Integration eines Magneten in die Lippenspitze der Ausblaslippe und eines Hall-Sensors in die Coanda-Klappe auf Höhe des Ausblaspaltes, kann darüber die Auslenkung bestimmt werden. Die konzeptionelle Anordnung ist in Abb. 5.21 b) zu sehen. Es muss nun eine passende Konfiguration aus kommerziell verfügbaren Hall-Sensoren und Neodym-Magneten gefunden werden, die den hohen Anforderungen an geringem Bauraum und hoher Genauigkeit gerecht wird. Dazu wird der in Abb. 5.21 a) schematisch dargestellte Versuch aufgebaut.

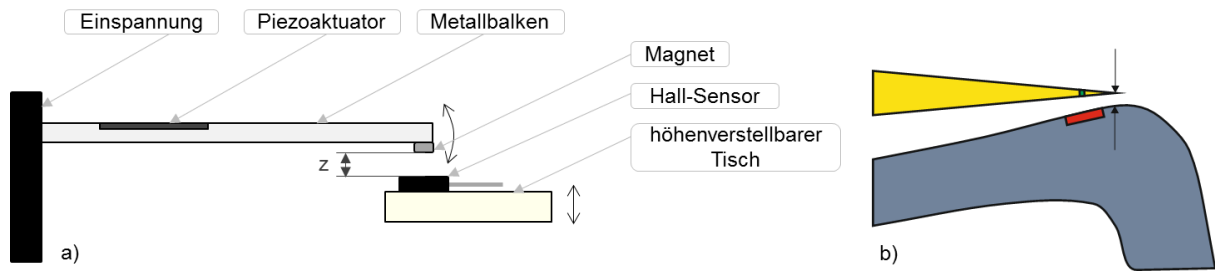


Abb. 5.21: a) Schaubild des Versuchsaufbaus zur Bestimmung eines geeigneten Messprinzips der Lippenauslenkung; b) Anordnung von Hall-Sensor (grün) und Magnet (rot) im Wasserkanalmodell

Es wird ein Biegebalken so ausgelegt, dass dieser unter Aktuierung eines applizierten Piezoaktuators eine maximale Auslenkung von 0,4 mm an der Spitze aufweist. Unter der Biegebalkenspitze befindet sich ein höhenverstellbarer Tisch mit einem aufgeklebten Hall-Sensor. Zur Validierung der Genauigkeit der Auslenkungsmessung mittels Hall-Sensor dient ein Lasertriangulator. Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 5.22 zu sehen.

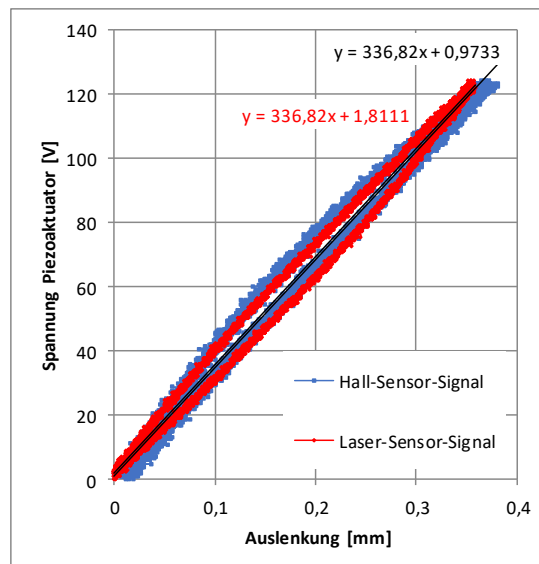


Abb. 5.22: Validierung der Messgenauigkeit des Hall-Sensors mittels Lasertriangulation

Es zeigt sich, dass der ausgewählte Hall-Sensor und der gewählte Neodym-Magnet den geforderten Messbereich bis 0,4 mm abdecken. Die Messkurven von Hall-Sensor und Lasertriangulator liegen fast genau aufeinander. Damit bietet der gewählte Hall-Sensor in Kombination mit dem gewählten Neodym-Magneten die gewünschte Messgenauigkeit.

5.4.10 Untersuchung der Diffusionseigenschaften von DuraAct Power Flächenwandlern

Die DuraAct Power Flächenwandler sind aufgrund ihrer geringen Blockierkraft nicht als Aktuatorik für die Ausblaslippe geeignet, allerdings bietet ihr Herstellungsprozess eine gewisse Robustheit gegenüber Umgebungseinflüssen. In Abb. 5.23 ist der schematische Aufbau von DuraAct Flächenwandlern dargestellt. Die DuraAct Power Aktuatoren unterscheiden sich von diesem Aufbau lediglich in ihrem Multilayer-Layout der Piezokeramik.

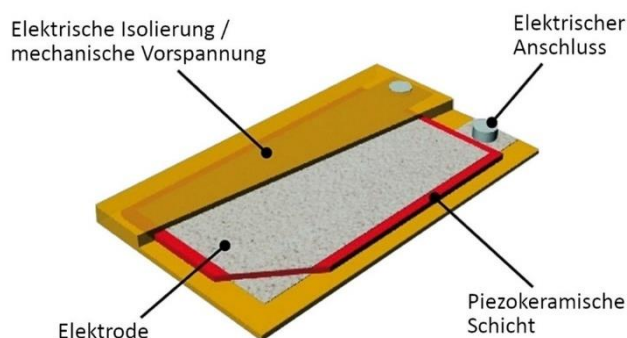


Abb. 5.23: Schematischer Aufbau von DuraAct Flächenwandlern

Die DuraAct Piezokomposite bestehen aus einer Polyimidfolie als Deckschicht zur elektrischen Isolation und mechanischen Vorspannung auf Ober- und Unterseite, der Piezokeramik mit den aufgetragenen Elektroden und den elektrischen Anschlüssen sowie mehreren Lagen Polyestervlies, in dem die Keramik eingebettet und welches bei der Injektion im Autoklaven mit Harz durchtränkt und ausgehärtet wird.

Es wird untersucht, ob das für die DuraAct Power Flächenwandler beim DLR entwickelte Einbettungsverfahren einen befriedigenden Schutz gegen Diffusion liefert. Hierzu werden DuraAct Power Flächenwandler in einem Klimaschrank bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit ausgelagert und anschließend auf Funktionalität unter Last getestet. Die DuraAct Power Aktuatoren basieren auf den PICMA® Multilayer-Piezoelementen und besitzen den gleichen keramischen Aufbau mit integrierten Elektroden.

Es werden drei Multilayer-Aktuatoren im Klimaschrank bei einer Temperatur von 70 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 85 % für 60 Tage konditioniert. Zwischendurch wird die Gewichtszunahme bestimmt und die Kapazität gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 5.24 zu sehen.

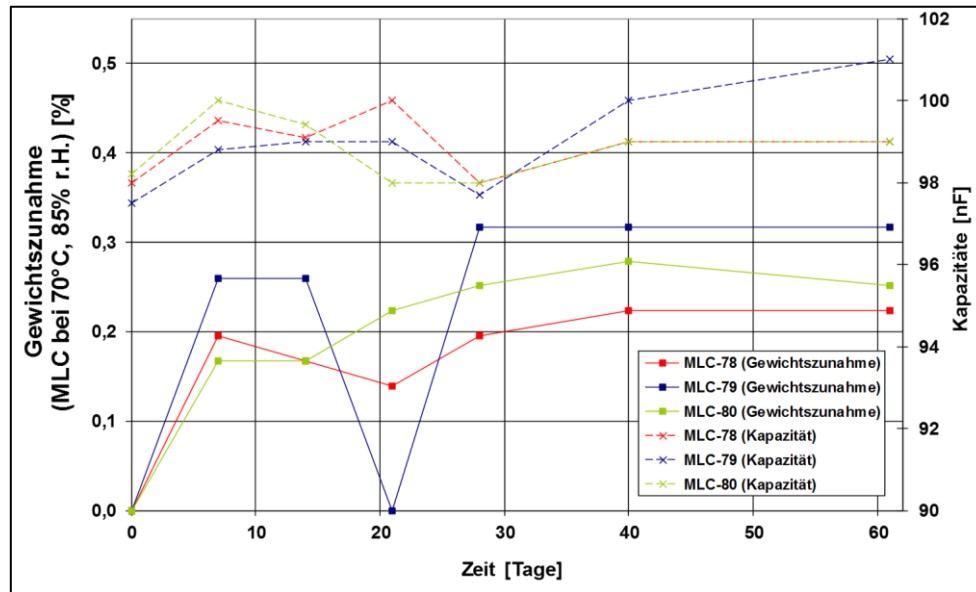


Abb. 5.24: Gewichtszunahme und Änderung der Kapazität der Aktuatoren über Zeit

Es ist deutlich zu sehen, dass alle drei Proben aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme an Gewicht zunehmen. Die Gewichtszunahme liegt etwa zwischen 0,22 % und 0,32 %. Der Gewichtseinbruch bei Probe MLC-79 nach etwa 20 Tagen wird auf einen Messfehler zurückgeführt, ansonsten findet sich für dieses Verhalten keine Erklärung, da bei der nächsten Messung nach 28 Tagen das Gewicht auch wieder deutlich ansteigt. Bei allen drei Proben stellt sich in dem Zeitraum zwischen 30 – 40 Tagen eine Sättigung ein, dies bedeutet, dass es keinen Konzentrationsunterschied mehr von Feuchtigkeit in der Umgebung und dem in der Probe vorliegt. Bei Probe MLC-80 wird ein leichter Abfall des Gewichts zum Ende hin beobachtet, dies wird auf Messtoleranzen zurückgeführt, da ein Ausgasen als unwahrscheinlich angesehen wird. Die Kapazitäten der drei Proben schwanken über den Zeitraum von 60 Tagen leicht, nehmen aber zum Ende hin leicht zu. Eigentlich wurde vermutet, dass eindringende Feuchtigkeit die Kapazität der Aktuatoren verringert, dies schein allerdings nicht der Fall zu sein. Anscheinend ist der Effekt, dass die Proben durch die Feuchtigkeit und erhöhte Temperatur leicht aufquellen und somit eine größere Elektrodenoberfläche erzeugen, größer.

Wie in Abb. 5.25 zu sehen ist, gibt es keinen erkennbaren Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die freie Auslenkung der Multilayer-Komposite. Hierzu werden die drei im Klimaschrank ausgelagerten Aktuatoren mit drei bei Raumklima gelagerten Proben verglichen. Die im Datenblatt angegebene freie Auslenkung beträgt $1200 \mu\text{m/m}$. Berücksichtigt man die für Piezokeramiken übliche Toleranz von $\pm 20 \%$, sind keine Auffälligkeiten ersichtlich. Allerdings treten bei allen drei konditionierten Proben schon nach kurzer Betriebszeit Kurzschlüsse auf, welche zum Ausfall der Aktuatoren führen. Probe MLC-79 fällt direkt nach der Messung der freien Auslenkung aus, Probe MLC-78 fällt nach 5 h Betrieb in der Resonanzfrequenz von 102 Hz aus und bei Probe MLC-80 führt ein Kurzschluss der Elektroden nach 15 h in Resonanz bei 131 Hz zum Ausfall. Es wird vermutet, dass Feuchtigkeit durch kleine Risse in der Piezokeramik, die vor allem unter Last entstehen, tief in die Keramik eindringt und somit die Elektroden kurzschließt.

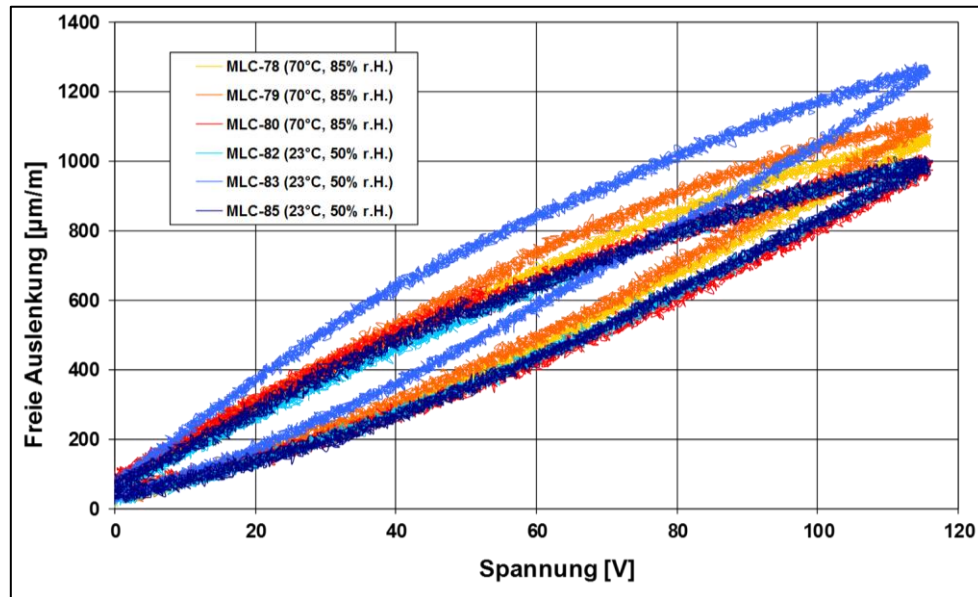


Abb. 5.25: Vergleich der freien Auslenkung der drei konditionierten Proben mit drei Referenzproben

Aus den gewonnenen Erkenntnissen bezüglich der Diffusionseigenschaften der DuraAct Einbettungstechnologie, wird diese als ungeeignet bewertet, um einen zuverlässigen Dauerbetrieb von Multilayer-Piezoaktuatoren im Wasserkanal zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden in Kapitel 6 weitere Diffusionsbarrieren für den Betrieb piezoelektrischer Aktuatoren unter Wasser untersucht.

6 Diffusionsbarrieren für Piezokeramiken für einen Unterwasserbetrieb

Für Strömungsuntersuchungen an dem Tragflügel in Hochauftriebskonfiguration sind Messungen in einem Wasserkanal vorgesehen. Die Aktuatoren und deren Elektroden müssen für den Betrieb im Wasserkanal elektrisch isoliert und vor dem Eindringen von Wasser geschützt werden. Wasser hat im Vergleich zu Luft eine höhere Dichte ρ und eine geringere kinematische Viskosität ν . Somit können nach der Definition der dynamischen Viskosität des Fluids η im Wasserkanal größere Reynoldszahlen bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten v erreicht werden (Gl. 3.2).

Ein weiterer Vorteil der Messungen im Wasserkanal ist, dass sich durch die geringere Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke zeitaufgelöste Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen mit hoher Auflösung durchgeführt werden können, um das Strömungsfeld an der Coanda-Klappe zu untersuchen. Allerdings müssen für PIV-Messungen kleine transparente Kunststoffpartikel dem Wasser zugeführt werden, an denen der Laserstrahl gestreut wird, damit ein Kamerasystem den Versatz der Partikel durch die Strömung bei zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen aufzeichnen kann. Es wird angenommen, dass diese im Durchmesser etwa $30\ \mu\text{m}$ großen Partikel eine abrasive Wirkung auf die Beschichtung haben.

Bei längerem Betrieb von Piezokeramiken unter Wasser gelangt Feuchtigkeit durch Diffusion in die Keramik und führt dort zu Kurzschlüssen, was den Ausfall der Aktuatorik zur Folge hat. Um einen funktionellen Betrieb im Wasserkanal zu garantieren, muss die Ausblaslippe und insbesondere die Piezoaktuatoren gegen das Eindringen von Wasser geschützt werden. In diesem Kapitel werden unterschiedliche Beschichtungsverfahren und Materialien untersucht, um die Aktuatorik über einen längeren Zeitraum unter Wasser betreiben zu können. Hierfür wird zuerst der Versagensmechanismus innerhalb einer Piezokeramik durch eindringende Feuchtigkeit untersucht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können Anforderungen an eine geeignete Beschichtung definiert werden.

6.1 Beschichtungsmethoden

Beschichten ist in der Fertigungstechnik eine von insgesamt sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren. Diese werden in der Industrienorm DIN 8580 [39] zusammengefasst und beschrieben. Beschichten ist die fünfte Hauptgruppe und beschäftigt sich damit, einem Bauteil gezielte Oberflächeneigenschaften zu geben, welche sich mit dem verwendeten Basiswerkstoff nicht erreichen lassen. Dabei geht es im Allgemeinen darum, bestimmte Funktionen von Werkstücken grundsätzlich zu realisieren oder zu verbessern. Weitere Motive der Beschichtungstechnik sind die wirtschaftliche Verbesserung, also ein Erhöhen der Lebensdauer oder auch das Verbessern der optischen Wirkung. Der häufigste Grund für das Auftragen einer Beschichtung ist das Erreichen einer Schutzfunktion. Beispielsweise als Korrosions-, Oxidations- oder auch Verschleißschutz.

Grundsätzlich lassen sich Beschichtungen auf allen Werkstoffen (Substraten) aufbringen. Dabei müssen jedoch Beschichtungsart und -verfahren auf den jeweiligen Werkstoff abgestimmt sein. Ist dies nicht der Fall, kann es zu Problemen, wie zum Beispiel zu Schichtspannungen, kommen. Diese können die Haftung der Beschichtung am Substrat senken, bis diese sich zum Teil oder komplett ablöst. Um eine optimale Haftung zu garantieren, ist es beim Beschichten oft hilfreich, das Substrat mechanisch oder chemisch vorzubehandeln.

Der derzeitige Stand der Technik ermöglicht, mit verschiedenen Verfahren Beschichtungsdicken über acht Größenordnungen zu fertigen. Von extrem dünnen Schichten, die nur wenige Atomlagen umfassen, bis hin zu Plattierungen, welche bis zu 100 mm dick sein können. Als Beschichtungsstoffe werden dabei metallische (Gold, Chrom), nichtmetallische, anorganische (Keramiken) oder organische (Polymere, Lacke) Materialien verwendet.

Nach der DIN 8580 [39] ist Beschichten das "Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück". Diese Hauptgruppe wird nach dem Aggregatzustand des Beschichtungsstoffes unmittelbar vor den Beschichtungsvorgang in vier Untergruppen gegliedert.

Die erste dieser Untergruppen beschreibt das "Beschichten aus dem gas- und dampfförmigen Zustand". Zu diesen Verfahren gehören die chemische und physikalische Gasphasenabscheidung (CVD und PVD Verfahren). Die zweite Gruppe umfasst das "Beschichten aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand". Vertreter dieser Gruppe sind beispielsweise das Lackieren, das Emaillieren oder das Schmelztauchen. In der dritten Untergruppe werden Verfahren des "Beschichten aus dem ionisierten Zustand durch elektrolytisches oder chemisches Abscheiden" zusammengefasst. Dazu gehören Verfahren wie Galvanisieren, Verzinken oder Chromatieren. Die vierte und letzte Untergruppe fasst Verfahren des "Beschichten aus dem festen (körnigen oder pulverförmigen) Zustand" zusammen. Zu Verfahren dieser Gruppe gehören das Pulverbeschichten oder das Wirbelsintern [40]. In Tabelle 6.1 sind alle Untergruppen mit ihren wichtigsten Verfahren aufgelistet.

Tab. 6.1: Übersicht über Beschichtungsverfahren, unterschieden nach Aggregatzustand des Beschichtungsstoffes unmittelbar vor dem Beschichtungsvorgang

gasförmig	flüssig	gelöst	fest
<ul style="list-style-type: none"> • CVD - Atomlagenabscheidung • PDV - Sputtern 	<ul style="list-style-type: none"> • Lackieren • Bemalen • Spritzlackieren • Tauchlackieren • thermisches Spritzen • Emaillieren • Schmelztauchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Galvanisieren • Eloxieren • Chromatieren • Verzinken • Phosphatieren • Verzinnen 	<ul style="list-style-type: none"> • Pulverbeschichten • Wirbelsintern • Plasma-Pulver-Auftragschweißen

6.2 Anforderungen an die Beschichtung

Im Folgenden wird auf die Anforderungen an die Ausblaslippe und an deren Beschichtung für die Strömungsuntersuchungen im Wasserkanal im Detail eingegangen.

Da mit dem Modell des Tragflügels mit der aktiven Ausblaslippe über mehrere Wochen Untersuchungen im Wasserkanal durchgeführt werden sollen, ist die wichtigste Anforderung an die Beschichtung, dass die Aktuatoren bestmöglich gegenüber jeglichem Eindringen von Wasser geschützt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass insbesondere die elektrische Kontaktierung der Aktuatoren isoliert ist und mit einer wasserdichten Beschichtung versiegelt wird. Es soll gewährleistet werden, dass die Ausblaslippe mindestens 25 Tage am Stück im Wasserkanal montiert sein kann und dabei funktionsfähig bleibt.

Die Beschichtung sollte möglichst duktil sein, um ein Aufreißen durch dynamische Beanspruchung während des Betriebs zu verhindern. Daher sollte die Dehngrenze der Beschichtung größer sein als die maximale Dehngrenze des Aktuators. Diese liegt bei den verwendeten Keramiken bei ca. 0,3 %.

Die Steifigkeit der Beschichtung trägt zur Gesamtsteifigkeit der Ausblaslippe bei und hat somit auch Auswirkung auf die maximale erreichbare Auslenkung. Der Aktuator muss zusätzlich gegen die Steifigkeit der Isolationsschicht arbeiten, dies reduziert die Auslenkung und führt eventuell dazu, dass der Ausblaspalt nicht mehr geschlossen werden kann. Aus diesem Grund sollte auch die Gesamtdicke der Beschichtung so gering wie möglich gehalten werden. Da im Wasserkanal der Einfluss der dynamischen Ausblasung auf das Strömungsfeld an der Coanda-Klappe untersucht werden soll, ist eine weitere Anforderung, dass die Oberfläche der Beschichtung so glatt wie möglich ist. Besitzt die Beschichtung eine unebene Oberflächenstruktur, könnte dies zu einem Ablösen der Strömung schon vor der Coanda-Klappe führen. Auf die mechanischen Anforderungen der Ausblaslippe wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen und auf Kapitel 5 verwiesen. In Tabelle 6.2 sind wichtige Anforderungspunkte für die Inbetriebnahme der aktiven Ausblaslippe im Wasserkanal aufgelistet.

Tab. 6.2: Anforderungsliste für die Aktuatorik

Nr.	Bezeichnung	Wert
1.	Umgebungsmedium	Wasser
2.	Elektrische Feldstärke	2,5 kV/mm
3.	Zeitraum im Wasserkanal	mindestens 25 Tage am Stück
4.	Maximale Betriebstemperatur	$T_{\max} = 50^{\circ}\text{C}$
5.	Minimale Betriebstemperatur	$T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$
6.	Frequenz im dynamischen Betrieb	max. 30 Hz
7.	Anzahl der Lastwechsel (Dauerfestigkeit)	$> 10^7$
8.	Streckgrenze der Beschichtung	$Re \geq 0,3 \%$
9.	Oberflächengüte der Beschichtung	$Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$
10.	Dicke der Beschichtung	$> 0,2 \text{ mm}$

Aufgrund der multilateralen Anforderungen, wie z. B. eine möglichst dünne Beschichtung mit hoher Diffusionsfestigkeit und elektrischer Durchschlagsfestigkeit, muss ein besonderes Augenmerk auf das Screening in Frage kommender Beschichtungen gelegt werden.

6.3 Auswahl geeigneter Beschichtungen

Anhand dieser aufgestellten Anforderungsliste werden im Folgenden nun geeignete Beschichtungsmethoden, sowie -materialien ausgewählt. Es können fast alle Materialien, wie zum Beispiel metallische, organische oder anorganische, als Beschichtungsstoffe eingesetzt werden. Um einen möglichst breiten Bereich an Beschichtungsmaterialien abzudecken, werden im Rahmen dieser Arbeit sowohl polymere, metallische als auch keramische Werkstoffe als Diffusionsbarriere untersucht. Diese werden mit Hilfe verschiedener Methoden appliziert, um so ein optimales Beschichtungsverfahren für Piezoaktoren zu ermitteln.

Wie zuvor erläutert, muss die Beschichtung zwei Hauptanforderungen erfüllen, zum einen Diffusionsschutz gegen Wasser bieten und zum anderen die elektrische Isolation der Kontaktierung zum umgebenden Medium sicherstellen. Gerade im Bereich der Isolation elektrischer Leiter werden häufig Polymere eingesetzt. So besteht beispielsweise die Aderisolation eines herkömmlichen Energie- oder Signalkabels aus Polyethylen. Für die Anwendung als Beschichtungsmaterial der aktiven Ausblaslippe ist Polyethylen aufgrund seiner hohen Zähigkeit jedoch nicht geeignet. Kabel, die stark mechanisch beansprucht werden und daher flexible Eigenschaften aufweisen müssen, werden deshalb herkömmlicherweise mit Gummi als Isolator ummantelt. Gummi weist hervorragende elastische Eigenschaften auf und besitzt einen hohen elektrischen Widerstand. Ein weiterer polymerer Werkstoff, der sich für die Beschichtung eignet, ist ein hochisolierender Schutzlack auf Acrylharzbasis. Lacke dieser Art werden dazu verwendet elektronische Leiterplatten zu schützen, indem sie Kriechströme und somit Kurzschlüsse verhindern. Des Weiteren schützt der Acryllack die Platine vor eindringender Feuchtigkeit. Dies entspricht genau

den Anforderungen, welche an die Beschichtung der Anwendung im Wasserkanal gestellt werden.

Diese möglichen Beschichtungen sind hauptsächlich für die elektrische Isolation ausgelegt. Es gibt allerdings auch Polymere, die primär die Forderung der Diffusionsdichte erfüllen. Im Schiffsbau werden die Rümpfe der Schiffe mit einer Teerepoxidharzgrundierung lackiert. Diese Grundierung wurde speziell für die Bereiche mit Dauerwasserbelastung entwickelt und soll vor Korrosion (bei Stahl-Rümpfen) beziehungsweise vor Osmose (bei GFK-Rümpfen) und Fouling schützen.

Da es sich bei diesen polymeren Beschichtungen fast ausschließlich um Lacke und Flüssiggrundierungen handelt, können diese auf verschiedene Weise appliziert werden. Der Acryl-Schutzlack hat die Eigenschaft, dass er sehr dünnflüssig ist und somit durch Sprühen aufgetragen werden kann. Dadurch lassen sich verhältnismäßig dünne Schichten realisieren. Ein anderes mögliches Beschichtungsverfahren ist das Tauchlackieren. Dabei wird das zu beschichtende Werkstück komplett in den flüssigen Lack eingetaucht und nach einer kurzen Zeit wieder herausgezogen. Bei dieser Methode ist es wichtig, dass der Lack eine langsame Fließgeschwindigkeit und eine schnelle Trocknungszeit besitzt, da er sonst nicht am Substrat haften bleibt. Zäh und dickflüssige Lacke wie die Teerepoxidgrundierung können mit einem Pinsel aufgetragen werden. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit das Epoxidharz zu verdünnen, wodurch es mit einer Lackierpistole aufgetragen werden kann.

Das Aufbringen von metallischen Stoffen gestaltet sich im Gegensatz zu der Polymerbeschichtung schwieriger. Zum einen, weil metallische Beschichtungen verhältnismäßig steif und spröde sind und zum anderen, weil diese Verfahren teilweise unter extremen Bedingungen durchgeführt werden. Beim Feuerverzinken wird das zu beschichtende Werkstück beispielsweise in eine Schmelze aus flüssigem Zink getaucht. Die Temperatur der Schmelze liegt dabei bei über 450 °C. Da diese Temperatur größer ist als die Curie-Temperatur der Piezokeramiken, ist dieses Beschichtungsverfahren nicht geeignet. Andere metallische Beschichtungsmethoden, wie die Galvanotechnik, sollen neben dem Korrosionsschutz oftmals die elektrische Leitfähigkeit von Bauteilen verbessern und bewirken somit das genaue Gegenteil der gestellten Anforderung.

Ein weiteres metallisches Beschichtungsverfahren ist die Kathodenzerstäubung (auch Sputtern) genannt. Dabei werden in einem Vakuum Atome aus einem Gold-Target herausgeschlagen. Die Ag-Elektrode (auch Target genannt) ist immer oberhalb des zu beschichtenden Werkstücks angebracht. Somit fallen die Ag-Atome durch die Schwerkraft und infolge eines elektrischen Feldes auf das Werkstück nieder und bilden so eine feste, dünne Goldschicht. Eine Goldschicht hat den Vorteil, dass sie die Lippe gegen das Eindringen von Wasser schützt und dabei gleichzeitig vergleichsweise weiches Metall mit einer hohen Duktilität ist. Damit sollte es auch den hohen Dehnungen während des dynamischen Betriebs der Aktuatoren standhalten. Bei metallischen Beschichtungen ergibt sich das Problem, dass die meisten dieser Materialien elektrisch leitend sind. Das bedeutet, dass die Elektroden der Aktuatoren zuvor durch eine polymere Schicht elektrisch isoliert werden müssen.

Ein weiterer Ansatz ist das Beschichten mit einem keramischen Werkstoff. Keramiken haben den Vorteil, dass sie wasserdicht und zugleich hervorragende elektrische Isolatoren

sind. Zwar sind Beschichtungsverfahren wie das Emaillieren oder das Wirbelsintern aufgrund der hohen benötigten Brenntemperaturen in diesem Fall nicht möglich, jedoch kann eine derartige Keramikschiicht mit Hilfe der Atomlagenabscheidung aufgetragen werden. Mit diesem Verfahren wird eine sehr dünne Schicht aus Aluminium- und Titanoxid (Al_2O_3 und TiO_2) auf das Werkstück aufgebracht. Die dabei entstehende keramische Schicht ist allerdings sehr spröde. Es muss daher geprüft werden, ob die Dehnbarkeit dieser Beschichtung dem dynamischen Betrieb standhält.

Um bei der Bewertung der unterschiedlichen Beschichtungen auf deren Diffusionseigenschaften methodisch vorzugehen, wird zunächst die Wasseraufnahme während Auslagerungsversuchen an Faserverbundproben untersucht. In einem zweiten Schritt werden dann die für tauglich bewerteten Beschichtungen an Piezokompositen getestet. Lediglich die keramische Beschichtung (Al_2O_3) mittels Atomlagenabscheidung wird nur an Piezokompositen untersucht, da sich dieses Verfahren bereits in den Untersuchungen von Abdulagatov [41] als Diffusionsschutz an passiven Probekörpern bewährt hat und hier der Einfluss der dynamischen Belastung auf die spröde Schicht von besonderem Interesse ist.

6.4 Herstellung von beschichteten Faserverbundprobekörpern

Zur Untersuchung der Diffusionsdichtigkeit der Beschichtungen werden Probekörper für Auslagerungsversuche in einem Wasserbad und in einem Klimaprüfstand hergestellt. Die Probekörper bestehen aus mehreren Lagen Polyestervlies mit einer Decklage aus Polyimid (Kaptonfolie) auf Ober- und Unterseite. Die einzelnen Lagen werden in einem Autoklavprozess mit einem Epoxidharz injiziert und anschließend ausgehärtet. Es handelt sich dabei um den gleichen Fertigungsprozess mit dem auch die DuraAct™-Actuatoren von PI Ceramic hergestellt werden. In Kapitel 6.6 wird auf die Herstellung von den beschichteten DuraAct™ Power Flächenwandlern eingegangen.

6.4.1 Lackierung mit Acryl-Schutzlack

Bei der zu untersuchenden Beschichtung handelt es sich um den hochisolierenden Schutzlack PLASTIK 70, einen Lack auf Acrylharzbasis der Firma Kontakt-Chemie. Dieser Schutzlack ist speziell zur elektrischen Isolation von Leiterplatten entwickelt worden. Er versiegelt die elektrischen Kontakte und verhindert dadurch Kriechströme. Herkömmliche Lacke bestehen im Allgemeinen aus einer Lösung unterschiedlicher Stoffe. Der Acryl-Lack hingegen besteht aus einer Dispersion von gesättigten Acrylpolymeren und den organischen Lösemitteln Ethylacetat und Butylacetat. Diese Zusammensetzung hat die physikalische Eigenschaft, dass sie sehr schnell trocknet, indem die Lösemittel verfliegen und sich dabei eine wasserfeste, lösungsmittelfreie Lackschicht bildet. Für eine optimale Anwendung sollte die Schicht laut Hersteller eine Dicke von 20-40 μm aufweisen. Diese besitzt im Temperaturbereich von $-40\text{ }^\circ\text{C}$ bis $60\text{ }^\circ\text{C}$ eine dauerhaft gute Haftung und eine Durchschlagsfestigkeit von mehr als 80 kV/mm. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt nach Herstellerangaben 10^{-13} S/cm und wird somit als elektrisch nichtleitend angesehen. Als Nichtleiter werden Stoffe bezeichnet, deren elektrische Leitfähigkeit weniger als 10^{-8} S/cm beträgt [39].

Die Proben werden zuerst mit Ethanol gereinigt, sodass die zu beschichtenden Oberflächen sauber und fettfrei sind. Anschließend wird der Lack aus einer Entfernung von ca. 25 cm auf die verschiedenen Proben gesprüht, bis sich ein gleichmäßiger Film über die gesamte Oberfläche gelegt hat. Bei der ebenen Struktur der Vlies-Probe funktioniert das Verfahren mit der Sprühdose einwandfrei.

Nach 24 Stunden bei Raumtemperatur ist der Acryl-Schutzlack vollständig ausgehärtet und wird untersucht. Bei der Beschichtung der Vlies-Probe fällt auf, dass sich beim Trocknen Bereiche unterschiedlicher Dicke gebildet haben. Dies kann zum einen daran liegen, dass der Lack ungleichmäßig schnell getrocknet ist. Ein anderer Grund dafür könnte sein, dass beim Applizieren der Schicht die Dispersion aus Acrylpolymeren und Lösungsmittel nicht homogen auf der Fläche verteilt wurden. Eine Schichtdickenbestimmung mit einer Messschraube hat ergeben, dass die Dicke des Lacks zwischen 19-36 μm variiert. Trotzdem ist die gesamte Probe mit dem Acryllack überzogen.

6.4.2 Beschichtung mit Flüssiggummi

Ein weiteres Beschichtungsverfahren für die Vlies-Proben ist das Aufsprühen von synthetischem Flüssiggummi der Firma Plasti Dip®. Im Gegensatz zu Naturgummi, welches ursprünglich als pflanzlicher Kautschuk gewonnen wird, handelt es sich bei dem synthetischen Gummi um ein chemisches Imitat, das aus Styrol und Butadien hergestellt wird. Die Gummibeschichtung leitet einerseits keinen elektrischen Strom und besitzt somit eine isolierende Wirkung, andererseits ist sie wasserabweisend. Des Weiteren besitzt sie eine Zugfestigkeit von 235 N/mm² und bleibt nach den Angaben des Herstellers selbst unter extremen Bedingungen bei Temperaturen von -34 °C bis 93 °C bis zu 300 % flexibel. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich auch das Flüssiggummi theoretisch als Diffusionsbarriere.

Der Applikationsvorgang des Flüssiggummis läuft ähnlich ab wie der des Acryl-Schutzlacks. Um eine bestmögliche Haftung der Beschichtung an den Proben zu erzielen, sollten auch hier die Oberflächen fett- und staubfrei sein und werden vor dem Auftragen mit Ethanol gereinigt. Anschließend wird das Sprühgummi gleichmäßig aus 25 cm Entfernung auf die Vlies-Probe aufgetragen. Schon dabei ist auffällig, dass das Gummi sehr viel dickflüssiger ist als der Acryl-Schutzlack. Dies hat zur Folge, dass auch die unebenen Stellen, wie die Kontaktierung der Aktuatoren, besser umschlossen werden. Allerdings führt diese Konsistenz des Flüssiggummis dazu, dass sich aufgrund des Treibgases der Sprühdose viele kleine Luftblasen in dem Beschichtungsmaterial bilden, die sich nicht eigenständig auflösen. Nach wenigen Minuten ist die Beschichtung griffest und kann berührt werden. Bis zur vollständigen Aushärtung, sollte sie zwölf Stunden trocknen. Auch nach dem Aushärten befinden sich immer noch viele kleine Lufteinschlüsse in dem Material.

Eine Überprüfung der elektrischen Kontakte mittels Multimeter ergibt, dass die Beschichtung diese zwar vollständig isoliert, jedoch lassen die vielen in der Schicht eingeschlossenen Luftbläschen auf ein nicht optimales Ergebnis in Bezug auf die Diffusionsdichtigkeit schließen. Aus diesem Grund wird ein alternatives Beschichtungsverfahren für das Flüssiggummi erprobt.

Zunächst wird der Gummilack in einen Behälter gesprüht und anschließend in einer Vakuumglocke entgast. Das Evakuieren der Glocke auf wenige mbar führt dazu, dass die Bläschen an die Oberfläche steigen und dort platzen. Nach wenigen Minuten ist der Lack komplett entgast und in einem folgenden Schritt werden die Probekörper mit einer Tauchlackierung beschichtet. Dazu werden die Vlies-Proben in den gasfreien Gummilack eingetaucht und nach einigen Sekunden langsam wieder herausgezogen, sodass sich auf ihnen eine Gummischicht bildet. Diese ist im Vergleich zu der gesprühten Beschichtung sehr viel gleichmäßiger und blasenfrei. Nach dem Aushärten ergibt eine Schichtdickenmessung mittels Messschraube, dass die Dicke der Beschichtung nach einem einmaligen Tauchvorgang ohne große Schwankungen bei 80 μm liegt.

6.4.3 Lackierung mit 2-Komponenten-Teerepoxyd

Die letzte polymere Beschichtung, die im Rahmen dieser Arbeit getestet wird, ist EP817 FlexShield, ein 2-Komponenten-Teerepoxyd der Firma Epiform. EP817 ist eine Grundierung auf Epoxidharzbasis und besitzt sein Hauptanwendungsgebiet im Schiffsbau. Dort wird das Teerepoxyd speziell für den Schutz von Bereichen mit Dauerwasserbelastung entwickelt. Ein Vorteil dieser Beschichtung ist, dass sie sowohl auf metallischen als auch auf GFK-Schiffsrümpfen eine höchstmögliche Haftfestigkeit besitzt. Sie bietet einen sehr guten Schutz vor Korrosion und auch Osmose, also den gerichteten Fluss von Wassermolekülen durch eine semipermeable Trennschicht.

Die Grundierung besteht aus zwei Komponenten, der Basis und dem Härter. Zum Applizieren der Beschichtung müssen diese beiden Komponenten miteinander vermischt werden. Das Verhältnis aus Basis und Härter beträgt in diesem Fall 9:1. Also werden neun Gewichtsteile der Basis und ein Gewichtsverhältnis des Härters jeweils einzeln exakt abgewogen und anschließend miteinander vermischt. Da die Grundierung eine hohe Viskosität aufweist und ursprünglich dafür entwickelt wurde, großflächige Schiffsrümpfe zu lackieren, empfiehlt der Hersteller das Auftragen mit einer Rolle. Alternativ kann das 2-Komponenten-Teerepoxyd auch mit einem Verdüner gemischt werden, um es anschließend mit einer Lackierpistole auftragen zu können. Um Blasenbildung beim Ausgasen des Lösungsmittels zu vermeiden, wird sich für das Auftragen des Teerepoxyds ohne Verdünnung mittels Pinsels auf die zuvor mit Ethanol gereinigten Probekörper entschieden. Damit eine möglichst gleichmäßige Beschichtungsdicke erzielt wird, wird die zu beschichtende Probe zwischen zwei Distanzstücken mit einer überstehenden Höhe zur Probe von 150 μm gelegt und die überflüssige Menge an Beschichtungsmaterial mit einem Holzspachtel abgezogen. Nachdem die Grundierung gleichmäßig und flächendeckend auf die Vlies-Probe aufgebracht ist, muss sie aushärten. Die Tropfzeit beträgt ca. 90 Minuten und nach 7 Stunden ist die lackierte Oberfläche griffest. Um jedoch sicherzustellen, dass die Beschichtung vollständig ausgehärtet ist, sollten die beschichteten Proben, nach Angaben des Herstellers bis zu 5 Tage zwischengelagert werden.

Nach dieser Zeit wird die Dicke der Isolationsschicht bestimmt. Dazu wird eine beschichtete Vlies-Probe mittig zersägt. Die Schnittkanten werden anschließend glattgeschliffen und unter dem Lichtmikroskop untersucht. Die Dicke der Schicht beträgt 130 μm . Vereinzelt gibt es Stellen, an denen die Schicht bis zu 200 μm stark ist. Dies liegt daran, dass

das Auftragen der Grundierung mittels Pinsel nicht auf der gesamten Fläche gleichmäßig ist.

Eine weitere Betrachtung der Schutzschicht ergibt, dass diese bei einer verhältnismäßig großen Dicke sehr steif ist. Aus diesem Grund muss in weiterführenden Experimenten sichergestellt werden, dass das 2-Komponenten-Teerepoxyd der geforderten dynamischen Beanspruchung standhält und als diffusionsdichte Beschichtung der Aktuatoren eingesetzt werden kann.

6.4.4 Sputtern mit Gold

Das Sputtern wird auch Kathodenzerstäubung genannt. Bei diesem Vorgang werden Atome durch einen Beschuss mit energiereichen Edelgasionen aus einem Festkörper (Target) herausgelöst und gehen in die Gasphase über, um sich anschließend auf dem zu beschichtenden Substrat abzulagern und bilden dort eine feste Schicht. Es handelt sich dabei um eine feinvakuumbasierte Beschichtungstechnik, die zu der Gruppe der PVD-Verfahren (physikalische Gasphasenabscheidung) gehört. In der Beschichtungstechnik wird das Verfahren der Sputterdeposition häufig nur als Sputtern bezeichnet. Es wird hauptsächlich dazu eingesetzt, um dünne funktionale Schichten herzustellen und bietet sich damit auch als Beschichtungsverfahren für eine Diffusionsbarriere der Piezoaktuatoren an.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Vlies-Proben in einem inerten Edelgas (Argon) mit einer Goldschicht besputtert. Da diese jedoch leitend ist, müssen die Kontakte der Aktuatoren zuvor elektrisch isoliert werden. Dies geschieht mit einer separaten Schicht aus Epoxidharz. Dazu wird Loctide Hysol 9466 A&B, ein 2-Komponenten-Epoxidharz der Firma Henkel verwendet. Für den Sputterprozess wird das zu beschichtende Substrat in die Bedampfungskammer auf die Anode gelegt und die Kammer anschließend luftdicht verschlossen und mit einer Vakuumpumpe auf einen Druck von ca. 0,01 bis 0,02 mbar evakuiert. Ist dieser Druck erreicht, wird die Kammer mehrmals mit Argon gespült. Damit wird erreicht, dass sich neben dem Argon möglichst kein anderer Stoff in der Bedampfungskammer befindet, um eine Oxidation der Schichten zu vermeiden. Nach mindestens zwei Spülvorgängen wird das Zugangsventil des Argons so eingestellt, dass sich ein stabiles Vakuum mit einem Druck von 0,04 mbar einstellt. Danach beginnt der eigentliche Beschichtungsprozess. Dazu wird über die Kontrolleinheit der Kathode (dem Gold-Target) und der Anode eine Gleichspannung von 2,5 kV angelegt. Um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen, muss darauf geachtet werden, dass der fließende Strom während des gesamten Prozesses konstant auf 30 mA gehalten wird. In dem elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode kommt es zu einer Stoßionisation der Argonatome. Es bildet sich in der Bedampfungskammer ein Plasma aus negativ geladenen Elektronen und aus positiv geladenen Argonionen.

Durch das anliegende elektrische Feld werden die positiv geladenen Gasionen in die Richtung der Kathode beschleunigt. Es entsteht ein dauerhafter Strom von Ionen zum Target. Dort kommt es beim Aufprall durch Impulsübertragung dazu, dass Teilchen aus dem Gold-Target herausgeschlagen werden. Diese Teilchen benetzen alle Oberflächen innerhalb des Feldes. Sie schlagen sich auf dem Substrat nieder und bilden dort eine dünne Schicht (Deposition). Bei der verwendeten Anlage handelt es sich um eine Magnetron-

Sputteranlage, auch Cool Sputter Coater genannt. Eine derartige Anlage besitzt im Sputterkopf der Kathode einen Magneten. Dessen Aufgabe ist es, die bei der Ionisation freiwerdenden Elektronen mit Hilfe seiner Feldlinien von der Anode und somit dem Probenstück fernzuhalten. Das hat zum einen zur Folge, dass sich die Elektronen nicht zur Anode bewegen und beim Aufprall auf die dort liegende Probe ihre kinetische Energie nicht in Wärme umwandeln und zum anderen, dass die Elektronen zur weiteren Ionisierung des Prozessgases genutzt werden können. Aus diesem Grund wird dieser Vorgang auch Magnetronsputtern genannt. Abb. 6.1 zeigt den schematischen Prozess des Magnetronsputterns.

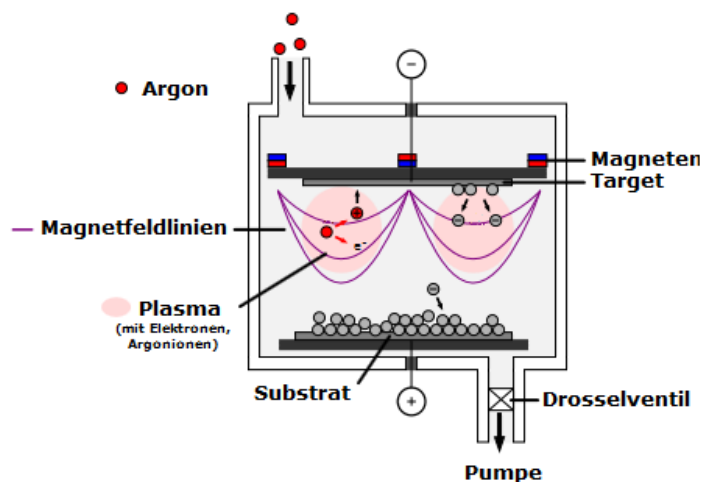


Abb. 6.1: Schematische Darstellung des Magnetronsputterns [42]

Sobald der gesamte Prozess beendet ist, wird die Argonzufuhr der Bedampfungskammer gestoppt und diese wird gelüftet. Anschließend kann die beschichtete Probe entnommen werden.

Die bei dem Sputterprozess entstandene Schichtdicke ist von mehreren Parametern abhängig. Bei der verwendeten Anlage von Quorum beträgt der Abstand zwischen Kathode und Anode ca. 5 cm. Bei einer angelegten Spannung von 2,5 kV gibt der Hersteller die empirische Gleichung 6.2 als eine ungefähre Abschätzung der Schichtdicke X für das Goldsputtern in Argongas an [43].

$$X = 7,5 \cdot I_{el} \cdot t \quad (6.1)$$

Dabei beschreibt X die Schichtdicke in Ångström, also in 10^{-4} Mikrometern, I_{el} den Strom in Milliampere und t die Zeit in Minuten [43]. Um diese Gleichung zu überprüfen, wird eine Probe 4,5 Minuten bei einem fließenden Strom von 30 mA besputtert. Der Gleichung 6.2 zur Folge, sollte diese Probe nach dem Sputterprozess eine Goldschicht von etwa $1 \mu\text{m}$ aufweisen. Um die tatsächliche Dicke der Beschichtung zu ermitteln wird die Probe angeschliffen und unter einem Lichtmikroskop betrachtet. Das Schliffbild ist in Abb. 6.2 zu sehen.

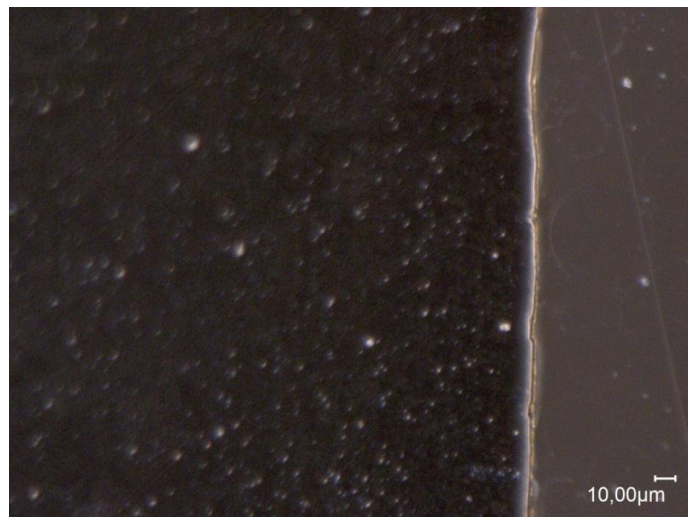


Abb. 6.2: Vergrößertes Schlibfbild einer besputterten Probe

In dem Schlibfbild lässt sich deutlich die sehr dünne Goldschicht auf dem Substrat erkennen. Die gemessene Schichtdicke beträgt etwa $1\ \mu\text{m}$. Somit stimmt der gemessene Wert mit dem berechneten überein. Die Untersuchung weiterer Proben hat eine Reproduzierbarkeit der Schichtdicke von einem Mikrometer bei gleichbleibenden Sputterparametern ergeben. Dabei umschließt die Goldschicht die komplette Kontur der Probe ohne sichtbare Defekte.

6.5 Auslagerungsversuche von beschichteten Faserverbundprobekörpern

Die Durchführung der Auslagerungsversuche ist an die DIN EN 2823 [44] angelehnt. Diese Norm beschreibt ein Prüfverfahren zur Ermittlung des Einflusses von feuchtem Klima auf ausgelagerte, faserverstärkte Kunststoffe. Vor Beginn der Versuche wird das Gewicht der Probekörper mit einer Genauigkeit von $0,1\ \text{mg}$ bestimmt. Die Auslagerungsversuche werden nach dem Erreichen des Sättigungszustands beendet. Als Sättigungskriterium wird eine Gewichtszunahme bei drei aufeinanderfolgenden Messungen von weniger als $1\ \text{Milligramm}$ definiert. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Probekörper wird jeweils nur eine beschichtete Probe untersucht, dadurch kann keine Aussage über die Standardabweichung der Messung getroffen werden.

Es werden zwei unterschiedliche Auslagerungsversuche durchgeführt, die die Umgebungsbedingungen während des Betriebs der Aktuatorik im Wasserkanal nachbilden sollen. Zum einen ist während der Strömungsuntersuchungen die komplette Oberfläche der Aktuatoren mit Wasser benetzt, zum anderen sollen die Piezoaktuatoren in Testpausen (z. B. übers Wochenende) rückgetrocknet werden, indem das Wasser aus dem Strömungskanal abgelassen und ein warmer Luftstrom durch den Kanal geblasen wird. Daher wird die Wasseraufnahme der beschichteten Vlies-Proben sowohl in einem Wasserbad als auch in einer Klimaprüfkammer untersucht. Es werden jeweils 4 verschieden beschichtete Vlies-Proben (Acryllack, Flüssiggummi, Teerepoxyd, Gold) und eine unbeschichtete Referenzprobe untersucht.

Da der Wasserkanal, in dem die Ausblaslippe eingesetzt werden soll, zur Senkung der Fluidviskosität auf 50 °C geheizt werden kann, werden zwei Versuchsreihen im Wasserbad, eine bei Raumtemperatur (23 °C) und eine bei 50 °C, durchgeführt, um einen möglichen Temperatureinfluss bei der Diffusion zu untersuchen.

Nachdem die Proben den Versuchsbedingungen ausgesetzt werden, wird in regelmäßigen Abständen erneut das Gewicht gemessen. Das zugenommene Gewicht entspricht der Menge an Wasser, das von den Testkörpern aufgenommen wurde.

Abb. 6.3 zeigt die Gewichtszunahme der Proben im Wasserbad bei 23 °C über einen Zeitraum von 28 Tagen. Der Verlauf der Sättigungskurven sieht für alle Proben ähnlich aus. An den ersten 7 Tagen der Messreihe ist eine nahezu lineare Wasseraufnahme über der Zeit zu beobachten, wobei die Sättigungskurve sich nach etwa 10 Tagen asymptotisch dem Maximalwert (Sättigungspunkt) annähert. In dem Diagramm sind noch kleine Gradienten der Gewichtszunahme zu sehen, allerdings wurde das zuvor definierte Sättigungskriterium erfüllt.

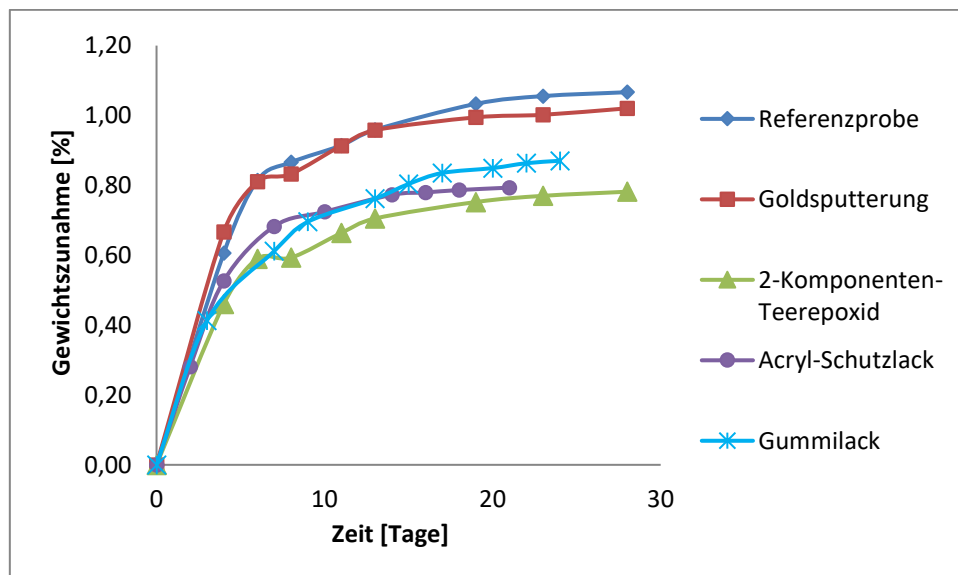


Abb. 6.3: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Wasserbad bei 23 °C

Bei der Betrachtung des Diagramms fällt auf, dass die Probe mit der 2-Komponenten-Teerepoxid-Beschichtung die geringste Wasseraufnahme aufweist. Allerdings weist die Teerepoxidbeschichtung eine wesentlich höhere Schichtdicke auf als die Goldsputterung. Bei gleicher Schichtdicke würde eine Goldbeschichtung eine geringere Wasseraufnahme aufweisen als eine Polymerbeschichtung. Allerdings werden hier nur technisch sinnvolle Beschichtungen (Material, Methode, Schichtdicke) untersucht, daher spiegelt Abb. 6.4 den erreichbaren Diffusionsschutz aktueller Beschichtungsmethoden mit ihren individuellen Schichtdicken dar. Ein wichtiges Bewertungskriterium ist die Steigung der Kurven. Je steiler der Verlauf der Sättigungskurve ist, umso stärker ist die Wasseraufnahme zu diesem Zeitpunkt. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte erzielen die Referenz- und die goldbesputterte Probe die schlechtesten Ergebnisse.

Auffällig ist, dass die Sättigung aller Proben nach spätestens 28 Tagen eintritt, mit jedoch unterschiedlich hohen Feuchtigkeitskonzentrationen. Dies verwundert, da zu erwarten ist, dass entweder durch die Beschichtung eine vollständige Diffusionsbarriere geschaffen wird oder der Sättigungsverlauf durch eine niedrig permeable Beschichtung lediglich verlangsamt wird, aber bei entsprechend langer Auslagerung die gleiche Feuchtigkeitskonzentration der Referenzprobe im Sättigungspunkt erreicht wird. Dies führt zu der Vermutung, dass ein Schwellenwert des Feuchtigkeitsgradienten existiert und dass unterhalb davon keine Diffusion stattfindet. Da die Diffusion bei unterschiedlichen Feuchtigkeitskonzentrationen der Proben stoppt, scheint dieser Schwellenwert von der Permeabilität der Beschichtung abzuhängen.

In Abb. 6.4 sind die Ergebnisse der Auslagerungsversuche in einem Wasserbad bei 50 °C über einen Zeitraum von 28 Tagen zu sehen. Bei der Auswertung dieser Versuchsreihe fällt auf, dass die Ergebnisse denen der ersten Messreihe ähneln. Die Wasseraufnahme der Proben steigt wieder linear mit der Zeit an und nähert sich dann asymptotisch dem Sättigungspunkt an. Die Reihenfolge bei der Gewichtszunahme der Proben bleibt gegenüber den Auslagerungsversuchen bei 23 °C unverändert.

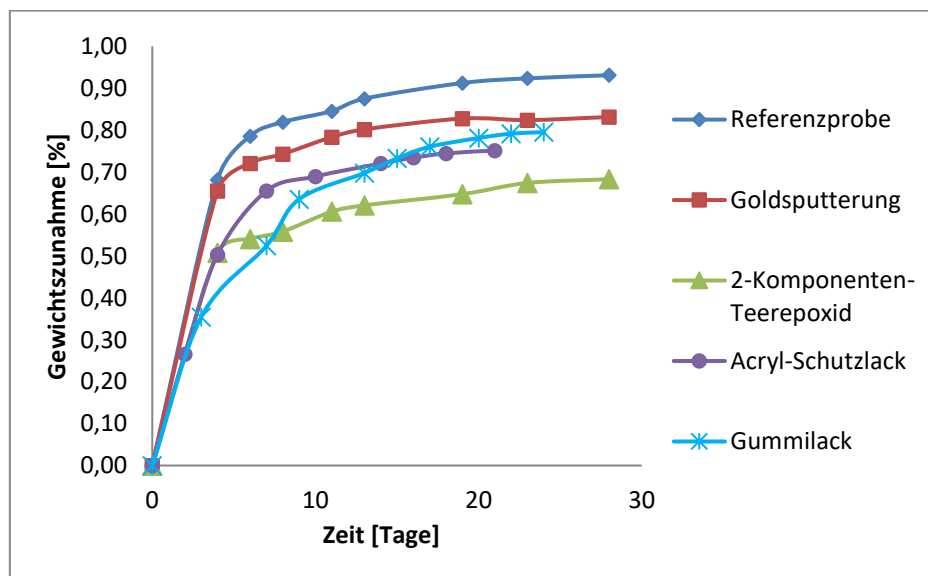


Abb. 6.4: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Wasserbad bei 50 °C

Beim Vergleich der Gewichtszunahme gleicher Proben bei den unterschiedlichen Wassertemperaturen, wird deutlich, dass die Wasseraufnahme bei der höheren Temperatur fast durchgehend geringer ist, als bei der niedrigeren. Die Diagramme der Wasseraufnahme der einzelnen Proben bei den beiden Temperaturen befinden sich im Anhang C.

Abb. 6.5 zeigt die Ergebnisse der dritten Versuchsreihe: Die prozentuale Gewichtszunahme der Vlies-Proben, die im Klimaschrank bei 70 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit eingelagert wurden.

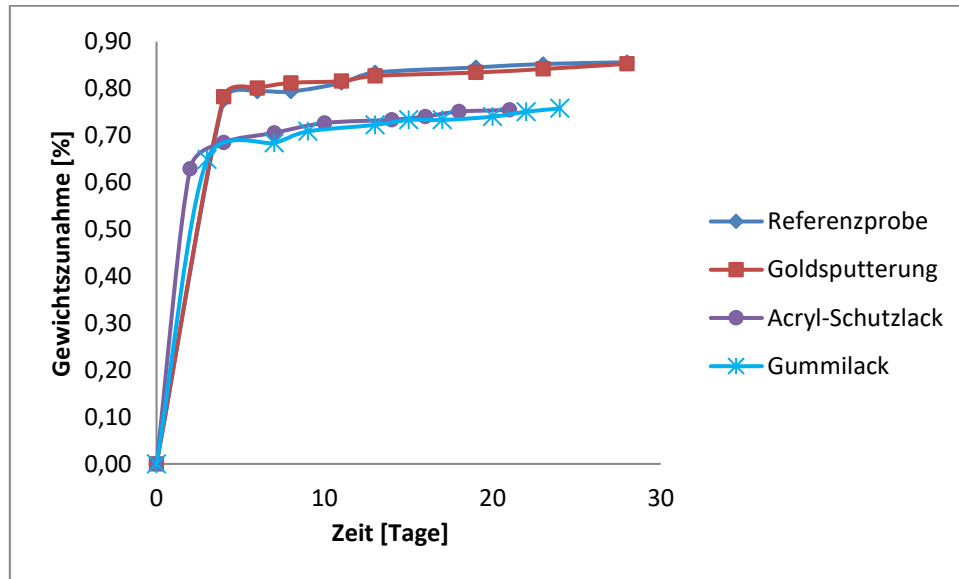


Abb. 6.5: Sättigungskurve unterschiedlich beschichteter Proben im Klimaprüfstand bei 70 °C und 85 % rel. Luftfeuchtigkeit

Unter diesen Testbedingungen ist auffällig, dass die mit dem 2-Komponenten-Teerepoxyd lackierte Probe kein Wasser aufnimmt, sondern Gewicht verliert. Dies könnte daran liegen, dass der Lack bei den im Klimaschrank herrschenden Bedingungen ausdampft. Aus diesem Grund wird die Probe nach dem sechsten Tag aus dem Schrank entfernt, da eine weitere Messung dieser Probe kein repräsentatives Ergebnis liefert. Auch wenn die 2-Komponenten-Teerepoxyd Probe in dieser Zeit Wasser aufnimmt, ist der Gewichtsverlust aufgrund des Ausgasens höher. Damit ist eine Aussage über die Wasseraufnahme nicht möglich und graphisch nicht darstellbar.

Die anderen Proben nehmen in den ersten Tagen des Auslagerungsversuchs verhältnismäßig viel Wasser auf, sodass der Sättigungszustand bei dem im Prüfschrank herrschendem Klima früher erreicht wird als im Wasserbad. Die dünne Goldbeschichtung scheint kaum eine diffusionshemmende Eigenschaft zu haben, da die Sättigungskurve mit der der Referenzprobe beinahe übereinanderliegt. Die beiden polymeren Beschichtungen zeichnet eine deutliche reduzierte Wasseraufnahme aus, wobei sich die Sättigungskurven der Acryllackbeschichtung und der Gummibeschichtung sehr ähneln.

Um die Güte der Beschichtungen zu vergleichen, wird die prozentuale Gewichtszunahme der Proben über den gesamten Zeitraum in Bezug auf das Ausgangsgewicht berechnet. Die Ergebnisse der drei Auslagerungsversuche sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tab. 6.3: Prozentuale Gewichtszunahme der Proben bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

	Wasserbad T = 50 °C	Wasserbad T = 23 °C	Klimaschrank T = 70 °C; 85 % rel. F.
Referenzprobe	0,93 %	1,07 %	0,86 %
Goldspatterung	0,83 %	1,02 %	0,86 %
2-K-Teerepoxyd	0,68 %	0,78 %	-
Acryl-Schutzlack	0,75 %	0,79 %	0,75 %
Gummilack	0,80 %	0,87 %	0,76 %

Anhand dieser Tabelle wird ersichtlich, dass die Proben im Wasserbad bei 23 °C durchschnittlich am meisten Wasser aufnehmen. Dieser Wert ist beim Auslagerungsversuch im Klimaschrank hingegen am geringsten.

Tendenziell besitzt die 2-Komponenten-Teerepoxyd Beschichtung eine bessere Isolationswirkung als die Goldspatterung und die Lackierung mit dem Acryl- und Gummischutzlack, wobei die Beschichtungsdicke als Einflussfaktor auf den Diffusionsschutz in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wird.

Die Beschichtungsdicke der Teerepoxydgrundierung ist wesentlich höher, als die der goldbeschichteten Probe. Da mit den vorhandenen Beschichtungsmethoden keine dickere metallischen Schichten auf die Aktuatoren aufgebracht werden können, entfällt die Berücksichtigung der Beschichtungsdicke als Einflussfaktor auf die Diffusion und nur die reinen Beschichtungen werden bei der Auswertung gegenübergestellt.

Es ist auffällig, dass zwischen den Ergebnissen der goldbesputterten und der Referenzprobe kein großer Unterschied erkennbar ist. Das könnte den Grund haben, dass die aufgetragene Goldschicht zu dünn ist und somit keine ausreichende Diffusionsbarriere darstellt. Auf Mikroskopaufnahmen sind zwar keine Defekte in der Goldschicht zu erkennen, allerdings können Fehlstellen nicht komplett ausgeschlossen werden, durch die Wasser in die Probe eindringt.

6.6 Herstellung von beschichteten Piezokompositen

Nach den Untersuchungen von verschiedenen Beschichtungsmaterialien und –verfahren an Auslagerungsproben aus Faserverbundmaterial werden nun die als geeignet betrachteten Beschichtungen an Piezoaktuatoren untersucht. Bei der Beschichtung der Aktuatoren mit dem Acryl-Schutzlack kommt es zu Haftungsproblemen an unebenen Stellen. Der Acrylharzlack ist sehr niedrigviskos, sodass er an den Lötstellen der Kontaktierung nicht haften bleibt, sondern herunterfließt, bevor sich ein stabiler Film zum Aushärten bilden kann. Auch nach mehrmaligem Wiederholen des Beschichtungsvorganges ergibt sich keine durchgängige Isolationsschicht auf den Lötstellen. Bei einer Betrachtung des Piezoaktuators stellt sich heraus, dass gerade an den unebenen Stellen der kontaktierten

Verkabelung die Beschichtung teilweise gar nicht vorhanden ist. Dies zeigt auch eine Durchgangsmessung mit einem Multimeter. Der Acryl-Schuttlack isoliert die elektrischen Kontakte des Aktuators nur unzureichend, sodass dieses Verfahren im vorliegenden Fall mit dem niedrigviskosen Lack nicht als Beschichtungsmethode geeignet ist. Zusätzlich zu Teerepoxid, Gummilack und Gold wird eine keramische Beschichtung aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), welche durch einen Atomlagenabscheidungsprozess (ALD) aufgebracht wird, untersucht. Da sich der Beschichtungsprozess sich bei den bisher betrachteten Materialien nicht von dem der Vlies-Proben unterscheidet, wird an dieser Stelle lediglich auf den Beschichtungsprozess der Atomlagenabscheidung eingegangen.

Nach dem Beschichten der Probekörper wird geprüft, inwieweit die aufgetragenen Beschichtungen die freie Auslenkung der Aktuatoren beeinflusst.

6.6.1 Atomlagenabscheidung mit Al_2O_3

Die Atomlagenabscheidung (aus dem Englischen: Atomic Layer Deposition, kurz: ALD) ist ein stark verändertes CVD-Verfahren zur Abscheidung von dünnen Schichten durch zwei oder mehr zyklisch durchgeführte selbstbegrenzende Oberflächenreaktionen. Wie bei anderen CVD-Verfahren wird auch bei der ALD die Schichtbildung über eine chemische Reaktion mindestens zweier Ausgangsstoffe realisiert. Im Unterschied zu herkömmlichen CVD-Verfahren werden bei der ALD die Ausgangsstoffe zyklisch nacheinander in die Reaktionskammer eingelassen. Zwischen den Gaseinlässen der Ausgangsstoffe (Edukte) wird die Reaktionskammer mit dem Inertgas Stickstoff (N_2) gespült. Auf diese Weise sollen die Teilreaktionen klar voneinander getrennt und auf die Oberfläche begrenzt werden. Nach Abdulagatov [41] sind Kupferproben, die im ALD-Verfahren mit Al_2O_3 und TiO_2 beschichtet wurden, bis zu 80 Tage wasserresistent. Da keramische Schichten ebenfalls elektrische Isolatoren sind, bietet sich die ALD als diffusionsdichte Beschichtungsmethode für die Aktuatoren an.

Das einfachste ALD-Verfahren ist ein Zweikomponentensystem, wie es auch hier zum Einsatz kommt. Beim angewendeten Prozess reagieren die Komponenten Trimethylaluminium ($\text{C}_3\text{H}_9\text{Al}$) und Wasser (H_2O) zu Aluminiumoxid (Al_2O_3). Die beiden Komponenten werden nun, wie oben beschrieben, abwechselnd und getrennt durch Spülschritte in die Kammer geleitet. Um eine optimale Anbindung vom Aluminiumoxid auf dem Stahlsubstrat zu gewährleisten, erfolgt der Beschichtungsprozess bei einer Temperatur von $180\text{ }^\circ\text{C}$. Es ergeben sich folgende vier charakteristische Schritte die in Abb. 6.6 dargestellt sind.

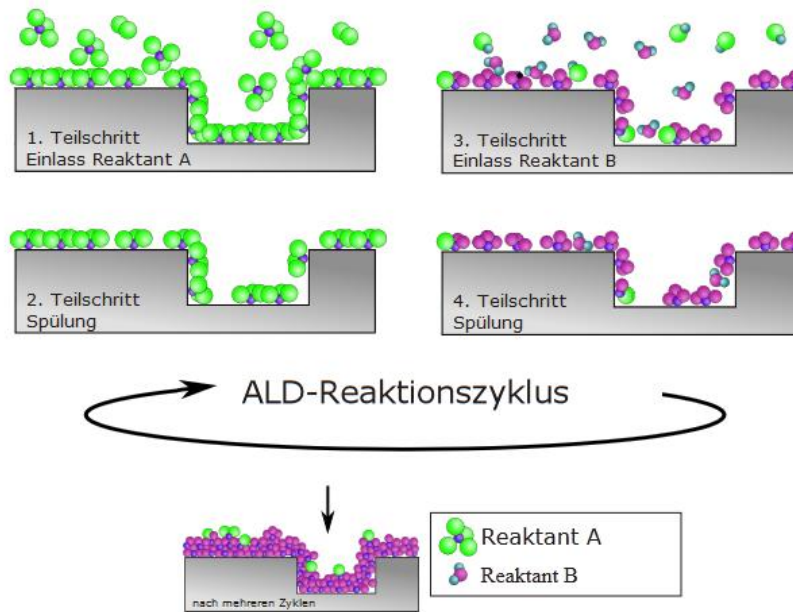


Abb. 6.6: Schematische Darstellung eines ALD-Reaktionszyklus [45]

Im ersten Schritt, dem sogenannten TMA pulse, wird der Ausgangsstoff Trimethylaluminium in die Reaktionskammer geleitet. Es kommt zu einer selbst begrenzenden Reaktion. In einem zweiten Schritt, welcher TMA purge genannt wird, wird die Kammer mit Stickstoff (N_2) gespült. Dies hat zur Folge, dass sämtliches nicht reagiertes Gas des ersten Reaktanden sowie alle nicht benötigten Reaktionsprodukte entfernt werden. Während des dritten Schritts, dem H_2O pulse, kommt es zur zweiten selbst begrenzenden Reaktion mit Wasser. So kann sich auf dem Substrat eine erste Schicht Aluminiumoxid bilden. Ein abschließender vierter Schritt des Zyklus spült und evakuiert erneut die Kammer. Dieser Schritt wird H_2O purge genannt. In einem ersten Beschichtungsverfahren wird die Dauer der Pulse Schritte auf 800 ms und die der purge Schritte auf 12 s festgelegt. Das Beschichtungsverfahren findet bei einer Temperatur von 180 °C statt. Pro Zyklus wird lediglich eine dünne Filmschicht von 1 Ångström (0,1 nm) erzeugt.

Dieser Temperaturbereich begünstigt die Pyrolyse, die thermo-chemische Spaltung organischer Verbindungen und führt so zu einer bestmöglichen Anbindung des Aluminiumoxids an die Oberfläche der zu beschichtenden Proben. In den Experimenten von Abdulagatov [41] werden Schichtdicken von ca. 200 Ångström (also 20 nm) betrachtet. Aus Isolationsgründen, resultierend aus der elektrischen Durchschlagsfestigkeit von etwa 35 kV/mm von Al_2O_3 , wird eine Schichtdicke von 250 nm angestrebt. Um die gewünschte Schichtdicke zu erzielen, werden bei der ersten ALD 2.500 Zyklen durchlaufen. Eine anschließende Schichtdickenermittlung mittels Messung des Brechungsindex hat ergeben, dass die aufgetragene Schicht eine Dicke von ca. 313 nm besitzt.

Anschließend wird eine zweite Charge von Piezoaktuatoren mit etwas veränderten Prozessparametern beschichtet. Die Zeit der purge Schritte wird auf 65 s und die TMA- und die H_2O pulse Zeit auf 1.000 ms beziehungsweise auf 1.250 ms erhöht. Entgegen der Erwartung hat diese Änderungen jedoch keine Steigerung der Schichtdicke ergeben. Diese beträgt für den zweiten Prozess 243 nm. Das könnte daran liegen, dass die Zeit der einzelnen Prozessschritte eine eher untergeordnete Rolle in Bezug auf die Dicke spielt. Denn

ein wesentliches Merkmal der ALD ist der selbst begrenzende Charakter der Teilreaktionen. Das heißt, die Reaktanden einer Teilreaktion reagiert nicht mit sich selbst. Dadurch ist das Schichtwachstum einer Teilreaktion bei beliebig langer Zeit und Gasmenge auf maximal eine Einzellage begrenzt. Auch die Annahme, dass ein längerer Zyklus die gleichmäßige Ablagerung begünstigt, konnte durch Widerstandsmessungen nicht bestätigt werden.

Eine Durchgangsmessung mit einem Multimeter ergibt, dass die sehr dünne Aluminiumoxidschicht keine komplette Isolation der Kontakte bietet. Auch auf den Substratbalcken, auf denen die Aktuatoren angebracht sind, gibt es vereinzelte Bereiche, die den Strom leiten und andere, die eine isolierende Wirkung haben. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Beschichtung nicht gleichmäßig auf die Probe abgelegt hat. Damit die Aktuatoren dennoch im weiteren Verlauf dieser Arbeit in Bezug auf ihre Wasserdichtigkeit getestet werden können, werden die Kontakte zusätzlich mit einer Schicht aus dem 2-Komponenten-Epoxidharz Loctide Hysol 9466 A&B elektrisch isoliert.

6.7 Bestimmung der freien Auslenkung der beschichteten Aktuatoren

Im späteren Betrieb müssen die Aktuatoren gegen die Steifigkeit der Ausblaslippe arbeiten, um diese zu öffnen und zu schließen. Die beschichteten Aktuatoren müssen zusätzlich zu dieser Last auch gegen die Steifigkeit der jeweiligen Beschichtung arbeiten. Der Aktuator arbeitet quasi gegen eine Federsteifigkeit. Wird diese Feder gestaucht, so entsteht eine Gegenkraft, die die maximale Auslenkung des Aktuators verringert. Aus diesem Grund wird im Folgenden untersucht, inwiefern die freie Auslenkung durch die unterschiedlichen Beschichtungen verringert wird.

Für die Bestimmung der freien Auslenkung mittels Lasertriangulation werden die beschichteten Aktuatoren in den Prüfstand eingespannt und einzeln vermessen. Dabei werden die Aktuatoren über den Funktionsgenerator mit einem Dreiecksignal angesteuert. Um einen quasistatischen Verlauf zu erreichen, besitzt das Signal eine Frequenz von 0,1 Hz und eine Maximalspannung von 120 V. Diese Spannung wird gewählt, damit die benötigte Feldstärke von 2,5 kV/mm und somit eine vollständige Auslenkung der Aktuatoren erreicht wird. Die Periodendauer, die Zeit in der der Spannungsverlauf von Null auf die Maximalspannung steigt und anschließend wieder auf den Ausgangswert zurückfällt, beträgt 10 s. Als Ergebnis wird die so entstandene Dehnungshysterese mit dem Oszilloskop aufgezeichnet. Sie zeigt den Dehnungsverlauf über der angelegten Spannung (siehe Abbildung 6.7).

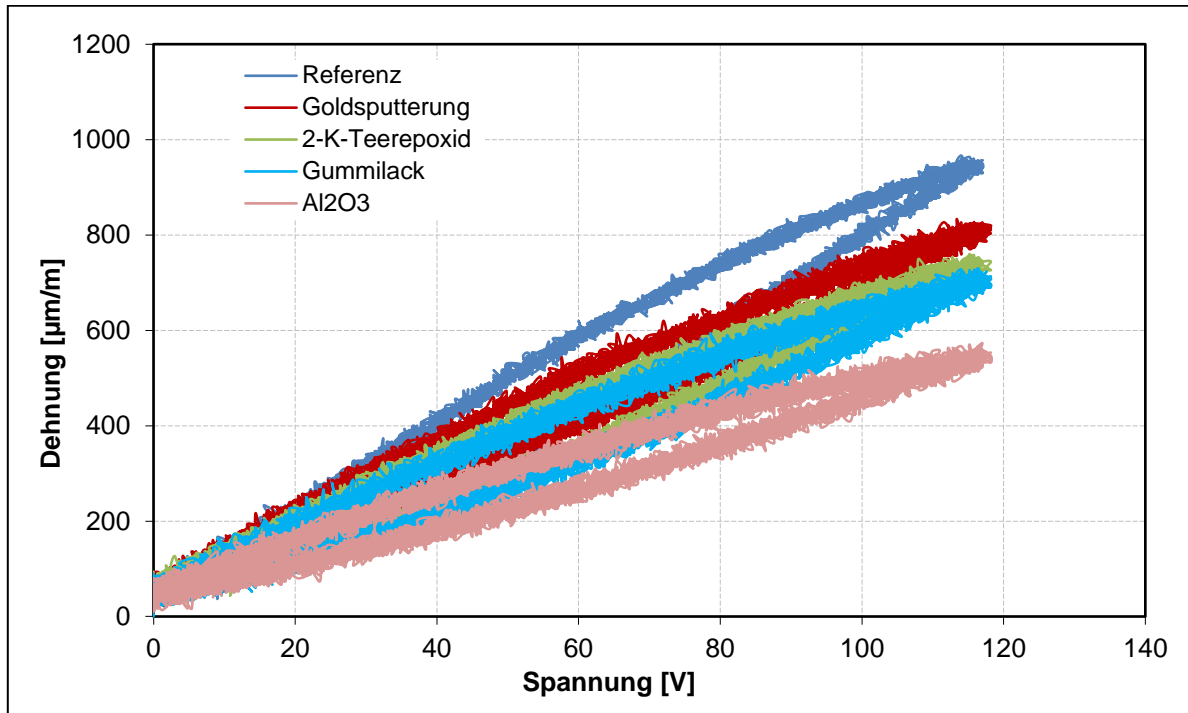


Abb. 6.7: Dehnungshysterese der unterschiedlich beschichteten Aktuatoren

Bei der Betrachtung der freien Dehnungen fällt auf, dass alle beschichteten Aktuatoren eine deutlich reduzierte Auslenkung im Vergleich zur unbeschichteten Referenzprobe aufweisen. Das beste Ergebnis liefert der mit Gold besputterte Aktuator. Die Differenz der freien Dehnung zur Referenzprobe ($967 \mu\text{m}/\text{m}$) beträgt ca. 14 %. Die Atomlagenabscheidung mit Al_2O_3 hingegen erreicht mit $573 \mu\text{m}/\text{m}$ den schlechtesten Dehnungswert. Da die beiden unterschiedlichen Beschichtungsprozesse der Al_2O_3 Beschichtung ein fast identisches Dehnungsverhalten aufweisen, wird in dem obigen Diagramm aus Gründen der Übersicht lediglich der Dehnungsverlauf des Prozess I ($313 \mu\text{m}$ Schichtdicke) dargestellt. Dieser Wert ist 40 % geringer als der des Referenzaktuator. Ein Grund dafür könnte sein, dass Keramiken wie Aluminiumoxid eine sehr hohe Steifigkeit (E-Modul $\sim 400 \text{ GPa}$) aufweisen und selbst die durch das Abscheideverfahren dünn aufgebraute Schicht die Auslenkung des Aktuator stark beeinträchtigt. Gold mit einem vergleichsweise geringen E-Modul von lediglich 78 GPa hingegen ist ein nachgiebiges Metall und somit kann die dünne, besputterte Schicht sich mit dem Aktuator verformen. Des Weiteren werden die Aktuatoren bei der Atomlagenabscheidung von Al_2O_3 während des Beschichtungsprozesses einer Temperatur von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt. Diese Temperatur liegt zwar unter der Curie Temperatur von etwa $350 \text{ }^\circ\text{C}$, könnte jedoch auch ein Grund für das verhältnismäßig schlechte Dehnungsverhalten der Aktuatoren sein, da bereits eine teilweise Depolarisation der Weisschen Bezirke eingesetzt haben kann. Die Beschichtungen mit Gummilack und der 2-Komponenten-Teerepoxyd Grundierung sind vergleichsweise dick, was dazu führt, dass die damit beschichteten Aktuatoren einen mittelmäßigen Dehnungswert erreichen. In Tabelle 6.4 sind noch einmal die maximalen Dehnungswerte und der prozentuale Anteil im Vergleich zur Referenzprobe angegeben.

Tab. 6.4: Ergebnisse der Dehnungsmessung

	Maximale Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Anteil der Referenzprobe [%]
Referenzprobe	966,97	100
Gummilack	730,00	75,5
2-Komponenten-Teerepoxyd	760,00	78,6
Gold	833,33	86,2
Atomlagenabscheidung (Prozess I / 313 μm Schicht)	573,33	59,3
Atomlagenabscheidung (Prozess II / 243 μm Schicht)	563,33	58,3

6.8 Auslagerungsversuche von beschichteten Piezokompositen

In diesem Experiment werden die beschichteten Aktuatoren unter Wasser angesteuert. Dieser Test zeigt, ob die zuvor ausgewählten Beschichtungsmaterialien und Verfahren den Betrieb der Piezokeramiken unter Wasser ermöglichen. Dabei wird ein erster Eindruck gewonnen, wie lange die Aktuatoren im Wasser funktionstüchtig bleiben. Des Weiteren wird untersucht, was die Gründe für den Ausfall, beziehungsweise das Versagen der Aktuatoren sind. Die Aktuatoren werden dafür in einem Wasserbad bei Raumtemperatur (23 °C) betrieben.

Das Ansteuerungssignal der Aktuatoren ist bei diesem Funktionstest ein Dreieckssignal mit einer Frequenz von 30 Hz und einer Spannungsamplitude von 0 bis 120 Volt. Dieses entspricht voraussichtlich dem späteren Signal bei den Untersuchungen im Wasserkanal. Mit der Ansteuerung werden die Aktuatoren ohne Last bis zum Ausfall betrieben. Als Versagenskriterium wird ein Auslenkungseinbruch von 50 % der Keramiken definiert. Dieser ist gleichbedeutend mit dem Verlust der Kapazität, was bedeutet, dass der Aktuator nicht mehr funktionsfähig ist.

Es werden zwei Versuchsreihen im Wasserbad durchgeführt. Zum einen werden die Piezokomposite ohne Last, d. h. nur das reine Piezokomposit, ausgelagert. Zum anderen werden die Piezokomposite unter einer mechanischen Last geprüft. Dazu werden die Piezokomposite auf einen dünnen Aluminiumbalken appliziert. Dadurch muss die Piezokeramik gegen die Steifigkeit des Biegebalkens beim Auslenken arbeiten. Dieses Szenario entspricht dem späteren Betrieb im Wasserkanal.

Um festzustellen, wann die unbelasteten Aktuatoren ausfallen, wird zweimal am Tag mit dem Multimeter der elektrische Widerstand, beziehungsweise die Kapazität gemessen. So kann eine Lebensdauer der untersuchten Aktuatoren angegeben werden. Aufgrund der

geringen Dehnung der reinen Piezokomposite ist eine optische Überwachung der Funktionstüchtigkeit nicht möglich. Im Gegensatz dazu können die belasteten Piezokomposite durch die größere Auslenkung des Biegebalkens mit einer Kamera optisch überwacht werden.

Da keine schleichende Degradation der Auslenkung festzustellen ist, sondern ein schlagartiges Versagensmuster beobachtet wird, kann durch eine Messung der Auslenkung keine Rückschlüsse auf den Zustand (Degradationsgrad) der Piezokeramiken geschlossen werden.

Aufgrund der begrenzten Anzahl der Aktuatoren, die für diese Versuche zu Verfügung stehen, kann jeweils nur ein Aktuator pro Beschichtung untersucht werden. Deshalb lässt sich auch bei diesen Versuchen keine Aussage über die Varianz und die Standardabweichung der Messwerte treffen. Die Lebensdauer der unterschiedlich beschichteten Piezokomposite ist für den belasteten und den unbelasteten Fall in Abbildung 6.8 dargestellt.

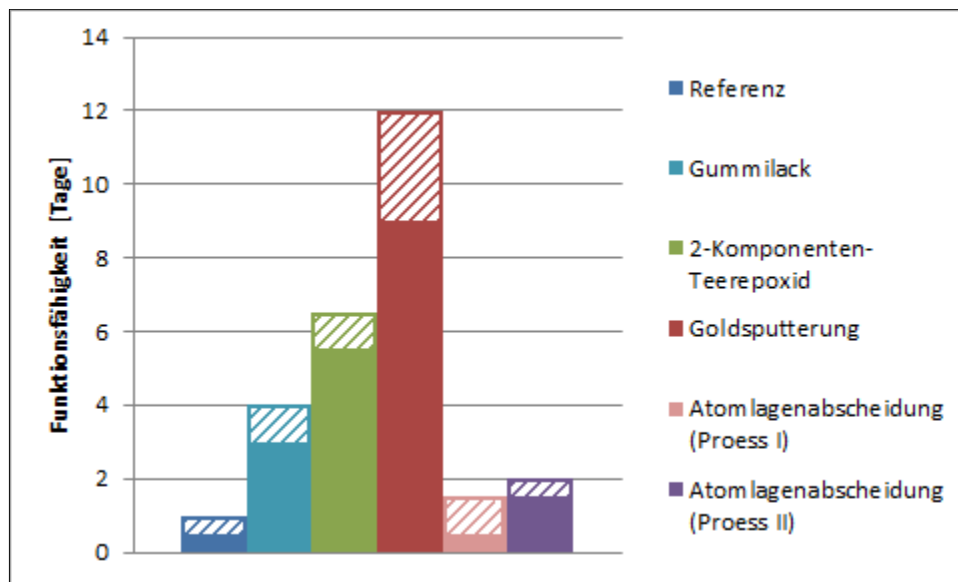


Abb. 6.8: Lebensdauer der Aktuatoren unter Wasser mit (ausgefüllt) und ohne (schraffiert) Last

Bei allen Proben ist eine deutliche Reduzierung der Lebenserwartung im belasteten zum unbelasteten Fall zu beobachten. Die Reihenfolge der Lebensdauer der verschiedenen beschichteten Piezokomposite bleibt bei den beiden Lastfällen unverändert.

Beim Betrachten des Diagramms, fällt auf, dass der mit Gold besputterte Aktuator mit 12 Tagen bzw. 9 Tagen unter Last die längste Funktionsfähigkeit unter Wasser besitzt. Diese ist fast doppelt so lang wie die des Aktuators, der mit der 2-Komponenten-Teerepoxyd Grundierung beschichtet ist. Dieser besitzt eine Lebensdauer von 6,5 (5,5) Tagen. Gefolgt von der zweiten polymeren Beschichtung mit 4 (3) Tagen. Ähnlich wie die Referenzprobe, die nur einen Tag (einen halben Tag unter Last) unter Wasser funktionsfähig ist, haben die mit Aluminiumoxid beschichteten Aktuatoren die mit 1,5 (0,5) beziehungsweise 2 (1,5) Tagen die geringste Lebensdauer. Das könnte daran liegen, dass die abgeschiedenen Aluminiumoxid-Schichten extrem dünn und spröde sind. Der Aktuator des zweiten Prozesses besitzt jedoch eine minimal bessere Lebensdauer. Das ist der Prozess mit der verlängerten Zykluszeit. Das könnte bedeuten, dass die Dauer der Zyklen zwar keinen Einfluss auf die

Dicke, jedoch auf die Gleichmäßigkeit der Schicht hat. Um zu sehen, weshalb die Aktuatoren ihre Funktionsfähigkeit verlieren, werden diese nach ihrem Ausfall unter dem Mikroskop untersucht. Alle Aktuatoren weisen nach dem Versagen sichtbare Durchschläge am Rand des aktiven Bereichs auf. An diesen Stellen ist sehr wahrscheinlich Wasser in die Keramik diffundiert und hat sich zwischen den Elektroden eingelagert. Ab einer gewissen Feuchtigkeit in der Keramik wird die Durchschlagfestigkeit soweit reduziert, bis es zu einem elektrischen Durchschlag der dünnen Keramikschiicht zwischen zwei Elektroden kommt. Durch die enorme Hitze die bei einem Kurzschluss entsteht, verdampft das eingedrungene Wasser und lässt Teile der Piezokeramik abplatzen. Da die Elektroden nun frei liegen, wird bei der anliegenden Feldstärke die Durchschlagfestigkeit von Luft überschritten und es entsteht ein Kurzschluss. Dadurch sind die Aktuatoren nicht mehr funktionstüchtig.

In Tabelle 6.5 sind die Lebensdauer und Lastwechselanzahl der unterschiedlich beschichteten Piezokomposite aufgelistet.

Tab. 6.5: Lebensdauer und Lastwechsel der belasteten Aktuatoren

	Lebensdauer [h]	Anzahl der Lastwechsel
Referenzprobe	9	972.000
Gummilack	55	5.940.000
2-Komponenten-Teerepoxid	126	13.608.000
Goldspalterung	211	22.788.000
Atomlagenabscheidung (Prozess I)	10	1.080.000
Atomlagenabscheidung (Prozess II)	48	5.184.000

Lediglich die Aktuatoren mit der Gold- und der Teerepoxidbeschichtung haben die geforderte Anzahl von 10^7 Lastwechseln erreicht. Allerdings bietet keine der Beschichtungen einen ausreichenden Diffusionsschutz, um die geforderte Betriebsfähigkeit der Aktuatorik von 25 Tagen (600 Stunden) unter Wasser zu erreichen.

6.9 Auslagerungsversuche der beschichteten Ausblaslippe

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit DuraAct Power Flächenwandlern durchgeführt, diese sind durch den in Kapitel 5.14 beschriebenen Einbettungsprozess schon elektrisch isoliert. Standard-Multilayerstacks sind mit einer passiven Keramikschiicht ummantelt und somit ebenfalls elektrisch isoliert und gegen leichte Umwelteinflüsse geschützt. Da es sich bei den für die Ausblaslippe verwendeten Multilayerstacks um Einzelanfertigungen handelt, die aufgrund von Geometrieanforderungen in eine bestimmte Kontur geschliffen werden, liegen auf einer Seite die Elektrodenfinger der Multilayerstacks offen. Daher muss die abgeschliffene Seite der Aktuatoren zuerst mit einer polymeren

Beschichtung elektrisch isoliert werden. Dies wird direkt vom Hersteller nach dem Abschleifen der Keramiken durchgeführt, um einer Degradation vorzubeugen. Auf diese ca. 200 µm dicke Polymerschicht wird nun die Diffusionsschutzschicht aufgebracht. Das Teerepoxyd und die Goldbesputterung zeigen den besten Diffusionsschutz der bisher untersuchten Beschichtungen. Daher werden sie als mögliche Diffusionsbarriere für die Ausblaslippe in Betracht gezogen und werden weitergehend untersucht. Zusätzlich wird ein neues Verfahren in Betracht gezogen. Dabei wird auf die Aktuatoren eine möglichst diffusionsdichte Folie appliziert. Es werden eine 5 µm dicke Stahlfolie (1.4310) und eine 25 µm dicke Polyvinylfluorid (PVF)-Folie untersucht. Um eine konstante Klebschichtdicke zwischen Aktuator und Folie zu gewährleisten wird ein Prepreg-Klebfilm zur Applikation verwendet, dieser hat eine Schichtdicke von 100 µm. Die Lippensegmente mit den unterschiedlichen Beschichtungen werden in einem Wasserbad bei 10 Hz und maximaler Betriebsspannung von 200 V betrieben. Die Lebensdauer der unterschiedlichen Beschichtungen ist in Abb. 6.9 dargestellt.

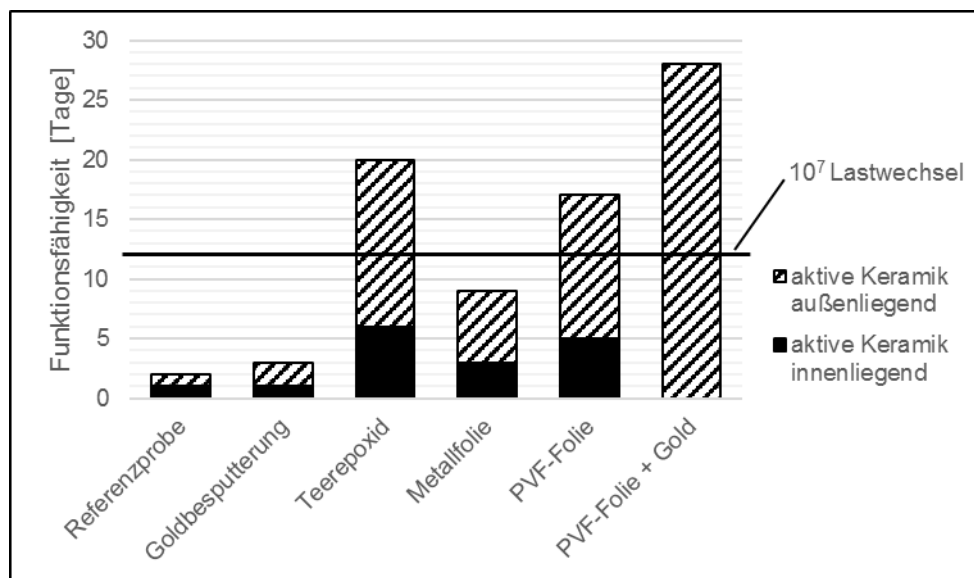


Abb. 6.9: Lebensdauer der Ausblaslippe im Wasserbad mit unterschiedlichen Diffusionsbarrieren

Die längste Funktionalität gewährleistet das Teerepoxyd mit 6 Tagen, gefolgt von der PVF-Folie mit 5 Tagen. Auffallend ist, dass die Goldbesputterung in den vorherigen Untersuchungen den besten Diffusionsschutz bietet, allerdings in der neuen Konfiguration, dem kompletten Aufbau eines Lippensegments, kaum besseren Schutz liefert als die Referenzprobe ohne jeglichen Diffusionsschutz. Die Ursache scheint im unterschiedlichen Aufbau der Aktuatoren zu liegen. Das Versagensbild deutet daraufhin, dass Wasser durch die Goldschicht in die polymere elektrische Isolationsschicht diffundiert und somit die Durchschlagsfestigkeit der elektrischen Isolation herabsetzt, bis es zum Kurzschluss zwischen Elektrode und Goldschicht kommt. Abb. 6.10 zeigt solch einen Kurzschluss der zum Ausfall des Lippensegments führt.



Abb. 6.10: Elektrischer Kurzschluss zwischen Aktuatorelektrode und Goldbeschichtung

Die Metallfolie zeigt das gleiche Versagensbild wie die Goldbeschichtung, auch hier kommt es zum Kurzschluss zwischen Elektrode und Metallfolie. Die PVF-Folie bestätigt dieses Verhalten, da sie trotz schlechterer Diffusionsschutzeigenschaften eine deutlich längere Funktionalität der Ausblaslippe unter Wasser bereitstellt und hier keine äußeren Kurzschlüsse erkennbar sind. Aufgrund dieser ersten Erkenntnisse soll der Einfluss der passiven Keramikschicht an der Unterseite der Piezokeramiken untersucht werden. Dazu werden die Aktuatoren umgekehrt, mit der abgeschliffenen aktiven Keramikseite, auf die Ausblaslippe appliziert. Dadurch liegt die passive Keramikschicht nun außen. Diese Konfiguration sollte einen höheren Diffusionsschutz bieten und ist in Abb. 6.9 schraffiert dargestellt. Durch diese Maßnahme zeigt sich eine etwa dreimal höhere Lebensdauer bei allen 4 untersuchten Beschichtungen. Auch in dieser Konfiguration schneiden das Teerepoxid mit einer Lebensdauer von 20 Tagen und die PVF-Folie mit 17 Tagen am besten ab und erfüllen damit die Vorgabe von mindestens 10^7 Lastwechseln. Allerdings wird trotz dieser Bemühungen die geforderte Betriebsdauer von 25 Tagen im Wasserkanal nicht erreicht.

Um den Diffusionsschutz für die Ausblaslippe weiter zu optimieren, werden unterschiedliche Beschichtungen kombiniert. Diese mehrschichtige Diffusionsbarriere soll das Eindringen von Wasser in die Piezokeramik soweit hinauszögern, dass eine ausreichend lange Betriebszeit der Ausblaslippen im Wasserkanal zur Durchführung einer Messreihe gewährleistet werden kann. Danach sollen sie aus dem Wasserkanal ausgebaut und Rückgetrocknet werden, dies ist möglich solange es in den Piezokeramiken aufgrund von Degradation nicht zu Kurzschlüssen kommt. In Abb. 6.11 ist ein Ausblaslippensegment mit den unterschiedlichen Beschichtungen zu sehen.

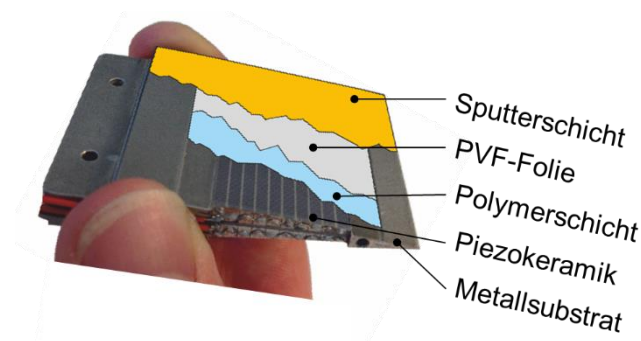


Abb. 6.11: Ausblaslippe mit mehrschichtiger Diffusionsbarriere

Das finale Lippensegment besteht aus dem Stahlsubstrat auf dem auf Ober- und Unterseite jeweils 2 Multilayerstacks appliziert sind. Die Piezokeramiken werden mit der aktiven Keramikschicht aufgeklebt, so dass die schützende passive Schicht außen liegt. Auf die Keramiken wird dann mittels Prepreg-Klebstoff eine 25 μm dicke PVF-Folie appliziert. Auf dieser Folie wird eine etwa 200 μm dicke Teerepoxidschicht aufgetragen. Diese gilt sowohl dem Diffusionsschutz als auch zur Konturbildung, da sie im ausgehärteten Zustand in die Zielkontur geschliffen werden kann. Da die Seiten nicht von der PVF-Folie bedeckt sind, sondern lediglich von einer etwa 2 mm dicken Teerepoxidschicht geschützt werden, wird zusätzlich die gesamte Ausblaslippe mit einer ca. 1 μm dicken Goldschicht besputtert. Dieser mehrschichtige Aufbau bietet, unter der Herausforderung des extrem limitierten Bauraums, den besten Diffusionsschutz und erfüllt mit 28 Tagen Funktionalität sowohl die Anforderung an die Lebensdauer, als auch mit 24^7 Lastwechseln die Vorgabe an die minimale Zyklenzahl.

Der Einfluss dieser mehrschichtigen Diffusionsbarriere auf die Auslenkung der Ausblaslippe wird in Abb. 6.10 dargestellt.

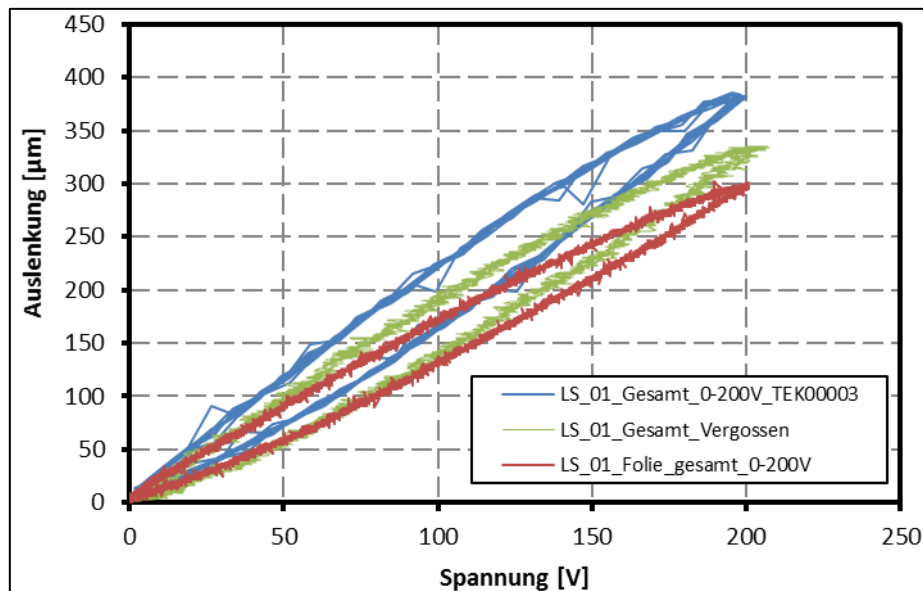


Abb. 6.12: Freie Auslenkung der Lippenspitze; blau) Lippensegment mit applizierten Aktuatoren; grün) Lippensegment mit Polymerbeschichtung; rot) Lippensegment mit Polymerbeschichtung und applizierter Metallfolie

Es ist deutlich zu sehen, dass die Beschichtungen einen negativen Einfluss auf die Auslenkung der Ausblaslippe haben. Jede Beschichtung erhöht die Biegesteifigkeit der Lippe und reduziert somit die Auslenkung, da die Aktuatoren gegen diese Biegesteifigkeit aktivieren. Die Ausblaslippe ist auf eine freie Auslenkung von 400 μm ausgelegt, da mit einer Toleranz der Dehnung der Multilayerstacks von -20 % und einer Reduktion der Auslenkung von 20-30 % durch die Beschichtung gerechnet wird.

Die 400 μm werden von der unbeschichteten Ausblaslippe nicht ganz erreicht, die Auslenkung von 380 μm liegt allerdings im Toleranzbereich der Multilayerstacks. Die geforderte Auslenkung beträgt 200 μm . In der finalen Konfiguration mit dem mehrschichtigen Diffusionsschutz erreicht die Ausblaslippe eine Auslenkung von 300 μm und gewährleistet

einen kontinuierlichen Betrieb von 28 Tage bei über 24^7 Lastwechseln im Wasserkanal, somit erfüllt sie alle Anforderungen an ihre Funktionalität.

6.10 Untersuchung der abrasiven Wirkung der Seeding-Partikel im Wasserkanal auf die Diffusionsbeschichtung

Zur Durchführung von PIV-Messungen werden dem Wasser im Wasserkanal Polyamid-Partikel mit einem Durchmesser von ca. $20\ \mu\text{m}$ zugesetzt um das Laserlicht zu streuen. Es wird vermutet, dass diese Partikel eine abrasive Wirkung auf die dünne Goldschicht haben. Zur Bewertung dieser Problematik wird ein Probekörper in den Wasserkanal montiert. Der Probekörper besteht aus einem Biegebalken aus Metall und einem applizierten und beschichteten DuraAct Power Flächenwandler. Unter einem Anstellwinkel von 45° wird der beschichtete Aktuator mit einer Geschwindigkeit von $6\ \text{m/s}$ für eine Dauer von 8 h angeströmt. Während dieser Zeit wird der Aktuator mit einer sinusförmigen Spannung von 0-120 V und einer Frequenz von 30 Hz angesteuert. Der Probekörper und die Einbauposition im Wasserkanal sind in Abb. 6.11 zu sehen.

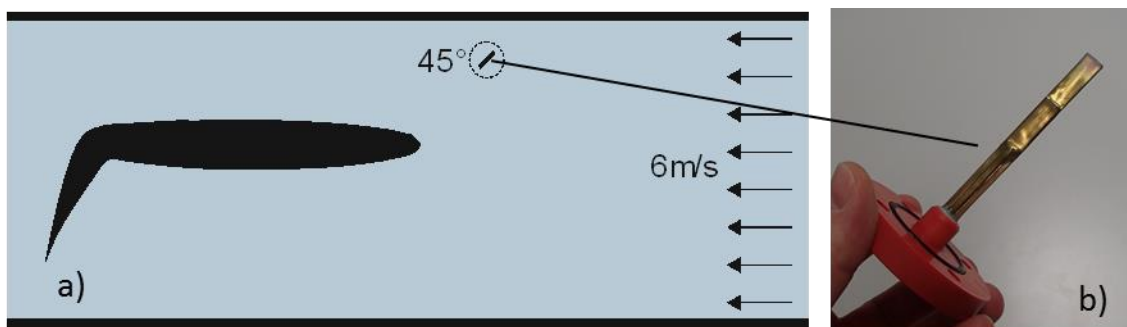


Abb. 6.13: a) Einbauposition im Wasserkanal; b) Probekörper

Nach dem Test wird der Probekörper wieder aus dem Wasserkanal ausgebaut und unter dem Mikroskop untersucht. Abb. 6.12 a) zeigt eine Mikroskopaufnahme der Goldschicht nach dem Sputterprozess und b) nach dem Test im Wasserkanal.

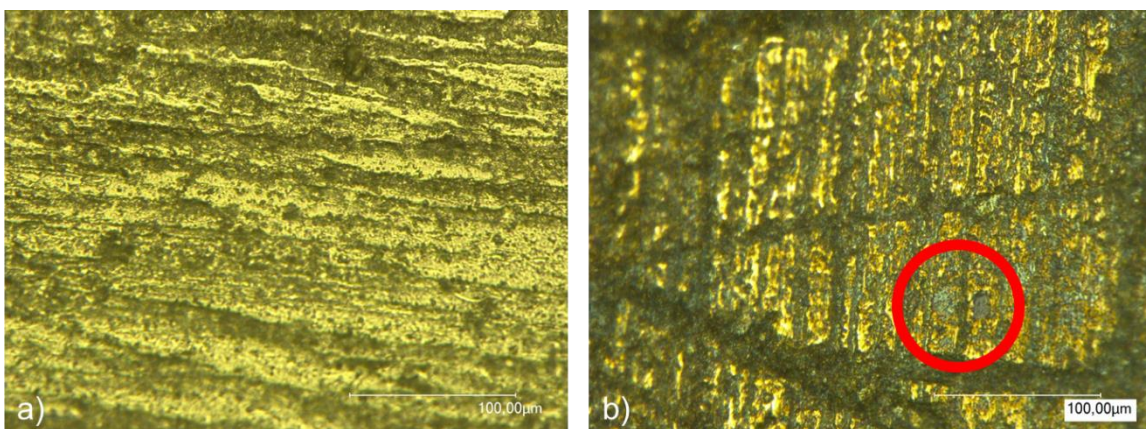


Abb. 6.14: Mikroskopaufnahme der Goldschicht a) vor und b) nach dem Test

Auf den ersten Blick ist keine Beschädigung der Goldbeschichtung zu erkennen und auch der Aktuator zeigt keine Degradationserscheinungen. Unter dem Mikroskop werden allerdings kleine Stellen entdeckt, an denen die Goldschicht abgeplatzt zu sein scheint. Der Durchmesser der Beschädigung liegt etwa in der Größenordnung der Seeding-Partikel von $20\ \mu\text{m}$. Daher wird angenommen, dass die Partikel die Grenzschicht durchschlagen und auf die Oberfläche prallen. Da es sich durch den Sputterprozess lediglich um lose abgelagerte Goldpartikel handelt, werden diese anscheinend durch den Impuls der auftreffenden Partikel aus ihrem Verband herausgelöst. Zum Abrasionsschutz der Goldbeschichtung wird diese mit einem Klarlack versiegelt. Durch den Klarlack wird die Goldschicht vor einem Ablösen geschützt und behält somit ihre Funktionalität als Diffusionsschutz. Mit diesem Aufbau aus mehrschichtigen Diffusionsbarrieren und Abrasionsschutz werden alle Anforderungen an die Funktionalität der Ausblaslippe erfüllt.

6.11 Test eines finalen Lippensegments unter realen Wasserkanalbedingungen

Der Test wird Wasser und einem Plenumsdruck von 5 bar durchgeführt. Um eventuelle Druckschwankungen aufzuzeichnen, wird die Ausblaslippe auf der Unterseite mit einem Drucksensor ausgestattet. Die Auslenkung wird auf der Oberseite mittels Lasertriangulation ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6.15 zu sehen.

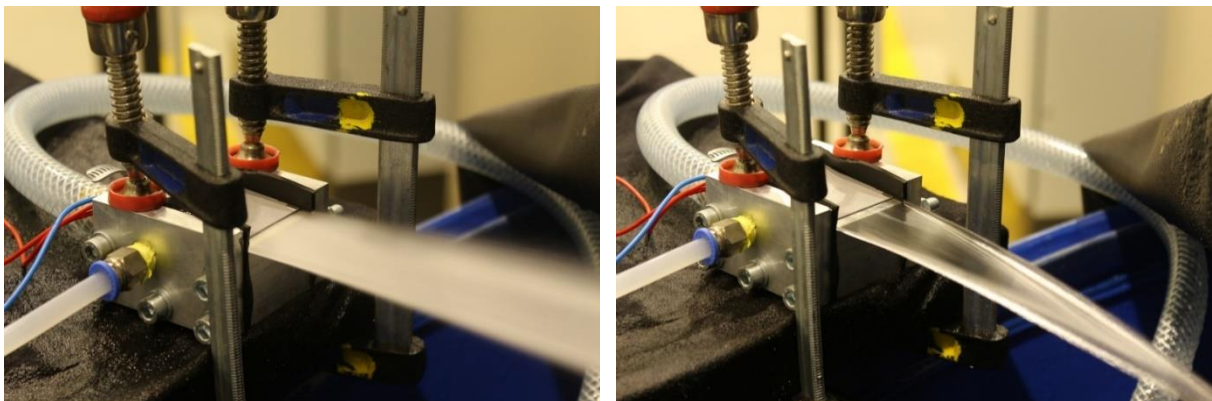


Abb. 6.15: Testaufbau zur Bestimmung der Auslenkung der Ausblaslippe unter realen Wasserkanalbedingungen mit Wasserstrahlausblasung

Durch Referenzmessungen ohne Ausblasung kann ein auslenkungsmindernder Einfluss einer seitlichen Gummiabdichtung ausgeschlossen werden, hier beträgt die Auslenkung $210\ \mu\text{m}$. Bei den Versuchen mit Ausblasung wird eine deutliche Auslenkungsreduzierung beobachtet. Im quasi statischen Betrieb bei $0,1\ \text{Hz}$ wird mit Ausblasung nur noch eine Auslenkung von $90\ \mu\text{m}$ erreicht und beim dynamischen Betrieb mit $5\ \text{Hz}$ wird lediglich eine Auslenkung von $60\ \mu\text{m}$ gemessen, statt den ursprünglichen $210\ \mu\text{m}$. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 6.16 dokumentiert.

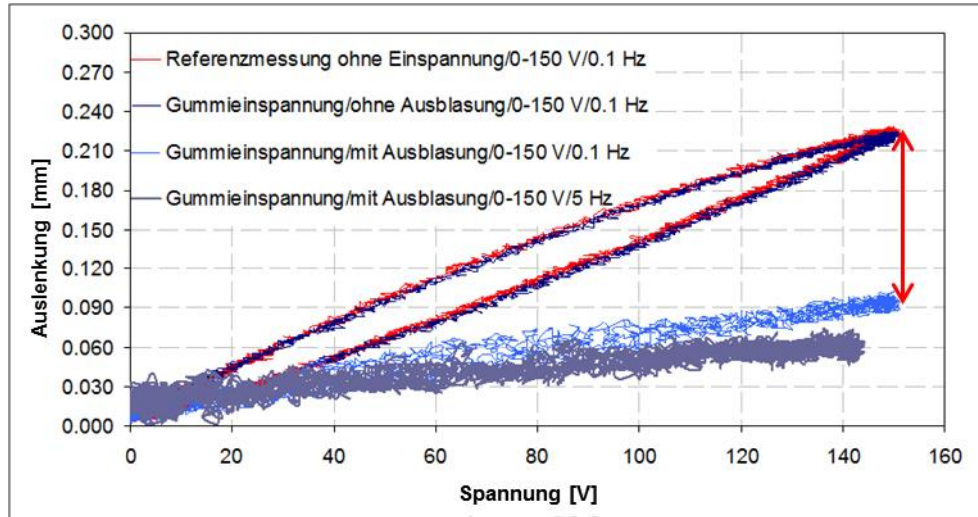


Abb. 6.16: Reduzierte Auslenkung der Ausblaslippe aufgrund des Druckanstieges beim Schließen des Ausblasespaltes

Diese Messergebnisse lassen darauf schließen, dass die in Kapitel 5.4.7 getroffene Annahme, dass gegen eine konstante Last aktuiert wird, nicht zutreffend zu sein scheint. Beim Schließen des Ausblasespaltes durch Aktuierung der Ausblaslippe wird eine Druckerhöhung von 0,5 bar registriert. Auf die Fläche der Ausblaslippe bezogen entspricht dies einer Kraft von 60 N. Diese Kraft kann als Federsteifigkeit angesehen werden, die von 0 N in der Ausgangsposition bis auf 60 N bei voller Auslenkung steigt, dadurch reduziert sich die Auslenkung. Trägt man diese Daten in das Arbeitsdiagramm (Abb. 6.17) ein, wird die Reduzierung der Auslenkung unter realen Wasserkanalbedingungen ersichtlich.

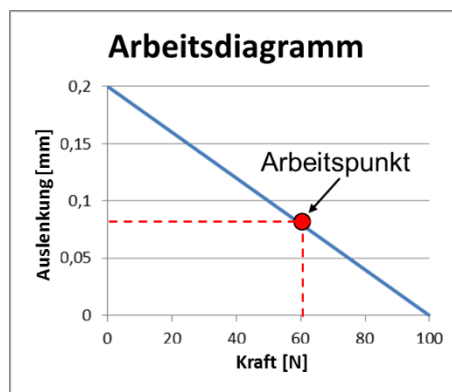


Abb. 6.17: Arbeitsdiagramm zur Bestimmung des Arbeitspunktes der Ausblaslippe unter realen Wasserkanalbedingungen

Die Auslenkung liegt laut Arbeitsdiagramm bei 80 μm , dies entspricht etwa der gemessenen Auslenkung von etwa 90 μm im Experiment und liefert somit die Erklärung für die reduzierte Auslenkung unter Last.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird im Kapitel 6.12 eine Bewertung der Funktionskonformität der Ausblaslippe durchgeführt.

6.12 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Versuchen unter realen Betriebsbedingungen verdeutlichen die Wichtigkeit einer gründlichen Anforderungsanalyse, die auch Umgebungseinflüsse und Randbedingungen mit einbezieht, um die daraus resultierenden multilateralen Konformitäten schon im Entwurfsprozess einer adaptiven Struktur durch entsprechende Kopplungsfaktoren zu berücksichtigen.

Es sollen nun mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den Experimenten die Kopplungsfaktoren angepasst werden, da sich die Gewichtungen der Anforderungen zur ursprünglichen Konfiguration in Kapitel 2.3.1 geändert haben. Hier zeigt sich der Vorteil eines iterativen Entwurfsprozesses, da durch Anpassung der Gewichtungen auf sich ändernde Randbedingungen, hier ein anderer Lastfall, sich die Funktionskonformität im nächsten Iterationsschritt des Entwurfs erhöhen lässt.

Um die multilaterale Konformität bewerten zu können, müssen zunächst die Anforderungen mit den gewonnenen Erkenntnissen neu priorisiert werden. Dafür wird die Kopplungsmatrix mit den neuen Paarvergleichen aufgestellt.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 9 & 1 \\ 1 & 1 & 9 & 1 \\ 0,111 & 0,111 & 1 & 0,111 \\ 1 & 1 & 9 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Den Eigenvektor wird durch Quadratur der Kopplungsmatrix und anschließender Bildung der Zeilensumme gewonnen. Der Eigenvektor wird zur besseren Veranschaulichung noch auf 1 normiert.

$$\begin{pmatrix} 0,321 \\ 0,321 \\ 0,036 \\ 0,321 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Auslenkung} \\ \text{Verformung} \\ \text{Dauerfestigkeit} \\ \text{Wasserdichtigkeit} \end{array} \quad (\text{Gl.6.4})$$

Die Anforderungen an Auslenkung, Verformung unter Last und Wasserdichtigkeit werden als gleichwertig in Bezug auf die Funktionskonformität der Ausblaslippe angesehen. Eine gezielte Betrachtung der Dauerfestigkeit spielt bei der Auslegung so gut wie keine Rolle, da die Haltbarkeit der Aktuatoren die Anwendungsdauer deutlich übersteigt.

Da sich im Laufe der Auslegung herausgestellt hat, dass anfangs eine falsche Annahme bezüglich des Lastfalls getroffen wurde, müssen die Kopplungsmatrizen von Anforderungen aktualisiert werden, auf die die Blockierkraft einen direkten Einfluss hat (Abb. 2.3). Die ursprüngliche Annahme, dass die Ausblaslippe gegen eine konstante äußere Last arbeitet, erwies sich als nicht zutreffend (Kapitel 6.11). Beim dynamischen Schließen des Ausblasespalt durch die aktuierte Ausblaslippe steigt nachweislich der Druck im Ausblasespalt um etwa 10 % des Plenumdruckes an. Dieses Verhalten spiegelt den Lastfall wieder, dass gegen eine Federkraft aktuiert wird, dies reduziert die Auslenkung der Ausblaslippe. Diese Erkenntnis führt zu neuen Kopplungsmatrizen für Auslenkung und Verformung. Auf die Kopplungsmatrizen der beiden anderen Anforderungen, Dauerfestigkeit und Wasserdichtigkeit, hat die Blockierkraft keinen Einfluss. Die an den neuen Lastfall

angepassten Kopplungsmatrizen und daraus berechneten Eigenvektoren für Auslenkung und Verformung befinden sich im Anhang B.

Um die, an den vorliegenden Lastfall, angepassten Kopplungsfaktoren zu erhalten, werden die neu berechneten Eigenvektoren der Anforderungen mit den aktualisierten Gewichtungen der Anforderungen multipliziert.

$$\begin{array}{l}
 \text{Stellweg} \\
 \text{Steifigkeit} \\
 \text{Blockierkraft} \\
 \text{Eigenfrequenz} \\
 \text{Feuchtigkeit}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Auslenkung} \\
 \text{Verformung} \\
 \text{Dauerfestigkeit} \\
 \text{Wasserdichtigkeit} \\
 \text{Gewichtung}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 0,247 & 0,128 & 0,076 & 0,076 \\
 0,289 & 0,510 & 0,076 & 0,076 \\
 0,400 & 0,315 & 0,076 & 0,076 \\
 0,032 & 0,023 & 0,697 & 0,076 \\
 0,032 & 0,023 & 0,076 & 0,697
 \end{pmatrix}
 *
 \begin{pmatrix}
 0,321 \\
 0,321 \\
 0,036 \\
 0,321
 \end{pmatrix}
 \begin{array}{l}
 \text{Auslenkung} \\
 \text{Verformung} \\
 \text{Dauerfestigkeit} \\
 \text{Wasserdichtigkeit}
 \end{array}
 \quad (\text{Gl. 6.5})$$

$$=
 \begin{pmatrix}
 0,148 \\
 0,284 \\
 0,257 \\
 0,067 \\
 0,244
 \end{pmatrix}
 \begin{array}{l}
 \text{Stellweg} \\
 \text{Steifigkeit} \\
 \text{Blockierkraft} \\
 \text{Eigenfrequenz} \\
 \text{Feuchtigkeitsaufnahme}
 \end{array}
 \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Der Kopplungsvektor beschreibt die multilaterale Konformität zwischen den einzelnen Kriterien, bezogen auf die Funktionskonformität des Gesamtsystems. Aus dem berechneten Kopplungsvektor ergeben sich die angepassten Kopplungsfaktoren zwischen Kriterien und Gesamtsystem:

$$\begin{array}{ll}
 w_z(x_i) \text{ (Stellweg Aktuator)} & = 0,210 \text{ (alt)} / 0,148 \text{ (neu)} \\
 w_z(x_j) \text{ (Steifigkeit)} & = 0,374 \text{ (alt)} / 0,284 \text{ (neu)} \\
 w_z(x_k) \text{ (Blockierkraft)} & = 0,210 \text{ (alt)} / 0,257 \text{ (neu)} \\
 w_z(x_l) \text{ (Eigenfrequenz)} & = 0,083 \text{ (alt)} / 0,067 \text{ (neu)} \\
 w_z(x_m) \text{ (Feuchtigkeitsaufnahme)} & = 0,121 \text{ (alt)} / 0,244 \text{ (neu)}
 \end{array}$$

Vergleicht man die neu berechneten Kopplungsfaktoren mit denen aus Kapitel 2.3.1 wird deutlich, dass vor allem der Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Funktionskonformität der Ausblaslippe unterschätzt wurde. Der Kopplungsfaktor der Feuchtigkeitsaufnahme hat sich zur ersten Annahme verdoppelt, da sich die Versiegelung der Aktuatoren als äußerst komplex herausstellte. Die Steifigkeit hat auch weiterhin den größten Einfluss auf die Funktionskonformität der Ausblaslippe, allerdings hat sich ihr Einfluss um 25 % reduziert. Der Einfluss der Auslenkung der Aktuatoren auf die Performance des Gesamtsystems hat sogar um 30 % abgenommen. Der Grund hierfür liegt in der Verformung der Struktur unter Last. Wird die Ausblaslippe aufgrund eines hohen Plenumdruckes stark verformt, kann die Aktuatorik diese Verformung nicht mehr kompensieren.

In dem vorliegenden Lastfall hat die Blockierkraft des Aktuators einen erheblichen Einfluss auf die maximal erreichbare Auslenkung der Ausblaslippe, dies spiegelt auch der zugehörige Kopplungsfaktor wieder, der im Wert um 22 % gestiegen ist. Die Eigenfrequenz spielt, aufgrund der hohen Steifigkeit der Struktur, auch weiterhin nur eine untergeordnete Rolle.

Die angepassten und ursprünglichen Kopplungsfaktoren können grafisch mit dem in Kapitel 2.2 gezeigten Bewertungsschema dargestellt werden. Die Kopplungsfaktoren werden auf einem Einheitskreis eingezeichnet und stellen deren Einfluss auf das Gesamtsystem dar. Die blaue Fläche zeigt die, an den neuen Lastfall, angepasste Auslegung, der erste Entwurf aus Kapitel 2.3.1 ist in Rot dargestellt.

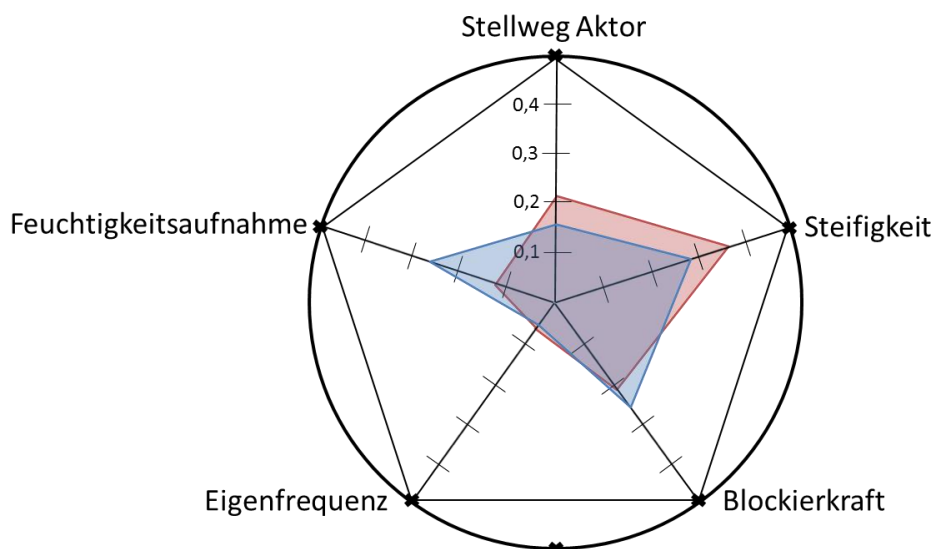


Abb. 6.18: Grafische Darstellung der Kopplungsfaktoren auf dem Einheitskreis.

Anhand dieser Darstellung lässt sich der Einfluss der Kriterien auf die Funktionskonformität des Gesamtsystems veranschaulichen. Es zeigt sich, dass die Feuchtigkeitsaufnahme anfangs unterschätzt und im Laufe des Entwurfs, zur Erfüllung der Anforderungen, angepasst werden musste.

Mit der angewendeten Entwurfsmethode für adaptive Systeme mit multilateralen Konformitäten konnte eine dynamisch aktuierte Ausblaslippe für ein Wasserkanalmodell entwickelt werden, die nach einer Designanpassung durch iterativ bestimmte Kopplungsfaktoren alle Anforderungen an Mechanik und Robustheit erfüllt.

Abschließend kann die These aus Kapitel 2.1 und die Arbeitsthese aus Kapitel 2.3 zu folgender Aussage zusammengefasst werden.

Durch die Überführung paarweiser Gewichtungen von Anforderungen und Kriterien in Kopplungsmatrizen, kann deren multilaterale Konformität durch Kopplungsfaktoren beschrieben und dadurch ihr Einfluss auf die Funktionskonformität des Gesamtsystems bewertet werden.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Beispiel einer dynamisch aktuierten Ausblaslippe einer Tragflügelhinterkante eine Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien erarbeitet.

Aus dem Ansatz, mikrotechnische Systeme strukturkonform mit der Faserverbundtechnologie zu verknüpfen, ergeben sich eine Vielzahl ingenieurwissenschaftlicher Herausforderungen. Bei der funktionskonformen Gestaltung werden Funktionswerkstoffe, z. B. Aktuatoren und Sensoren, schon während des Faserverbundherstellungsprozesses so in das Bauteil integriert, dass sie weitere Aufgaben, z. B. lastragende Funktionen, übernehmen. Diese multifunktionale Bauweise erfordert eine neue Entwurfsmethodik, da mit der bisherigen bilateralen Auslegung von Strukturen, bei der z. B. ein Energiespeicher erst nachträglich auf die Struktur aufgebracht wird, nicht die Interaktion der unterschiedlichen Werkstoffe berücksichtigt. Die neue integrale Bauweise von Multifunktionsbauteilen erfordert daher eine Entwurfsmethodik die von Anfang an die multilateralen Konformitätskriterien, die sich aus den Anforderungen der Einzelkomponenten im Gesamtsystem ergeben, bündelt und miteinander verknüpft.

Eine mögliche Entwurfsmethodik wurde beim Entwurf einer dynamisch aktuierten Ausblaslippe für ein Wasserkanalmodell erarbeitet. Gerade die Entwicklung von einem adaptiven elektrischen System für Unterwasseranwendungen bietet ideale Voraussetzungen zur Validierung der Forschungshypothese. Bei dem Entwurf der adaptiven Ausblaslippe muss bei der Wahl des Aktuatorkonzepts der knappe Bauraum, die große Auslenkung, die hohe Blockierkraft sowie die hohen Betriebsfrequenzen berücksichtigt werden. Hinzu kommt ein geeignetes Sensorsystem zur Bestimmung der Auslenkung mit ausreichender Messgenauigkeit sowie eine entsprechende diffusionsdichte Beschichtung für einen dauerhaften Unterwasserbetrieb im Wasserkanal. Diese unterschiedlichen, teilweise konträren Kriterien, die sich aus den Anforderungen ergeben, in einem möglichst leichten Bauteil zu vereinen, ist ohne eine entsprechende Entwurfsmethodik kaum möglich. Daher werden in dieser Arbeit die multilateralen Konformitätskriterien miteinander verknüpft, um das Gesamtsystem zu optimieren. So kann schon im Entwurfsprozess eine Priorisierung einzelner Anforderungen erfolgen und mit Hilfe von Kopplungsfaktoren lässt sich der Einfluss einzelner Kriterien auf die Funktionskonformität des Gesamtsystems beschreiben.

Mit dieser Erkenntnis lassen sich adaptive Strukturen mit einer erhöhten Funktionskonformität realisieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Inkermann, D.: Anwendung adaptiver Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Strukturen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Verlag Dr. Hut, München, 2017, ISBN 978-3-8439-2997-4.
- [2] Radespiel, R., Semaan, R.: SFB 880 – Fundamentals of high-lift for future commercial aircraft, Biennial Report, TU Braunschweig, 2013.
- [3] Sinapius, M.: Adaptronik, Springer, 2018, ISBN 978-3-662-55884-3.
- [4] Saaty, T. L.: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill International Book Co., New York, 1980, ISBN 978-0-070-54371-3.
- [5] Zimmermann, H.-J., Gutsche, L.: Multi-Criteria Analyse, Springer, 1991, ISBN 978-3-642-58198-4.
- [6] Golden, B. L., Wasil, E. A., Harker, P. T.: The Analytic Hierarchy Process, Springer, 1989, ISBN 978-3-642-50244-6.
- [7] Westphal, D.: Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme, Dissertation Technische Universität Berlin, 2016, <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/5937>.
- [8] VDI Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [9] Opitz, S.: Funktionskonforme Sensorintegration in hoch belasteten, adaptiven, umströmten Strukturen, Dissertation Universität Magdeburg, DLR-Forschungsbericht 2015-28, 2015.
- [10] Lilienthal, O.: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin, 1889.
- [11] Wright, O.: How we invented the airplane, Dover Publications, New York, 1988.
- [12] Haase, A., Campanile, L. F.: Design of compliant mechanisms with selective compliance, Smart Materials and Structures, vol. 19.3, 2009.
- [13] Grabietz, M.: Hauptbaugruppen eines Tragflügels, FAME-W, Airbus, 2005.

- [14] Campanile, L. F., Carli, V., Sachau, D.: Adaptive Wing Model for Wind Channel Tests, RTO AVT Symposium on Active Control Technology for Enhanced Performance Operational Capabilities of Military Aircraft, Land Vehicles and Sea Vehicles, Braunschweig, Deutschland, RTO MP-051, 2000.
- [15] Monner, H. P.: Erzielung einer optimierten Tragflügelverwölbung durch den Einsatz formvariabler Klappenstrukturen, Dissertation Technische Universität Braunschweig, DLR-Forschungsbericht 2000-30, 2000.
- [16] Amiryants et al.: Selectively deformable structures for design of adaptive wing smart elements as part of active aeroelastic wing concept, 27th International Congress of the Aeronautic Sciences, Nizza, Frankreich, 2010.
- [17] Wölcken, P. C., Papadopoulos, M.: Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU), Springer, 2016, ISBN 978-3-319-22413-8.
- [18] Hannig, A.: Static and fatigue transverse crack initiation in thin-ply fibre-reinforced composites, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, NFL, 2018, ISBN 978-3-928628-97-6
- [19] Kintscher, M.: Entwurfsmethode für formvariable Flügelvorderkanten, Dissertation Technische Universität Braunschweig, DLR-Forschungsbericht 2014-23, 2014.
- [20] DLR: Die Smart Droop Nose, https://www.dlr.de/media/desktopdefault.aspx/tabid-4985/8422_read-20647, Stand 03.07.2021.
- [21] FlexSys Inc., Homepage, <https://www.flexsys.com/flexfoillnternet>, Stand 03.07.2021.
- [22] Radespiel, R., Semaan, R.: Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft, Springer, 2021, ISBN 978-3-030-52429-6.
- [23] Beutel, T.: Mikrotechnische Sensorik für aktive Hochauftriebssysteme, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2013, <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201901241313-0>.
- [24] Schwerter, M.: Micro sensor systems for aeronautical application in harsh environment, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen, 2018, ISBN 978-3-8440-5948-9.
- [25] Huber, J. E., Fleck, N. A., Ashby, M. F.: The selection of mechanical actuators based on performance indices, Proceedings of The Royal Society A 453, pp. 2185-2205, 1997, <https://doi.org/10.1098/rspa.1997.0117>.
- [26] Kollenberg, W.: Technische Keramiken – Grundlagen – Werkstoffe – Verfahrenstechnik, Vulkan-Verlag, Essen, 2004.
- [27] Kamlah, M.: Zur Modellierung von nichtlinearen elektromechanischen Koppelphänomenen in Piezokeramiken, Bericht des Instituts für Mechanik, Universität Kassel, Kassel, 2000.

- [28] Ruschmeyer, K.: Piezokeramik – Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995.
- [29] Pertsch, P.: Das Großsignalverhalten elektromechanischer Festkörperaktoren, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, ISLE Steuerungstechnik und Leistungselektronik, 2003, ISBN 978-3-932633-81-2.
- [30] Wierach, P.: Entwicklung von Piezokompositen für adaptive Systeme, Dissertation Technische Universität Braunschweig, DLR-Forschungsbericht 2010-23, 2010.
- [31] PI Ceramic GmbH: Piezoelektrische Aktoren, https://www.piceramic.de/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/catalog_CAT/PI_Piezoelektrische_Aktoren_CAT128D.pdf, Stand 03.07.2021.
- [32] Jost, W., Hauffe, K.: Diffusion, Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt, 1972.
- [33] Pelleg, J.: Diffusion in Ceramics, Springer, 2016, ISBN 978-3-319-18437-1.
- [34] Thongrueng, J., Tsuchiya, T., Nagata, K.: Lifetime and Degradation Mechanism of Multilayer Ceramic Actuator, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 37, pp. 5306-5310, 1998.
- [35] Zhang, J., Pan, P., Jiang, P., Qin, J., Hu, J.: Electric degradation in PZT piezoelectric ceramics under a DC bias, De Gruyter, 2020, <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0049>.
- [36] Gall, M.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Lebensdauer von flächigen piezokeramischen Sensor-/Aktor-Modulen, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [37] Crawley, E. F., Anderson, E. H.: Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 1, pp. 4-25, 1990.
- [38] Park, C., Walz, C., Chopra, I.: Bending and torsion models of beams with induced strain actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 5, pp. 98-113, 1996.
- [39] DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung, Beuth, 2003.
- [40] Paul, S., Paul, R.: Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1: Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen. Springer-Verlag, 2014, ISBN 978-3-642-53948-0.
- [41] Abdulagatov, A. I.; et al.: Al₂O₃ and TiO₃ Atomic Layer Deposition on Copper for Water Corrosion Resistance, ACS Applied Materials & Interfaces, 3 (12), pp. 4593-4601, 2011.
- [42] Wikipedia: Sputtern, <https://de.wikipedia.org/wiki/Sputtern>, Stand 03.07.2021.

- [43] Quorum: Mini Sputter Coater and Glow Discharge System, <https://www.quorum-tech.com/wp-content/uploads/2020/10/SC7620-brochure.pdf>, Stand 03.07.2021.
- [44] DIN 2823:2017-07, Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Ermittlung des Einflusses der Auslagerung in feuchtem Klima auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften, Beuth, 2017.
- [45] Wikipedia: Atomlagenabscheidung, <https://de.wikipedia.org/wiki/Atomlagenabscheidung>, Stand 03.07.2021.

Anhang

A. Bestimmung der Eigenvektoren der Anforderungen aus Kapitel 2.3.1

Kopplungsmatrix der passiven Verformung unter Last

$$\begin{pmatrix} 1 & 0,111 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 0,111 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0,111 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0,111 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. A-1})$$

Eigenvektor der passiven Verformung unter Last

$$\begin{pmatrix} 0,076 \\ 0,697 \\ 0,076 \\ 0,076 \\ 0,076 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{array} \quad (\text{Gl. A-2})$$

Kopplungsmatrix der Dauerfestigkeit

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0,111 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0,111 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0,111 & 1 \\ 9 & 9 & 9 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 0,111 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. A-3})$$

Eigenvektor der Dauerfestigkeit

$$\begin{pmatrix} 0,076 \\ 0,076 \\ 0,076 \\ 0,697 \\ 0,076 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{array} \quad (\text{Gl. A-4})$$

Kopplungsmatrix Wasserdichtigkeit

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0,111 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0,111 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0,111 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0,111 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. A-5})$$

Eigenvektor Wasserdichtigkeit

$$\begin{pmatrix} 0,076 \\ 0,076 \\ 0,076 \\ 0,076 \\ 0,697 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{array} \quad (\text{Gl. A-6})$$

B. Bestimmung der Eigenvektoren der Anforderungen aus Kapitel 6.12An neuen Lastfall angepasste Kopplungsmatrix der Auslenkung

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0,333 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \\ 3 & 1 & 1 & 9 & 9 \\ 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \\ 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. B-1})$$

Neuer Eigenvektor der Auslenkung

$$\begin{pmatrix} 0,242 \\ 0,289 \\ 0,400 \\ 0,032 \\ 0,032 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{array} \quad (\text{Gl. B-2})$$

An neuen Lastfall angepasste Kopplungsmatrix der aktiven Verformung unter Last

$$\begin{pmatrix} 1 & 0,142 & 0,2 & 9 & 9 \\ 7 & 1 & 3 & 9 & 9 \\ 5 & 0,333 & 1 & 9 & 9 \\ 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \\ 0,111 & 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. B-3})$$

Neuer Eigenvektor der aktiven Verformung unter Last

$$\begin{pmatrix} 0,128 \\ 0,510 \\ 0,315 \\ 0,023 \\ 0,023 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Stellweg} \\ \text{Steifigkeit} \\ \text{Blockierkraft} \\ \text{Eigenfrequenz} \\ \text{Feuchtigkeitsaufnahme} \end{array} \quad (\text{Gl. B-4})$$

C. Vergleich der Auslagerungsversuche im Wasserbad bei 23 °C und bei 50 °C

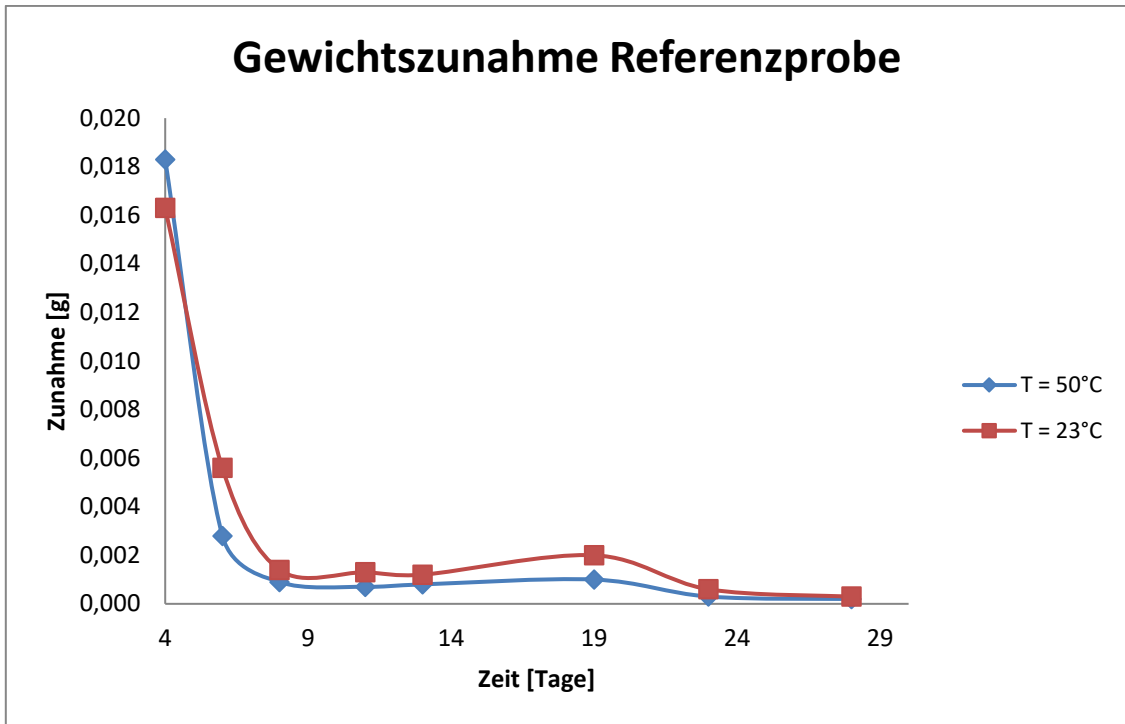


Abb. C-1: Gewichtszunahme der Referenzproben im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen

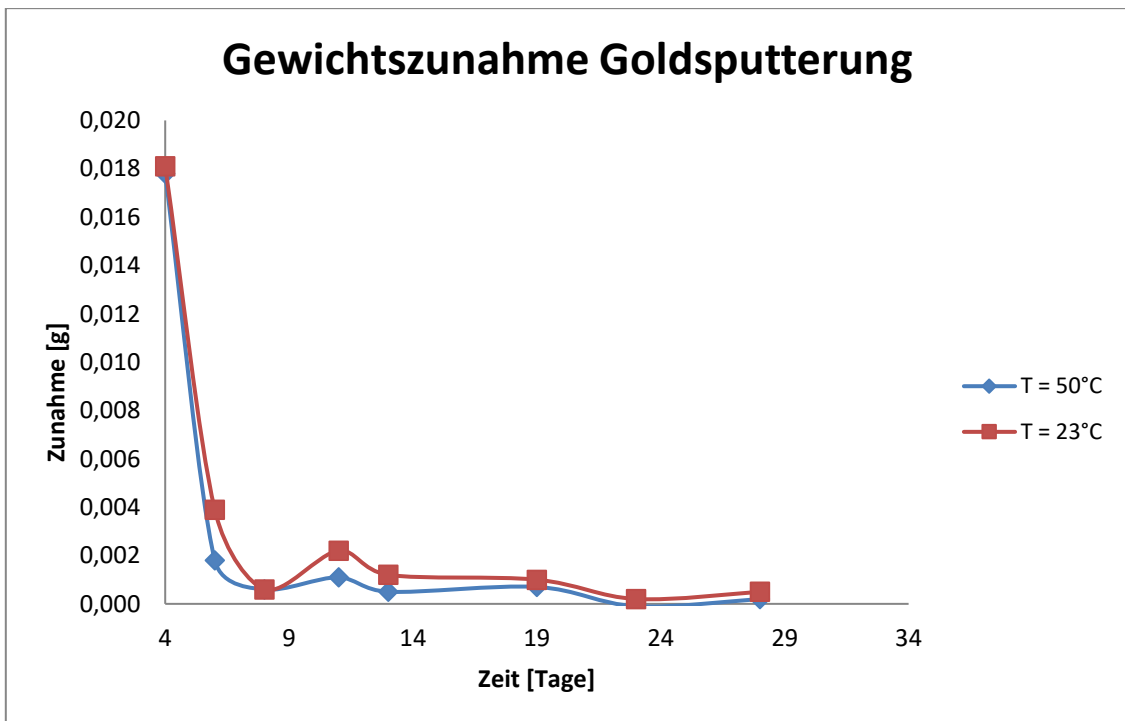


Abb. C-2: Gewichtszunahme der Proben mit Goldbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen

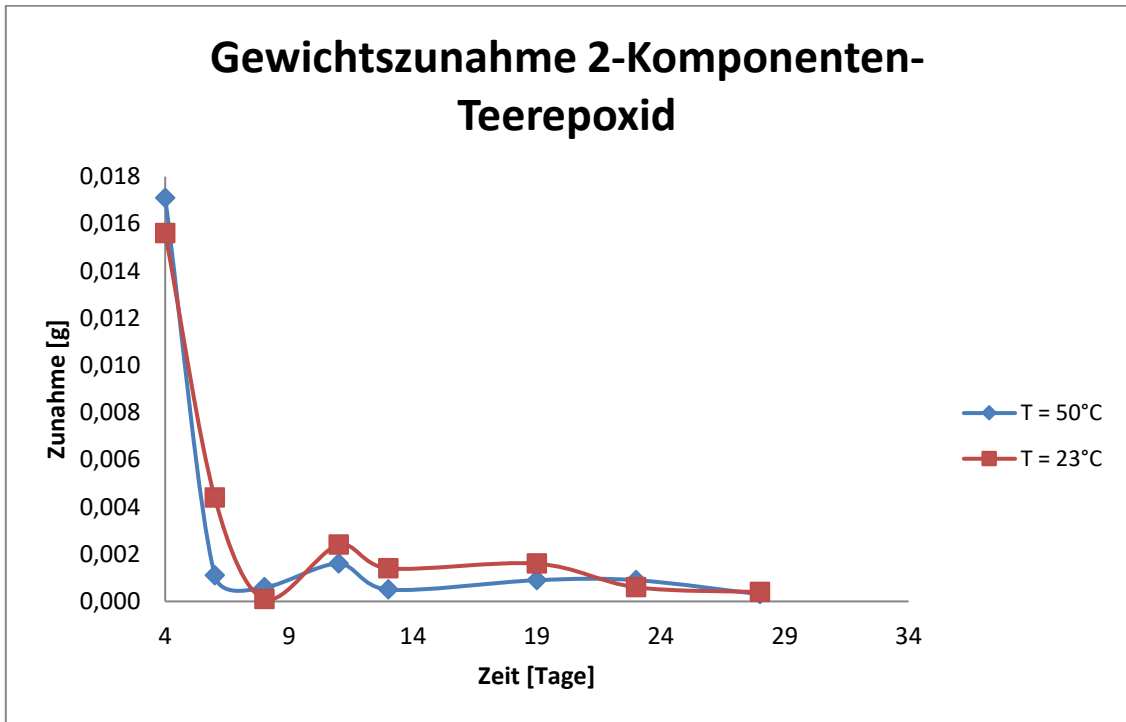


Abb. C-3: Gewichtszunahme der Proben mit Teerepoxidbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen

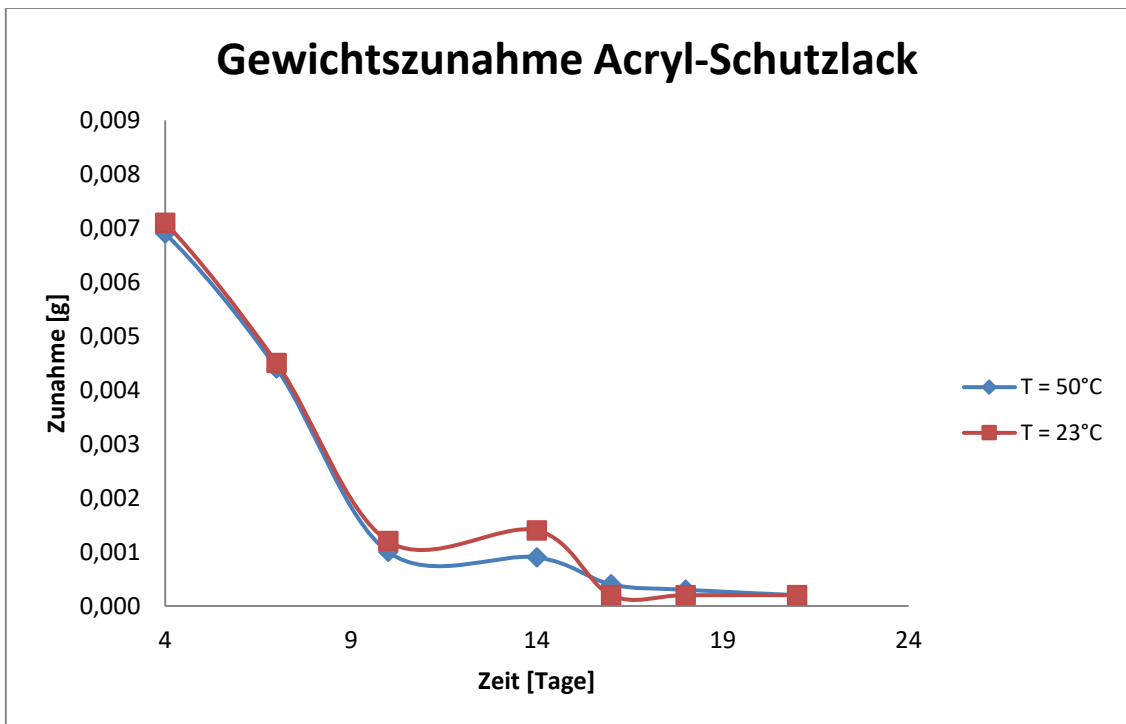


Abb. C-4: Gewichtszunahme der Proben mit Acryllackbeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen

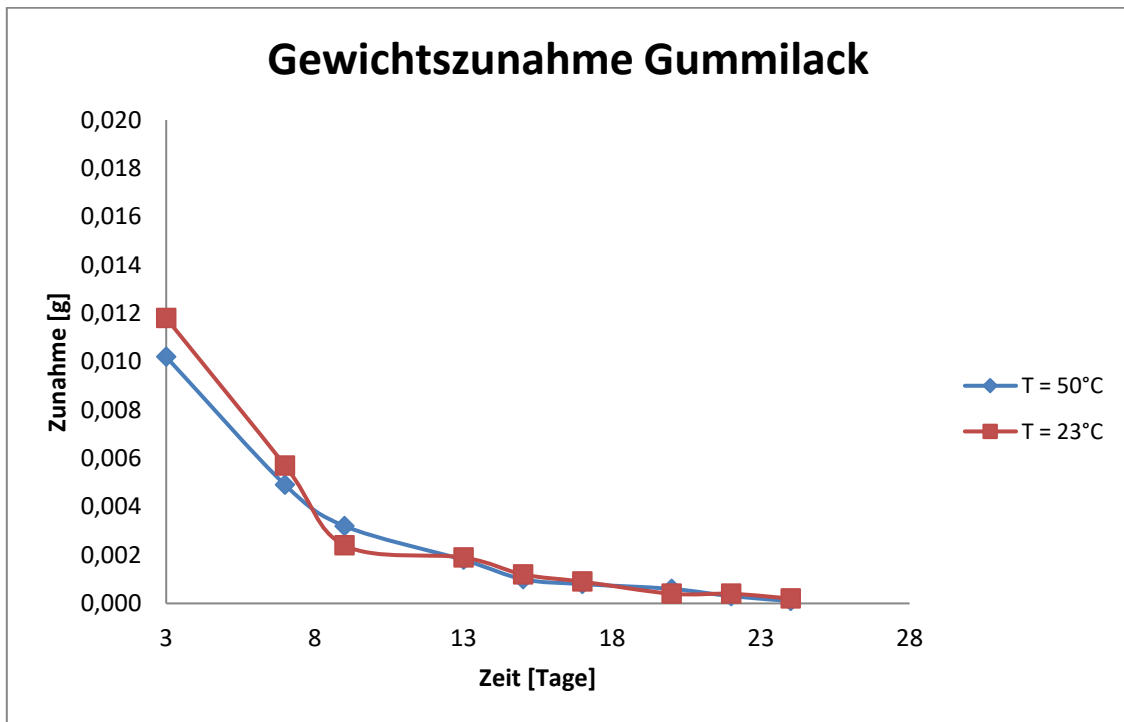


Abb. C-5: Gewichtszunahme der Proben mit Gummibeschichtung im Wasserbad bei unterschiedlichen Wassertemperaturen