

F 2801

Jürgen Ruth, Rainer Gump, Christian Heidenreich

Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme

F 2801

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8639-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Forschungsvorhaben
Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme

Forschungsergebnisse - Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft
Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-09.8/II 3 - F20-09-072)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



Projektpartner

Bauhaus-Universität Weimar:	Professur Tragwerkslehre Professur Entwerfen und Tragwerkskonstruktion
SKZ - Das Kunststoff-Zentrum	Kunststoff-Forschung und -Entwicklung gGmbH
Datum:	31. August 2011

Bearbeiter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth Prof. Dipl.-Ing. Rainer Gump Dipl.-Ing. Christian Heidenreich
--------------------	--

Vorwort und Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit entstand unter freundlicher Förderung durch Mittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung an der Professur Tragwerkslehre und der Professur Entwerfen und Tragwerkskonstruktion der Bauhaus-Universität Weimar zwischen 2009 und 2011.

Des Weiteren danken wir dem SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, als kommerzieller Partner des Forschungsprojektes. Unserer besonderer Dank gilt außerdem Herrn Prof. Grohmann und Herrn Thoralf Krause für die Teilnahme an den Arbeitsgruppentreffen und vielen interessanten fachlichen Gesprächen.

Wir danken unseren Kollegen der Professuren für die vielen intensiven Diskussionen. Weiterhin gilt unser Dank den am Forschungsprojekt beteiligten Studenten Herrn Alexander Hollberg und Herrn Martin Dembski.

Weimar, August 2011

Kurzfassung

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive System (AFAS)“ vorgestellt.

Der Ansatz im Forschungsprogramm AFAS bestand darin, die Effektivität von Faser-verbundwerkstoffen für Anwendungen im Bauwesen zu untersuchen und durch den Einsatz innovativer Techniken zu steigern. Hierzu wurden zunächst verschiedene Recherchen zur Ausbildung faserverstärkter Strukturen in der Natur durchgeführt und geeignete Übertragungen dieser Erkenntnisse auf das Bauwesen diskutiert. Auf diese Weise können die zu verwendenden Materialien entsprechend ihrer Eigenschaften optimal genutzt werden.

Des Weiteren werden die Kenntnisse der Luft- und Raumfahrtindustrie in der Anwendung aktiver Materialien und Steuertechnik vorgestellt und die Übertragbarkeit auf Anwendungen im Bauwesen diskutiert.

Um die zuvor erarbeiteten Grundlagen effektiv für Anwendungen im Bauwesen zu nutzen, besteht die Notwendigkeit verschiedene Softwareprodukte zu nutzen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS wurden geeignete Schnittstellen entwickelt, welche einen kontinuierlichen Datenaustausch zwischen diesen Programmsystemen ermöglichen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend an verschiedenen Verifikationsobjekten vorgestellt und die Möglichkeiten zusammengefasst.

Abstract

In the final report of the research project „Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive System (AFAS)“ are the main results presented.

The approach in the research program AFAS was to investigate the effectiveness of fiber composites for building applications and increase the use of innovative techniques. So, first, various research on fiber-reinforced structures training conducted in the nature of these findings and discuss appropriate transfers to the building industry. This allows the materials to be used according to their properties can be optimally used.

Furthermore, the knowledge of aviation industry in the application of active materials and control technology presented and discussed the applicability to civil engineering applications.

To the previously elaborated bases to use it effectively for building applications, there is a need to use different software products. As part of the research project AFAS appropriate interfaces have been developed that allow a continuous exchange of data between these systems.

The gained knowledge are finally presented to various objects of verification and summarizes the possibilities.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	17
1. AFAS - Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für adaptive Systeme	19
1.1. Das Forschungsvorhaben	19
2. Aufzeigen des derzeitigen Kenntnis- und Anwendungsstandes adaptiver technischer Systeme	21
2.1. Smart materials für adaptive Systeme	22
2.2. Aufzeigen von derzeitigen Anwendungen von adaptiver Systeme in der Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau	25
2.2.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken	25
2.2.2. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen	27
2.2.3. Anwendungsgebiete Optischer Fasern	28
2.3. Aufzeigen möglicher Einsatzgebiete aktiver Bauteile im Bauwesen	29
2.3.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken	31
2.3.2. Anwendungsgebiete Magnetorheologischer Fluide	36
2.3.3. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen	40
2.3.4. Anwendungsgebiete von Phasenwechselmaterialien	43
2.3.5. Anwendungsgebiete Optischer Fasern	45
2.4. Aufzeigen der Einsatzmöglichkeiten aktiver Bauteile im Bauwesen für spezielle Belastungen	48
2.4.1. Erdbeben	49
2.4.2. Begrenzung von Durchbiegungen und Schwingungen	50
3. Leichtbau und die Vorteile von Faserverbundstrukturen	59
3.1. Leichtbau	59
3.2. Biologische Faserverbundstrukturen	61
3.3. Aktuelle Entwicklungen und Konzepte im Automobilbau	66
3.4. Beispiele von FVK-Anwendungen im Bauwesen	66
3.4.1. Faserverbundbauteile als lineare Bauteile	67
3.4.2. Freiformschalentragwerke als Faserverbundstrukturen	70
3.4.3. Entwicklung im Fassadenbau - Faserverbundwerkstoffe und Wandelbarkeit	73
3.4.4. Freiformarchitektur ohne Schalungsaufwand	76
3.4.5. Kunststoff-Faltwerke	76
3.4.6. Modulare Bauweise - Vom vorgefertigten Einzelteil zum Bauwerk . .	81

3.5.	Vergleichende Betrachtung von Stahlbetonschalen - Berechnungsannahmen und Systembildung	82
3.5.1.	Betonschalen	82
3.5.2.	Betonrippenschalen	83
3.5.3.	Betongitterschalen	83
3.5.4.	Lastannahmen für Schalentragerwerke - Schneelasten	84
3.5.5.	Lastannahmen für Schalentragerwerke - Windlasten	84
3.5.6.	Tragverhalten von Schalentragerwerken - Formfindung und historische Entwicklung	85
3.5.7.	Tragverhalten	86
3.5.8.	Stabilität	86
3.5.9.	Imperfektionen	87
3.6.	Strukturoptimierung	88
3.6.1.	Topologieoptimierung	88
3.6.2.	Formoptimierung und -findung	89
3.6.3.	Materialoptimierung - Faserorientierung	90
4.	Innovative Planungswerkzeuge zur Generierung adaptiver Systeme	93
4.1.	Parametrik in Design und Berechnung	93
4.1.1.	Parametrisches Design	93
4.1.2.	Parameterbasierte statische und dynamische Berechnung	96
4.2.	Parametrische Design-, Berechnungs-, Optimierungs- und Steuerungssoftware — Werkzeuge	98
4.2.1.	Parametrische Designsoftware	100
4.2.2.	Parametrische Steuerungssoftware	102
4.2.3.	Parametrische Berechnungs- und Optimierungssoftware	103
4.2.4.	Simulation aktiver Prozesse mit Hilfe statisch-dynamischer Analyserwerkzeuge	109
4.3.	Zukunftsweisende Nutzung moderner Programmtechnik und notwendige Schnittstellen zur Entwicklung optimierter Faserverbundstrukturen	117
4.3.1.	Entwicklung von Schnittstellen — Auslegung und Optimierung von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen unter Berücksichtigung des Fasergehaltes und der Topologieoptimierung	117
5.	Erstellung von Anwendungshilfen — Identifikation geeigneter intelligenter Materialien für verschiedene Anwendungszwecke	123
5.1.	Definition von im Bauwesen einsetzbarer aktiver Werkstoffe	123
5.2.	Piezoelektrische Keramiken	126
5.2.1.	Bauarten und aktuelle Entwicklungen piezoelektrischer Aktoren	126
5.2.2.	Auswahl von Piezoaktoren	129
5.3.	Formgedächtnislegierungen	130
5.3.1.	Formgedächtnislegierungsarten	131
5.3.2.	Anwendungen von Formgedächtnislegierungen	136
5.4.	Magnetische Formgedächtnislegierungen	139

5.5. Anwendungshilfen	140
5.5.1. Auswahlmatrix Sensorik	141
5.5.2. Auswahlmatrix Aktorik	141
6. Demonstrationsobjekt	143
6.1. Vorüberlegungen	143
6.2. Relevante Entwurfskriterien	147
6.3. Schalenträgerwerke - rechnerische Voruntersuchungen	148
6.4. Demonstrationsobjekt - DO1	151
6.4.1. Definition der Geometrie- und Materialparameter	151
6.4.2. Lastfälle	152
6.4.3. Berechnungsergebnisse	152
6.4.4. Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse und Optimierung	161
6.4.5. Herstellung der Fuge - Zusatzintegrationsmöglichkeiten	162
6.5. Demonstrationsobjekt - DO2	171
6.6. Demonstrationsobjekt - DO3	174
7. Zusammenfassung und Ausblick	175
7.1. Zusammenfassung	175
7.2. Ausblick	176
Literatur	177
A. Projektzeitplan	185
B. Öffentlichkeitsarbeit	187

Abbildungsverzeichnis

2.1. Werkstoffpreise Preis/Masse [Deg09]	22
2.2. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für smart materials nach [Lag08a]	23
2.3. Auftrieb-Widerstandsbeziehung für verschiedene aerodynamische Profilformen [Bol00]	26
2.4. Aktive Flugzeugflügel [Rap03]	26
2.5. Adaptive Technologie im Automobilbau [Fraunhofer Allianz Adaptronik] . .	27
2.6. Active Sensing and Repair Composite (links) [Kir09] / Segelyacht beim Volvo Ocean Race 2009	28
2.7. Faser Bragg Gitter Sensor (links) [Rap03] / Nervensystem als Structural Health-Monitoring-System (rechts) [Bla]	28
2.8. Vibrationskontrolle in Fachwerkstruktur nach [Lag08a]	31
2.9. Schwingvorgänge an Schrägkabeln (links: quer zur Seilachse; rechts: in Seilachse) nach [SSL06]	32
2.10. Aktor zur Dämpfung von Schwingungen in Schrägkabelbrücken, Anordnung des Aktors in Seilachse nach [SSL06]	32
2.11. Blei-Zirkonat-Titan-Verbundwerkstoff nach [DL05]	33
2.12. In Beton integrierter Sensor und Aktuator mittels eingebetteter piezoelektrischer Keramikplatten nach [SSL06]	33
2.13. Aktive Fassade [TU-Darmstadt]	34
2.14. Sustainable Dance Floor, [www.idealize.nl]	35
2.15. Wirkungsweise des Sustainable Dance Floor, [Studio Roosegaarde]	35
2.16. Faserverbundstruktur mit Formgedächtnislegierungsstreifen [Evo10]	36
2.17. Faserverbundstruktur mit FGL-Streifen - Bewegungsvorgänge [Evo10] . . .	36
2.18. Schrägseil im Bereich der Verankerung mit Elastomerlager [WDN05]	37
2.19. MR-Dämpfer auf Eiland-Brücke mit Stromversorgung (links) [WDN05] / Dongting Lake Bridge China mit MR-Dämpfern (rechts) [DNK05]	37
2.20. Versuchsaufbau und Einbausituation der MR-Dämpfer senkrecht zur Seilachse (links) [WDN05] / Schematisches Funktionsprinzip eines MR-Dämpfers (rechts) [DNK05]	38
2.21. Beschleunigungsmesswerte mit und ohne aktive Kontrolle [DNK05]	39
2.22. Nihon-Kagaku-Miraikan Building in Tokyo (links) [Mor04] / V-förmige Verstrebung mit Hebelmechanismus (rechts) [Rit07]	39
2.23. Spannungs-Dehnungslinie der Tieftemperaturphase (links) und bei spannungsinduzierter Phasenumwandlung aus der Hochtemperaturphase (rechts) [JCMR05]	40

2.24. Formgedächtnislegierungs-Dämpfer für erdbebenertüchtigte Verbindung zwischen Haupttragwerk und Tympanon der Basilika San Francesco in Assisi [JCMR05]	41
2.25. Kirche San Giorgio / Formgedächtniselement im Bereich des Zugstabes [JCMR05]	41
2.26. Aktivierungszeiten für verschiedene Durchmesser [JCMR05]	42
2.27. PAUL Demonstrationspavillon [Rit07]	43
2.28. SmartWrap Ausstellungspavillon [Kieran Timberlake Association, Arch+ Material]	44
2.29. PAUL Demonstrationspavillon [Markus Holzbach, Werner Sobek, Arch+ Material]	44
2.30. Typischer Aufbau einer optischen Faser [Lau03]	45
2.31. Schematische Illustration der Dehnungsmessungen an der Beddington Trail Bridge mittels optischer Fasern [Lau03]	46
2.32. Einbau der optischen Fasern direkt im Betonbauteil durch Befestigung an der Bewehrung [Lau03]	46
2.33. Give Back Curtain [Kennedy + Violic Architecture, Arch+ Material]	47
2.34. Beschleunigungszeitverlauf Petrovac-Beben nach [MHBM07]	49
2.35. Arten von Erdbebenwellen nach [Bac02]	50
2.36. Spannungszeitverlauf für Lastzyklen nach [Wag05]	51
2.37. Durchbiegungsanteil - Holzbau nach [Ne08]	52
2.38. Fassadenstütze	53
2.39. Fassadendurchbiegung	53
2.40. akzeptierbare Schwingungsintensitäten [Bac96]	55
2.41. Schwingungen [Bac96]	55
2.42. Durch Personen verursachte Schwingungen bei Konzerten [Bac96]	56
2.43. Durch Personen verursachte Schwingungen bei Sportveranstaltungen [Bac96]	56
2.44. Sprungturm [Bac96]	57
2.45. Sprungturm für Wassersport [Bac96]	57
2.46. Monte Rosa Hütte [BA10] und [Asc10]	58
3.1. Verschiedene Versagensarten im Leichtbau [Deg09]	60
3.2. Plattenbeulen nach [Deg09]	60
3.3. Zellulosefaserverbund in der Holzzwellwand [Deg09]	62
3.4. Küstenmammutbaum [Deg09]	62
3.5. Röhren-Faserverbund eines Grasstängels und des Stachels eines Stachel-schweines [Deg09]	63
3.6. Menschlicher Knochen [Deg09]	63
3.7. Menschlicher Wirbelknochen - 17 Wochen nach Empfängnis, 5 Wochen und 8 Jahre nach Geburt [Deg09]	64
3.8. Hierarchische Struktur von Zugfasern [Jer00]	64
3.9. Chitinfasergewebe in Heuschrecken [Deg09]	65
3.10. BMW Megacity Vehicle [Grü11]	66

3.11. Strangpressprofile - [Strongwell.com]	67
3.12. Eyecatcher Swissbau - [www.umwelt-wand.de/newsletter/nl7-2/scobalit.jpg]	67
3.13. Pontresina - [www.daetwyler.ch/Technische-Komponenten.148.98.html] . . .	68
3.14. GFK-Brücke Kolding - [www.denmark.dk/en/menu/Business-Lounge/Focus-Denmark/Articles/FutureBridgesOfReinforcedPlastic.htm]	68
3.15. GFK-Brücke Schwerin - [de.structurae.de/photos/index.cfm?JS=25742] . .	68
3.16. GFK-Brücke Klipphausen Sachsen - [www.baulinks.de/webplugin/2004/i/1711-gfk2.jpg]	69
3.17. D-Tower - Nox Architekten, Foto: Henk Vlasblom	71
3.18. Busbahnhof Emsdetten ox2-Architekten, nach Gregor Brune in [FOM04] . .	71
3.19. Busbahnhof Emsdetten ox2-Architekten - Aufbau und Detail, nach Gregor Brune in [FOM04]	72
3.20. Busbahnhof Münchner Freiheit ox2-Architekten - [Arc10]	72
3.21. Busbahnhof Münchner Freiheit ox2-Architekten - Entwurf als GFK-Tragwerk [ox2-Architekten]	72
3.22. Kollagenfasern in [Dou09]	73
3.23. Iterative Modifizierung in [Dou09]	73
3.24. Iterative Modifizierung Detail in [Dou09]	74
3.25. Flectofin [®] - Biegsame Flächentragwerke, BMBF-Projekt [Sch11]	75
3.26. Kinetic Pavillon, Soeul, [SOMA Architekten und Knippers Helbig Ingenieure]	75
3.27. Adaptive Fassadenverschattungssystem [SL11]	75
3.28. Splinetex - frei formbare Faserverbundstrukturen, [www.splinetex.at]	76
3.29. Kunststofffaltwerk, [ES10]	76
3.30. Kunststofffaltwerk, [ES10]	77
3.31. Faltungen - verschiedene Faltungswinkel in [Tra09]	77
3.32. Faltungsarten in [Tra09]	78
3.33. gleichmäßige, regelmäßige und unregelmäßige Faltungen in [Tra09]	78
3.34. doppelagige Faltungen in [Tra09]	78
3.35. Fächerpalme in [Tra09]	79
3.36. Marienkäfer mit ausgebreiteten Flügeln in [Tra09]	79
3.37. Schildkröte in [Tra09]	80
3.38. Freiformkörper mit unterschiedlichen Oberflächenfaltungen in [Tra09] . . .	80
3.39. steckox — modulare Bar aus GFK-Fertigteilplatten, [KFA11]	81
3.40. Planetariumskuppel Zeisswerke Jena in [Sch05]	82
3.41. Palazzo dello Sport in [Dav10]	83
3.42. Breslauer Jahrhunderthalle in [Hoe10]	84
3.43. Schneelast nach ASI in [Zim06]	84
3.44. C_y und C_z für kuppelförmige Hallen in [Zim06]	85
3.45. Staudruck q_0 in [Zim06]	85
3.46. Strukturoptimierung nach Ramm [Lip07]	88
4.1. Multihalle Mannheim in [Men10]	95
4.2. Centre Pompidou Metz in [Men10]	95

4.3. Centre Pompidou Metz - Formentwicklung in [Sch10]	95
4.4. Evolutionary Process in Design Engineering, [BGT10d]	97
4.5. Sphäre Deutsche Bank Frankfurt in [BGT10c]	97
4.6. Evolutionäre Fußgängerbrücke Reden in [BGT10b]	98
4.7. Strömungssimulation, [HK10]	99
4.8. Strömungssimulation des studentischen Projekts „Wir bauen den Illuma- ten“ an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Tragwerkslehre und Entwerfen und Tragwerkskonstruktion, Sommersemester 2011	99
4.9. Simulation eines Materialsystems aus CFK/PVC, [HK10]	99
4.10. Grasshopper [®] - visuelle Programmieroberfläche	100
4.11. Galapagos - evolutionäre Algorithmen	101
4.12. Galapagos - evolutionäre Algorithmen	101
4.13. Firefly - Oberfläche, visuelles Programmier- und Mikroaktuatorenmodul für Grasshopper [®] , [JP11]	102
4.14. Arduino - Mikrocontroller, [JP11]	102
4.15. Kinetic Pavillon, [EB11]	103
4.16. Formfindung unter Nutzung von Rhino [®] /Grasshopper [®] und Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	105
4.17. Formfindung unter Nutzung von Rhino [®] /Grasshopper [®] und Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	105
4.18. Formfindung unter Nutzung von Rhino [®] /Grasshopper [®] und Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	106
4.19. Formfindung unter Nutzung von Rhino [®] /Grasshopper [®] und Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	106
4.20. Formfindung unter Nutzung von Rhino [®] /Grasshopper [®] und Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	107
4.21. Definition für die Datenschnittstelle Rhino [®] /Grasshopper [®] - Sofistik [®] , Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011	107
4.22. FE-Netz eines zu optimierenden Balkens	108
4.23. optimierter Balken unter gegebener Belastung	108
4.24. Piezoaktormodellierung in Ansys [®] , [New04]	109
4.25. Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen der Hersteller, [Ima99]	110
4.26. Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen gemäß Ansys [®] , [Ima99]	110
4.27. Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen gemäß Ansys [®] als Ma- trix, [Ima99]	110
4.28. Piezoaktormodellierung in Ansys [®] , [New04]	111
4.29. grafische Ergebnisauswertung, [Pig07]	111
4.30. Charakteristik von piezoelektrischen SOLID Finiten Elementen, [Ben00] . .	112
4.31. Charakteristik von piezoelektrischen SHELL Finiten Elementen, [Ben00] . .	113
4.32. Charakteristik von piezoelektrischen plattenartigen Finiten Elementen (elec- trical dof), [Ben00]	114
4.33. Charakteristik von piezoelektrischen plattenartigen Finiten Elementen (wi- thout electrical dof), [Ben00]	115

4.34. Charakteristik von piezoelektrischen Balken-Finiten Elementen (electrical dof), [Ben00]	115
4.35. Charakteristik von piezoelektrischen Balken-Finiten Elementen (without electrical dof), [Ben00]	116
4.36. Ausgangsstruktur - Formgebung über (parametrisches) CAD-Modell	118
4.37. formgefundene Struktur unter Eigengewicht	118
4.38. Hauptspannungen vektoriell dargestellt unter Nutzung der IFAS -Schnittstelle	119
4.39. IFAS -Schnittstelle zur Übertragung der FE-Ergebnisse aus Ansys [®] in Rhino [®] unter Nutzung von Grasshopper [®]	120
4.40. Topologieoptimierung vektoriell dargestellt unter Nutzung der IFAS -Schnittstelle	121
4.41. Topologieoptimierung als grafische Darstellung im FE-Programm Ansys [®] .	121
4.42. Workflow der Optimierung mit Ansys [®] und Sofistik [®]	122
5.1. Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Spannung und Dehnung [Lag08a]	123
5.2. Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Arbeitsfrequenz und Arbeitsdichte [SP04]	124
5.3. Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Spannung und Dehnung [Lag08a]	124
5.4. Piezoelektrische und inverser Piezoelektrischer Effekt in [AW04]	126
5.5. Prinzipieller Aufbau eines Stapelaktors in [AW04]	127
5.6. Prinzipieller Aufbau eines Biegeaktors in [AW04]	127
5.7. Prinzipieller Aufbau eines Tubusaktors in [AW04]	128
5.8. Wirkungsweise der Piezowaben [Mel09]	128
5.9. Piezoaktorenübersicht nach [Bas00]	130
5.10. FGL - Öffnungsmechanismus in [Gla11]	138
5.11. Maximale Schaltfrequenzen und Dehnungen gängiger Aktormaterialien [CW03] in [Thi05]	139
5.12. Auswahlmatrix Sensorik in SMARTchoice	141
5.13. Auswahlmatrix Aktorik in SMARTchoice	141
5.14. Funktionsmaterialien - Auswahlmatrix, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08b]	142
5.15. Funktionsmaterialien - Auswahlmatrix, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08b]	142
6.1. Screenhaus.Solar [RG10]	144
6.2. Ökologischer Rucksack [RG10]	144
6.3. Ökologischer Rucksack [RG10]	145
6.4. Screenhaus.Solar im Schnee [RG10]	145
6.5. Formgedächtnislegierungen Kostenübersicht [JCMR05]	146
6.6. Pavillon Schwerin - ox2-Architekten, nach Daniel Trappen in [FOM03] . . .	148
6.7. Renzo Piano Salzhalle; 1966 - [www.kunststoffbauten.de/img/small_salzhalle-piano1966.jpg]	149
6.8. Naturtheater Grötzingen - Formfindung im virtuellen Raum	149
6.9. Naturtheater Grötzingen - Spannungsverlauf	149
6.10. Naturtheater Grötzingen - Öffnungen	150

6.11. Naturtheater Grötzingen - Öffnungen und Spannungsverlauf	150
6.12. Demonstrationsobjekt DO1 — bogenförmiges Fugenbauteil	151
6.13. DO1 — Darstellung des Lastfall Eigengewicht	152
6.14. DO1 — Darstellung System und Verformung unter Eigengewicht	153
6.15. DO1 — Darstellung 1. und 2. Eigenfrequenz	153
6.16. DO1 — Darstellung 3. und 4. Eigenfrequenz	153
6.17. DO1 — Darstellung des Formfindungsprozesses durch entgegenwirkendes Eigengewicht	154
6.18. DO1 — System vor und nach der Formfindung	154
6.19. DO1 — Windanalyse des Demonstrationsobjektes	155
6.20. DO1 — Windanalyse - Staudruck	156
6.21. DO1 — Windanalyse - Strömungslinien	156
6.22. DO1 — Windanalyse - Druckanalyse	157
6.23. DO1 — Windanalyse Zeitschritt 1 + 2	157
6.24. DO1 — Windanalyse Zeitschritt 3 + 4	157
6.25. DO1 — Windanalyse Zeitschritt 5 + 21	157
6.26. DO1 — Windanalyse - dynamischer Staudruck, knotenbezogen	158
6.27. DO1 — Windanalyse - dynamischer Staudruck, Knoten 63	158
6.28. DO1 — Windbelastung	159
6.29. DO1 — Spannungsverteilung infolge Windbelastung	159
6.30. DO1 — optimierte Strukturteile infolge Windbelastung, gelb eingefärbt . .	159
6.31. DO1 — Hauptspannungen vektoriell dargestellt unter Nutzung der IFAS - Schnittstelle	161
6.32. DO1 — Topologieoptimierung vektoriell dargestellt unter Nutzung der IFAS - Schnittstelle — Topologieoptimierung als grafische Darstellung im FE-Programm Ansys	162
6.33. DO1 — Herstellungsmöglichkeit	163
6.34. Schalenstruktur unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperatúraus- dehnungskoeffizienten	165
6.35. Schalenstruktur unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperatúraus- dehnungskoeffizienten - Verformungen	165
6.36. DO1 — Öffnungsmechanismen durch Nutzung Holz-PVC-Kunststoffverbund	166
6.37. Holz-Kunststoff-Versuch - Buche radiale Faserausrichtung mit Plexiglasplatte	167
6.38. Holz-Kunststoff-Versuch - Buche Faserausrichtung längs mit Plexiglasplatte	168
6.39. Holz-Kunststoff-Versuch - MDF mit Plexiglasplatte	169
6.40. aktives Piezo-GFK-Element	170
6.41. aktives Piezo-GFK-Element - Darstellung der Verformung	170
6.42. DO2 — Freiformschale	171
6.43. DO2 — Belastung	172
6.44. DO2 — Hauptspannungen und Topologieoptimierung	172
6.45. DO2 — Struktur nach Re-Import	172
6.46. DO2 — Hauptspannungen und Topologieoptimierung nach Re-Import	173
6.47. DO3 — FVK - Würfel - Verstärkungszonen	174

6.48. DO3 — FVK - Würfel - konstruktive Randbedingungen	174
2.1. Flyer Forschungsforum der Forschungsinitiative Zukunft Bau auf der DEU- BAU in Essen	187
2.2. AFAS-Plakat	188
2.3. AFAS Flyer	188

1. AFAS - Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für adaptive Systeme

1.1. Das Forschungsvorhaben

Im Bauwesen werden 50 % des weltweiten Energieverbrauches und ein Großteil der weltweiten Rohstoffvorkommen eingesetzt. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung von ressourcenschonenden und energieeffizienten Bauweisen, Materialien und Technologien dringend notwendig. Einen möglichen Ansatz stellt die Leichtbauweise mit entsprechenden Leichtbaumaterialien, wie z. B. hochfesten Stählen und faserverstärkten Kunststoffen (FVK) dar. FVK's werden seit den 1950er Jahren im Bauwesen eingesetzt. Die Produktion entsprechender Profile ist aufgrund des Strangziehverfahrens (Pultrusionsverfahren) als Großserienproduktion möglich. Des Weiteren ermöglicht die Herstellung von FVK aus Fasern und entsprechendem Matrixmaterial eine genaue Anpassung des Materials und Profils an die Einflussfaktoren. Durch die gezielte Anpassung von Materialien und Strukturen an den Kraftverlauf lassen sich materialoptimierte Systeme erstellen. Der Einsatz von Leichtbaumaterialien ist im Hinblick auf das geringe Gewicht und Dämpfungsvermögen jedoch kritisch zu betrachten. Zu typischen Problemen zählen u. a. die Schwingungsanfälligkeit und große Verformungen infolge dynamischer Belastungen, wie Wind, Erdbeben oder Fußgängerverkehr. Ebenso stellt das hohe Kriechvermögen eine Herausforderung an die konstruktive Ausbildung derartiger Profile dar.

Durch die Nutzung der vorteilhaften Eigenschaften des Leichtbaus unter Zuhilfenahme von innovativen Techniken können die derzeitigen Einsatzgrenzen aufgehoben werden. Einen derartigen Ansatz stellt die Integration von aktiven Systemen in faserverstärkte Kunststoffe dar. Hierbei werden die Vorteile der FVK genutzt und durch einweben, bzw. einlaminiert aktiver Fasern adaptive, selbstregelnde Systeme erzeugt. Auf diese Weise können die Material- und Systemeigenschaften individuell an die jeweilige Belastungs- und Umgebungssituation angepasst werden. Durch die Entwicklung aktiver Systeme lässt sich der Materialverbrauch gegenüber passiven Systemen senken. Im Rahmen der Bewertung ist neben den passiven Materialien auch der Einfluss der aktiven Materialien zu berücksichtigen. Diese Überprüfung ist nur über eine ganzheitliche Energie- und Volumenbilanz möglich. Derzeit sind Gebäude jeder Belastung passiv ausgesetzt. Damit die Gebäude mit ihrem passiven Verhalten alle diese Belastungen abtragen können, sind die einzelnen Bauteile entsprechend stark zu dimensionieren, z. T. sogar überdimensioniert auszubilden. Durch die Ausbildung aktiver, adaptiver Systeme lassen sich schlankere Querschnitte erzeugen,

welche nur bei Auftreten einer bestimmten Belastung (Wind, Erdbeben, Schwingungen von Brücken) die Steifigkeit simultan zur Belastung anpassen. Die Einführung von aktiven Systemen stellt in erster Annahme einen ungewöhnlichen Ansatz dar, wurde aber im Automobilbau konsequent durchgeführt. Selbstverständlich müssen in diesem Zusammenhang auch die Sicherheitsaspekte bei Versagen des aktiven Systems diskutiert werden. Hierbei ist über die Einführung redundanter Systeme nachzudenken.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, dass die Kriterien der Tragfähigkeit nicht adaptiv gesteuert werden, sondern allein die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit beeinflusst werden. Insofern ist die Tragfähigkeit des Bauwerks rein passiv gegeben. Durch die gleichzeitige Verwendung von aktiven Formgedächtnislegierungen zur aktiven Beeinflussung der Steifigkeiten im Bauwerk und dem Einbau von Piezoelementen können eventuelle Schäden im Bauwerk direkt registriert werden. Die Materialforschung hat in den letzten Jahren verschiedene intelligente (smarte) Materialien hervorgebracht. Hierzu zählen unter anderem Piezokeramiken und -fasern ebenso wie Formgedächtnislegierungen und Formgedächtniskunststoffe.

Für die Anwendung im Bauwesen ist jedoch eine auf den jeweiligen Anwendungszweck bezogene Kombination dieser smart materials mit geeigneten Faserverbundwerkstoffen notwendig. Zu den verschiedenen Anwendungsgebieten zählen der Schwingungsschutz von Hochhäusern und adaptiven Schalenträgwerken. Hierbei werden aufgrund unterschiedlicher dynamischer Belastungen auch unterschiedliche Materialeigenschaften erforderlich. Die Anwendbarkeit aktiver Faser-Verbundwerkstoffe in adaptiven Systemen werden an verschiedenen Verifikationsmodellen numerisch untersucht. Zu den Verifikationsobjekten zählen unter anderem Bogen-, wie auch Schalenträgwerke.

2. Aufzeigen des derzeitigen Kenntnis- und Anwendungsstandes adaptiver technischer Systeme

Zunächst wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens smart materials, ihre Anwendungen und Eigenschaften recherchiert realisierte adaptive Systeme in der Luft- und Raumfahrt, dem Maschinenbau und dem Bauwesen untersucht.

Die Anwendungsbreite und -anzahl adaptiver Systeme ist in den einzelnen Ingenieurdisziplinen sehr unterschiedlich. Dies ist vor allem dem Verhältnis von Werkstoffpreis zu Bauteilmasse geschuldet, vgl. Abbildung 2.1.

Da in der Luft- und Raumfahrt eine sehr geringe Abnahmemenge zu verzeichnen ist, ist der Kostendruck pro Einzelbauteil sehr hoch. Vor diesem Hintergrund ist auch die Entwicklung des Leichtbaus zu erklären. Vor allem in der Luft- und Raumfahrt werden immer leichtere Materialien (Materialleichtbau) und filigranere Strukturen (Strukturleichtbau) entwickelt und eingesetzt. Somit kann die Luft- und Raumfahrt als Vorreiter im Bereich Leichtbau bezeichnet werden. Da aber auch im Bauwesen immer häufiger leichte, filigrane und materialsparende Bauweisen bevorzugt werden, treten auch hier die gleichen Phänomene und Probleme auf. Mit Hilfe eines Technologietransfers können auch andere Ingenieurdisziplinen von den schon gewonnenen Erkenntnissen profitieren.

Neben der für den Leichtbau notwendigen genauen Strukturanalyse werden herkömmliche Baustoffe wie Beton und Stahl zu hochfesten Betonen und hochfesten Stählen weiterentwickelt. Auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaften werden neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung herkömmlicher Werkstoffe auch neuartige aktive und anpassungsfähige Werkstoffe erforscht.

Diese Werkstoffe werden in verschiedenen Veröffentlichungen als „smart“ bzw. „intelligent“ bezeichnet. Eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten ist nicht definiert. Smarte Werkstoffe reagieren entsprechend vorgegebener Szenarien auf Einwirkungen und „erinnern“ sich welche Reaktion hierbei auszuführen ist. Intelligente Werkstoffe suggerieren demgegenüber einen höheren Grad an Eigenkontrolle. So müssen intelligente Werkstoffe in der Lage sein die äußere Einwirkung zu registrieren, die bestmögliche Reaktion zu erarbeiten und entsprechend eigenständig zu handeln, vgl. [AS05]. Sie interagieren mit der Umwelt autonom. Aufgrund der anpassbaren Materialeigenschaften eignen sich sowohl smarte wie auch intelligente Werkstoffe zur Integration in Funktionswerkstoffen und ermöglichen somit den Einsatz in adaptiven Systemen, vgl. [Teu04].

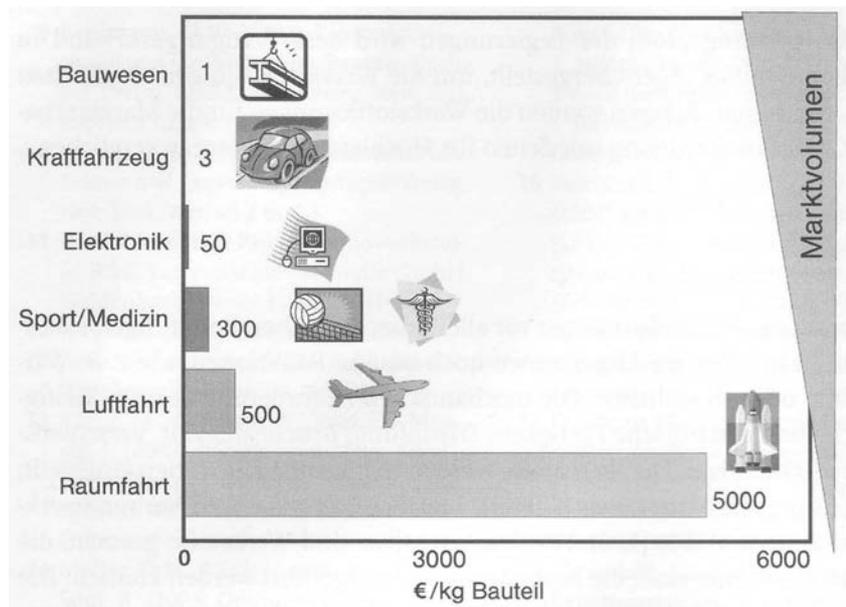


Abbildung 2.1.: Werkstoffpreise Preis/Masse [Deg09]

2.1. Smart materials für adaptive Systeme

Die Wandlungsfähigkeit der Materialeigenschaften bei smart materials ist sehr vielseitig. Für verschiedene smart materials sind in Abbildung 2.2 die erzielbaren mechanischen Spannungen und Dehnungen, also die realisierbare Energiedichte, gegenübergestellt. Nachfolgend werden häufig angewandte smarte Materialien und ihre Eigenschaften näher erläutert.

Piezokeramiken

Piezokeramiken sind piezoelektrische Werkstoffe, welche unter äußerer mechanischer Beanspruchung ein elektrisches Feld aufbauen. Der piezoelektrische Effekt wurde erstmals 1880 von Pierre und Jaques Curie entdeckt. Dieser Effekt ist unter Anlegen eines elektrischen Feldes umkehrbar und kann Dehnungen und bei deren Behinderung auch Kräfte erzeugen. Die erzielbaren Dehnungen liegen bei ca. 0,1%. Durch die Kopplung mehrerer piezokeramischer Schichten in Form von Stapelaktuatoren sind Längenänderungen bis ca. 0,1 mm erzielbar, vgl. [Köh00]. Die Reaktionszeit ist mit > 10 Hz im Vergleich zu anderen Funktionswerkstoffe sehr hoch, vgl. [GWK00] und kann somit für schnell auftretende Belastungen eingesetzt werden. Piezokeramiken können Druckbelastungen bis ca. $50 \frac{N}{mm^2}$ und Zugbelastungen bis ca. $25 \frac{N}{mm^2}$ übertragen und eignen sich somit als lastabtragende Bauteile, vgl. [Bas00]. Der bekannteste piezokeramische Werkstoff ist Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Es wird in Form von Platten-, Faser-, Stapelaktuatoren und als Piezokeramische Reibungsdämpfer hergestellt.

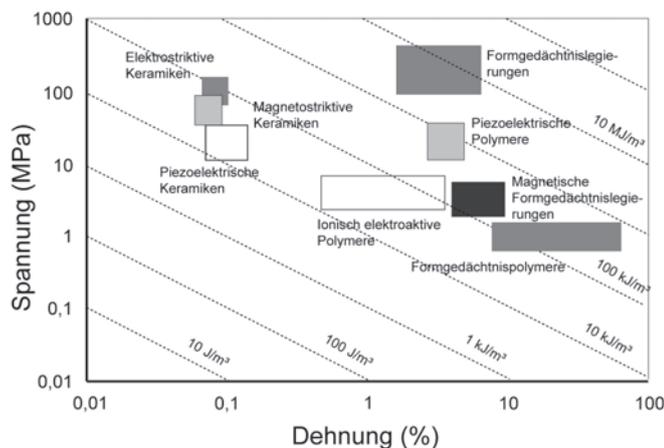


Abbildung 2.2.: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für smart materials nach [Lag08a]

Rheologische Fluide (ER / MR)

Rheologische Fluide sind sowohl als elektrorheologische und magnetorheologische Fluide bekannt. Beide Flüssigkeiten verändern ihre Viskosität durch Anlegen eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Sowohl elektro- als auch magnetorheologische Fluide bestehen grundlegend aus einer Trägerflüssigkeit (z.B. Öl), Wasser und polarisierbaren Teilchen, wie z.B. Eisen-Nickel-Legierungen (suspendierte ferromagnetische Teilchen) bei MR-Fluiden und z.B. Aluminiumsilikat (hochpolarisierbare Feststoffteilchen) bei ER-Fluiden. Rheologische Fluide haben Aktivierungszeiten von wenigen Millisekunden und können sowohl als Aktor als auch als Sensor genutzt werden, da die Vorgänge stufenlos reversibel sind, vgl. [Rit07]. Magnetorheologische Fluide sind in Bezug auf ihre Marktreife aufgrund einfacherer Herstellungsverfahren gegenüber elektrorheologischen Fluiden weiter verbreitet, ebenso ist die Viskositätsänderung bei MR-Fluiden um das 20 - 50-fach stärker ausgeprägt, vgl. [Köh00].

Formgedächtnislegierungen (FGL) - mechanisch oder thermisch aktivierbar

FGL können in Abhängigkeit von Temperatur oder mechanischer Spannung ihre Form und Steifigkeit reversibel ändern, Diese Fähigkeit beruht auf einem Umbau der metallischen Gitterstruktur. Die Transformationen zwischen beiden Phasen sind unter bestimmten Voraussetzungen reversibel bis zu hohen Zyklenzahlen. FGL können dabei Dehnungen bis zu 8% realisieren. Die theoretische Verformungsgeschwindigkeit ist mit < 1 Hz relativ gering und somit der Einsatz nur bei geringer Beanspruchungsfrequenz sinnvoll. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Formänderung welche als Einweg-, Zweiwegeeffekt und Pseudoelastizität bezeichnet werden. Mittels Temperaturänderung kann beim Einwegeffekt ein FGL-Element einmalig bei überschreiten der Aktivierungstemperatur eine Formänderung vollführen. In dieser Form verbleibt das Bauteil auch bei erneutem Abkühlen. Wird die Formänderung verhindert, so entsteht eine Zwangsspannung die mechanisch nutzbar gemacht werden kann. Der aktiv wiederholbare Zweiwegeeffekt hingegen, charakterisiert die reversible Verformung eines FGL-Elementes ohne mechanische Einwirkung beim Über-

bzw. Unterscheiden der Aktivierungs- bzw. Deaktivierungs-temperatur.

Einige Formgedächtnislegierungen weisen in der Hochtemperaturphase das Phänomen des passiven mechanischen Formgedächtnisses (Pseudoelastizität) auf. Hierbei geht der Werkstoff nach einem Belastungsvorgang mit spannungsinduzierter Phasenumwandlung, und damit verbundenen großen nichtlinearen Dehnungen, vollständig oder teilweise in den Ursprungszustand zurück. Dabei wird eine Hysterese mit dissipativen Vorgängen durchlaufen. Bekannte FGL-Legierungen basieren auf den Systemen: Nickel-Titan, Kupfer-Zink und Eisen-Mangan-Silizium. Eine ausführliche Beschreibung kann [JCMR05] entnommen werden.

Magnetische-Formgedächtnis-Legierungen (MFG) - magnetisch aktivierbar

Bei einigen Formgedächtnislegierungen wurde festgestellt, dass eine reversible Änderung der Mikrostruktur und somit der Form bei Anlegen eines Magnetfeldes auftritt, vgl. [SP04]. Diese Materialklasse wurde Magnetische Formgedächtnis-Legierungen genannt. Die dabei erzielbaren Dehnungen von bis zu 10 % Dehnweg überschreiten z.B. piezoelektrische Werkstoffe um Größenordnungen. Die realisierbaren Reaktionszeiten von bis zu 800 Hz übertreffen FGL bei weitem. Es können mechanische Spannungen bis ca. $10 \frac{N}{mm^2}$ erreicht werden. Magnetische Formgedächtnislegierungen können sowohl als Aktor und aufgrund des inversen Effekts als Sensor eingesetzt werden. Häufige Werkstoffkombinationen basieren auf Ni-Mn-Ga-Legierungen.

Phasenwechselmaterialien (PCM)

Als Phasenwechselmaterialien werden Materialien bezeichnet deren latente Schmelzwärme ein vielfaches größer ist als die Wärme, die das Material aufgrund seiner normalen spezifischen Wärmekapazität, also ohne den Phasenumwandlungseffekt, speichern kann. Sehr häufige Anwendungen der Phasenwechselmaterialien (Latentwärmespeicher) ist in Handwärmekissen, Kühlakkus und mit Paraffin gefüllten Speicherelementen für solarthermische Anlagen.

Optische Fasern

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen eigenschaftsveränderlichen Werkstoffen ändern Faser-optische Systeme ihre Eigenschaften nicht. Dennoch ist ihre Entwicklung und Anwendung im Zusammenhang mit Funktionswerkstoffen sehr wichtig. Mit Hilfe von optischen Fasern lassen sich sehr effiziente Messsysteme zur Echt-Zeit-Messung verschiedener Materialeigenschaften, Deformationen, Temperaturen und Zustandsanalysen umsetzen. Für Faser-optische Systeme werden Lichtleitkabel, häufig Glasfaserkabel, verwendet, welche seit langer Zeit aus dem Bereich der Telekommunikation bekannt sind. Durch die Kombination aus Lichtquelle und entsprechenden Messsensoren (Photodetektoren) am Ende des Kabels können Laufzeitunterschiede und evtl. nicht weitergeleitete Lichtspektren registriert werden und hieraus Rückschlüsse auf eventuelle Schädigungen bzw. Zustandsänderungen gezogen werden, vgl. [Lau03].

2.2. Aufzeigen von derzeitigen Anwendungen von adaptiver Systeme in der Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau

Flugzeuge und Raumschiffe sind auf Grund ständig ändernder Klima- und Belastungssituationen höchsten Ansprüchen ausgesetzt. So müssen derartige Strukturen zwischen dem Start und dem Flug in der geplanten Reishöhe sehr großen Temperaturunterschieden standhalten. Ebenso sind sie aufgrund stark dynamischer Einwirkungen Schwingungen ausgesetzt.

Im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden daher seit vielen Jahrzehnten Systeme und Materialien entwickelt welche diesen Belastungen widerstehen können und eventuelle Schädigungen rechtzeitig registrieren. Im nachfolgenden werden einige exemplarische Anwendungen aus den Bereichen aktiver Strukturbeeinflussung und Strukturanalyse aufgezeigt.

2.2.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken

Aktive Steuerung von Flugzeugtragflügeln

Flugzeugtragflügel sind für die Aerodynamik von Flugzeugen essentiell, wobei die optimale Form eines Tragflügels aufgrund des Verhältnisses von Auftrieb zu Widerstand in den verschiedenen Flugzustandssituationen sehr unterschiedlich sind, siehe Abbildung 2.3. So sind bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten starke Krümmung, großer Radius der Flügelvorderkante und große Profilhöhe günstig. Demgegenüber sind bei hohen Geschwindigkeiten gegenteilige Profilabmessungen von Vorteil. Die derzeitig eingesetzten starren Flügel bieten nur einen Kompromiss zwischen Auftrieb und Widerstand. Sofern aber optimal anpassbare Flugzeugtragflügel eingesetzt werden, so kann der Treibstoffverbrauch signifikant gesenkt und das mögliche Transportgewicht erhöht werden, vgl. [Rap03]. Zur aktiven Steuerung der Flügelform werden „Aktive Flügel“ mit integrierten Biegeaktuatoren vorgeschlagen. Hierbei können unter anderem piezokeramische Werkstoffe in die Flügelstruktur integriert werden und entsprechend vorgegebener Situationen die Flügelform anpassen, vgl. Abbildung 2.4.

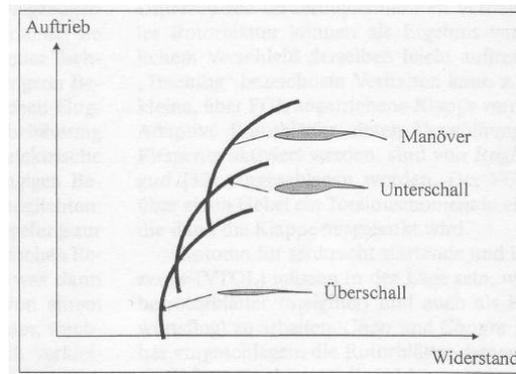


Abbildung 2.3.: Auftrieb-Widerstandsbeziehung für verschiedene aerodynamische Profilformen [Bol00]

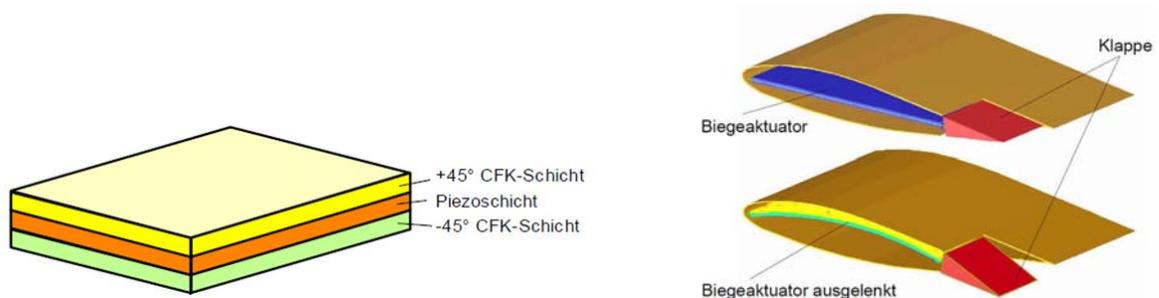


Abbildung 2.4.: Aktive Flugzeugflügel [Rap03]

Vibrations- und Lärmreduzierung im Automobilbau

Der Automobilbau sieht sich wie der Flugzeugbau vor ähnlichen Problemfeldern. Fahrzeuge müssen möglichst leicht sein um Kraftstoff einzusparen und dennoch dem Nutzeranspruch hinsichtlich Komfort entsprechen. Durch diese Materialminimierung treten jedoch verschiedene Phänomene auf. Leichte Fahrzeugbleche zum Beispiel im Bereich der Türen oder des Daches neigen aufgrund des geringen Gewichtes und der geringen Steifigkeit zum Schwingen. Durch diese Schwingungen werden unter anderem störende Schallwellen und akustische Beeinträchtigung ausgelöst. Diesem Phänomen wird auf konventionellem Wege mit Materialanlagerung bzw. verstärkten Dämmmaßnahmen entsprochen, welche jedoch zu einer nicht gewollten Gewichtssteigerung führen.

Um dem Wunsch der Materialminimierung und gleichzeitigen Tilgung der ungewünschten Schwingungen gerecht zu werden, können im Automobilbau innovative aktive Maßnahmen genutzt werden. Im Bereich eines leichten Blechdaches können beispielsweise aktive piezokeramische Schwingungstilger in Form von applizierten Bauteilen genutzt werden, vgl. Abbildung 2.5. Auf diese Weise sind sehr leichte und dennoch schwingungsresistente Fahrzeugstrukturen möglich.

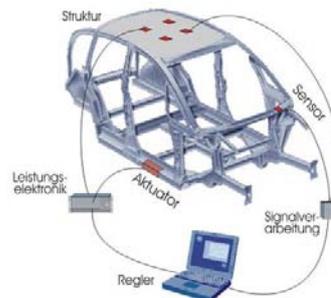


Abbildung 2.5.: Adaptive Technologie im Automobilbau [Fraunhofer Allianz Adaptronik]

2.2.2. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen

Self Healing im Yachtbau

Im Yachtbau wie auch in der Luft- und Raumfahrt werden aufgrund beliebig anpassbarer Formbarkeit und individuell einstellbarer Materialeigenschaften heutzutage Faserverbundwerkstoffe angewendet. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ein sehr hohes Zugfestigkeit - Gewichtsverhältnis aus. Bei Flugzeugen und Schiffen sind aufgrund ihres Einsatzgebietes fern ab von „festem Boden“ hinsichtlich möglicher Schäden spezielle Vorkehrungen zu treffen. So wurden unter anderem „selbstheilende Materialien“ entwickelt, wobei es sich um Faserverbundwerkstoffe mit integrierten Polymeren handelt. Diese Polymere werden schon bei der Herstellung in die Struktur eingebettet. Sofern keine Schädigung im Materialverbund auftritt verbleiben diese Polymere in ihrem Urzustand. Tritt jedoch ein Schaden im Verbund auf, so tritt das Polymer aus und verbindet (verklebt) die Schadensstelle selbsttätig. Auf diese Weise kann auch in Flugzuständen eine Reduzierung der

Schadensauswirkung erzielt werden. Um die Wirkung der „selbstheilenden Materialien“ zu verstärken gibt es die Möglichkeit Formgedächtnisfasern in den Materialverbund zu integrieren, welche im Schadenszustand im Bereich der Schadensstelle erhitzt werden und sich entsprechend angelerntem Formgedächtniseffekt verkürzen um die aufgetretene Schadensöffnung zu schließen, vgl. [Kir09] und Abbildung 2.6.

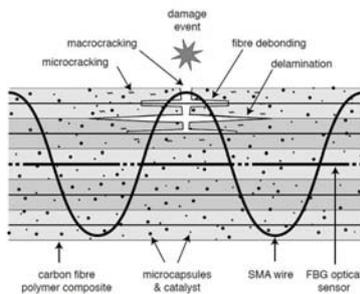


Abbildung 2.6.: Active Sensing and Repair Composite (links) [Kir09] / Segelyacht beim Volvo Ocean Race 2009

2.2.3. Anwendungsgebiete Optischer Fasern

Health Monitoring im Flugzeugbau

Flugzeuge sind als hochleistungsfähige Transportmittel hohen dynamischen Kräften und ständig wechselnden Flugbedingungen, vgl. Abschnitt 2.2.1, ausgesetzt. Flugzeuge werden von den Fluggesellschaften regelmäßig entsprechend der gültigen Normen gewartet. Jedoch können diese Untersuchungen keine Aussage über die Struktur der Bauteile im Inneren geben. Vor allem ist aber keine Untersuchung in den hochbelasteten Zuständen, während des Fluges, möglich. Durch den Einsatz von Faseroptischen Systemen, vgl. Abbildung 2.7, besteht die Möglichkeit Informationen aus dem „Inneren“ der Bauteile zu erlangen. Zudem besteht die Möglichkeit durch kontinuierliche Messmethoden auch Zustandsanalysen während des Fluges zu erhalten und eventuelle Schädigungen früh zu erkennen.

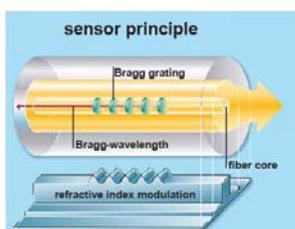


Abbildung 2.7.: Faser Bragg Gitter Sensor (links) [Rap03] / Nervensystem als Structural Health-Monitoring-System (rechts) [Bla]

2.3. Aufzeigen möglicher Einsatzgebiete aktiver Bauteile im Bauwesen

Smart Materials werden auch in der derzeitigen Ingenieurpraxis bereits sehr innovativ angewendet und sollen hier näher erläutert werden. Vor allem aber werden bauwesenrelevante Funktionswerkstoffe wie Piezokeramiken, Rheologische Fluide, Formgedächtnislegierungen und optische Fasern vorgestellt. Die möglichen Anwendungsgebiete sind aufgrund der sowohl aktorischen als auch sensorischen Fähigkeiten sehr breit gefächert und umfassen unter anderem die aktive Beeinflussung von Tragwerken, z.B. bei der Schwingungsdämpfung von Regen-Wind-induzierten-Schwingungen von Schrägkabelbrücken und dem Erdbebenschutz von Hochhäusern, als auch der dauerhaften Echt-Zeit-Untersuchung von Bauwerkszuständen, dem so genannten „Health-Monitoring.“

Die Anwendungen im Bauwesen werden in die Teilbereiche Architektur und Tragwerksplanung untergliedert. Im Bereich der Tragwerksplanung werden Anwendungen zur Ertüchtigung von Tragkonstruktionen aufgezeigt, demgegenüber erfüllen die Anwendungen im Bereich Architektur gestalterische und bauphysikalische Aufgaben. Aber auch in aktuellen Architekturwettbewerben werden Smart Materials als grundlegende Themenstellung aufgegriffen. Die Internationale Bauausstellung in Hamburg (2006 - 2013) wurde unter die Themenfelder „Smart Material“ und „Smart Technologie“ gestellt. Durch die breite Öffentlichkeit einer IBA und des zugehörigen Architekturwettbewerbes sollen innovative und vor allem nachhaltige Gebäude unter Nutzung smarterer Technologien geschaffen werden. Im Rahmen des Wettbewerbes wurden unterschiedlichste Ansätze im Umgang mit dieser zukunftsweisenden Technologie vorgestellt, vgl. [arc]. Diese erstrecken sich über die gesamte Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten smarterer Materialien:

- Wandelbarkeit
 - Beim Wettbewerbsbeitrag SOFT HOUSE wurden wandelbare Fassaden und Strukturen zur Steuerung der Nutzbarkeit und Veränderung der optischen Erscheinung angewendet. Des Weiteren wurde wandelbare Photovoltaik Elemente eingesetzt, welche in Bezug auf den Sonnenstand ausgerichtet werden können, vgl. SOFT HOUSE, Kennedy & Violich Architecture [arc]
 - Tragende Wärmedämmung
 - Durch die Entwicklung von Infrarot-Beton-Fertigteilen besteht die Möglichkeit tragende Betonbauteile mit Wärmedämmeigenschaften zu erstellen. Durch die Integration von Rohren in der Wand kann diese sowohl beheizt werden, aber auch die eingetragene solare Wärme speichern und in Energie umwandeln, vgl. Tragende Wärmedämmung, Barkow Leibinger Architekten [arc]
-

- Anpassbare Tragwerke
 - Neben der Wandelbarkeit der Gebäudeaussenhülle ist eine Anpassbarkeit der Tragkonstruktion ein häufiger Wunsch von Planern und Investoren. Im Wettbewerbsbeitrag „Das Re-Konfigurierbare Tragwerk des Smart Treefrog“ vom Architekturbüro Splitterwerk in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Bollinger und Grohmann wurde auf diese Thematik eingegangen. Hierbei wurden in gewissen Grenzen variabel anzuordnende Stützen vorgesehen, welche individuell angepasst werden können, vgl. [arc]

Im Abschnitt 2.1 wurden für den konstruktiven Ingenieurbau neuartige Werkstoffe, deren Funktionsweise und Materialeigenschaften vorgestellt. Im nachfolgenden Abschnitt wird im speziellen auf die Einsatzgebiete, Anwendungsfelder und Anwendungsgrenzen der einzelnen Funktionswerkstoffe eingegangen. Aber auch durch die Kombination der Funktionswerkstoffe ergeben sich neue richtungweisende adaptive Materialsysteme.

2.3.1. Anwendungsgebiete von Piezokeramiken

Vibrationskontrolle einer Fachwerkstruktur

Piezokeramiken eignen sich aufgrund des piezoelektrischen und inversen piezoelektrischen Effekts sowohl für den Einsatz als Aktuator und Sensor. Piezokeramiken sind wie sämtliche andere Funktionswerkstoffe im Gegensatz zu konventionellen Baustoffen sehr teuer. Somit sollte der Einsatz aktiver bzw. sensorischer Werkstoffe auf genau definierte neuralgische Punkte in Tragwerkssystemen beschränkt sein. Die nachfolgenden Anwendungen zeigen die Möglichkeiten nachhaltiger, aktiver Systeme unter Anwendung piezokeramischer Werkstoffe. Song et al. stellt in [SSL06] verschiedene Untersuchungen an Fachwerkstrukturen vor, bei denen piezokeramische Aktoren und Kraftmesseinrichtungen mit einander kombiniert wurden. Durch diese Kombination können große räumliche Fachwerke mit nur einigen wenigen aktiven Bauteilen hinsichtlich Schwingungen untersucht und in Echt-Zeit stabilisiert werden, vgl. Abbildung 2.8.

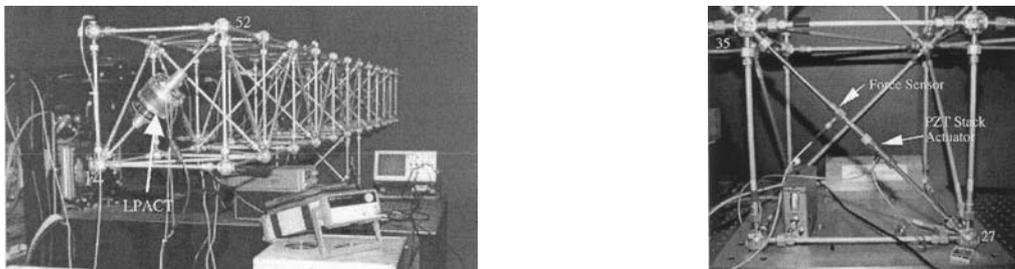


Abbildung 2.8.: Vibrationskontrolle in Fachwerkstruktur nach [Lag08a]

Schwingungstilgung einer Schrägkabelbrücke mit Piezokeramiken

Schrägkabelbrücken werden aufgrund ihrer filigranen Bauweise und großen möglichen Spannweiten sehr häufig gebaut. Doch gerade wegen ihrer schlanken Bauteilabmessungen sind Besonderheiten hinsichtlich des möglichen Schwingungsverhaltens zu beachten. Vor allem die Schrägkabel können durch Wind und Regen zu Schwingungen angeregt werden. Aber auch die geringe Dämpfung der Tragwerke und immer weiter zunehmende Verkehrslasten führen zu vermehrten Vibrationen im Bereich der Schrägkabel. Damit das Vertrauen der Nutzer in Brückenbauwerke gewährleistet ist, müssen vom Auge sichtbare Seilschwingungen verhindert werden, vgl. [WDN05]. Hierzu empfiehlt [WD05] einen Grenzwert von $1/700$ der Seillänge. Eine neuartige Möglichkeit zur Reduzierung des Schwingungsverhaltens von Schrägkabeln ist die Anwendung piezokeramischer Stapelaktoren. Die möglichen Schwingungssymptome von Schrägkabeln sind Schwingungen in Seillängsrichtung und Schwingungen quer zur Seillängsrichtung einzuteilen. Beide Schwingvorgänge können mit piezokeramischer Aktoren reduziert werden, vgl. [SSL06]. Durch den Einbau piezokeramischer Aktoren in Seillängsachse ist es möglich die Seilzugkraft aktiv zu ändern, vgl. Abbildung 2.9, und somit die auftretenden Schwingungen reduziert werden, vgl. [SSL06].



Abbildung 2.9.: Schwingvorgänge an Schrägkabeln (links: quer zur Seilachse; rechts: in Seilachse) nach [SSL06]

Der Einbau der Aktuatoren erfolgt, siehe Abbildung 2.10, direkt am Brückendeck in Seilachse. Somit sind Wartungsarbeiten an den piezokeramischen Aktuatoren jederzeit ohne großen technischen Aufwand möglich.

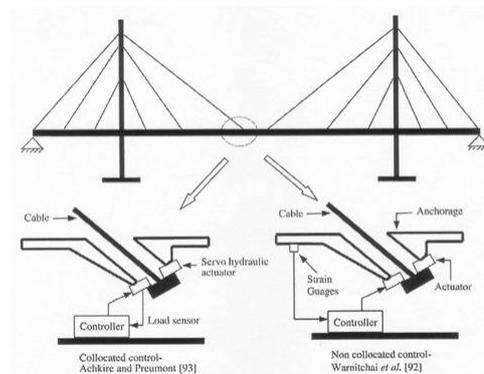


Abbildung 2.10.: Aktor zur Dämpfung von Schwingungen in Schrägkabelbrücken, Anordnung des Aktors in Seilachse nach [SSL06]

Piezokeramiken als Pulverwerkstoffe im Betonbau

Beton ist einer der weitverbreitetsten Baustoffe im Bauwesen. Die messtechnische Untersuchung aber auch die aktive Steuerung von Betonbauteilen ist für viele Anwendungsgebiete sehr aufschlussreich. Dong und Li [DL05] stellen ein gänzlich neues Konzept der Anwendung von piezokeramischen Werkstoffe im Bereich des Betonbaus dar. Sie entwickelten zum einen ein auf Blei-Zirkonat-Titan-Verbundwerkstoff basiertes piezoelektrisches keramisches Pulverprodukt. Es ist somit möglich zementgebundene piezokeramische Blöcke direkt im Betonbauteil einzubringen und somit einen robusten lastabtragenden Sensor im inneren massiver Betonbauwerke zu nutzen, vgl. Abbildung 2.11.

Dong und Li [DL05] haben ebenso durch die Integration von piezoelektrischen Keramik-

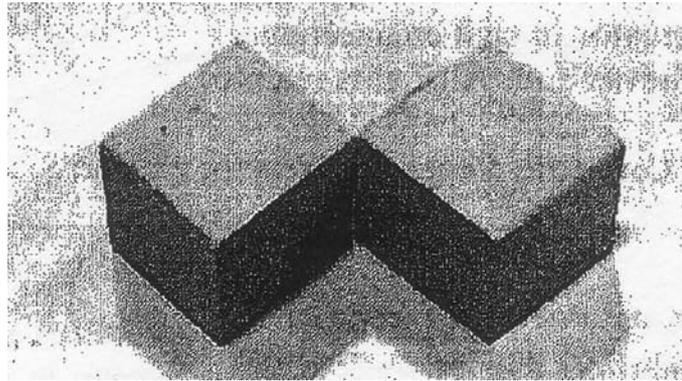


Abbildung 2.11.: Blei-Zirkonat-Titan-Verbundwerkstoff nach [DL05]

platten in die Betonmatrix einen im Beton integrierten Sensor und Aktor geschaffen, vgl. Abbildung 2.12. Die Keramikplatten mit den Abmessungen von 17 x 40 x 40 mm werden im Zentrum der Zementmatrix integriert.

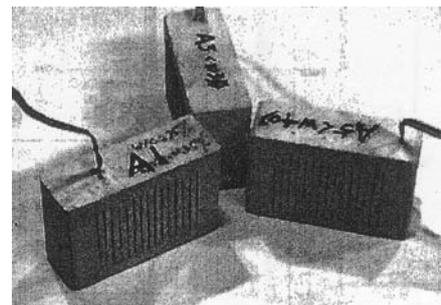
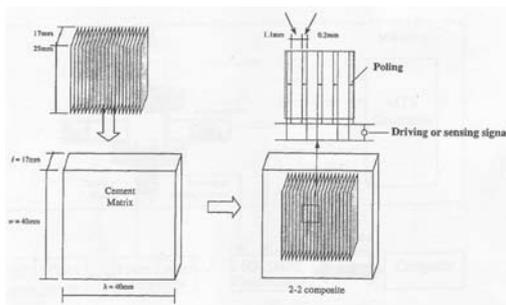


Abbildung 2.12.: In Beton integrierter Sensor und Aktuator mittels eingebetteter piezoelektrischer Keramikplatten nach [SSL06]

Es ist somit möglich, einen genauen Zustand über das Bauwerk mittels Echt-Zeit-Messung zu erhalten. Gegebenenfalls werden die in einzelnen Bauteilen integrierten Aktuatoren aktiviert um einer auftretenden Belastung oder Formänderung entgegenzuwirken.

Aktive Fassaden zur Reduzierung der Schallimmission in Gebäuden

Eine weiteres Anwendungsgebiet piezokeramischer Werkstoffe wurde von der TU-Darmstadt untersucht. In einem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt wurden „Aktive Fassaden zur Reduzierung der Schallimmission in Gebäuden“ entwickelt. In innerstädtischen Bereichen und vor allem an Hauptstraßen ist die Schall- und Lärmentwicklung sehr hoch. Die Anwohner dieser Bereiche klagen sehr häufig über diese Lärmbelastung. Der Schalleintrag in die Gebäude kann auf konventionellem Wege über Dreifachverglasung und sandgefüllte Profile reduziert werden. Jedoch nimmt durch diese Maß-

nahmen die Masse der Fassadenelemente zu. Dieser erhöhte Materialaufwand steht im Widerspruch zu immer leichteren und filigranen Fassaden. Ebenso ist der erhöhte Materialaufwand hinsichtlich Kosten und Ressourcenschonung sehr ungünstig. Im zuvor benannten Forschungsvorhaben wurde die Möglichkeit untersucht, leichte Fassaden zu entwickeln, welche den Anforderungen hinsichtlich Schallschutz entsprechen, vgl. Abbildung 2.13. Hierzu wurden über die gesamte Fassadenfläche piezokeramische Aktuatoren verteilt, welche in Echt-Zeit den eingetragenen Schall registrierten und aktiv Gegenschall erzeugten. Auf diese Weise konnte der auftreffende Schall gedämpft und die Immission reduziert werden.

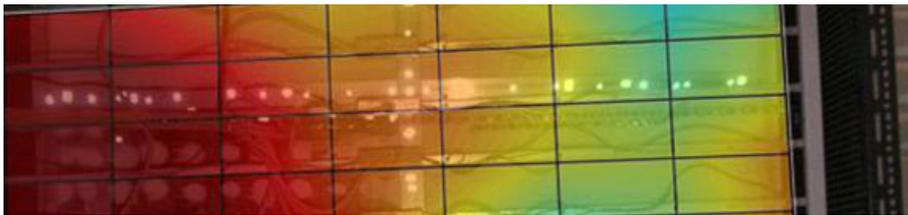


Abbildung 2.13.: Aktive Fassade [TU-Darmstadt]

Piezokeramiken als Energiequelle

Ein sehr anschauliches Beispiel bezüglich der Nutzung des Piezoelektrischen Effekts stellt das Beispiel „Sustainable Dance Floor“ von Best Dutch, TU Eindhoven, Advanced Electromagnetics, Ymif, TU Delft und Rotterdam Climate Initiativ, www.sustainabledanceclub.com, dar, vgl. Abbildung 2.14. Diese Partner haben spezielle Bodenelemente entwickelt, welche beim Begehen ca. 10 mm zusammengedrückt werden und hierbei über einen Generator Energie erzeugen, vgl. Abbildung 2.15. Die Einzelmodule haben die Abmessungen 75 x 75 x 20 cm und erzeugen 35 Watt Leistung. Die Energie wird zur Beleuchtung der Diskotheken genutzt bzw. gespeichert. Eine physikalisch-technische Analyse dieser Anwendung wurde von Seth Winger in seinem Artikel „Piezoelectricity from Dancing“, [WS10], erarbeitet und errechnet eine durchschnittliche „ertanzbare“ Energiemenge von 4×10^7 J.



Abbildung 2.14.: Sustainable Dance Floor, [www.idealize.nl]

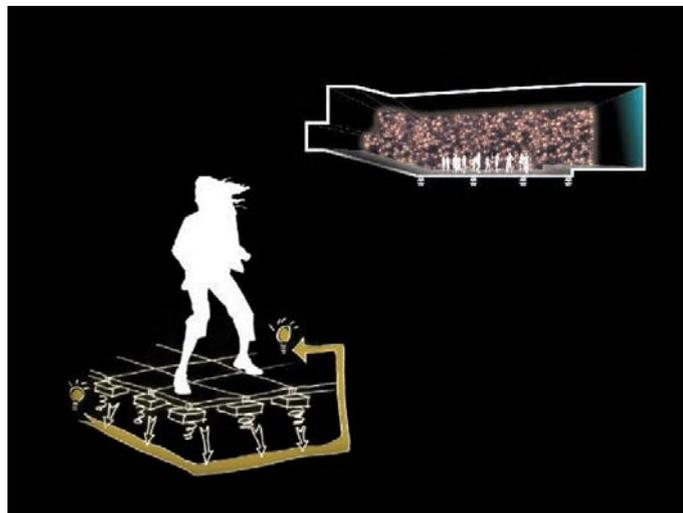


Abbildung 2.15.: Wirkungsweise des Sustainable Dance Floor, [Studio Roosegaarde]

Prototypische Umsetzung integrierter Systeme zur Wandelbarkeit von Faserverbundwerkstoffen

Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet stellt die Kombination von Faserverbundwerkstoffen und der direkten Integration von Piezokeramischen Aktoren zur Struktursteuerung dar. Diese Prozesse sind sehr stark an biologischen Vorgängen orientiert, da auch in der Natur Verstärkungs- und Anlagerungsvorgänge angewendet werden. Diese Phänomene basieren auf Sensor- und Aktoraktivitäten in natürlichen Konstruktionen. Die Anpassung hinsichtlich des Wachstumsverhaltens von Pflanzen wird als Thigmo-Morphogenesis bezeichnet und wird durch Änderungen der Umgebungsbedingungen ausgelöst, vgl. [Evo10]. Die in der Natur vorkommenden Adaptionsvorgänge vollziehen sich über lange Zeiträume. Die Anwendung selbstregelnder Bauteile spielt auch in der Architektur eine große Rolle. Hierbei kommen derzeit Systeme zum Einsatz, welche von „außen“ gesteuert werden. Ein möglicher Ansatz der Integration wurde in [Evo10] dargestellt.



Abbildung 2.16.: Faserverbundstruktur mit Formgedächtnislegierungsstreifen [Evo10]

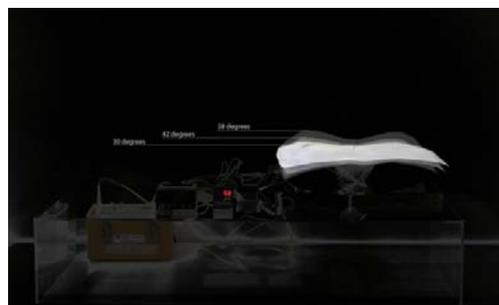
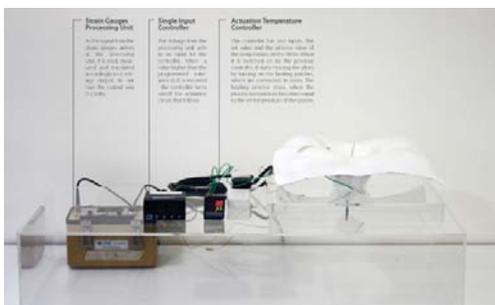


Abbildung 2.17.: Faserverbundstruktur mit FGL-Streifen - Bewegungsvorgänge [Evo10]

2.3.2. Anwendungsgebiete Magnetorheologischer Fluide

Schwingungstilgung einer Schrägkabelbrücke mit Magnetorheologischen Fluiden

Im Abschnitt 2.3.1 wurde ein Seildämpfer in Seilachse auf Basis piezoelektrischer Keramiken vorgestellt. Im nun folgenden Abschnitt werden Seildämpfer senkrecht zur Seilachse

vorgestellt. Viele Schrägseilbrücken werden im Verankerungsbereich mit Elastomerlagern zur Reduzierung der Biegebeanspruchung aus Änderung des Seildurchhanges, Verkehr und Temperatur ausgestattet [WDN05], siehe Abbildung 2.18. Diese Elastomerlager können die auftretenden Schwingungen aufgrund interner Dämpfung zu gewissen Anteilen reduzieren.

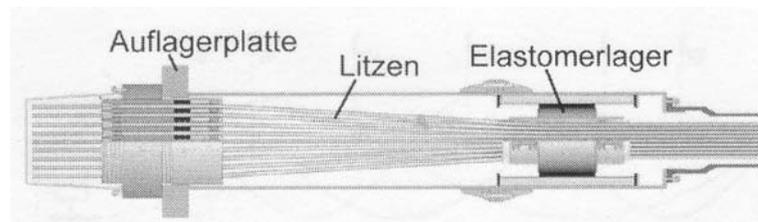


Abbildung 2.18.: Schrägseil im Bereich der Verankerung mit Elastomerlager [WDN05]

Als weitere Maßnahme stellen Weber et al. [WDN05] und Duan et al. [DNK05] die Verwendung adaptiver Seildämpfer auf Basis magnetorheologischer Fluid-Dämpfer (MR-Dämpfer) am Beispiel der Eilandbrücke (bei Kampen in Holland) und der Dongting Lake Bridge in China, vgl. Abbildung 2.19 vor.



Abbildung 2.19.: MR-Dämpfer auf Eiland-Brücke mit Stromversorgung (links) [WDN05] / Dongting Lake Bridge China mit MR-Dämpfern (rechts) [DNK05]

Die größte Effizienz haben quer zur Seilachse angeordnete Seildämpfer im Bereich des Schwingungsbauches. Diese Anordnung wird aber aufgrund des optischen Eindrucks nicht vorgenommen. Vielmehr werden diese Seildämpfer auf Höhe des Geländers zwischen Brückendeck und Seil eingebaut [WDN05]. Die Dämpferposition befindet sich somit bei ca. 2 - 6 % der Seillänge. Das schematische Funktionsprinzip eines MR-Dämpfers ist in Abbildung 2.20 dargestellt.

Magnetorheologische Fluid-Dämpfer sind als Adaptive Dämpfer zu bezeichnen und bieten im Gegensatz zu MD (Massendämpfer) die Möglichkeit der Anpassung vor Ort und während des Betriebs, welche auf Grund der Abweichung von getroffenen Annahmen und

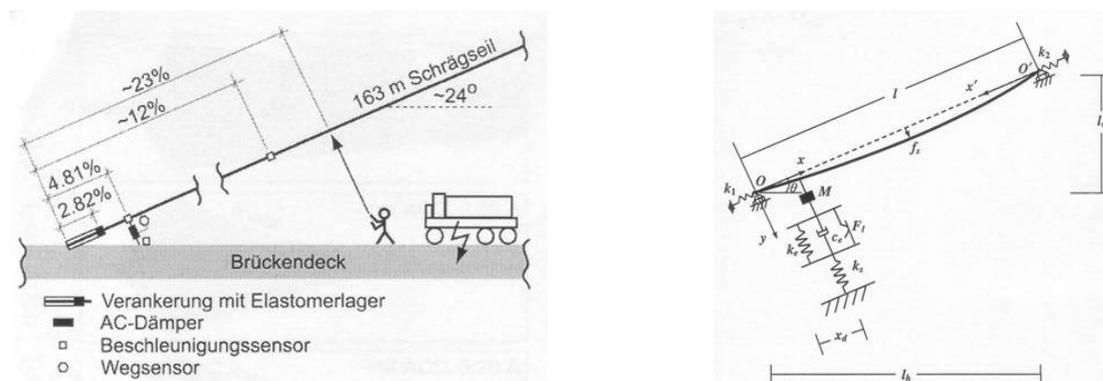


Abbildung 2.20.: Versuchsaufbau und Einbausituation der MR-Dämpfer senkrecht zur Seilachse (links) [WDN05] / Schematisches Funktionsprinzip eines MR-Dämpfers (rechts) [DNK05]

der Realität häufig auftreten. Das Fluid im Inneren der verwendeten Dämpfer ist von Spulen umgeben, welche Magnetfelder erzeugen können. Durch den Einfluss des Magnetfeldes ändert sich die Scherfestigkeit des Fluids. „Je höher der Strom ist, umso größer sind Magnetfeld und damit Dämpferkraft“ [WDN05]. Die übertragbaren Kräfte eines MR-Dämpfers sind durch folgende Eigenschaften charakterisiert. Wenn kein Magnetfeld aufgebaut ist, wirkt die Grundreibung des Fluids. Aufgrund dieser Tatsache sind MR-Fluid-Dämpfer auch bei Stromausfall einsatzbereit. Die Scherfestigkeit des Fluids beeinflusst die obere Grenze der übertragbaren Kräfte. Bei der vorgestellten Eilandbrücke konnte die Seildämpfung durch die MR-Dämpfer um den Faktor 4 im ausgeschalteten Zustand (keine Stromzufuhr) und um den Faktor 9 (mit Stromzufuhr) erhöht werden. In Abbildung 2.21 wird die mögliche Reduzierung der Schwingamplitude dargestellt. Für die aktive Schwingungskontrolle ist sehr wenig Energie bereitzustellen. Im Falle der Eilandbrücke erfolgt eine autarke Stromversorgung mittels Solarzellen. Der Stromverbrauch beträgt im ausgeschalteten Zustand 0,25 W bei 21 mA (Monitoring des Seils) und 2,6 W bei 220 mA im aktivierten Zustand.

MR-Fluid-Dämpfer für Schwingungstilgung in Gebäuden

Neben den beschriebenen Brückenbauprojekten werden MR-Fluid-Dämpfer auch für Schwingungstilgung in Hochbauten entwickelt. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Smart Damping Strategies for Seismic Protection of Urban Structures“ an der Universität Illinois und dem US-amerikanisch-japanischen Urban Earthquake Disaster Mitigation Research Initiative wurden großmaßstäbliche seismische Stoßdämpfer für das Nihon-Kagaku-Gebäude in Tokio Bay entwickelt, vgl. Abbildung 2.22. Es wurden MR-Fluid-Dämpfer zwischen der 3. und 5. Etage unterhalb einer V-förmigen Verstrebung über einen Hebelmechanismus angebracht und somit aktive Bauteile direkt in die Gebäudestruktur integriert.

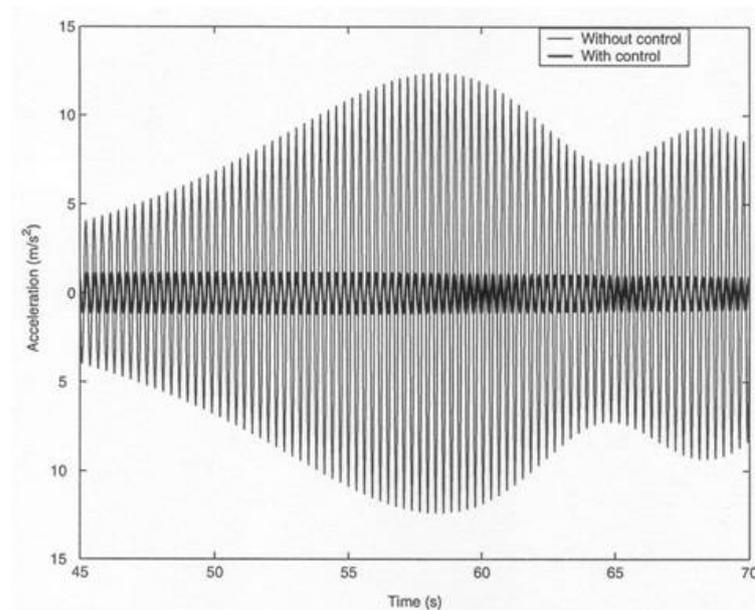


Abbildung 2.21.: Beschleunigungsmesswerte mit und ohne aktive Kontrolle [DNK05]

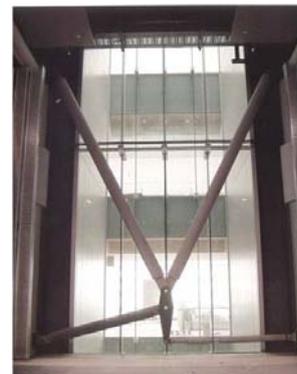
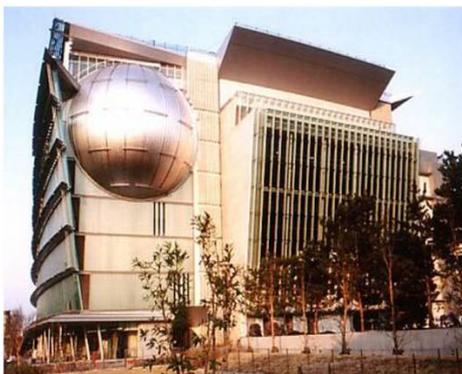


Abbildung 2.22.: Nihon-Kagaku-Miraikan Building in Tokyo (links) [Mor04] / V-förmige Verstrebung mit Hebelmechanismus (rechts) [Rit07]

2.3.3. Anwendungsgebiete von Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen zur Schwingungstilgung

Aufgrund der unterschiedlichen Effekte der FGL können verschiedene Anwendungsgebiete abgedeckt werden.

Die passiven Eigenschaften der Dämpfung eignen sich für Tragwerksertüchtigungen. Die Dämpfung beschreibt die Umwandlung mechanischer in thermische Energie. Hierbei kann die Reibung zwischen verschiedenen Bauteilen oder die interne Reibung in einem Werkstoff herangezogen werden. FGL haben sehr hohe Reibungsintensitäten die sich auf zwei unterschiedliche Vorgänge zurückführen lassen. Der Werkstoff richtet sich in seiner Tieftemperaturphase bei Überschreiten der Zugfestigkeit neu aus und vollführt eine Hysterese bei umgekehrten Kräften. Auf diese Weise kann verhältnismäßig viel Energie dissipiert werden. Im Vergleich zu Stahl, kann der Ausgangszustand thermisch wieder hergestellt werden [JCMR05].

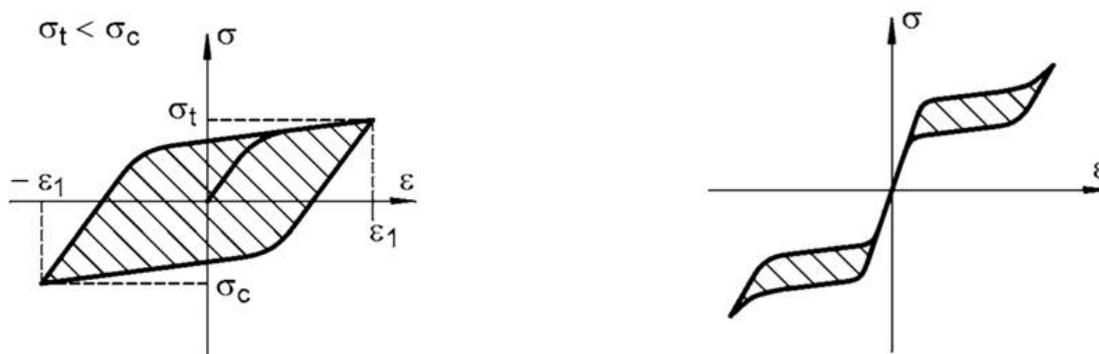


Abbildung 2.23.: Spannungs-Dehnungslinie der Tieftemperaturphase (links) und bei spannungsinduzierter Phasenumwandlung aus der Hochtemperaturphase (rechts) [JCMR05]

Ein weiteres Phänomen der Dämpfung bei Formgedächtnislegierungen läuft während der spannungsinduzierten Phasenumwandlung aus der Hochtemperaturphase statt [JCMR05]. Bereits umgesetzte Projekte unter Einsatz von Formgedächtnislegierungen gibt es vor allem in Italien bei der Erbebenertüchtigung historischer Gebäude. Das Tympanon der Basilika San Francesco in Assisi wurde durch mehrere Erdbeben im Jahr 1999 schwer geschädigt. Die Sicherung des Tympanons war im Anschluss außerordentlich wichtig, da die Deckenbalken des Querschiffes auf ihm aufgelagert sind. Um eine weitere Schädigung zu verhindern wurden die Dachlasten über einen Stahlbetonsparren abgefangen und direkt in die Außenmauern abgetragen, vgl. Abbildung 2.24. Des Weiteren wurde das Tympanon baulich vom restlichen Gebäude getrennt und über speziell entwickelte FGL-Dämpfer, vgl. Abbildung 2.24, gesichert. Die FGL-Dämpfer müssen für kleine Lasten (z.B. Windlasten) steif sein, im Falle eines Erdbebens muss das Tympanon jedoch frei schwingen können

und bei extremen Belastungen (z.B. Starkbeben) müssen die auftretenden Bewegungen begrenzt werden [Hah03], [JCMR05]. Die Spannungs-Dehnungs-Linie wie in Abbildung 2.26 gezeigt, ermöglicht ein solches Verhalten.

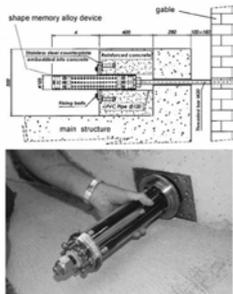


Abbildung 2.24.: Formgedächtnislegierungs-Dämpfer für erdbebenertüchtigte Verbindung zwischen Haupttragwerk und Tympanon der Basilika San Francesco in Assisi [JCMR05]

Ein weiteres Projekt der Erdbebenertüchtigung stellt die Kirche San Giorgio in Italien dar, vgl. Abbildung 2.25. Die Kirche wurde 1996 von einem Erdbeben schwer geschädigt. Infolge des Erdbebens ist der Turm in 2/3 der Höhe um 3 cm rotiert. Die Biegezugsteifigkeit des Turmes wurde als zu gering eingeschätzt und im Rahmen der Sanierung in den vier Turmecken vorgespannte Stahlstäbe eingebaut. Diese Spannglieder enthalten ein Zwischenstück aus der FGL Nickel-Titan, vgl. Abbildung 2.25. Die Steifigkeit des Systems wird durch die FGL-Elemente bestimmt. Infolge eines Erdbebens werden sich die FGL-Elemente stark verformen und auf Grund der Hysterese wird Energie abgebaut. Im Gegensatz zu einer konventionellen Vorspannung ermöglicht diese Lösung eine Lastbegrenzung für das vorhandene geringfeste Mauerwerk in der Biegedruckzone bei horizontaler Erdbebenanregung. Für aussergewöhnliche Erdbeben hingegen steht noch eine Steifigkeitsreserve in der FGL zur Verfügung [Hah03], [JCMR05].

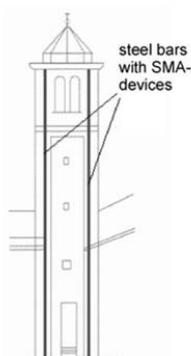


Abbildung 2.25.: Kirche San Giorgio / Formgedächtniselement im Bereich des Zugstabes [JCMR05]

Im Zusammenhang mit Formgedächtnislegierungen werden immer wieder aktiv veränderbare Systeme vorgestellt. Diese Konzepte sind aufgrund ihrer Zustandsänderungen höchst interessant und imposant. Dennoch sind aktive Anwendungen auch kritisch zu betrachten [JCMR05]. Die für die Aktivierung notwendige Energie ist durch thermische oder elektrische Energie einzutragen. Die für die Deaktivierung notwendige Abkühlung ist nur über Wärmeabgabe des Elementes umzusetzen. Der Aufheizvorgang läuft im Allgemeinen schneller ab als der Abkühlvorgang. Der Aufheizvorgang ist in Abhängigkeit vom Durchmesser der FGL-Drähte unterschiedlich und kann bis zu mehreren Minuten dauern, vgl. Abbildung 2.26. Die Abkühlung kann mit Hilfe von Kühlelementen (Peltier-Elementen) erfolgen.

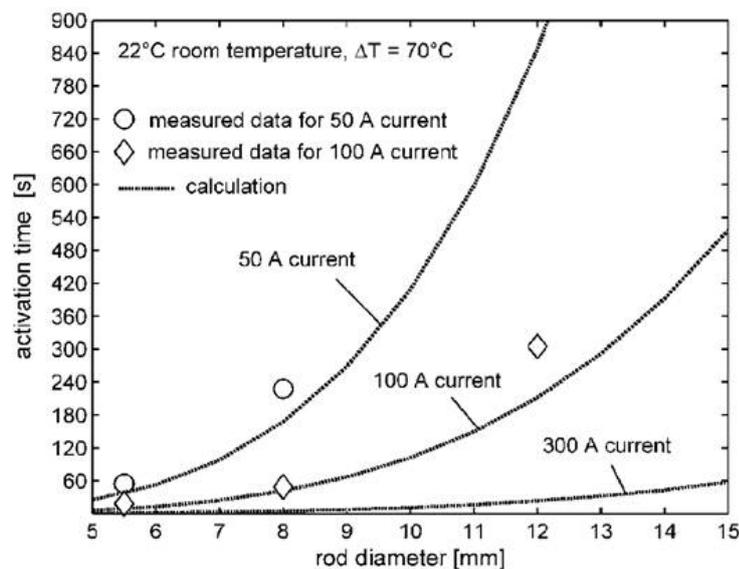


Abbildung 2.26.: Aktivierungszeiten für verschiedene Durchmesser [JCMR05]

Aus den vorgenannten Gründen ist die Anwendung von aktiven Formgedächtnislegierungen im Bauwesen derzeit begrenzt. Eine Anwendung von FGL unter Ausnutzung des passiven Effekts hingegen bietet vor allem im Bereich der Schwingungsdämpfung viele Möglichkeiten.

Automatischer Vorhang

Durch die Integration von Formgedächtnislegierungsfasern können automatische Gewebe wie zum Beispiel Vorhänge entstehen. Hierzu werden konventionellen Gewebefasern mit FGL-Fasern verwoben. Durch die Kombination dieser Fasertypen besteht die Möglichkeit, dass der Vorhang sich aufgrund einer Temperaturänderung automatisch auf- und niederrollt. Dies folgt dem thermischen Formgedächtniseffekt, vgl. Abbildung 2.27.

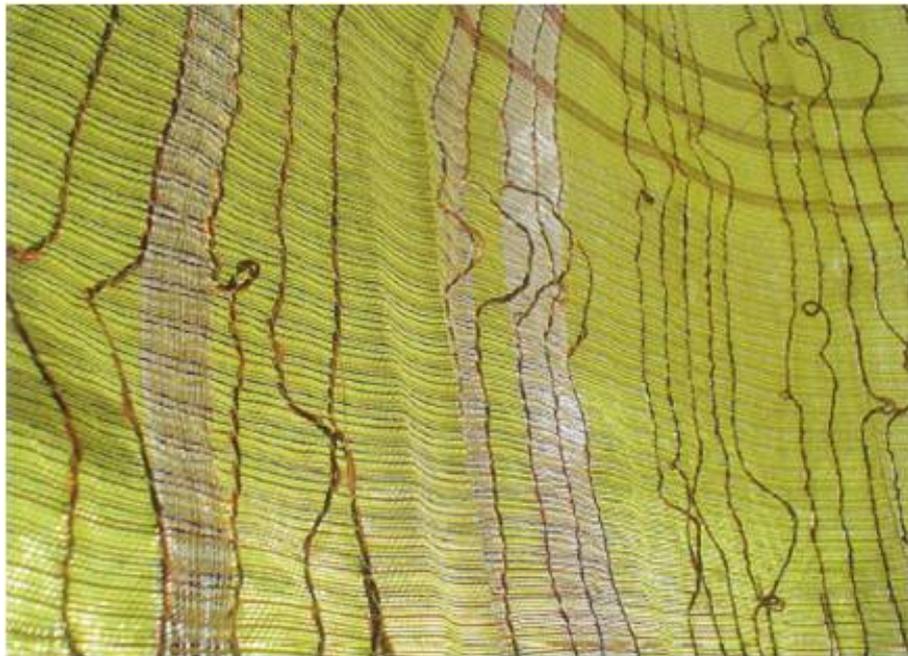


Abbildung 2.27.: PAUL Demonstrationspavillon [Rit07]

2.3.4. Anwendungsgebiete von Phasenwechselmaterialien

Smart Wrap – Ausstellungspavillon

Der Demonstrationspavillon SmartWrap wurde für eine Ausstellung unter Verwendung verschiedener smart materials errichtet. Hierbei sollte vor allem die ganzheitliche Einsatzmöglichkeit dargestellt werden. Der Pavillon besitzt zweilagige Fassadenelemente. Die Aussenhülle als fassadenbildende Schicht besteht aus transparentem, elastischen PET mit integrierten organischen Photovoltaikzellen (OPV), organischen Dünnschicht-Transistoren (OTFT) und organischen Leuchtdioden auf Polymerbasis (OLED). Somit übernimmt die äußere Hülle die Funktionen der Dichtigkeit, Energiegewinnung und Kommunikation.

In die innere Schicht sind Phasenwechselmaterialien integriert, wodurch diese Schicht als wärmedämmende und wärmespeichernde Schicht eingesetzt wird. Die innere Schicht hat mit einer Stärke von wenigen Millimetern eine vergleichbare Wärmedämmung zu einer normalen Mauerwerkswand, vgl. Abbildung 2.28.

PAUL - Demonstrationspavillon

Das Institut für Leichtbau in Stuttgart hat einen zum vorher vorgestellten SmartWrap-Pavillon vergleichbaren Demonstrationspavillon errichtet. Auch hier wurden verschiedenen smarte Materialien entsprechend ihrer vorteilhaften Eigenschaften eingesetzt.

Die äußere Schicht als Wetterschutzschicht wurde durch Lichtlayer mit 8 km Glas-Lichtleitfaserkabeln und 1200 Lichtpunkten interaktiv bespielbar gemacht.

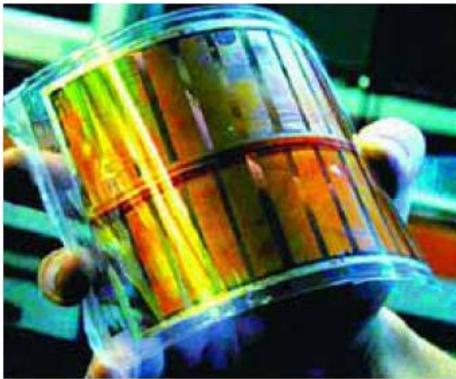


Abbildung 2.28.: SmartWrap Ausstellungspavillon [Kieran Timberlake Association, Arch+ Material]

Die innere Schicht wurde ähnlich zum SmartWrap-Pavillon als wärmedämmende Ebene ausgebildet. Jedoch wurde ein Isolationslayer mit hochisolierten Keramiken eingesetzt, vgl. Abbildung 2.29.



Abbildung 2.29.: PAUL Demonstrationspavillon [Markus Holzbach, Werner Sobek, Arch+ Material]

2.3.5. Anwendungsgebiete Optischer Fasern

Optische Fasern als Health-Monitoring Werkzeug

Die Sanierung, Ertüchtigung und der Erhalt von Baukonstruktionen hat in den letzten Jahren mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. In diesem Zusammenhang werden unter anderem bei Brückenbauwerken die zulässige Belastung und die mögliche Reststandzeit rechnerisch ermittelt und sehr häufig durch Belastungsversuche vor Ort die Ergebnisse validiert. Im Rahmen dieser Maßnahmen werden viele Bauwerke mit Messtechnik in Form von Dehnmessstreifen (DMS) und anderen externen Sensoren appliziert. Durch die exponierte Lage der DMS an der Bauteilaußenseite ist ein Schutz gegen Beschädigungen und Umgebungseinwirkungen vorzusehen. Aber auch neu errichtete Bauwerke werden im Rahmen der Errichtung mit Messtechnik ausgestattet um genaue Kenntnis über sämtliche Belastungszustände des Bauwerks zu erhalten. Das Faser-optische Messverfahren stellt eine weitere Möglichkeit der messtechnischen Überwachung von Bauteilen dar. Bei Faser-optischen Systemen werden Lichtleitkabel direkt in Bauteile integriert, sind im Gegensatz zu DMS vor äußeren Einwirkungen geschützt und liefern Messergebnisse aus dem Inneren des Bauteils. Der typische Aufbau eines Lichtleitkabels ist in Abbildung 2.30 dargestellt. Bei der Anwendung der Faser-optischen Messmethode mit speziellen Multiplex-Lichtleitkabeln können Messwerte an verschiedenen Stellen des untersuchten Bauwerks ermittelt werden [Lau03].

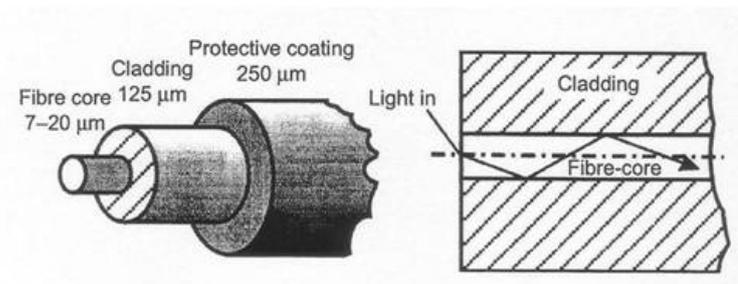


Abbildung 2.30.: Typischer Aufbau einer optischen Faser [Lau03]

Die Anwendung von Faser-optischen Messmethoden ist im Betonbau noch nicht weit fortgeschritten. Einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten liefert [Lau03]. Erste Versuche wurden an der Taylor und Beddington Trail Bridge durchgeführt, vgl. 2.31. Hierbei wurden optische Fasern direkt im Beton eingebaut und an der Bewehrung arretiert, vgl. Abbildung 2.31 [Lau03].

Mit Hilfe der Sensoren war es möglich sämtliche Last- und Bauwerkszustände vom Abbinden des Betons, über das Eintragen der Vorspannung, dem Spannungsabfall nach dem Vorspannen, dem Kriechen und Schwinden des Betons bis hin zu den Lastzuständen Eigengewicht und Verkehrslast nachzuvollziehen. Da die Sensoren im Bauteil verblieben, besteht die Möglichkeit diese Messwerkzeuge als „Health-Monitoring-System“ einzusetzen [Lau03]. Für die Wahl der optischen Fasern ist die Beständigkeit gegenüber dem alkalischen Milieu

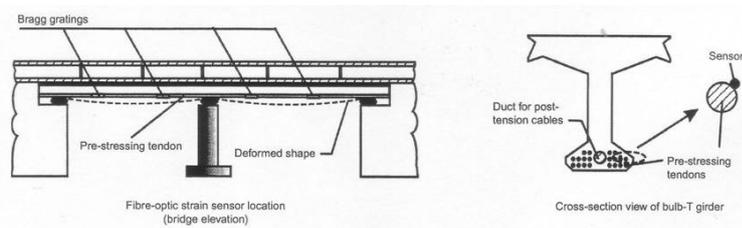


Abbildung 2.31.: Schematische Illustration der Dehnungsmessungen an der Beddington Trail Bridge mittels optischer Fasern [Lau03]

zu beachten. Erst durch die Kombination aktiver Werkstoffe und im Bauteil integrierter Sensoren ist die Möglichkeit gegeben, Bauteile adaptiv zu gestalten. Sie sind somit in der Lage Materialveränderungen, Belastungssteigerungen und eventuelle Schädigungen zu registrieren und eine Veränderung der Materialeigenschaften hervorzurufen, bzw. eine Warnmeldung zu versenden.

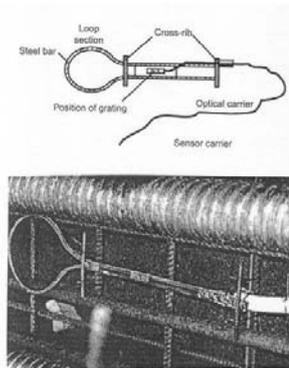


Abbildung 2.32.: Einbau der optischen Fasern direkt im Betonbauteil durch Befestigung an der Bewehrung [Lau03]

Photolumineszentes Gewebe

Neben den rein messtechnischen Anwendungen von Optischen Fasern eignen sich diese auch für aktive Anwendungen. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit photolumineszierende Fasern in herkömmliche Gewebestoffe einzuweben. Auf diese Weise können Vorhänge Licht absorbieren, speichern und an anderen Orten oder zu späteren Zeitpunkten emittieren. Als Einsatzgebiete sind unter anderem der Messebau, bzw. Fluchtwege mit notwendiger Grundbeleuchtung denkbar, vgl. Abbildung 2.33.

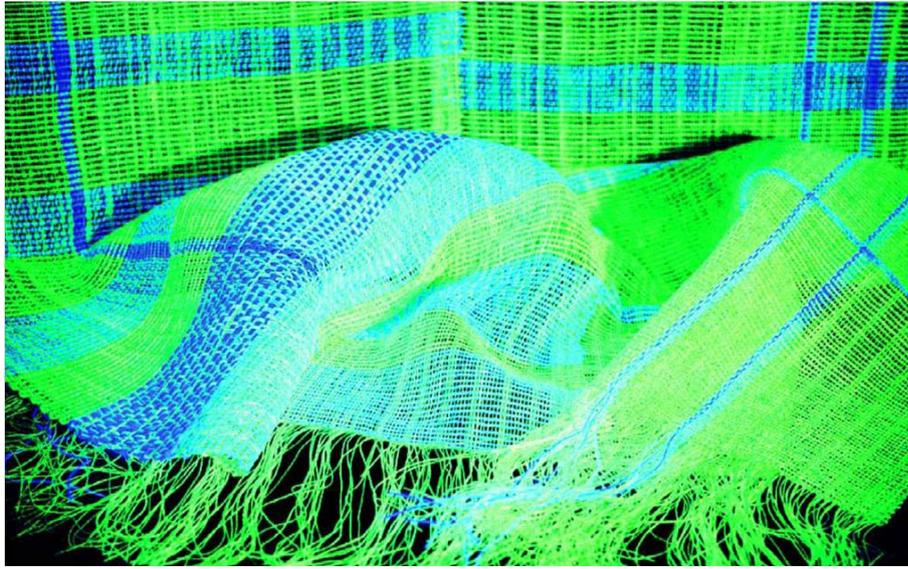


Abbildung 2.33.: Give Back Curtain [Kennedy + Violich Architecture, Arch+ Material]

2.4. Aufzeigen der Einsatzmöglichkeiten aktiver Bauteile im Bauwesen für spezielle Belastungen

In Abschnitt 2.2 wurden verschiedene aktive und smarte Materialien und Anwendungsgebiete dieser Materialien und Techniken im Bereich der Luft- und Raumfahrt vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass bereits in einigen wenigen Fällen diese hochinnovativen Techniken im Bauwesen genutzt werden und sehr gute Möglichkeiten bieten Bauwerke und Tragwerke hinsichtlich:

- hochdynamischer Lasten zu ertüchtigen,
- die bauphysikalischen Eigenschaften zu verbessern und
- Multifunktionalität zu gewährleisten (Wandelbarkeit von Oberflächen).

Dennoch beschränken sich die Anwendungsgebiete sehr häufig auf wenige Forschungsprojekte. Die erzielten und gezeigten Ergebnisse lassen jedoch auf eine große Vielzahl an weiteren Anwendungsgebieten und vor allem auf eine größere Verbreitung dieser Technologien im Bauwesen schließen.

Bei der Übertragung von der Luft- und Raumfahrt auf das Bauwesen können verschiedene ähnliche Belastungsszenarien betrachtet werden. Hierzu zählen unter anderem:

- Schwingungsdämpfung,
- Verformungs- und Durchbiegungsminimierung,
- Health-Monitoring und
- selbstheilende Materialien.

Bei der Übertragung dieser Erkenntnisse sind als wesentliches Unterscheidungsmerkmal die unterschiedliche Belastungsgröße und die notwendigen Parameter der aktiven Materialien festzuhalten. Folgende Parameter sind zu überprüfen und zu beachten:

- zulässige Spannung und erforderliche übertragbare Spannung,
- zulässige Dehnung und erforderliche übertragbare Dehnung,
- Aktivierungszeiten,
- aktives oder passives Material,
- Art der Aktivierung.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die aufgezeigten Probleme näher eingegangen und anhand von Beispielen und Anwendungskonzepten verschiedene Lösungsmöglichkeiten vorgestellt.

2.4.1. Erdbeben

Erdbeben sind hochfrequent und derzeit nicht vorhersagbar. Die Stärke, Frequenz und Ausbreitung eines Erdbebens ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. In Abbildung 2.34 ist der Beschleunigungsverlauf eines Erdbebens dargestellt. Die Ausbreitung von Erdbeben hängt vor allem von den Untergrundverhältnissen und den somit auftretenden Erdbebenwellen zusammen, vgl. Abbildung 2.35.

Die Disziplin des Erdbebeningenieurwesens hat auf dem Gebiet der Ertüchtigung geschädigter Bauwerke aber auch auf dem Gebiet der Erdbebensicherung neuer Objekte große Fortschritte gemacht. Hierbei sei unter anderem die Erdbebenertüchtigung durch schwimmende Lagerung des Feuerwehrgebäudes in Basel genannt, vgl. [Bac09]. So werden neben der Verstärkung auf konventionellem Wege auch smarte Materialien eingesetzt. Aus diesem Grund müssen Objekte in den jeweiligen Regionen auf diese dynamischen Einwirkungen entsprechend reagieren können. Da im Falle eines Erdbebens sehr häufig auch Versorgungsleitungen wie z.B. Stromleitungen zertrennt werden, müssen bei der Planung der Erdbebenertüchtigung unter Verwendung von smarten Materialien verschiedene Wege gegangen werden. Zum einen können passive Systeme (Formgedächtnislegierungen) verwendet werden, welche nicht auf Energiezufuhr angewiesen sind und dennoch die auftretenden Schwingungen reduzieren können, vgl. Beispiel der Basilica San Francesco in Assisi (2.3.3). Des Weiteren können auch aktive Systeme eingesetzt werden, sofern diese direkt mit einer Notstromversorgung verbunden sind und diese Aggregate auch schwingungs isoliert gelagert sind.

An diesen Überlegungen ist sehr gut erkennbar, inwieweit die Anwendung verschiedener Materialien und Systeme nicht nur von deren physikalischen und mechanischen Eigenschaften abhängig ist, sondern auch die geplanten Einsatzbedingungen berücksichtigt werden müssen.

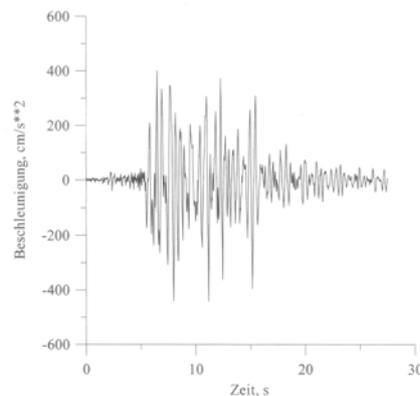


Abbildung 2.34.: Beschleunigungszeitverlauf Petrovac-Beben nach [MHBM07]

Die Anwendung aktiver Materialien stellt im Erdbebeningenieurwesen eine sehr innovative Möglichkeit der Schwingungsreduzierung und Ertüchtigung einzelner Bauteile dar.

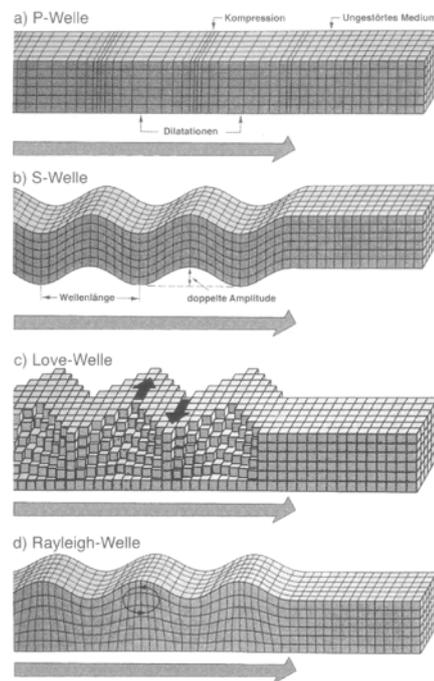


Abbildung 2.35.: Arten von Erdbebenwellen nach [Bac02]

2.4.2. Begrenzung von Durchbiegungen und Schwingungen

Im Bauwesen sind verschiedene Nachweise bei der Berechnung einer Konstruktion erforderlich. Hierzu gehören die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Mit Hilfe der Nachweise der GZT kann direkt ermittelt werden, inwieweit eine Konstruktion in ihrer Ausbildung den angreifenden Belastungen widerstehen kann, hierzu werden die Einwirkungen und der Widerstand der Konstruktion verglichen.

$$E_d \leq R_d$$

Die Nachweise für die GZT der einzelnen Bauweisen sind in den unterschiedlichen Normen geregelt.

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sichern die Nutzungsfähigkeit eines Bauwerks oder Bauteils für die angedachte Nutzung. Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit sind in DIN 1055-100 folgendermaßen geregelt:

„Ein Bauwerk muss so entworfen und ausgeführt werden, dass es während der vorgesehenen Nutzungsdauer neben seiner Tragfähigkeit auch seine Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bei angemessenem Unterhaltungsaufwand behält.“

Als wesentliche Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit können die uneingeschränkte Nutzungsfähigkeit, das Wohlbefinden der Nutzer und das optische Erscheinungsbild ge-

Durchbiegungen

Durchbiegungen sind je nach Bauweise entsprechend der zugehörigen DIN bzw. Eurocode unterschiedlich zu minimieren. Folgende allgemeine Grenzen sind definiert:

- Stahlbau nach DIN 18800,
 - $L/200$ für Dächer
 - $L/250$ für Decken, allgemein
 - $L/400$ für Decken, die Stützen tragen
- Holzbau nach Eurocode 5
 - $L/150$ bis $L/300$ für beidseitig aufgelagerte Biegestäbe
 - $L/75$ bis $L/150$ für auskragende Biegestäbe
- Stahlbetonbau, Nachweis der Biegeschlankheit nach DIN 1045-1
 - für Bauteile allgemein

$$l_i/d \leq 35$$

- für Bauteile mit erhöhten Anforderungen an die Verformung

$$l_i/d \leq 35/l_i$$

- Glasbau nach TRLV für Vertikalverglasungen
 - vierseitige Linienlagerung - keine Anforderungen hinsichtlich Durchbiegungen
 - zwei- und dreiseitige Linienlagerung - $l/100$ der freien Kante als zulässige Durchbiegung
- Glasbau nach TRLV für Überkopfverglasungen
 - vierseitige Linienlagerung - $l/100$ der Stützweite in Hauptrichtung
 - zwei- und dreiseitige Linienlagerung - $l/100$ der Stützweite in Hauptrichtung bzw. $l/200$ der freien Kante

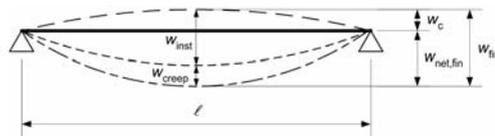


Abbildung 2.37.: Durchbiegungsanteil - Holzbau nach [Ne08]

An dieser Aufstellung ist erkennbar, dass die einzuhaltenden Kriterien sehr stark von den angeschlossenen Bauteilen und von den verwendeten Werkstoffen abhängen. Vor allem spröde Baustoffe (wie z.B. Glas) erfordern sehr geringe Verformungswerte.

An den vorhergehenden Erläuterungen ist der grundsätzliche Unterschied zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit erkennbar. Denn Bauteile die ausreichend tragfähig sind, erfüllen die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit zumeist nicht. Dies bedeutet, dass Bauteile für die Erfüllung des GZG stärker, bzw. gegenüber der GZT überdimensioniert werden müssen. Dies ist nachfolgend exemplarisch an einer Fassadenstütze veranschaulicht:



Abbildung 2.38.: Fassadenstütze



Abbildung 2.39.: Fassadendurchbiegung

Für den Nachweis der Tragfähigkeit ist für die Fassadenstütze ein IPE 80 Profil bei einer auftretenden Spannung von $218 \frac{N}{mm^2}$, welches der zulässigen Spannung für Stahl der Güte S235 entspricht, erforderlich. Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis wurde eine Grenzverformung von $1/300$ angenommen. Unter diesem Kriterium ist für das Fassadenprofil bei gleichen Randbedingungen und Belastungen ein IPE100-Profil notwendig. Was einem Materialmehraufwand von ca. 20 % entspricht. Eine mögliche Alternative hierbei stellen in die Struktur integrierte aktive Materialien dar. Diese Stellen sind auf möglichst wenig ausgewählte Bereiche im Tragwerk zu beschränken. Eine genaue Analyse hierzu ist in den nachfolgenden Beispielen dargestellt.

Schwingungsreduzierung

Die Schwingungsanalyse stellt im Bereich der Luft- und Raumfahrt aufgrund der hochdynamischen Lasteinwirkung der Windlasten eine notwendige Nachweisanalyse dar.

Im Bauwesen werden Schwingungsanalysen nur in sehr seltenen, sofern notwendigen, Fällen angewendet. Dennoch werden Bauwerke nach Bachmann [Bac96] unter anderem durch folgende Vibrationen beeinflusst:

- personeninduzierte Schwingungen,
- maschineninduzierte Schwingungen,
- windinduzierte Schwingungen und
- Schwingungen infolge Verkehr und Bautätigkeiten.

Für den Lastfall Wind ist die Anwendung dynamischer Windbetrachtungen in DIN 1055-4:2005-03 - Abschnitt 6.2 und Abschnitt 11 geregelt. Hierbei werden schwingungsanfällige und nicht-schwingungsanfällige Konstruktionen unterschieden. Aber auch bei Brücken können verschiedene Verfahren zum Abschätzen der Schwingungsanfälligkeit einer Konstruktion angewendet werden. Sofern Brücken nach diesen Hinweisen einer möglichen Schwingungsgefahr ausgesetzt sind, ist eine Schwingungsanalyse durchzuführen. Hierbei werden vor allem Behaglichkeitskriterien der Nutzer angesetzt. Eine umfangreiche Aussage hierzu ist in DIN 4150 (Schwingungen im Bauwesen) und in „Vibration Problems in Structures“ [Bac96] dargestellt.

Für den Nutzer akzeptierbare Schwingungseinwirkungen sind in DIN 4150 mit dem KB-Verhältnis definiert:

$$KB = d \cdot \frac{0.8 \cdot f^2}{1 + 0.032 \cdot f^2}$$

Die KB-Intensitäten haben je nach Gebäudenutzung und Tages- bzw. Nachtzeit unterschiedliche Grenzwerte, vgl. Abbildung 2.40.

In DIN 4150 sind zudem die vom Menschen ohne Schaden wahrnehmbaren Schwingungen definiert, vgl. Abbildung 2.41.

Wie zuvor gezeigt, sollten Menschen Schwingungen nur in bestimmten Grenzen ausgesetzt werden, da sie sich sonst unwohl fühlen und die Nutzung eines Bauwerks eingeschränkt wird. Dies kann bis zur Nichtakzeptanz von Bauwerken führen und diese sind dann unter entsprechendem Mehraufwand nachzurüsten. Als sehr bekanntes Beispiel ist hierbei die Millennium-Bridge in London zu nennen.

Aber Schwingungen können nicht nur auf Menschen einwirken, sondern auch vom Menschen, also vom Nutzer, ausgehen. So sind zum Beispiel Sporthallen und Tribünen bei

Building Type	Time	Acceptable KB value	
		continuous or repeated	infrequent
rural, residential and holiday resort	day	0.2 (0.15*)	4.0
	night	0.15 (0.1*)	0.15
small town and mixed residential	day	0.3 (0.2*)	8.0
	night	0.2	0.2
small business and office premises	day	0.4	12.0
	night	0.3	0.3
industrial	day	0.6	12.0
	night	0.4	0.4

* These values should be complied with if buildings are excited horizontally at frequencies below 5 Hz

Abbildung 2.40.: akzeptierbare Schwingungsintensitäten [Bac96]

Description	Frequency range 1 to 10 Hz Peak acceleration [mm/s ²]	Frequency range 10 to 100 Hz Peak velocity [mm/s]
just perceptible	34	0.5
clearly perceptible	100	1.3
disturbing/unpleasant	550	6.8
intolerable	1800	13.8

Abbildung 2.41.: Schwingungen [Bac96]

der Nutzung großer Menschenmengen großen Schwingungsintensitäten ausgesetzt. Diese Schwingungen können auch die Konstruktionen gefährden und schädigen. Im Planungsprozess sind somit die auftretenden Schwingungsamplituden zu berücksichtigen und rechnerisch einzuplanen. Als Beispiele sind nachfolgend die durch Personen induzierten Schwingungen bei Konzerten und Sportveranstaltungen dargestellt, vgl. Abbildung 2.42 und 2.43.

floors of concert halls and of theatres with fixed seating with classical concerts or “soft” pop-concerts only	$f_1 > 3.4 \text{ Hz}$
floors of concert halls and of theatres with fixed seating and spectator gallery structures with “hard” pop-concerts	$f_1 > 6.5 \text{ Hz}$
spectator gallery structures with fixed seating and lateral swaying and singing audience	$f_{1horiz} > 2.5 \text{ Hz}$

Abbildung 2.42.: Durch Personen verursachte Schwingungen bei Konzerten [Bac96]

	Sport floors	Dance floors
Reinforced concrete structures	$f_1 > 7.5 \text{ Hz}$	$f_1 > 6.5 \text{ Hz}$
Prestressed concrete structures	$f_1 > 8.0 \text{ Hz}$	$f_1 > 7.0 \text{ Hz}$
Composite structures	$f_1 > 8.5 \text{ Hz}$	$f_1 > 7.5 \text{ Hz}$
Steel structures	$f_1 > 9.0 \text{ Hz}$	$f_1 > 8.0 \text{ Hz}$

Abbildung 2.43.: Durch Personen verursachte Schwingungen bei Sportveranstaltungen [Bac96]

Vor allem bei Konstruktionen welche direkt für Sprünge geschaffen werden und somit unmittelbar Schwingungen ausgesetzt sind, sollten die möglicherweise auftretenden Frequenzbereiche in der Planung berücksichtigt werden. Hierzu zählen unter anderem Sprungtürme für Wassersportveranstaltungen, vgl. Abbildung 2.44 und 2.45.

Aufgrund stetig höher gebauter Türme, zunehmend leichter und filigraner Brücken und materialsparenderer Treppenkonstruktionen wird in naher Zukunft die Schwingungsanalyse im Bauwesen häufiger angewendet werden müssen. Doch neben der Schwingungsanalyse sind konstruktive Maßnahmen zu ergreifen, welche schwingungsresistente und dennoch filigrane Bauweisen erlauben. Eine mögliche Anwendung stellen aktive und smarte Materialien dar. Diese Materialien können in genau identifizierten Bereichen eingesetzt werden. Die auf diese Weise verstärkten Tragwerke können im Moment des Lastauftritts ihre Steifigkeit anpassen und somit die Schwingungsbelastung reduzieren und tilgen. Das Tragwerk

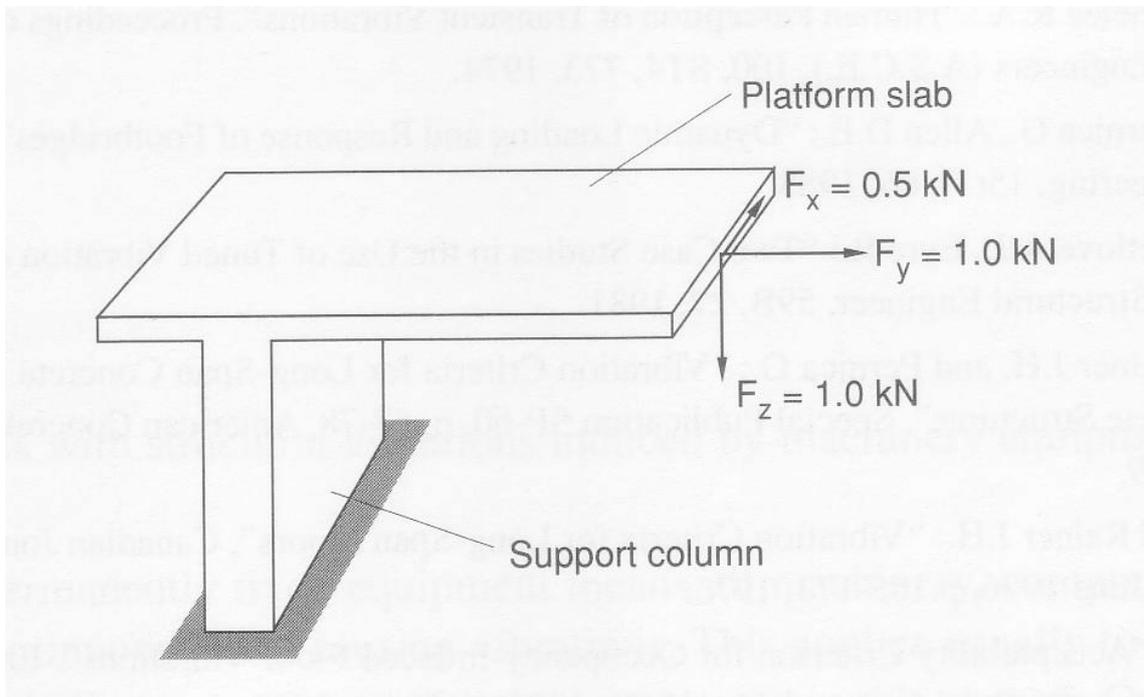


Abbildung 2.44.: Sprungturm [Bac96]

Frequency bounds	without spring board	with spring board
Support column vibrations (all fundamental modes in longitudinal and lateral sway and in twist)	$f_1 \geq 3.5 \text{ Hz}$	$f_1 \geq 5.0 \text{ Hz}$
Rigid-body vibration (flexibility of foundation)	$f_1 \geq 7.0 \text{ Hz}$	$f_1 \geq 10.0 \text{ Hz}$
Slab vibration	$f_1 \geq 10.0 \text{ Hz}$	$f_1 \geq 10.0 \text{ Hz}$

Abbildung 2.45.: Sprungtrum für Wassersport [Bac96]

weist also eine höhere Steifigkeit auf. Diese Verfahren werden auch bei der Stabilisierung von Flugzeugtragflügeln für die einzelnen Flugzustände angewendet, vgl. 2.2.1.

Wie schon zuvor beschrieben sind unterschiedliche Bauwerke und Bauteile unterschiedlichen Schwingungsbelastungen ausgesetzt. Diese unterschiedlichen Belastungen haben ganz eigene Charakteristika hinsichtlich Erscheinung und Frequenz.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Frequenzerscheinungen sind für die einzelnen Bauteile und Anwendungen verschiedenartige Materialien einzusetzen. Diese aktiven Materialien sind vor allem hinsichtlich realisierbarer Dehnung, zulässiger Spannung und den notwendigen Aktivierungszeiten zu klassifizieren.

Neben der simultanen Reaktion von Brückenbauwerken auf dynamische Lasteinwirkungen, muss die Möglichkeit der Lastfrüherkennung untersucht werden. Diese Herangehensweise wird zum Beispiel der Monte Rosa Hütte in der Schweiz bei der Gebäudetemperierung angewendet, vgl. Abbildung 2.46.



Abbildung 2.46.: Monte Rosa Hütte [BA10] und [Asc10]

Sofern diese Techniken auch für Lasteinwirkungen angewendet werden können, ist die Anzahl der einsetzbaren Materialien ein Vielfaches höher. Des Weiteren ist auch der Energieverbrauch für eine mögliche ständige Grundaktivierung wesentlich geringer.

3. Leichtbau und die Vorteile von Faserverbundstrukturen

3.1. Leichtbau

Der Leichtbau ist in allen technischen Bereichen und dem Design ein häufig genutzter Begriff und ein umfangreiches Entwurfsziel. So werden hauptsächlich Flugzeuge, Fahrzeuge, Sportgeräte und bewegte Bauteile hinsichtlich geringer Masse und damit einhergehend geringem Materialverbrauch optimiert. Hierdurch kann die Nutzlast gesteigert und gleichzeitig der Energieverbrauch reduziert werden. Der Leichtbau wird häufig in folgende Zweige unterteilt, vgl [Deg09]:

- stofflicher Leichtbau (Leichtbauwerkstoffe)
- Formleichtbau (z.B. Hohlstrukturen)
- Fertigungsleichtbau (z.B. integrale oder gefügte Bauteile)
- Konstruktionsleichtbau (materialsparend)
- Funktionsleichtbau (z.B. Integration oder Reduzierung von Funktionen)

Doch neben den verschiedenen Leichtbauarten werden auch Innovationen auf den nachfolgenden Gebieten erzielt und technisch umgesetzt:

- Neue Werkstoffe (Faserverbundstrukturen, hochfeste Stähle, Titan, Aluminium, Magnesium)
- Optimierungsverfahren (Form- und Topologieoptimierungsansätze, ebenso wie adaptive Form- und Topologieoptimierungsverfahren)
- Erforschung der Natur hinsichtlich biologischer Vorbilder in Form von:
 - Untersuchung und Erforschung biologischer Materialien (Faserverbunde, Schäume)
 - Untersuchung der Optimierungs- und Selektionsprozesse und Übertragung auf technische Nutzbarkeit (Soft-Kill-Optimization)
 - Untersuchung biologischer Gesamtstrukturen (Verzweigungen, Schalen, Öffnungen und Aufkantungen an Schalen, Netzstrukturen)

Im Bereich der Leichtbaustrukturen sind neben den vorteilhaften Eigenschaften verschiedene Besonderheiten hinsichtlich Struktur- und Materialverhalten zu beachten, vgl.[Deg09]:

- Schwingungsverhalten (Neigung zu erhöhten Schwingungen)
- Verformungsverhalten (Neigung zu großen Verformungen)
- Kippen schmaler, hoher Träger
- Stabilitätsverlust (Biegedrillknicken)
- Plattenbeulen

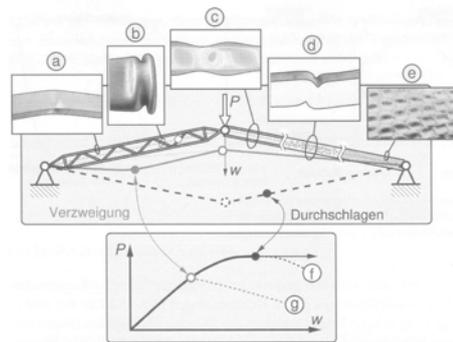


Abbildung 3.1.: Verschiedene Versagensarten im Leichtbau [Deg09]

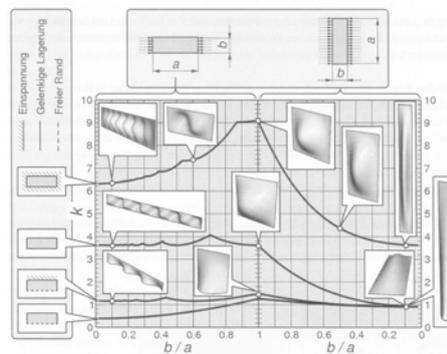


Abbildung 3.2.: Plattenbeulen nach [Deg09]

Diese kurze Einführung ist als grober Überblick des Leichtbaus zu verstehen und kann durch weitergehende Literatur [Deg09] und [Wie07] vertieft werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden biologische Leichtbaustrukturen, deren Übertragung auf das Bauwesen und Leichtbaustrukturen im Bauwesen am Beispiel von Faserverbundstrukturen näher erläutert.

3.2. Biologische Faserverbundstrukturen

Die zuvor beschriebenen Ansätze des Leichtbaus werden im Bereich der Natur seit vielen Jahrtausenden Tag für Tag angewendet. Auf diese Weise werden Strukturen und Materialien verbessert, optimiert und gegebenenfalls eliminiert, sofern sie den geforderten Ansprüchen nicht genügen. Hierdurch ist die Biologie ein großer Lehrmeister auf dem Gebiet der Formoptimierung und Materialwissenschaften. Diese Techniken werden immer häufiger untersucht und unter dem Begriff der BIONIK die technische Abstraktion vollzogen. Eine umfangreiche Anzahl an Büchern und Schriften zum Thema hat Herr Werner Nachtigall verfasst, welche die hier aufgeführte Zusammenfassung sinnvoll ergänzen.

Biologische Materialien zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie ein sehr günstiges Verhältnis zwischen Eigengewicht und Traglast aufweisen. Hierzu zählen zelluläre Strukturen wie Holz (vgl. Abbildung 3.3, 3.4 und 3.5) oder Knochen (vgl. Abbildung 3.6 und 3.7). „Holz ist ... ein Faserverbund aus zugfesten Cellulosefasern und einer Ligninmatrix, der überlastete Teile mit zusätzlichen Materialablagerungen verstärkt“ und Knochen bestehen aus „relativ kurzen und weichen Kollagenfasern in einer mineralischen Apatitmatrix“, vgl. [Dou09]. Vor allem zeichnen sich natürliche Systeme durch Selbstorganisation hinsichtlich Faserausrichtung und Topologieanpassung aus. „Die Einflüsse die während des Wachstums einwirken, lösen dabei die selektive Ablagerung des Fasermaterials aus. Dieser adaptive Wachstumsprozess strebt nach einer dynamischen Gleichverteilung der Kräfte“, vgl. [Dou09].

Nahezu alle in der Biologie vorhandenen lastabtragenden Materialien, Gewebe und Organe sind Faserverbunde [Jer00]. Mit Faserstrukturen hat die Natur hocheffiziente, materialminimierte Bauteile erschaffen.

Alle Faserstrukturen haben aufgrund ihrer Topologie einige Gemeinsamkeiten [Jer00]:

- Anisotrope Materialeigenschaften durch Faserorientierung
- Hierarchie in der Lastabtragung durch unterschiedliche Fasergrößen (Mikrofibrillen in Fasern)
- Heterogenität und starke Nichtlinearität im Spannungs-Dehnungsverhalten
- geringe Biegesteifigkeit

Die Zugfestigkeit von Faserstrukturen ist aufgrund der Molekülorientierung viel größer als die Druckfestigkeit [Jer00]. Gordon und Cox konnten in [Jer00] zeigen, dass die Abtragung von Zuglasten nicht in einem flächenmäßig großen zugbelasteten Bauteil, sondern über viele Lastwege abgetragen werden soll. Auf diese Weise ist die Belastung für die Einzelbauteile geringer und im System kann eine Redundanz erzeugt werden. Diese Möglichkeiten lassen sich sowohl in der Natur, bei Sehnen und Spinnennetzen, wie auch im Bauwesen bei Spannkabeln von Brückenbauwerken erkennen.

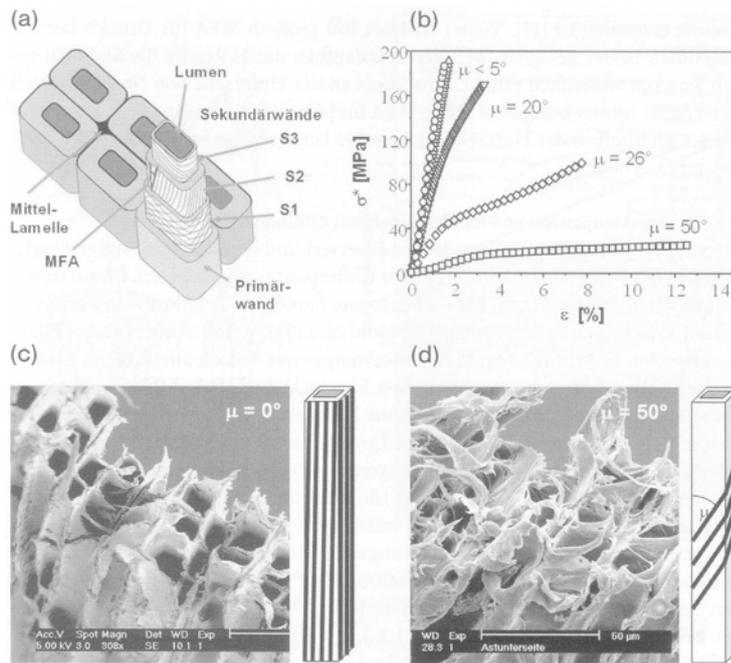


Abbildung 3.3.: Zellulosefaserverbund in der Holzzwellwand [Deg09]

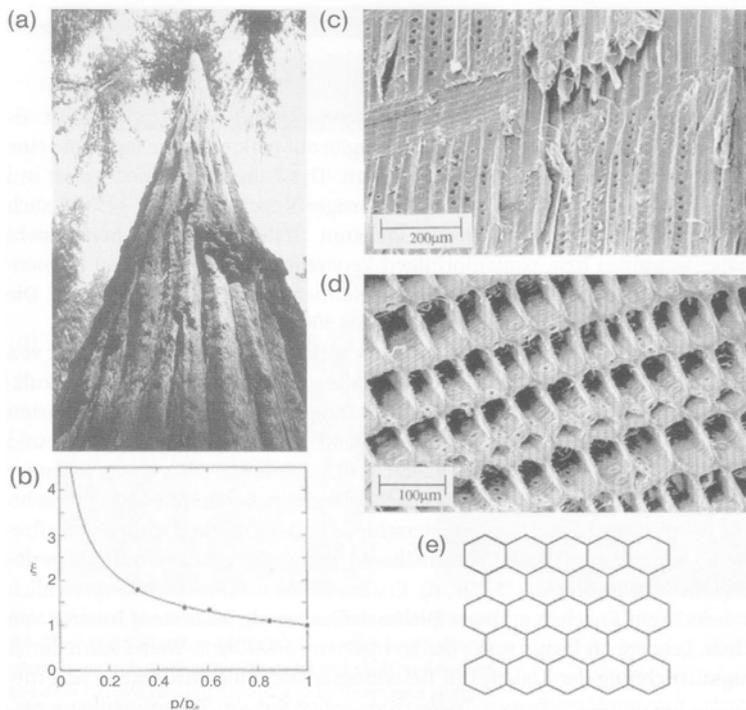


Abbildung 3.4.: Küstenmammutbaum [Deg09]

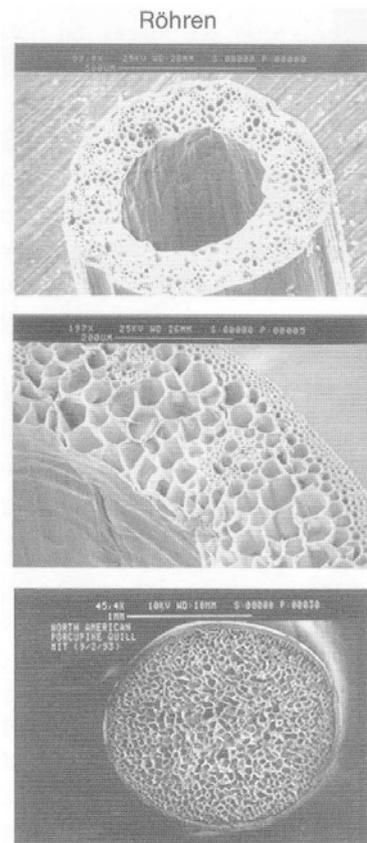


Abbildung 3.5.: Röhren-Faserverbund eines Grasstängels und des Stachels eines Stachelschweines [Deg09]

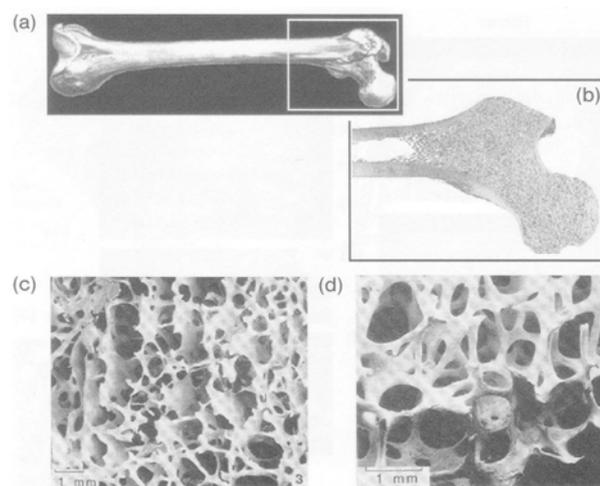


Abbildung 3.6.: Menschlicher Knochen [Deg09]

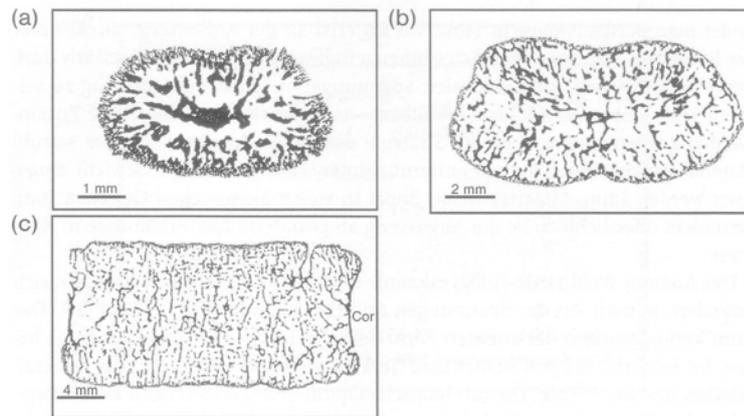


Abbildung 3.7.: Menschlicher Wirbelknochen - 17 Wochen nach Empfängnis, 5 Wochen und 8 Jahre nach Geburt [Deg09]

Neben den zellulären Materialien und Strukturen sind im Bereich der Natur Faserverbunde sehr weit verbreitet. Als Beispiele können Haare, Sehnen und Muskeln genannt werden. Faserverbunde weisen hierbei sehr häufig einen hierarchischen Aufbau auf, vgl. Abbildung 3.8. Die Vorteile der Faserverbunde sind vor allem in der auf die Belastung anpassbaren mechanischen Eigenschaften begründet. Zudem sind die Fasern in Achsrichtung sehr Zugfest. Wohingegen eine Gefahr bezüglich einer möglichen Druckbelastung und hiermit einhergehendem Faserknicken als kritisch zu betrachten ist. In der Natur gibt es verschiedene Ansätze um dem Knicken entgegenzuwirken. Hierbei sind unter anderem die Möglichkeit des Aufbringens einer Vorspannung der Fasern bzw. die Sicherung der Fasern durch Matrixmaterialien zu nennen, vgl. [Deg09].

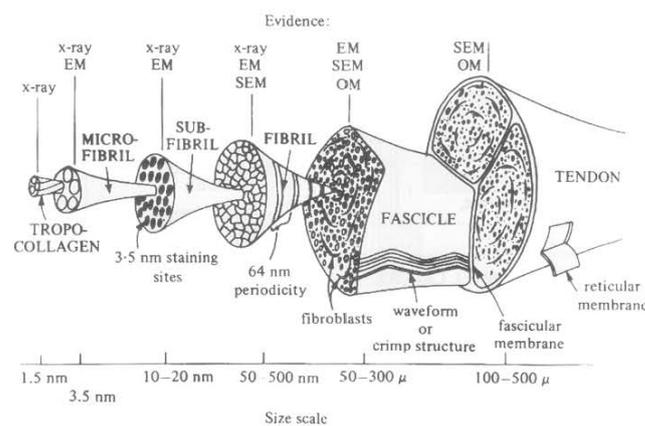


Abbildung 3.8.: Hierarchische Struktur von Zugfasern [Jer00]

Eine optimierte Anwendung von Faserverbunden ist in den Sehnen und Panzerplatten von Heuschrecken zu erkennen, vgl. [Deg09]. Die Faserausrichtung ist hierbei perfekt auf die auftretenden Lasten angepasst. So werden im Bereich der Sehnen ausschließlich parallel angeordnete Fasern entsprechend der Zugbelastung angeordnet. Demgegenüber sind die Plattenelemente (wie Flügel und Schädeldecke) aus mehreren Schichten mit gegenseitig verdreht angeordneten Fasern ausgestattet. Hierdurch können sämtliche Lasten, auch quer zur Faser abgetragen werden. Neben der Variation der Faserorientierung wird auch der E-Modul zwischen den Sehnen und Platten, aber auch innerhalb der Platten (innere Faserschichten und Außenschichten) entsprechend der Belastung angepasst. Somit ist die Heuschrecke mit all ihren Faseranwendungen und -orientierungen ein sehr gutes Beispiel materialoptimierter, adaptiver Strukturen.

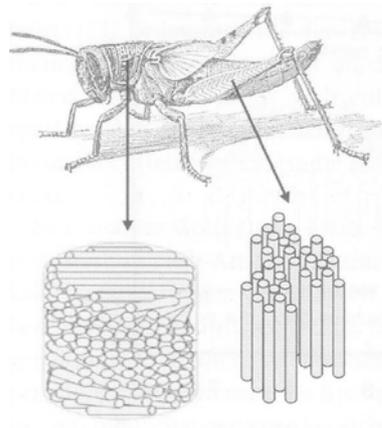


Abbildung 3.9.: Chitinfasergewebe in Heuschrecken [Deg09]

3.3. Aktuelle Entwicklungen und Konzepte im Automobilbau

Aufgrund der aktuellen Entwicklung im Automobilbau, bedingt durch die Neuentwicklung von Elektroautomobilen, werden zunehmend leichtere Fahrzeugkonzepte realisiert. Hierbei werden zunehmend als bisher „leicht“ geltende Materialien wie zum Beispiel Aluminium durch „noch leichtere“ Werkstoffe wie zum Beispiel kohlefaserverstärkte Kunststoffe ersetzt. So plant beispielsweise die Firma BMW bis zum Jahr 2013 ein komplettes Fahrzeug aus CFK herzustellen, vgl. Abbildung 3.10. Auf dem Weg zur Serienreife dieser und vergleichbarer Fahrzeugkonzepte sind noch einige technische Lösungen zu klären, welche auch für das Bauwesen von entscheidender Bedeutung sein können und für den Technologietransfer herangezogen werden können.



Abbildung 3.10.: BMW Megacity Vehicle [Grü11]

3.4. Beispiele von FVK-Anwendungen im Bauwesen

Faserverbundwerkstoffe werden seit vielen Jahrzehnten im Bauwesen angewendet. Vor allem in den 1950er und 1960er Jahren wurden einige Bauwerke in FVK errichtet. Eine umfangreiche Aufstellung hierzu ist in [GV05] dargelegt. Die Anwendung mit entsprechend großem Marktvolumen ist bisher ausgeblieben. Dennoch werden derartige Bauwerke für spezielle Anwendungen immer wieder eingesetzt. Vor allem bei der Ausnutzung der vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich Korrosionsverhalten und Beständigkeit gegenüber Medien fördert den Einsatz im Behälterbau und bei Standorten in Küstennähe. Ein weiterer Vorteil ist das günstige Verhältnis von Eigengewicht zu Tragfähigkeit.

Die Anwendung von FVK-Bauteilen ist grundsätzlich in zwei unterschiedliche Bereiche zu unterteilen. Zum einen werden lineare Bauteile im Sinne von stahlbautypischen Merkmalen und des Weiteren als Freiformflächentragwerke eingesetzt.

3.4.1. Faserverbundbauteile als lineare Bauteile

Durch das schon aufgezeigte günstige Verhalten gegenüber aggressiver Medien, werden in vielen Anwendungsbereichen Stahlbauprofile durch FVK-Bauteile substituiert. Hierbei werden stahlbautypische Profile (I-Profile, C-Profile, etc.) zum Beispiel in GFK als FVK-Bauteil hergestellt. Die Herstellung dieser Profile wird als Strangziehverfahren bezeichnet, vgl. Abbildung 3.11. In den letzten Jahren wurden unter Nutzung der Strangziehprofile weltweit verschiedene Bauwerke und Brücken errichtet (vgl. Abbildung 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 und 3.16).

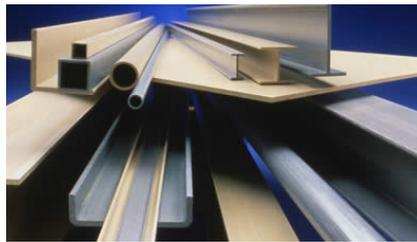


Abbildung 3.11.: Strangpressprofile - [Strongwell.com]



Abbildung 3.12.: Eyecatcher Swissbau - [www.umwelt-wand.de/newsletter/nl7-2/scobalit.jpg]

Die zuvor gezeigten Strukturen zeichnen sich durch den Einsatz linearer FVK-Bauteile aus. Zur optimalen Ausnutzung der vorteilhaften Eigenschaften von Faserverbundbauteilen sind normalkraftbeanspruchte Systeme zu entwickeln und Biegebeanspruchung sowie Querkraftbeanspruchung zu vermeiden. Des Weiteren sind vor allem die Fügedetails zu beachten. Die Fügung der einzelnen Bauteile ist vor allem im Hinblick auf eine optimale Materialausnutzung notwendig. Sehr häufig werden Fügetechniken entsprechend des Stahlbaus herangezogen. Hierbei werden die Profile punktuell miteinander verbunden, wobei die mögliche „Lasteinleitung stark von der Faserrichtung und Faserkonzentration abhängt und lokal auftretende Spannungsspitzen aufgrund fehlender Plastizität des GFK nicht umgelagert werden können“, [ES10]. Um diesem Problem entgegenzuwirken werden häufig Formteile in den Faserverbund einlaminieren und auf diese Weise eine lösbare Fügung ermöglicht.



Abbildung 3.13.: Pontresina - [www.daetwyler.ch/Technische-Komponenten.148.98.html]

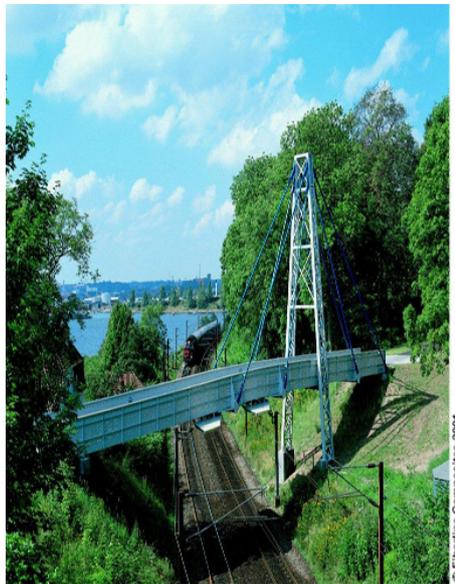


Abbildung 3.14.: GFK-Brücke Kolding - [www.denmark.dk/en/menu/Business-Lounge/Focus-Denmark/Articles/FutureBridgesOfReinforcedPlastic.htm]



Abbildung 3.15.: GFK-Brücke Schwerin - [de.structurae.de/photos/index.cfm?JS=25742]



Abbildung 3.16.: GFK-Brücke Klipphausen Sachsen - [www.baulinks.de/webplugin/2004/i/1711-gfk2.jpg]

Eine weitere Möglichkeit der Verbindung verschiedener Bauteile besteht in der Verklebung dieser. Hierbei ist allerdings der zunehmenden Transportgröße bzw. der Möglichkeit einer Verklebung unter Baustellenbedingungen Aufmerksamkeit zu schenken. Nach [ES10] ist „die Entwicklung von werkstoffgerechten Fügetechnologien für Kunststoffe“ noch nicht abgeschlossen. Einen Ansatz zu lösbaren kraftschlüssigen Verbindungen von Faserverbundbauteilen zeigt [Lin10] auf.

3.4.2. Freiformschalentragwerke als Faserverbundstrukturen

Gegenüber den zuvor vorgestellten FVK-Strukturen aus linearen Bauteilen weisen Freiformflächentragwerke aus FVK hinsichtlich des Tragverhaltens viele Vorteile auf. Schalentragwerke ermöglichen die Lastabtragung allein, oder zu großen Teilen, über Normalkräfte. Normalkraftbeanspruchte Konstruktionen weisen gegenüber biegebeanspruchten Konstruktionen geringere Dimensionen und somit geringere Materialaufwendungen auf. Die Herstellung von Faserverbundstrukturen ist neben dem Strangziehverfahren auch in Freiformflächen möglich. Als Beispiele seien hierbei Bootsrümpfe genannt. Ebenso wurde der D-Tower von Nox-Architekten und der Busbahnhof in Emsdetten von ox2-Architekten als Freiform-Faserverbund-Tragwerk geplant und errichtet, vgl. Abbildung 3.17, 3.18 und 3.19.

Als mögliche Einsatzgebiete von FVK im Bauwesen sollten vor allem im Hinblick auf Nachhaltigkeit und material- und energieminierte Systeme freigeformte Flächentragwerke unter Ausnutzung der vorteilhaften Herstellungsmöglichkeiten und gleichzeitigen statisch-konstruktiven Eigenschaften hinsichtlich günstiger Lastabtragung untersucht und in Betracht gezogen werden.

„Wenn also ein Gebäude eine gewünschte leichte, schlanke Tragstruktur besitzen soll und diese Struktur zusätzliche Aufgaben erfüllt, ist der Einsatz von FVK nicht nur rentabel, sondern oft auch die einzige Alternative. Bedingung bleibt allerdings immer ein materialgerechter und somit sparsamer Einsatz des Materials. Auf Grund seines Aufbaus, kräfteleitende Fasern parallel zur Fläche eingebettet in formgebende Matrix, ist das Material prädestiniert für die Aufnahme von Normalkräften. Als Strukturen bieten sich deshalb leichte Flächentragwerke, wie Schalen und Faltungen an. Die Verbindungen von Elementen sollte ebenfalls dem Prinzip der flächigen Kräfteübertragung folgen, um Störungen im Kraftfluss und damit verbundene Überbeanspruchungen zu vermeiden“ vgl. [FOM03].

Das Architekturbüro ox2 realisierte im Jahr 2009 einen Entwurf einer freigeformten bionisch inspirierten Busbahnhofüberdachung in München. Hierbei war von Anfang an die Materialwahl auf GFK gefallen, welcher sich für die freien Formen der Stützen und Dachkonstruktion sehr gut eignet. Da im Verlaufe der Planung die Kosten für die GFK-Variante bei weitem höher lagen, als die einer Stahlvariante wurde unter Beibehaltung der Form und äußeren Erscheinung auf den Werkstoff Stahl umgeplant. Somit wurde das optimal für GFK geeignete Projekt unter viel Aufwand in Stahl errichtet, vor Ort geschweißt und fertiggestellt, vgl. Abbildungen 3.20 und 3.21.

Wie zuvor erwähnt, können FVK-Bauteile frei geformt werden. Dies gilt nicht nur für die Schalung und somit die Außenhaut sondern auch für die innere Struktur. „Herkömmliche Faserverbundwerkstoffe bestehen aus Fasermatten und einer viskosen, aushärtenden Matrix. Die industriell gefertigten Fasermatten erlaubten es bisher nur eingeschränkt, die Anordnung und Ausrichtung der Fasern in einem Bauteil dessen spezifischen Anforderungen und Funktionen anzupassen,“ vgl. [Dou09].

Christina Doumptoti hat mit Hilfe adaptiver Methoden die Faserausrichtung in iterativen Schritten angeordnet und somit die Prozesse der Bionik hinsichtlich Wachstums- und



Abbildung 3.17.: D-Tower - Nox Architekten, Foto: Henk Vlasblom



Abbildung 3.18.: Busbahnhof Emsdetten ox2-Architekten, nach Gregor Brune in [FOM04]



Abbildung 3.19.: Busbahnhof Emsdetten ox2-Architekten - Aufbau und Detail, nach Gregor Brune in [FOM04]



Abbildung 3.20.: Busbahnhof Münchner Freiheit ox2-Architekten - [Arc10]

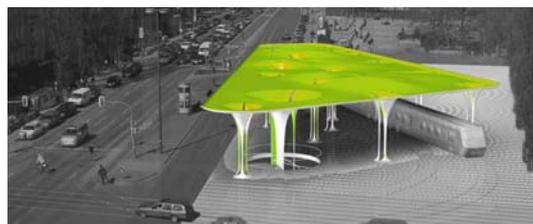


Abbildung 3.21.: Busbahnhof Münchner Freiheit ox2-Architekten - Entwurf als GFK-Tragwerk [ox2-Architekten]

Verteilungsprozessen nachgeahmt. Die Grundlage hierfür lieferten Kollagenfasern und Trabeculare Knochenstrukturen, vgl. Abbildung 3.22. Auf diese Weise konnte sie lastflussgerechte Fasergelege entwickeln. An verschiedenen Beispielen, wie z.B. einer Brücke konnte die Anwendung verifiziert werden, vgl. Abbildung 3.23 und 3.24.

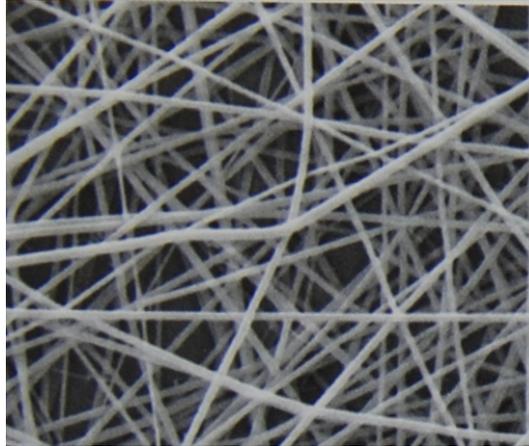


Abbildung 3.22.: Kollagenfasern in [Dou09]



Abbildung 3.23.: Iterative Modifizierung in [Dou09]

3.4.3. Entwicklung im Fassadenbau - Faserverbundwerkstoffe und Wandelbarkeit

Die vorteilhaften Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen werden seit vielen Jahren ausgenutzt um leichte und filigrane Gebäudehüllen und Fassaden zu realisieren. Dies ist vor allem auf die nachfolgenden Eigenschaften zurückzuführen, vgl. [ES10]:

- geringes Eigengewicht
 - geringe Wärmeleitfähigkeit
 - Anpassbarkeit der Oberflächentextur
 - Beschichtbarkeit und Bedruckbarkeit
 - Dauerhaftigkeit und Witterungsbeständigkeit
-

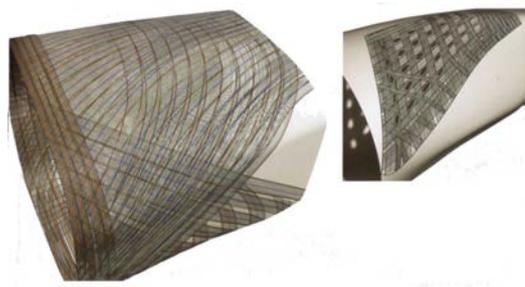


Abbildung 3.24.: Iterative Modifizierung Detail in [Dou09]

- Möglichkeit der Transluzenz.

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, speziell GFK, ist im Fassadenbau in Verbindung mit Glas als besonders günstig einzuschätzen, da GFK aufgrund des hohen Glasanteils einen mit Glasscheiben vergleichbaren thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist. Aus diesem Grund lassen sich beide „Werkstoffe kraftschlüssig und näherungsweise starr miteinander verkleben, ohne dass Zwängungen von nennenswertem Umfang entstehen“, [ES10].

Nach [ES10] ist vor allem „der Aspekt der Gewichtsminimierung von Gebäudehüllen“ bei „nicht ausreichend tragfähigem Baugrund, nachträglichen Ergänzungen/ Aufbauten, wandelbaren Strukturen etc. von Bedeutung.“

Die Wandelbarkeit von Fassaden und Dächern fasziniert Architekten wie auch Ingenieure seit langer Zeit. Frühe Beispiele der Anwendung von Wandlungsmechanismen im Bauwesen stellen unter anderem die Sonnenschutz-Segeldächer römischer Theater, so genannte Velas, dar. Aber auch in der aktuellen Architektur werden vor allem für temporäre Bauwerke verfahrbare Dachkonstruktionen realisiert. Hierbei werden sehr häufig mechanische Systeme, wie z.B. Motoren, Stellantriebe oder Gelenke benötigt. Prof. Knippers hat im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens („Biegsame Flächentragwerke“) mit anderen Projektpartnern einen gelenklosen Bewegungsmechanismus auf biologischer Grundlage untersucht und in technische Systeme übersetzt, vgl. Abbildung 3.25. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit Fassaden je nach Bedarf zu verschatten. Hierbei kommen als Lamellenmaterial Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. Faserverbundwerkstoffe eignen sich aufgrund ihrer entsprechend der Belastung ausrichtbaren Materialeigenschaften hierfür hervorragend. Ein erstes großmaßstäbliches Fassadensystem ist beim Thematic Pavillon in Zusammenarbeit mit SOM Architekten in Seoul geplant, vgl. Abbildung 3.26.

Die Forschergruppe um Prof. Knippers von der TU-Stuttgart hat sich neben den zuvor vorgestellten aus der Natur abgeleiteten Vorgängen auch mit den pflanzlichen elastischen Bewegungsvorgängen der *Aldrovanda vesiculosa* beschäftigt. Die Untersuchungen ergaben, dass durch eine geringe Bewegung in der „Konstruktion“ eine großflächige Verformung im System hervorrufen kann. Derzeit werden hierzu FE-Analysen durchgeführt, vgl. Abbildung 3.27, welche in einem weiteren adaptiven Fassadenverschattungssystem münden können.

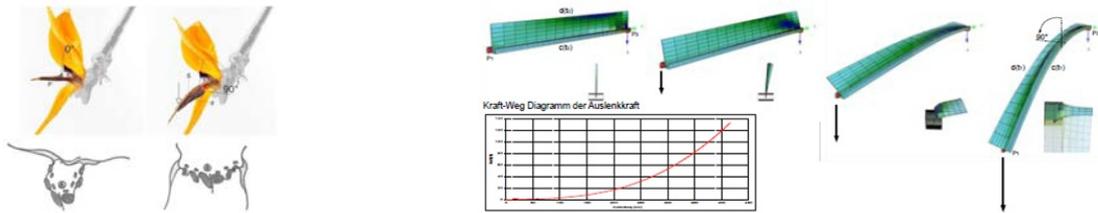


Abbildung 3.25.: Flectofin® - Biegsame Flächentragwerke, BMBF-Projekt [Sch11]



Abbildung 3.26.: Kinetic Pavillon, Seoul, [SOMA Architekten und Knippers Helbig Ingenieure]

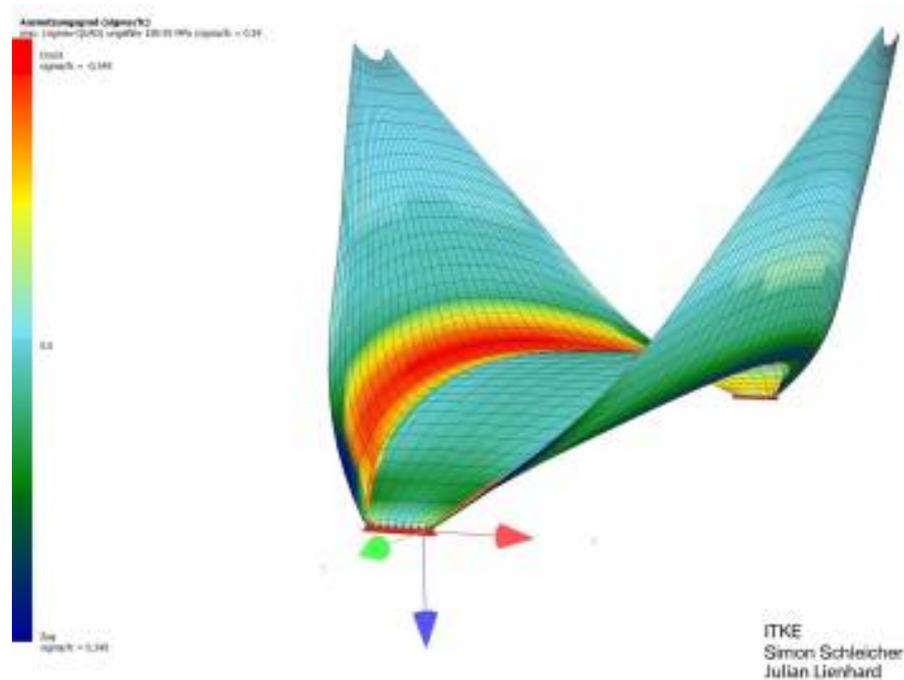


Abbildung 3.27.: Adaptive Fassadenverschattungssystem [SL11]

3.4.4. Freiformarchitektur ohne Schalungsaufwand

Die Forschergruppe um Valerie Troi der TU Innsbruck beschäftigt sich mit der Möglichkeit freie Formen zu generieren, ohne aufwändige und kostenintensive Negativformen erzeugen zu müssen. Hierbei werden biegeeweiche CFK-Rohre auf einer Freiformmaschine in Position gebracht. Anschließend werden die Schläuche mit GFK-Gelege von oben und unten umhüllt und im Pre-Preg-Verfahren härten die Schläuche wie auch die Flächengelege in der fixierten Form aus. Auf diese Weise können die vielfältigsten Konstruktionen erzeugt werden.



Abbildung 3.28.: SplineTex - frei formbare Faserverbundstrukturen, [www.splinetex.at]

3.4.5. Kunststoff-Faltwerke

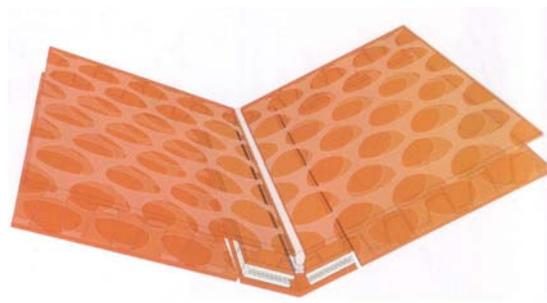
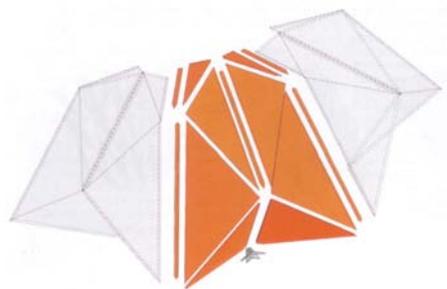


Abbildung 3.29.: Kunststofffaltwerk, [ES10]

Faltungen stellen neben linearen Bauteilen und Plattenbauteilen eine weitere Kategorie lastabtragender Bauteile dar. Faltungen sind im Bauwesen, bis auf Wellblechprofile, sehr wenig verbreitet. Eine kurze Einführung zum Thema hat M. Trautz vgl. [Tra09] gegeben: „Falten sind mindestens zweiteilige Strukturen: Sie sind erst vollständig, wenn sie mindestens aus jeweils einem aufsteigenden und einem abfallenden Flächenelement bestehen. Beide Elemente dürfen um die Faltkante drehbar sein, sie müssen jedoch in Längs- und Querrichtung der Falte kraftschlüssig verbunden sein, damit sie sich gegenseitig stützen können und in konstruktiver Hinsicht eine Einheit bilden. Faltungen sind eine Addition



Abbildung 3.30.: Kunststofffaltwerk, [ES10]

von mehreren Falten und weisen zwei grundsätzlich verschiedene technisch funktionale Eigenschaften auf: die Versteifung eines flächigen Halbzeugs aus dünnwandigem Material und die Wandelbarkeit. Beide Funktionen ergeben sich aus der strukturellen Aufgliederung in paarweise zueinander gefalteten Teilflächen, die aus der Symmetrieebene der gefalteten Fläche herausgeschwenkt werden. Dabei nimmt mit zunehmendem Auffaltungswinkel α die statische Höhe des Querschnitts zu und mit ihr Trägheitsmoment und Tragfähigkeit, vgl. Abbildung 3.31. Gleichzeitig reduziert sich die überdeckte Fläche. Technisch wird bisher fast ausschließlich die stabilisierende Wirkung von Faltungen genutzt, doch auch die Flächenveränderbarkeit öffnet für die Architektur neue Perspektiven.“

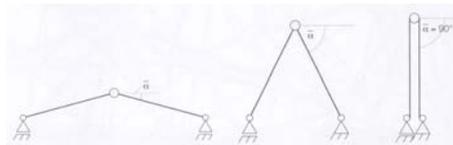


Abbildung 3.31.: Faltungen - verschiedene Faltungswinkel in [Tra09]

Arten von Faltungen

Faltungen können in die nachfolgenden Grundformen eingeteilt werden, vgl. Abbildung 3.32:

- Längsfaltungen (Longitudinalfaltungen)
- Punktfaltungen (Facettenfaltungen)

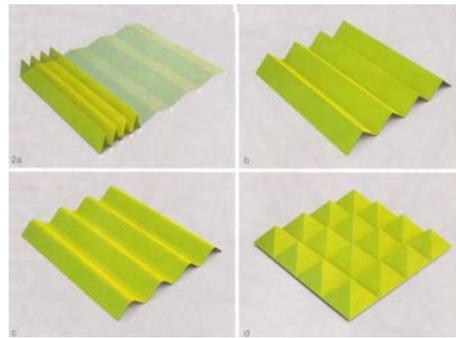


Abbildung 3.32.: Faltungsarten in [Tra09]

Durch eine unterschiedliche Wiederholung der Faltung können neben den Grundformen der Faltung verschiedene Abwandlungen erzeugt werden, vgl. Abbildung 3.33.

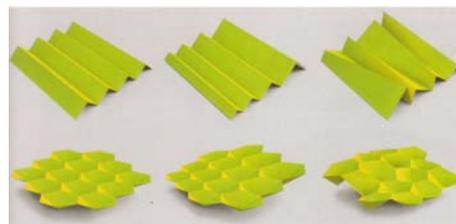


Abbildung 3.33.: gleichmäßige, regelmäßige und unregelmäßige Faltungen in [Tra09]

Nach [Tra09] lässt sich durch Schichtung mehrerer axialer oder punktgefalteter Schichten das monoaxiale Tragverhalten in ein biaxiales bzw. orthotropes überführen, vgl. Abbildung 3.34.

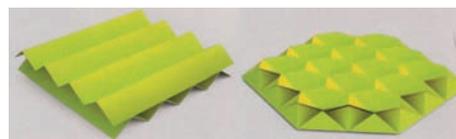


Abbildung 3.34.: doppellagige Faltungen in [Tra09]

Faltungen in der Natur

Faltungen sind in der Natur weit verbreitet. „Gräser und Blätter sind aufgrund ihrer gefalteten Querschnittsformen robuster. Falten machen die Haut und Extremitäten von Lebewesen beweglich, adaptierbar und wachstumsfähig und zugleich fest und widerstandsfähig“ [Tra09].

Blätter von Palmen weisen Längsfaltungen auf, wo Röhren verlaufen über welche die Pflanze mit Nährstoffen versorgt wird. Die Blätter entfalten sich quer zu diesen Faltungen. Des

Weiteren wirken die Faltungen für die Blätter versteifend, so dass die Blätter nicht knicken oder brechen, vgl. Abbildung 3.35.



Abbildung 3.35.: Fächerpalme in [Tra09]

Die Flügel von Käfern, wie z.B. der Marienkäfer, können während der Landung zusammengefaltet und unter der Rückenschale versenkt werden. Auf diese Weise werden die Flügel nicht beschädigt. Die Flügel können somit als adaptives, wandelbares System verstanden werden, vgl. Abbildung 3.36.



Abbildung 3.36.: Marienkäfer mit ausgebreiteten Flügeln in [Tra09]

Nach [Tra09] sind Faltungen in der Flora, bei Blättern und Rinden, „zum Teil scharfkantig“ und „meist regelmäßiger Geometrie“. Wohingegen „Hautfaltungen von Tieren in der Regel runde und weiche Faltkanten“ aufweisen, „die oft einer unregelmäßigen Frequenz und Geometrie“ folgen.

Faltungen in der Technik

Das Prinzip gefalteter Flächentragwerke zum realisieren großer Spannweiten wird seit den 1940er Jahren von Buckminster Fuller und seinen Nachfolgern angewendet. Frühe Beispie-



Abbildung 3.37.: Schildkröte in [Tra09]

le sind der Sky Break von 1949 und der Kaiser Dome Hawaii. All diese Strukturen basieren auf der Form eines Ikosaeders, welcher durch Facettenfaltung und doppelte Krümmung die Tragfähigkeit einer Schale erreicht.

Durch die Anwendung von innovativen CAD-Techniken können heutzutage nicht nur „regelmäßige, mathematisch beschreibbare geometrische Körper und Tessierungen“ [Tra09] erzeugt werden, sondern „beliebige Formen und deren Tessierung“ [Tra09]. Bei der Faltung beliebiger Formen entstehen irreguläre Faltungen mit Längs- und Facettenfaltungen, es entstehen die unterschiedlichsten Teilflächen. Zum Bau von Prototypen derartiger Strukturen oder von 1:1 Modellen bieten sich die an CAD-Systemen gekoppelte Möglichkeiten des CNC-FräSENS oder der Laserschneidetechniken an.



Abbildung 3.38.: Freiformkörper mit unterschiedlichen Oberflächenfaltungen in [Tra09]

Wandelbare Faltungen

Gegenüber den starren Faltungen stellen wandelbare Systeme hochkomplexe Systeme dar und es können nicht alle Faltformen für Bewegungsabläufe genutzt werden. Ziel des Faltmechanismus sollte eine möglichst verwindungsfreie Bewegung darstellen, dies ist vor allem bei Parallelfaltungs- und Punktfaltungskonfigurationen möglich.

Faltungen - eine Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich die Einsatzbereiche und Vorzüge von Faltungen wie folgt zusammenfassen: „Faltungen sind ein bewährtes Konstruktionsprinzip aus der Natur, dessen Potenzial in Architektur und Ingenieurwesen bisher noch kaum genutzt wird. Als Faltungen können hoch beanspruchte und weit gespannte Leichtbaukonstruktionen oder wandelbare Flächentragwerke ausgebildet werden“... „Wenngleich solche Konstruktionen in der Architektur nicht alltäglich sind und auch in absehbarer Zukunft nicht sein werden, ihre vielseitigen und innovativen Eigenschaften sind prädestiniert, Anwendungsgebiete auch in anderen Ingenieurdisziplinen zu erschließen“ vgl. [Tra09].

3.4.6. Modulare Bauweise - Vom vorgefertigten Einzelteil zum Bauwerk

In den bisherigen Abschnitten wurden unterschiedliche Fertigungsweisen und Herstellungsprinzipien dargestellt. Hierbei konnten zwei Hauptmerkmale herausgearbeitet werden. Zum einen besteht die Möglichkeit faserverstärkte Kunststoffe in Form von pultrudierten Fertigteilen bzw. zum anderen in Form von Freiformobjekten herzustellen. Die pultrudierten Bauteile bieten die Möglichkeit der einfachen Herstellung, bringen aber viele Eigenschaften des Stahlbaus mit. Auf der anderen Seite bieten die Freiformbauteile sämtliche gestalterische Freiheiten, sind aber meistens Unikate und mit entsprechendem Aufwand herzustellen. Es besteht allerdings die Möglichkeit die Vorteile der Fertigteile mit denen einer Freiformstruktur zu vereinen. Hierzu werden die Fertigteile als Grundwerkstoff für die freie Form genutzt. Dieses Konzept wird beispielhaft an dem von Prof. Frank Schüler und Thoralf Krause betreuten Objekt „Steckox“ der Westsächsischen Hochschule Zwickau erläutert, vgl. Abbildung 3.39. Es wurde aus GFK-Platten eine transportable und demontierbare Bar realisiert. Hierzu wurden die fertigen Platten mit Hilfe eines Wasserstrahls so geschnitten, dass sie in einem Steckmechanismus zu einer räumlichen Struktur geformt werden konnten, vgl. [KFA11].



Abbildung 3.39.: steckox — modulare Bar aus GFK-Fertigteilplatten, [KFA11]

3.5. Vergleichende Betrachtung von Stahlbetonschalen - Berechnungsannahmen und Systembildung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Freiformschalentragwerke als Faserverbundstrukturen vorgestellt. Nachfolgend werden verschiedene Betonschalenarten betrachtet. Diese Zusammenstellung wird im Hinblick auf vergleichende Lastannahmen und den großen Wissensvorsprung von Betonschalen gegenüber Kunststoffschalentragwerken dargelegt.

Betonschalen können hinsichtlich ihrer Bauart in folgenden Unterkategorien unterteilt werden:

- Betonschalen
- Betonrippenschalen
- Betongitterschalen

3.5.1. Betonschalen

Betonschalen werden seit den 1930er Jahren sehr verbreitet zum überspannen großer Spannweiten eingesetzt. Als eine der bekanntesten Schalen kann das Zeiss-Planetarium in Jena genannt werden, welches im Zeiss-Dywidag-Verfahren errichtet wurde, vgl. Abbildung 3.40. Das Zeiss Planetarium weist bei einem Durchmesser von 16 m eine Schalendicke von nur 3 cm auf.



Abbildung 3.40.: Planetariumskuppel Zeisswerke Jena in [Sch05]

Aufgrund der gekrümmten Flächenstruktur können Betonschalen sowohl Dehn- wie auch Biegebeanspruchungen abtragen. Diese beiden Lastabtragungsarten lassen sich für dünne Schalen entkoppelt betrachten, vgl. [Zim06]. Unter dünnen Schalen wird in diesem Zusammenhang gesprochen, sofern die „Dicke h im Verhältnis zum Krümmungsradius kleiner $1/20$ “ aufweist. Obwohl Schalentragwerke prinzipiell Biegung und Normalkräfte

abtragen können, sind reine Normalkraftbeanspruchungen, auch „Membranspannungszustand“ genannt, zu bevorzugen. Aufgrund der flächigen einschaligen Ausführung können Betonschalen infolge von Belastungen Beulen oder Durchschlagen. Eine Weiterentwicklung stellen nach [Zim06] Betonrippenschalen dar.

3.5.2. Betonrippenschalen

Betonrippenschalen haben aufgrund der Rippen gegenüber Betonschalen eine höhere Sicherheit gegen das Beulen oder eventuelles Durchschlagen. Die Tragwirkung der Betonrippenschalen wird zum einen durch die Rippen gegenüber dem Beulen und des Weiteren durch die zwischen den Rippen vorhandene Schale gewährleistet, welche die Schubsteifigkeit der Konstruktion beeinflusst. Die Herstellungsaufwand von Betonrippenschalen ist aufgrund der hohen Anforderungen an den Schalungsbau nicht zu unterschätzen. Aus diesem Grund wurden die realisierten Projekte in Fertigteilbauweise umgesetzt.

Eine der bekanntesten Betonrippenschalen ist der Palazzetto dello Sport von Nervi in Rom, welcher 1961 errichtet wurde. Die Anordnung der Rippen ist bei diesem Objekt jedoch nicht dem Lastfluss entsprechend, sondern aus architektonischen Gesichtspunkten angeordnet, vgl. [Zim06].

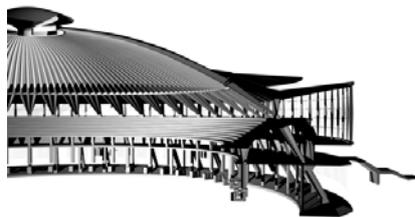


Abbildung 3.41.: Palazzetto dello Sport in [Dav10]

3.5.3. Betongitterschalen

Neben den Betonschalen- und den Betonrippenschalenkonstruktionen wurden auch Betongitterschalenkonstruktionen ausgebildet. Diesem Herstellungsprinzip folgt die Breslauer Jahrhunderthalle. Diese Konstruktion ist an die Festhalle in Frankfurt am Main angelehnt, wobei allerdings statt Stahl auf Stahlbeton als Hauptbaustoff gesetzt wurde.

Gitterschalen können als Stabtragwerke angesehen werden. „Die Stäbe liegen in einer mehrfach gekrümmten Fläche und bilden ein „flaches“ Gitter. Die Flächen sind meist synklastisch ausgebildet, wodurch sich im Idealfall keine Biegebeanspruchung der Stäbe, sondern eine reine Druckbelastung einstellt,, vgl. [Zim06].

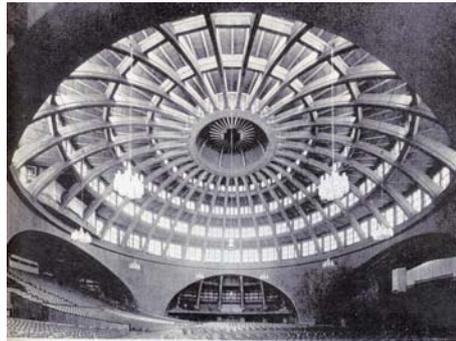


Abbildung 3.42.: Breslauer Jahrhunderthalle in [Hoe10]

3.5.4. Lastannahmen für Schalenträgerwerke - Schneelasten

Die Schneelasten für schalenförmige Tragwerke sind nach DIN 4134 und DIN 1055 anzusetzen. Die Belastung infolge Schnee kann laut [Zim06] auch entsprechend des Air Structure Institute (ASI) berücksichtigt werden. Hierbei sind die Schneelasten „dreieckförmig anzusetzen“ und weisen ein Maximum am höchsten Punkt der Halle auf und laufen zu den Seiten zu Null aus. Wenn ein Schalenwinkel von 30° überschritten wird, ist keine Schneelast mehr anzusetzen.

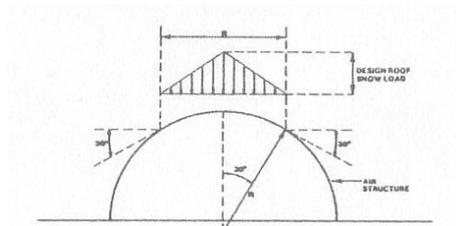
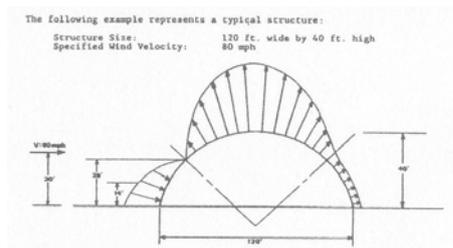


Abbildung 3.43.: Schneelast nach ASI in [Zim06]

3.5.5. Lastannahmen für Schalenträgerwerke - Windlasten

Die Windlasten stellen eine der maßgebenden Belastungen für sämtliche Tragwerke dar und sind für schalenförmige Bauwerke nach DIN 4134 anzusetzen. Nach DIN 4134 und ASI kann „der Winddruck rechtwinklig zur Tangentialfläche der unverformten Halle angesetzt werden“, vgl. [Zim06]. Die Membranspannungen von Kuppeln können überschläglich mittels der aerodynamischen Widerstandsbeiwerte C_y und C_z ermittelt werden, vgl. Abbildung 3.45. Mit Hilfe der Widerstandsbeiwerte können die Belastungen P_x und P_y berechnet werden.

Diese Lastannahmen gelten für regelmäßige Schalenträgerwerke. Bei der Planung, Berechnung und Ausführung von Freiformschalenträgerwerken sind die jeweiligen Schnee- und ins-

Abbildung 3.44.: C_y und C_z für kuppelförmige Hallen in [Zim06]
$$P_z = q_0 \cdot A_z \cdot C_z \quad \text{Gl. 12}$$

$$P_y = q_0 \cdot A_y \cdot C_y \quad \text{Gl. 13}$$

A_y die Aufrissfläche des gesamten Bauwerkes auf der zur Windrichtung senkrechten Ebenen [m²]
 C_y der Beiwert für den aerodynamischen Widerstand des gesamten Bauwerkes [-]
 A_z die Grundfläche [m²]
 C_z der Beiwert für die [lotrechte] Auftriebskraft [-]
 q_0 der rechnerische Staudruck [kN/m²] nach Tabelle 11

Höhe über Gelände [m]	Windgeschwindigkeit v [m/s]	Staudruck q_0 [kN/m ²]
0 bis 8	28,3	0,5
8 bis 20	35,8	0,8
20 bis 100	42,0	1,1
über 100	45,6	1,3

Abbildung 3.45.: Staudruck q_0 in [Zim06]

besondere Windlastbeiwerte zu ermitteln. Hierzu sind Windkanalversuche oder numerische Verfahren (Computer-Fluid-Dynamische Berechnungen) anzustreben.

3.5.6. Tragverhalten von Schalenträgwerken - Formfindung und historische Entwicklung

Durch die Theorie der Kettenlinie, welche von Bernoulli 1686 aufgestellt wurde, war es schon frühzeitig möglich rein auf Druck beanspruchte Schalen zu entwickeln. Antonio Gaudi hat als einer der ersten diese Theorie für effiziente Schalen verwendet. Bei den ersten Schalenträgwerken wurden Hängemodelle als biegeeweiche Konstruktionen aufgehängt. Diese rein auf Zug beanspruchte Konstruktionen weisen bei der Umkehrung nur Druckkräfte auf. Nach [Zim06] weichen moderne Gitterschalen aufgrund von Rationalisierung bei der Herstellung und Wirtschaftlichkeit gegenüber den klassischen Schalen von den Grundregeln ab.

3.5.7. Tragverhalten

Das Tragverhalten von Gitterschalen kann nach [Zim06] wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Tragfähigkeit einer Gitterschale wird bestimmt durch die Steifigkeit des Gitters und der Ränder sowie der Krümmung und der Form.
- Gitterschalen sind überwiegend synklastisch ausgebildet.
- Mit wachsender Krümmung (synklastisch oder antiklastisch) nimmt die Tragfähigkeit zu.
- Die Detailausbildungen der Knoten und der Maschen bestimmen die Steifigkeit der Gitterschale. Es muss gewährleistet sein, dass die Knoten nicht gedreht werden können.
- Zwei Stabilitätsfälle sind zu unterscheiden: Das Knicken einzelner Stäbe und das lokale oder globale Beulen des Gitters. Ein einzelner Stab kann Versagen oder Ausknicken, ohne dass die gesamte Gitterschale versagt. Ebenso muss das Beulen eines begrenzten Bereichs nicht zum Versagen der kompletten Schale führen.

3.5.8. Stabilität

Bei Schalentragwerken stellen die Nachweise der Stabilität das Hauptaugenmerk dar. Nach Schlaich [SS02] können folgende Nachweisverfahren angewendet werden:

- Die „perfekte“ Gitterschale wird unter Last so lange berechnet, bis sich bei geometrisch nichtlinearer Berechnung, ein Stabilitätsversagen einstellt.
- Auf Basis des letzten konvergenten Berechnungsschritts wird eine Eigenwertanalyse durchgeführt, aus der sich Eigenformen und Eigenfrequenzen ergeben.
- Normierungen der Eigenformen - in Anlehnung an DIN 18800 - auf einen Maximalwert.
- Ansetzen dieser Maximalwerte als spannungslose Vorverformung.
- Geometrisch nichtlineare Berechnung mit Vorverformung.

Für Schalentragwerke können folgende Stabilitätsnachweise geführt werden:

- Einzelstabilität - Ein einzelner Stab wird auf Knicken nachgewiesen. Dieser Nachweis erfolgt, nach [BW05], an einem imperfekten System. Hierbei muss jedoch die richtige Eigenform bzw. Imperfektion gefunden werden.
-

- Lokale Stabilität - Das Durchschlagen eines einzelnen Knotens aus der Gitterschalengeometrie wird berechnet. Nachgewiesen wird die Stabilität durch das Festigkeitsverhalten anhand von geometrisch nichtlinearen Berechnungen. Berücksichtigt werden hierbei auch Mischformen des lokalen und globalen Versagens.
- Globale Stabilität- Das Versagen der Gesamtstruktur wird nachgewiesen. Die Tragwerkshaut selbst wird nicht durch das Versagen einzelner Stäbe geschädigt. Der Nachweis wird ebenfalls anhand einer imperfekten Gitterschale durchgeführt. Die Schnittgrößen werden mit einem elastischen Materialgesetz ermittelt und im Anschluss auf Biegung geprüft - einachsige Biegung um die Y-Achse, einachsige Biegung um die z-Achse und Normalkraftbeanspruchung.

„Bei allen genannten Nachweisen spielt die Imperfektion in Form einer geometrischen Ersatzimperfektion eine bedeutende Rolle“, [Zim06]. Nach DIN 18800 Teil 2 und 4 können Hilfen zur Bestimmung von Imperfektionen für Einzelstäbe und Fachwerke genutzt werden.

3.5.9. Imperfektionen

Als Imperfektion kann die niedrigste Eigenform als Ersatzimperfektion angesetzt werden, wodurch die geringste Traglast ermittelt wird, vgl. [BKS95]. Die Analyse der Struktur erfolgt vergleichend mit und ohne Ansatz der Imperfektion.

Die Ermittlung der Imperfektionen sollte als globaler und lokaler Stabilitätsversagensfall berechnet werden. Die globalen und lokalen Versagensarten können wie folgt untersucht werden:

- Die Skalierung der Imperfektion im Verhältnis zur Spannweite sollte z.B. $d/500$ betragen, sofern ein globaler Versagensfall eintritt.
- Sofern von einem lokalen Stabilitätsversagen auszugehen ist, sollte die Differenz der Z-Koordinaten benachbarter Knoten als Referenzgröße verwendet werden, vgl. [Zim06].

3.6. Strukturoptimierung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die verschiedenen Konzepte und Möglichkeiten des Leichtbaus aufgezeigt. Es konnte vor allem der Einfluss der Form einer Struktur auf den Lastfluss und der damit verbundene Materialaufwand dargelegt werden. Im nachfolgenden sollen verschiedene mögliche Optimierungsschritte kurz vorgestellt und erläutert werden.

Zu entwickelnde Strukturen, vor allem Strukturen des Leichtbaus, können während des Konstruktionsprozesses mit Hilfe verschiedener Optimierungsalgorithmen optimiert werden. Nach Ramm, vgl. Abbildung 3.46, zählen hierzu:

- Topologieoptimierung
- Formoptimierung
- Bemessungsoptimierung
- Materialdesign

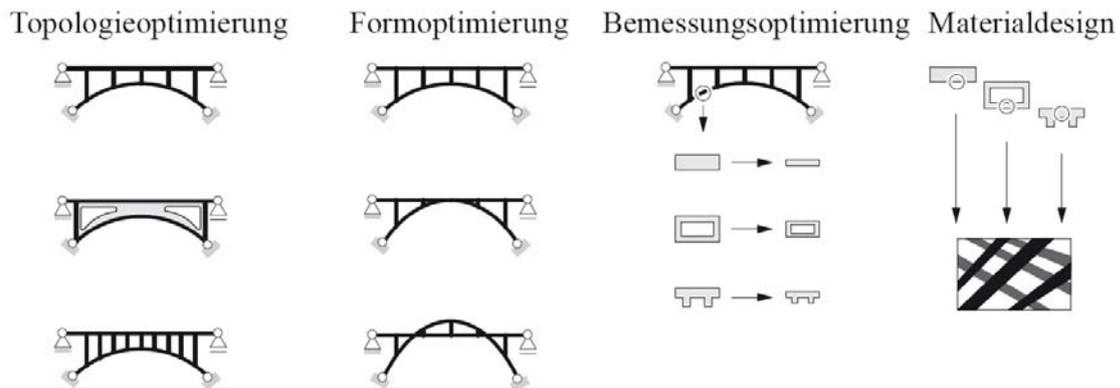


Abbildung 3.46.: Strukturoptimierung nach Ramm [Lip07]

3.6.1. Topologieoptimierung

Mit Hilfe der Topologieoptimierung kann die Verteilung von Material in einem zuvor definierten Designraum frei verteilt werden und somit die Bereiche festgelegt werden in denen die Belastungen abgeleitet werden sollen, vgl. [Wal11] und [Deg09]. Auf diese Weise können mögliche Anordnungen für Aussparungen und Verstärkungszonen ermittelt werden.

Weitere Ausführungen zum Thema Topologieoptimierung sind in folgenden Quellen einsehbar: [Lip07] und [Deg09].

3.6.2. Formoptimierung und -findung

Formoptimierung

Für eine bereits festgelegte bzw. gefundene Topologie kann die Form durch Verschiebung einzelner Knotenkoordinaten hinsichtlich dem Kräfteverlauf angepasst werden, vgl. [Lip07]

Für nähere Informationen zum Thema Formoptimierung wird auf die Ausführungen in [BD05] und [Deg09] hingewiesen.

Formfindung

Neben den Möglichkeiten der Optimierung von Tragwerks- und Strukturformen werden im Nachfolgenden verschiedene Formfindungsmethoden vorgestellt. Formfindungen werden zur Entwicklung von Tragwerken im Bauwesen eingesetzt. Es können grundsätzlich zwei Formfindungsmethoden aufgezeigt werden, die experimentelle und die numerische Formfindung.

Experimentelle Formfindung

Die experimentelle Formfindung wird seit vielen Jahrhunderten im Bauwesen angewendet um dem Lastfluss angepasste Tragwerke zu entwickeln. Zu den gängigsten experimentellen Formfindungsarten gehören:

- Hängemodelle (Gips, Wachs, Netze)
- Fließformen
- pneumatische Formen
- Seifenhautmodelle

Auf diese Weise können relativ kostengünstig und schnell maßstabsgetreue Tragstrukturen formgefunden werden.

Bei den Hängemodellen stellt sich während der Formfindung eine Kettenlinie ein, die Struktur ist somit rein infolge Zugkräften beansprucht. Versteift man die Struktur in diesem Zustand, so entsteht ein Tragwerk welches nur Druckkräften ausgesetzt ist.

Die größte Herausforderung bei der experimentellen Formfindung ist die Übertragung der Messwerte (Verformungen, Spannungen, usw.) auf den realen Bauwerksmaßstab. Hierbei müssen die beteiligten Ingenieure und Konstrukteure höchste Sorgfalt walten lassen.

Numerische Formfindung

Numerische Formfindungsmethoden bieten im Gegensatz zu den experimentellen Formfindungsmethoden eine höhere Präzision, vor allem bei der Möglichkeit der Messung von Ergebnissen und der Übertragung auf den realen Maßstab. Aus diesem Grund werden die numerischen und die experimentellen Formfindungsmethoden parallel eingesetzt, vgl. [Wal11].

In [Wal11] sind die wesentlichen numerischen Formfindungsarten kurz zusammengefasst:

- Dynamische Relaxation
- Kraftdichtemethode (Force Density Method)
- Flächenspannungsdichtemethode (Surface Stress Density Method)
- Feder-Masse-Systeme als digitale Hängemodelle
- geometrisch-nichtlineare, elastostatische Analyse auf Basis der FEM
- Deformationsmethoden in Kombination mit Optimierungsstrategie

Für nähere Informationen zum Thema Formfindung wird auf die Ausführungen in [Ble00] hingewiesen.

3.6.3. Materialoptimierung - Faserorientierung

Neben der Querschnittsoptimierung, wobei der optimale Querschnitt für die jeweilige Struktur ermittelt wird, ist die Materialoptimierung ein wesentlicher Planungsschritt bei der Erzeugung materialgerechter leichter Tragwerke.

„Mit festgelegter Topologie und definierten Form- und Querschnittswerten ist die Anpassung des verwendeten Werkstoffs an die Belastung und die Entwurfskriterien das Ziel des Materialdesigns“, [Lip07].

Die Auslegung von Faserverbundstrukturen hinsichtlich optimal ausgerichtetem Fasergehalt stellt für viele Ingenieure eine wesentliche Aufgabe dar, da hierbei die größten Möglichkeiten der Materialeinsparung liegen und die Vorteile dieser Konstruktionsarten ausgenutzt werden können. Bei der Ermittlung der optimalen Faserausrichtung wird häufig auf bionische Grundprinzipien zurückgegriffen. „Die Frage ist, ob die bionisch motivierte Faserorientierung längs der Hauptspannungsrichtung wirklich die optimale Faserplatzierung darstellt oder ob es eventuell weitere Hinweise bezüglich des optimalen Faserverlaufs gibt“, [Mol11].

Die rechnerische Ermittlung des Fasergehaltes ist für komplexe Strukturen nur durch die Berechnung der Hauptspannungen möglich und erst seit Einführung der computer-gestützten Finite-Element-Methode durchführbar. Aber auch vor der Erfindung der Computertechnik wurden Strukturen hinsichtlich dieser Kriterien optimiert, hierzu wurde ein mechanisches Messprinzip verwendet, das Reißlackverfahren. „Dieses Reißlackverfahren, auch Dehnungslinienverfahren genannt (Maybach, 1924 und Stresscoat, 1938), funktioniert wie folgt: Nach dem Trocknen des ‚lackierten‘ Bauteils wird die Last aufgebracht. Der spröde Lack reißt quer zur Richtung mit der größten Zughauptspannung. Damit ist die (Faserquer-) Richtung der 2. Hauptspannung visualisiert. Die Fasern der 1. Hauptspannungsrichtung verlaufen dazu senkrecht. Damit dient der Reißlack als experimenteller Transformator auf das Spannungs-Hauptachsensystem und als Integrator längs einer Hauptspannungsrichtung. Die Risslinie selbst ist das Ergebnis der Integration und vergleichbar mit den aus CAIO rechnerisch ermittelten Faserverläufen,“ [Mol11].

Eine weitere Schwierigkeit in der Auslegung von tragenden Bauteilen ist in der ausgeprägten Nichtlinearität begründet, dies ist vor allem auf „... große Deformationen, Kontakte, Bauteilversagen ... und der hohen Anzahl von Designvariablen des Materials (Topologie, Anzahl der Schichten, Faserorientierung“ [MW10] zurückzuführen. Aus diesem Grund „... sollte ein Simulations- und Materialmodell für einen solchen Ansatz demnach grundsätzlich nichtlinearer Natur sein“ [MW10].

[MW10] schlägt aus diesem Grund folgende Vorgehensweise vor: Da sich aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Variablen die Berechnungszeiten sehr lang wären, sollten die wesentlichen Variablen in den ersten Bemessungszyklen reduziert und auf ein lineares Materialmodell zurückgegriffen werden. In späteren Dimensionierungsphasen kann das Bauteil unter Beachtung der Nichtlinearität detailliert berechnet werden, vgl. [MW10].

Die Volkswagen AG hat sich nach [MW10] zur einer zweistufigen Optimierungsstrategie entschieden und eine Konzept- und Feintuningphase eingeführt. „In der Konzeptphase wurde zunächst mittels einer Topologieoptimierung eine materialunabhängige Untersuchung durchgeführt, wobei die Materialeigenschaften als linear angenommen wurden. Ziel dieser ersten Phase war der Erhalt von Aussagen über den grundlegenden Aufbau der Komponente beziehungsweise die Lastpfade und die Orientierungen der verschiedenen Verbundfaserschichten. Desweiteren konnten aus den Ergebnissen Vorschläge für eventuelle Rippenpositionen im Bauteil abgeleitet werden. So zeigte sich in dieser Phase beispielsweise, dass die Komponente in den Anbindungspunkten und im mittleren Bereich mit Rippen verstärkt werden sollte.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der eigentliche Prozess der Verbundmaterialoptimierung angestoßen, der mittels eines konzeptionellen FEM-Modells umgesetzt wurde. Der Verbundmaterialoptimierungsprozess ist an dieser Stelle in der Automobilindustrie dem der in der Luftfahrt gebräuchlichen ähnlich, allerdings haben Flugzeugkonstrukteure den Vorteil, dass sie sich meist auf den linearen Bereich beschränken können. In der Automobilentwicklung muss hingegen zumindest am Ende der Entwicklung auch der Nachweis für das nichtlineare Bauteilverhalten erbracht werden. In dieser Auslegungsphase ist es allerdings

auch für den Automobilentwickler von Vorteil, eine lineare Physik zugrunde zu legen, um sich zunächst den grundlegenden Fragestellungen zur Verbundmaterialgestaltung widmen zu können. Der Verbundmaterialoptimierungsprozess sieht eine dreistufige Optimierung vor. In einer sogenannten FreeSizeOptimierung wird bestimmt, wo die einzelnen Faserlagen der jeweiligen Orientierung benötigt werden, in einer SizeOptimierung wird die Anzahl der Schichten bestimmt, und in der letzten Stufe wird durch eine Shuffle-Optimierung der optimale Schichtenaufbau ermittelt. Die Ergebnisse, zeigen die Belastungen im Bauteil in den jeweiligen Faserrichtungen (0° , 45° , 90° , 45°)“ [MW10].

4. Innovative Planungswerkzeuge zur Generierung adaptiver Systeme

4.1. Parametrik in Design und Berechnung

Die zuvor dargestellten Anwendungen adaptiver Systeme erfordern bei einer Anwendung im Bauwesen grundlegend neue Anforderungen an die Bauwerke selber, an die Planer und die erforderlichen Wartungsmaßnahmen. Dies ist vor allem auf den zusätzlichen Regelungsaufwand während des Betriebes zurückzuführen. Aber auch im Bezug auf die Planungsmaßnahmen werden höhere Anforderungen notwendig. Die Gesamtmehraufwendungen in der Planung werden jedoch über die gesteigerte Ästhetik durch leichte und schlankere, wie auch ressourcenschonendere Bauwerke relativiert.

4.1.1. Parametrisches Design

In der aktuellen Architektur setzen sich mehr und mehr parametrische CAD-basierte Simulationswerkzeuge durch. Hierzu zählen unter anderem Rhinoceros[®] (Rhino[®]) von Robert McNeel & Associates bzw. Generative Components[®] von Bentley Systems. Der große Vorteil dieser Programmsysteme besteht darin, Modelle in kürzester Zeit aufgrund der Veränderung einzelner Parameter zu verändern. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zu erzeugen und hinsichtlich zu beachtender Parameter zu analysieren und optimieren. Der parameterbasierte Entwurf oder das „Computational Design“, [Men10], wird von Menges wie folgt beschrieben. „Im Computational Design wird der Architekt nicht durch den Rechner ersetzt, vielmehr wird hier die Rolle des Entwerfenden gestärkt: Der Architekt wandelt sich von einem Nutzer digitaler Prozesse zu deren Entwickler“, [Men10]. Die Arbeitsweise verändert sich von der Anfertigung von Skizzen, Zeichnungen, Plan oder Modell hin zur „Entwicklung von Algorithmen oder generativen Regeln, aus denen dann durch die Definition und Gewichtung von Einflussgrößen und Parametern ein bestimmtes Ergebnis entsteht.“

Bisher folgten alle CAD-Modelle den Regeln von Zeichenpapier und waren von allen Gesetzen der Physik frei, [Men10]. Menges beschreibt den Unterschied und die Möglichkeiten zwischen Computer Aided Design und Computational Design wie folgt: „Im Gegensatz zum Computer Aided Design macht Computational Design die Beziehung zwischen Form, Information und Formwerdung explizit. Die damit verbundene Offenlegung der Wechselbeziehungen aus algorithmischer Er- und Verarbeitung von Informationen ermöglicht es

dem Entwerfenden, den Formgenerierungsprozess durch die spezifischen Eigenheiten und Einschränkungen der Materialisierung zu „informieren“. Computational Design ermöglicht es also ein Verständnis von Form, Material, Struktur, Herstellung und Fertigung als systematische Wechselbeziehungen, in deren Möglichkeitspielraum sich der Entwurf entfalten kann. Diese wechselseitige Rückkopplung aus virtuellem Rechnermodell und materieller Konstruktion im computerbasierten Entwurfsprozess erlaubt eine neue Art der Synthese von Form- und Materialwerdung,“ [Men10].

Menges stellt des Weiteren zwei Anwendungen vor, wobei eine mit CAD-Systemen in den 1970er Jahren erarbeitet wurde und das zweite Beispiel in den 2000er Jahren als Computational Design zu bezeichnen ist.

Die Form der Multihalle in Mannheim, vgl. Abbildung 4.1, wurde mit Hilfe von Formfindungsmethoden über Hängemodelle entworfen und optimiert. Auf diese Weise konnte eine materialsparende und lastflussgerechte Konstruktion entwickelt werden. Dem gegenüber wurde das Centre Pompidou in Metz, vgl. Abbildung 4.2, aus der Grundform eines Strohhutes abgeleitet und diese Form weitestgehend beibehalten. Sämtliche weitere Bearbeitungsschritte wurden hierbei am Computer durchgeführt. So wurden zum Beispiel die sich ergebenden 100 Doppelträger in 1790 Segmente unterteilt und am Computer analysiert und bearbeitet. Hierbei wurden alle Vorgänge, bis hin zur Herstellung mittels CNC-Technik computergesteuert durchgeführt, [Men10].

Als wesentlicher Unterschied zwischen beiden Bauwerken ist die unterschiedliche Art der Formentwicklung zu nennen. So wurden bei der Multihalle optimale, materialsparende und einfach herzustellende Einzelbauteile entwickelt, wohingegen beim Centre Pompidou in Metz eine gewünschte Form bewusst realisiert werden sollte. Die große Anzahl individueller Einzelteile, wie beim Centre Pompidou, ist nur aufgrund der verfügbaren Computertechnik mit den geforderten Toleranzen zu realisieren. Doch trotz des aufwändigen Computereinsatzes ist die Multihalle dem Centre Pompidou im Hinblick auf den Materialverbrauch weit voraus. So konnten in Mannheim ca. 60 m Spannweite mit vier Schnittholzlagen von 50 x 50 mm überspannt werden. Im Gegensatz hierzu sind in Metz für ca. 50 m Spannweite sechs Brettschichtholzlagen mit den Abmessungen 140 x 140 mm erforderlich. An dieser Gegenüberstellung ist eine gewollte Formgebung und deren Umsetzung und eine konsequente lastflussgerechte Formfindung zu unterscheiden. Dieser Vergleich verdeutlicht neben der unterschiedlichen Herangehensweise die Notwendigkeit der Durchführung von Formfindungs- und Optimierungsvorgängen bei leichten, weit spannenden Bauwerken und Dächern.



Abbildung 4.1.: Multihalle Mannheim in [Men10]



Abbildung 4.2.: Centre Pompidou Metz in [Men10]

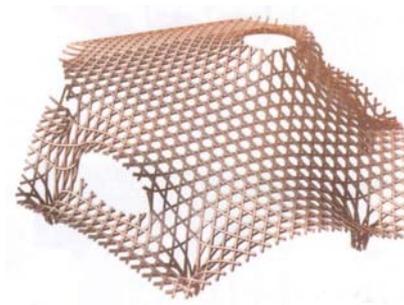


Abbildung 4.3.: Centre Pompidou Metz - Formentwicklung in [Sch10]

4.1.2. Parameterbasierte statische und dynamische Berechnung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Eigenschaften und Vorteile parametrischer Modelle bei der Formgenerierung beschrieben. Aber auch im Bereich der statischen bzw. dynamischen Berechnung von Strukturen werden vermehrt parametrische Modelle eingesetzt. Die Besonderheiten derartiger Modelle und einige Projektbeispiele werden nachfolgend vorgestellt.

Gegenüber konventionellen CAD-Modellen bilden parametrische Modelle nicht nur einen einzelnen Zustand ab. Es wird vielmehr „jeder Punkt, jede Kurve, jede Fläche, die in einem Modellierprogramm erzeugt wird“, [BGT10a]... mitsamt den zugehörigen parametrischen punktbasierten x-,y- und z- Koordinaten gespeichert. Auf diese Weise ist „Parametrische Modelliersoftware in der Lage, diese Bildungsprozesse zu speichern“, [BGT10a], und kann beliebig viele Varianten der Ausgangslösung erzeugen. Die Variation kann entsprechend vorgegebener Regeln oder anhand evolutionärer Algorithmen erfolgen, vgl. hierzu [BGT10a].

Das Projekt „Sphäre - Deutsche Bank in Frankfurt“ wurde vom Ingenieurbüro Bollinger und Grohmann gemeinsam mit dem Architekten Mario Bellini bearbeitet. Der Entwurfsansatz sah eine Kugel vor, welche durch umwickelte Bänder gebildet wird. Durch die Kugel hindurch verlaufen zwei Verbindungsbrücken. Die Planung sah zunächst vor, eine Ausgangsstruktur zu erzeugen, welche 60 Bänder über die Kugel verteilt, diese Daten wurden als 3D-Datensatz abgespeichert. In den weiteren Schritten wurden diese digitalen Daten durch einen generischen Algorithmus variiert und ein leistungsfähiges Tragwerk gesucht, wobei die Lichtraumprofile der Brücke unberührt bleiben mussten, vgl. [BGT10c].

Parametrisch generierte Strukturen bieten auch die Möglichkeit eine direkte Interaktion zwischen CAD-Entwurf und statischer Berechnung zu vollziehen. Der Entwurf der Fußgängerbrücke in Reden, vgl. [BGT10b], wurde parametrisch erzeugt und bot die Möglichkeit die Fachwerkdiagonalen frei anzuordnen. Auf diese Weise bestand die Möglichkeit die Struktur zu variieren und die Strebenkräfte direkt auszuwerten. Wobei günstige Veränderungen beibehalten und weiter untersucht und weniger optimale Varianten ausgesondert wurden. Hierbei konnte die parametrische Software sich einem Optimum der Fachwerkstrebenanordnung annähern.

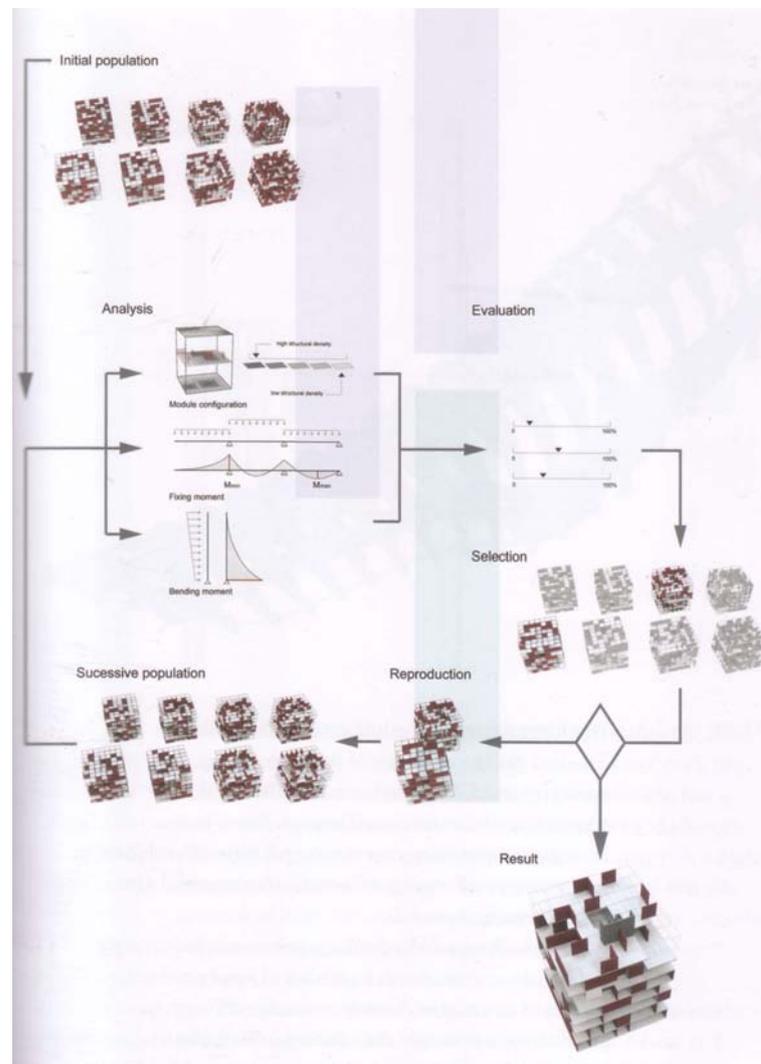


Abbildung 4.4.: Evolutionary Process in Design Engineering, [BGT10d]

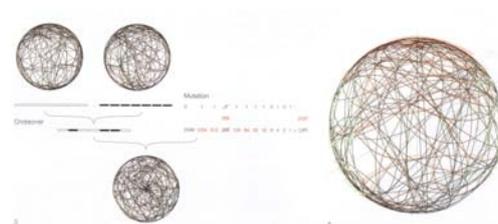


Abbildung 4.5.: Sphäre Deutsche Bank Frankfurt in [BGT10c]

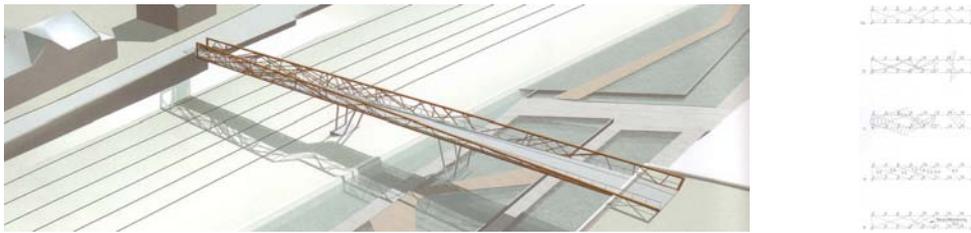


Abbildung 4.6.: Evolutionäre Fußgängerbrücke Reden in [BGT10b]

4.2. Parametrische Design-, Berechnungs-, Optimierungs- und Steuersoftware — Werkzeuge

Wie zuvor beschrieben setzen sich parametrische Modellieranwendungen, aufgrund der dadurch möglichen Optimierungsvariablen, immer häufiger im Bauwesen durch. Derzeit werden die Einzelprogramme zur Planung und zur Simulation von den beteiligten Partnern und Fachplanern nebeneinander genutzt, wobei geeignete Schnittstellen genutzt oder entwickelt werden müssen. Nach [HK10] „werden Planungs- und Simulationsumgebungen mittelfristig zusammenwachsen.“ Durch die Weiterentwicklung der Simulationswerkzeuge lassen sich immer komplexere Systeme jenseits „klassischer Stabwerksmethoden“, [HK10] berechnen und analysieren. Folgende Simulationswerkzeuge sind nach [HK10] heute schon gängige Praxis:

- Akustiksimulation
- Brandverhaltenssimulation
- Lichtsimulation
- Lüftungs-/ Strömungssimulation, vgl. Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8
- Raumbedarfssimulation
- statische Simulation (Stabwerksprogramme und Finite-Elemente-Programme)
- thermische Simulation, vgl. Abbildung 4.9
- Verkehrsstromsimulation

Eine detaillierte Übersicht über gängige Architektur-Software ist in [HK10] gegeben. Aus der Vielzahl an zur Verfügung stehender Software werden beispielhaft Rhinoceros[®] mit den möglichen Programmaufsätzen auf der Seite der Designsoftware und Sofistik[®] bzw. ANSYS[®] auf der Seite der statisch-numerischen Berechnungsprogramme vorgestellt.



Abbildung 4.7.: Strömungssimulation, [HK10]

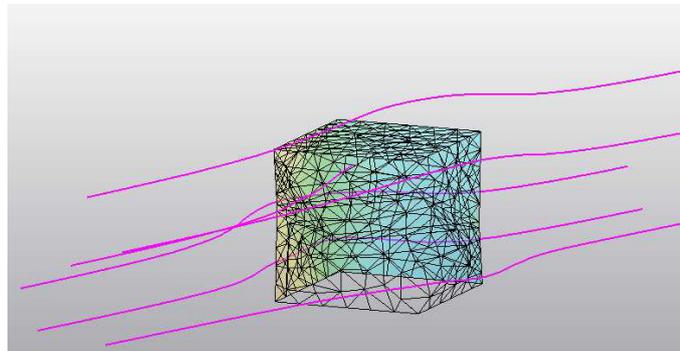


Abbildung 4.8.: Strömungssimulation des studentischen Projekts „Wir bauen den Illumaten“ an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Tragwerkslehre und Entwerfen und Tragwerkskonstruktion, Sommersemester 2011

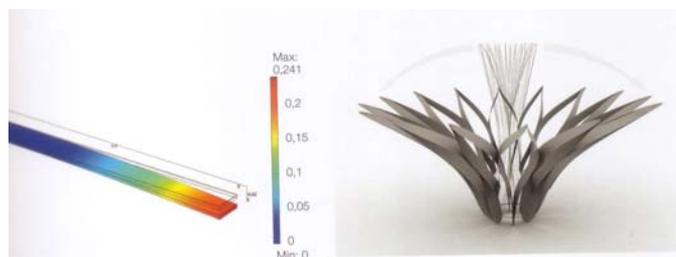


Abbildung 4.9.: Simulation eines Materialsystems aus CFK/PVC, [HK10]

4.2.1. Parametrische Designsoftware

Rhinoceros® wird bei aktuellen Entwürfen und Wettbewerben sehr häufig eingesetzt, dies ist vor allem in der vielseitigen Erweiterbarkeit über verschiedene Plug-ins begründet. Durch den Programmaufsatz Grasshopper® lassen sich mit Rhino® parametrische Modelle erzeugen, vgl. Abbildung 4.10. Wobei Grasshopper® auf eine visuelle Programmieroberfläche zurückgreift und somit die Bearbeitung und vor allem die Erlernbarkeit sehr zügig möglich ist. Über weitere Plug-ins lassen sich verschiedene Schnittstellen bzw. Analysewerkzeuge direkt in die Rhino®/Grasshopper®-Oberfläche integrieren. Hierzu gehören unter anderem:

- Gecko — Beleuchtungs-Analyse über das AUTODESK®-Programm Ecotect®
- Galapagos — evolutionäre Algorithmen zur Erzeugung unterschiedlichster Modellstudien
- Panelling Tools — Unterteilung von Freiformflächen in ebene Einzelflächen
- Structural Drawing Toolset von geometrygym — Export-Schnittstelle zwischen Rhino® und Ansys® bzw. Sofistik®

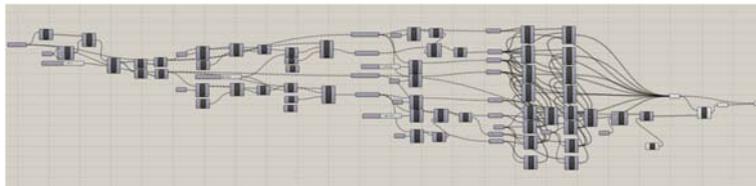


Abbildung 4.10.: Grasshopper® - visuelle Programmieroberfläche

Mit Hilfe der evolutionären Software Galapagos, vgl. Abbildung 4.11, können Formen, Geometrien und Strukturen unter Vorgabe gewisser Randbedingungen in unzähliger Anzahl variiert werden. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit eine Tragstruktur zeichnerisch darzustellen und evolutionär optimieren zu lassen. Bei Erreichen der entsprechenden Schlussbedingung, bricht das Optimierungsprogramm ab. Bei der Entwicklung dieser optimalen Strukturen können neben der reinen Formgenerierung auch statische Randbedingungen analysiert werden, hierzu werden weitere Programmaufsätze verwendet, vgl. Abbildung 4.12. Natürlich können auch über diese statischen Voranalysen hinausgehende Algorithmen verwendet werden, vgl. hierzu Abbildung 4.2.3.

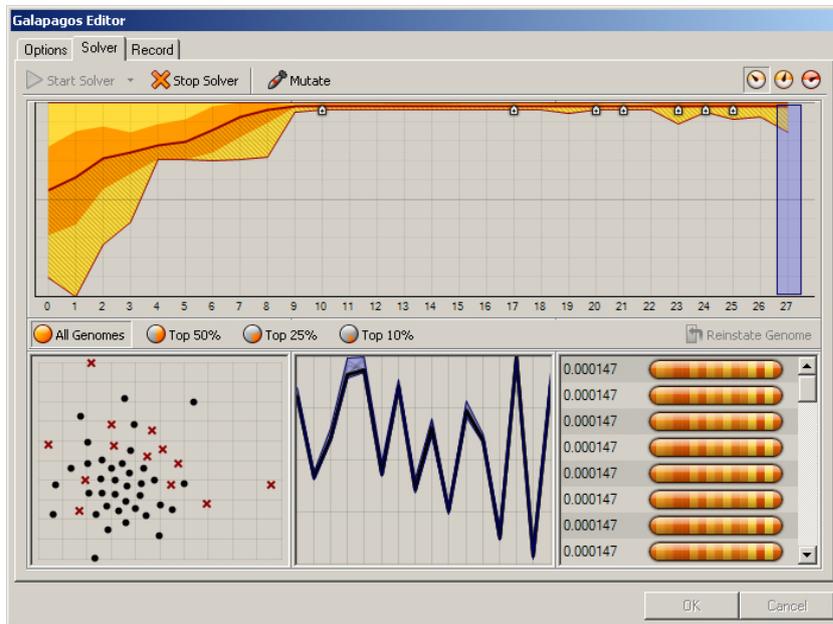


Abbildung 4.11.: Galapagos - evolutionäre Algorithmen

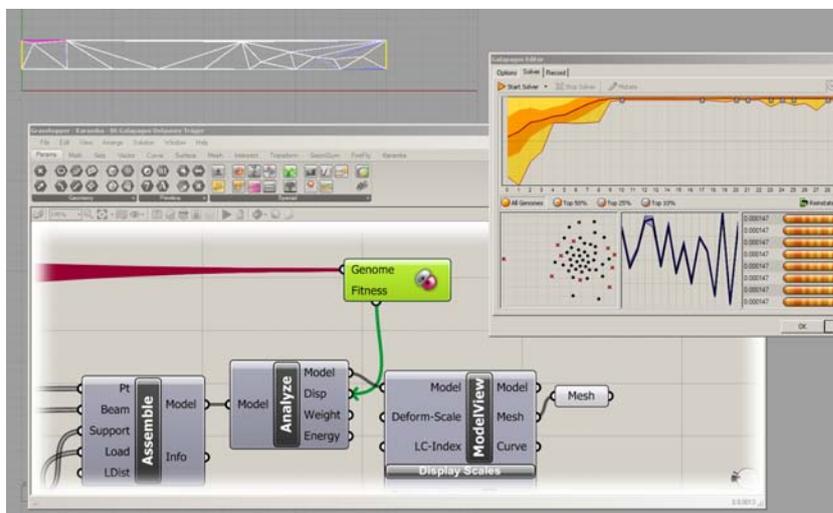


Abbildung 4.12.: Galapagos - evolutionäre Algorithmen

4.2.2. Parametrische Steuersoftware

Vor allem für die Entwicklung adaptiver Strukturen und deren Simulation bzw. Steuerung sind erweiterte Techniken einsetzbar und notwendig. Eine sehr kostengünstige Möglichkeit für die Überprüfung aktiver Techniken stellt hierbei die Schnittstellentechnologie zwischen Grasshopper® und dem ARDUINO®-Mikrocontroller-System dar.

ARDUINO vertreibt frei programmierbare Mikrocontroller-Systeme auf open-Hardware-Basis, somit ist die Weiterentwicklung und Integration neuer Bauteile sehr gut möglich. Die zugehörige Software basiert ebenfalls auf open-source-Quellcode und wird von vielen Programmieren weiterentwickelt und kostenfrei zur Verfügung gestellt. Durch den von Jason Kelly Johnson und Andrew Payne zur Verfügung gestellten Programmaufsatz Firefly® für Grasshopper®, können parametrisch erzeugte und modellhaft gebaute Strukturen aktiv vom Computer aus gesteuert werden. Hierbei können die Bewegungen auf dem Computer simuliert und vom Mikrocontroller umgesetzt werden, also eine aktorische Wirkung erzielt werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit in die gebauten Modelle Sensoren zu integrieren und die Messsignale auf dem Computer auszuwerten. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass sämtliche Bewegungen- oder sensorischen Vorgänge in Echtzeit ablaufen.

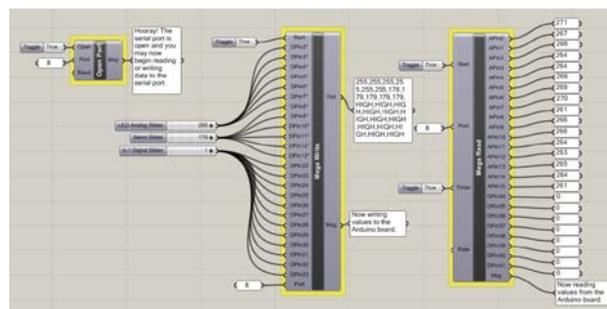


Abbildung 4.13.: Firefly - Oberfläche, visuelles Programmier- und Mikroaktuatorenmodul für Grasshopper®, [JP11]

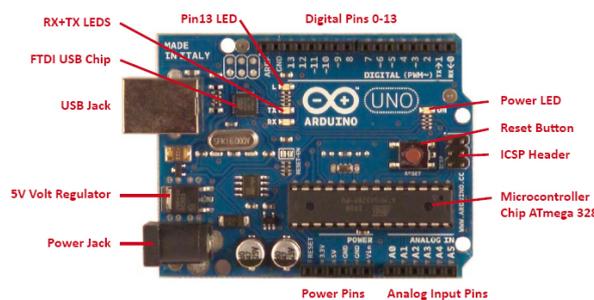


Abbildung 4.14.: Arduino - Mikrocontroller, [JP11]

Beim Projekt Kinetic Pavillon von Elise Elsacker und Yannick Bontinckx wurde die interaktive Verbindung zwischen parametrischer CAD-Software, ARDUINO und Stellmotoren

gezeigt. Der Pavillon interagiert mit der Umwelt aufgrund von unterschiedlichen Wetterbedingungen und menschlicher Bewegung, vgl. Abbildung 4.15.



Abbildung 4.15.: Kinetic Pavillon, [EB11]

4.2.3. Parametrische Berechnungs- und Optimierungssoftware

Neben der parametrischen Designsoftware ist für eine zügige und innovative Projektentwicklung auch eine hochentwickelte Berechnungs- und Optimierungssoftware erforderlich. Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen CAD und Berechnungsprogrammen funktioniert heutzutage sehr flüssig über Excel- bzw. dxf-, oder dwg- Schnittstellen. Der Leistungsumfang unterscheidet sich bei den verschiedenen Programmen sehr stark. So eignen sich einige Programme nur für einige wenige Aufgabenbereiche, wohingegen andere Programme sehr umfangreich ausgestattet sind. Die nachfolgende Aufzählung liefert einen kurzen Überblick:

- Carat++[®] — Finite-Element-Software zur Optimierung und Formfindung — www.caratplusplus.de
- TopoStruct[®] — Topologieoptimierungsprogramm für Architekten und Designer — www.sawapan.eu/sections/section79_topostruct/files/topostruct-help.pdf
- Sofistik[®] — umfangreiches Finite-Element-Berechnungssoftware für das Bauwesen. Möglichkeit der Formfindung (Membrantheorie) — www.sofistik.de
- Ansys[®] — sehr umfangreiches Finite-Element-Software — www.ansys.com
- Comsol[®] — Berechnungssoftware für Materialverbundsysteme — www.comsol.de

Die Programmsysteme Sofistik[®] und Ansys[®] bieten aufgrund ihres Aufbaus die Möglichkeit der parametrischen Ansteuerung. Hierbei können bei beiden Programmsystemen die Bauteilabmessungen, Materialparameter sehr effizient geändert und die rechnerischen Auswirkungen ermittelt werden. Des Weiteren haben diese Programme eine Vielzahl ansteuerba-

rer Schnittstellen. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit einen umfangreichen Datenaustausch zwischen der Berechnungssoftware und unterschiedlichen CAD- Programmen und Tabellenkalkulationen durchzuführen.

Sofistik

Für die Berechnungs- und Simulationssoftware Sofistik[®] gibt es des weiteren eine Schnittstelle zum bereits im Abschnitt „Parametrisches Design“ beschriebenen 3D-Modellierungssystem Rhinoceros[®]. Diese Schnittstelle wird von Jon Mirtschin (<http://geometrygym.blogspot.com>) entwickelt und zur Verfügung gestellt. Sie basiert auf dem Programmsystem Rhinoceros[®] in Verbindung mit der visuellen Programmieroberfläche Grasshopper[®], vgl. vorangegangene Abschnitte. Mit Hilfe dieser Schnittstelle besteht die Möglichkeit, einen direkten Datenaustausch zwischen CAD-System und statisch-dynamischen Berechnungsprogramm Sofistik[®] durchzuführen. Des Weiteren werden schon bei der parametrischen Systemerstellung die Materialien, Profile und Lasten festgelegt. Diese Daten werden an die textbasierte Oberfläche des Sofistik[®] (TEDDY[®]) übergeben, vgl. Abbildung 4.17 und berechnet.

Eine wesentliche Neuerung dieser Schnittstelle gegenüber dem Datenaustausch mittels reiner CAD-Daten besteht darin, dass die Ergebnisse der statisch-dynamischen Berechnung an das CAD-System zurückgespielt werden können. Dies ist vor allem bei Formfindungsansätzen von Membrantragwerken von großer Bedeutung, da sich die Form der Membran infolge Vorspannzuständen und Formfindungsmethoden gegenüber der manuell generierten Form verändert. Diese, der Belastung angepasste, Form kann somit im CAD-System Rhino[®] weiterbearbeitet werden.

Diese Schnittstelle wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS und einer begleiteten Masterthesis im Studiengang **archineering** getestet und eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass die Nutzung einer solchen Schnittstelle eine effiziente und vor allem zeitgemäße Arbeitsweise darstellt, vgl. Abbildungen 4.16, 4.18, 4.19, 4.20 und 4.21.

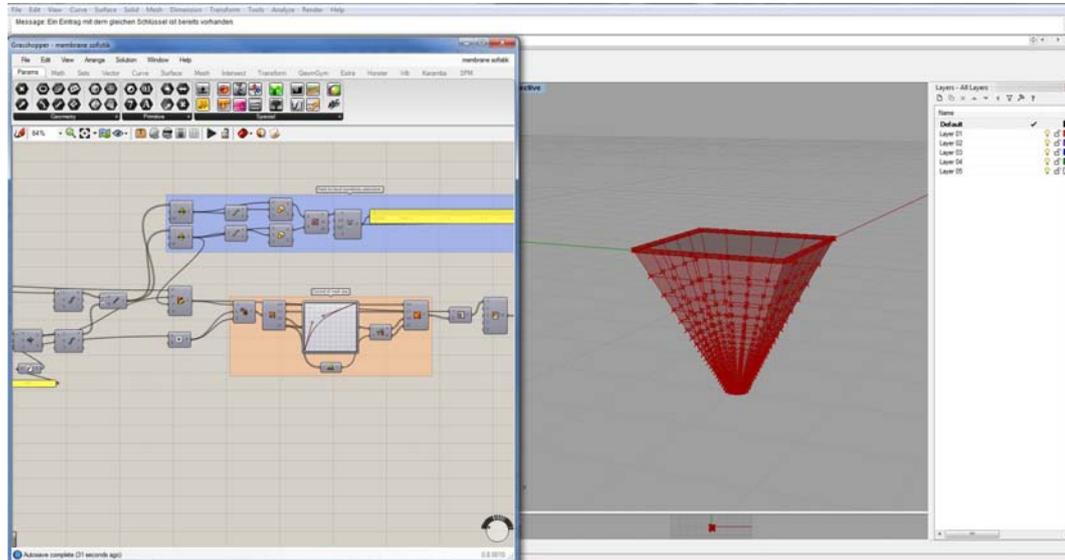


Abbildung 4.16.: Formfindung unter Nutzung von Rhino[®]/Grasshopper[®] und Sofistik[®],
Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011



Abbildung 4.17.: Formfindung unter Nutzung von Rhino[®]/Grasshopper[®] und Sofistik[®],
Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011

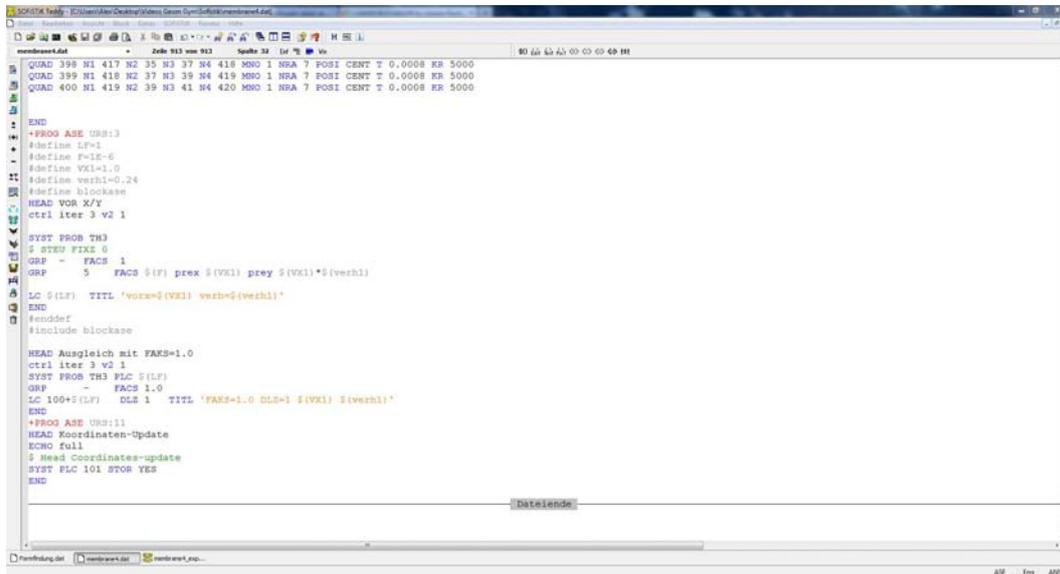


Abbildung 4.18.: Formfindung unter Nutzung von Rhino[®]/Grasshopper[®] und Sofistik[®],
 Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011

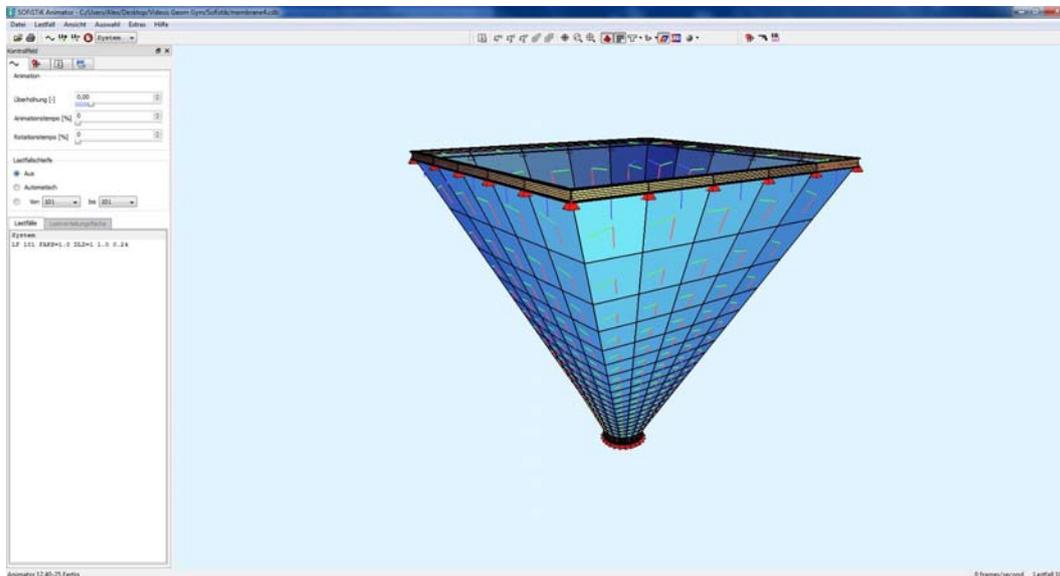


Abbildung 4.19.: Formfindung unter Nutzung von Rhino[®]/Grasshopper[®] und Sofistik[®],
 Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011

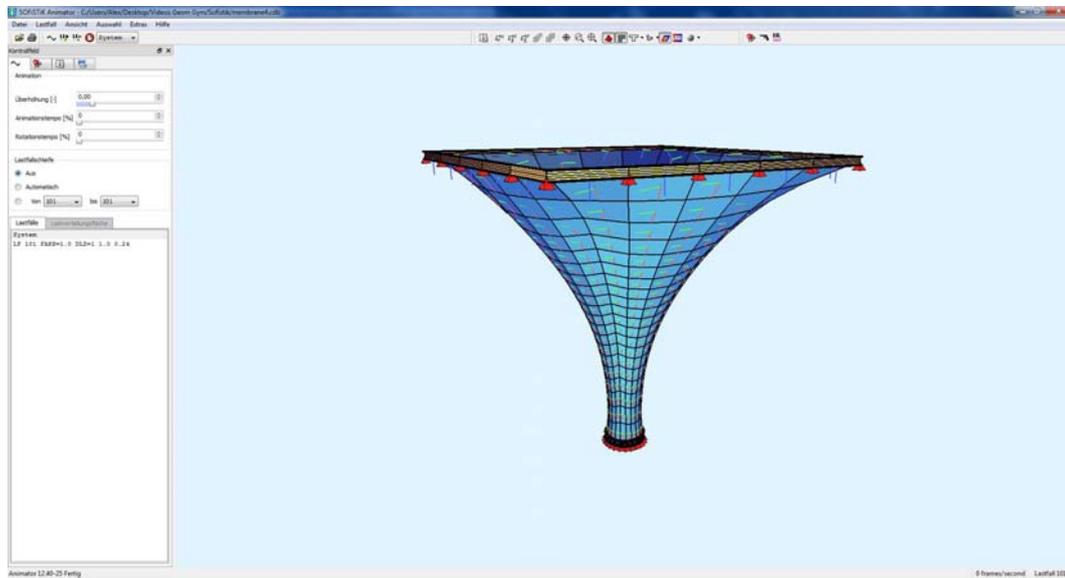


Abbildung 4.20.: Formfindung unter Nutzung von Rhino[®]/Grasshopper[®] und Sofistik[®],
Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011

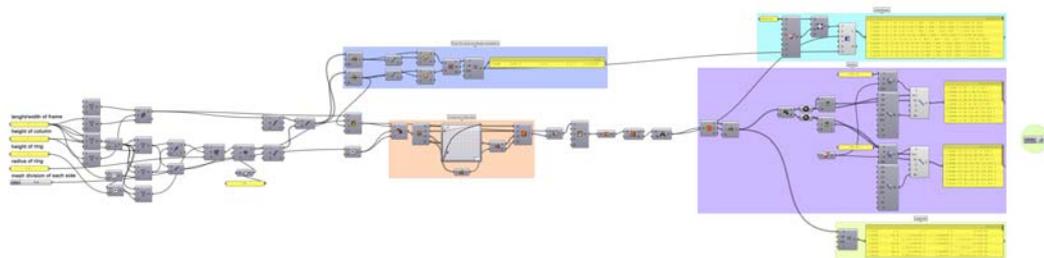


Abbildung 4.21.: Definition für die Datenschnittstelle Rhino[®]/Grasshopper[®] - Sofistik[®],
Masterthesis Alexander Hollberg, Bauhaus-Universität Weimar, 2011

Ansys

Mit dem Programmsystem Ansys[®] können komplexe Strukturen sehr effizient vernetzt und berechnet werden. Zudem besteht die Möglichkeit Untersuchungen im Detail durchzuführen, wobei neben dem globalen Tragverhalten auch lokale Betrachtungen, wie Spannungsspitzen analysiert werden. Ein wichtiges Tool in Ansys[®] ist die Topologieoptimierung, vgl. Abschnitt 3.6.1. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, vorgegebene Strukturen hinsichtlich minimaler Baumasse bei maximaler Steifigkeit zu ermitteln, da nicht belastete Strukturbereiche eliminiert werden. Als mögliche Schnittstellen bietet Ansys[®] derzeit eine gute Anbindung an verschiedene CAD-Systeme und einen Datenaustausch zu unterschiedlichen FE-Systemen.

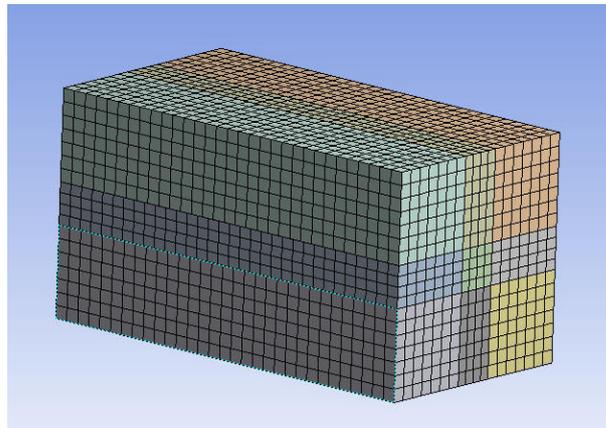


Abbildung 4.22.: FE-Netz eines zu optimierenden Balkens

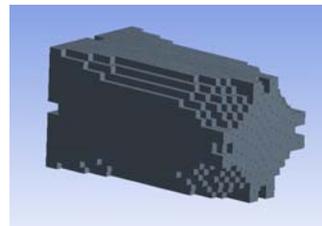
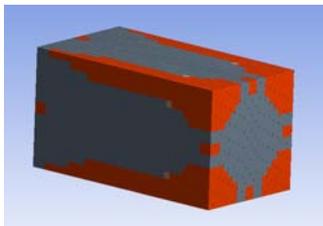


Abbildung 4.23.: optimierter Balken unter gegebener Belastung

4.2.4. Simulation aktiver Prozesse mit Hilfe statisch-dynamischer Analysewerkzeuge

Das im vorigen Kapitel, vgl. 4.2.3, vorgestellte FE-Programmsystem Ansys® bietet neben umfangreichen Import-, Export-, Vernetzungs- und Berechnungsoptionen auch die Möglichkeit der Simulation aktiver Prozesse. Dies ist durch die Berechnung mehrerer Zeitschritte und Multiphysikbetrachtungen (Strömungsversuche und elektrische Felder) möglich.

Auf diese Weise besteht die Möglichkeit Piezoelektrische Aktoren im Programmsystem Ansys® zu simulieren und zu berechnen, vgl. Abbildung 4.24. Bei der Simulation dieser Vorgänge sind verschiedene Grundlagen notwendig und anzuwenden, auf diese wird im Nachfolgenden näher eingegangen.

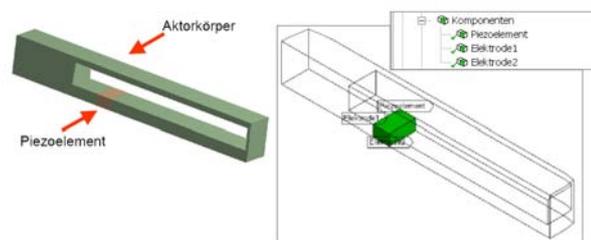


Abbildung 4.24.: Piezoaktormodellierung in Ansys®, [New04]

Eine wesentliche Grundlage einer Berechnung stellen die materialspezifischen Kennwerte dar. Vor allem bei der Berechnung piezoelektrischer Aktoren besteht laut [Ima99] eine Diskrepanz zwischen den Angaben der Hersteller und den erforderlichen Kennwerten für das Simulationsprogramm Ansys®. In Abbildung 4.25 ist verdeutlicht, in welcher Form die Hersteller häufig ihre Materialien klassifizieren und beschreiben. Demgegenüber benötigt Ansys® grundlegend anders aufbereitete Daten, vgl. Abbildung 4.26. Aus diesem Grund besteht zunächst die Erfordernis die Angaben der Hersteller in die erforderliche Form des Simulationsprogramms zu konvertieren. Der Arbeitsablauf hierzu ist sehr gut in [Ima99] zusammengefasst.

Die für das Simulationsprogramm konvertierten Daten können in Matrixform wie folgt dargestellt werden, vgl. Abbildung 4.27. Die Eingabe erfolgt textbasiert entsprechend Abbildung 4.28.

Die Ergebnisauswertung im Anschluss an die Berechnung kann grafisch, wie auch textbasiert erfolgen, vgl. Abbildung 4.29.

$$\begin{aligned}\{S\} &= [s^E] \{T\} + [d] \{E\} \\ \{D\} &= [d]^T \{T\} + [e^T] \{E\}\end{aligned}$$

where

- $\{T\}$ = stress vector (six components x, y, z, yz, xz, xy)
- $\{S\}$ = strain vector (six components x, y, z, yz, xz, xy)
- $\{D\}$ = electric displacement vector (three components x, y, z)
- $\{E\}$ = electric field vector (three components x, y, z)
- $[s^E]$ = compliance matrix evaluated at constant electric field, i.e. short circuit
- $[d]$ = piezoelectric matrix relating strain/electric field
- $[d]^T$ = piezoelectric matrix relating strain/electric field (transposed)
- $[e^T]$ = dielectric matrix evaluated at constant stress, i.e. mechanically free

Abbildung 4.25.: Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen der Hersteller, [Ima99]

$$\begin{aligned}\{T\} &= [c^E] \{S\} - [e] \{E\} \\ \{D\} &= [e]^T \{S\} + [e^S] \{E\}\end{aligned}$$

where

- $\{T\}$ = stress vector (six components x, y, z, xy, yz, xz)
- $\{S\}$ = strain vector (six components x, y, z, xy, yz, xz)
- $\{D\}$ = electric displacement vector (three components x, y, z)
- $\{E\}$ = electric field vector (three components x, y, z)
- $[c^E]$ = stiffness matrix evaluated at constant electric field, i.e. short circuit
- $[e]$ = piezoelectric matrix relating stress/electric field
- $[e]^T$ = piezoelectric matrix relating stress/electric field (transposed)
- $[e^S]$ = dielectric matrix evaluated at constant strain, i.e. mechanically clamped

Abbildung 4.26.: Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen gemäß Ansys[®], [Ima99]

$$[s^E] = [c^E]^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{66}^E & 0 & 0 \\ & & & & s_{44}^E & 0 \\ & & & & & s_{44}^E \end{bmatrix}$$

Abbildung 4.27.: Angabe der Materialkennwerte von Piezowerkstoffen gemäß Ansys[®] als Matrix, [Ima99]

```

save_pre_mod,db
/prep7
/com,
/com, Units SI! (m, kg, s, N ...)
/com,
/com, MATERIAL PROPERTIES FOR THE FINITE ELEMENT SOLUTION:
/com, CONSTITUTIVE MATRICES FOR PZT-4 (POLAR AXIS ALONG Y)
/com,
/com, [c11 c13 c12 0 0 0] [0 e31 0] [ep11 0 0]
/com, [c13 c33 c13 0 0 0] [0 e33 0] [0 ep33 0]
/com, [c12 c13 c11 0 0 0] [0 e31 0] [0 0 ep11]
/com, [0 0 0 c44 0 0] [e15 0 0]
/com, [0 0 0 0 c44 0] [0 0 e15]
/com, [0 0 0 0 0 c66] [0 0 0]
/com,
MP,PERX,10,728.5 ! PERMITTIVITY AT CONSTANT STRAIN
MP,PERY,10,634.7
MP,PERZ,10,728.5
TB,ANEL,10 ! ANISOTROPIC ELASTIC STIFFNESS
TBDA,1,13.9E10,7.43E10,7.78E10 ! c11,c13,c12
TBDA,7,11.5E10,7.43E10 ! c33,c13
TBDA,12,13.9E10 ! c11
TBDA,16,2.56E10 ! c44
TBDA,19,2.56E10 ! c44
TBDA,21,3.06E10 ! c66
TB,PIEZ,10 ! PIEZOELECTRIC STRESS COEFFICIENTS
TBDA,2,-5.2 ! e31
TBDA,5,15.1 ! e33
TBDA,8,-5.2 ! e31
TBDA,10,12.7 ! e15
TBDA,15,12.7 ! e15

et,10,226,1001
cnsel,s,piezoelement
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,12
alls
cnsel,s,Elektrode1
d,all,vo1t,0
cnsel,s,Elektrode2
d,all,vo1t,1000
alls
/solu
    
```

Abbildung 4.28.: Piezoaktormodellierung in Ansys®, [New04]

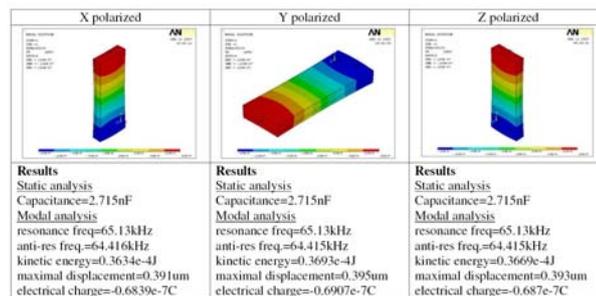


Abbildung 4.29.: grafische Ergebnisauswertung, [Pig07]

Die Anwendung von Piezoaktoren in der Technik wurde eingehend im Abschnitt 2 diskutiert. Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften werden diese Techniken von vielen Wissenschaftlern untersucht. Zu diesen Untersuchungen gehören sowohl physische wie auch numerische Erforschungen. Vor allem auf dem Gebiet der Computersimulation wurden in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wegweisende Fortschritte erzielt. Dies ist vor allem darin begründet, dass die rechnergestützte Untersuchung den Einsatz von realen Prototypen minimiert und auf diese Weise die Entwicklungszeiten verkürzt werden können, aber vor allem die Kosten für eine Neuentwicklung reduziert werden können. Eine wesentliche Voraussetzung für die computergestützte Analyse von Piezwerkstoffen besteht in deren Simulation in Finite-Element-Programmen. Hierfür sind, nach [Ben00], entsprechende Elemente für die FE-Berechnung zu entwickeln. In den nachfolgenden Abbildungen 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 und 4.35 sind einige FE-Elemente exemplarisch dargestellt.

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
 Tet4	Allik, Hughes (1970)	u, v, w : linear ϕ : linear	u, v, w ϕ	16	-Static condensation of the electric dofs -Application to acoustic transducers
 Tet4	Ghandi, Hagood (1997)	u, v, w : linear ϕ : linear	u, v, w ϕ	16 +	- Nonlinear constitutive equations - Electric displacement-based formulation Intern. - Element internal dofs to represent phase transition and remnant polarization
 Hex8	Tzou, Tseng (1990)	u, v, w : linear +quadratic incompatible modes, ϕ : linear	u, v, w + internal dofs ϕ	32	- Static condensation of the incompatible modes at the element level and electric dofs after elements assembly -Application to intelligent plates
 Hex8	Ha, Keilers, Chang (1992)	u, v, w : linear ϕ : linear+ quad. incom. modes	u, v, w ϕ + int. dofs	32	- Equivalent single layer model - Static condensation of the incompatible modes at the element level
 Hex8	Ghandi, Hagood (1996)	u, v, w : linear ϕ : linear	u, v, w ϕ	32 +	- Nonlinear constitutive equations - Iterative F. E. solution intern. - Element internal dofs to represent phase/polarization state of the material
 Hex8	Chin, Varadan, Varadan (1994)	u, v, w : linear ϕ : linear	u, v, w ϕ	32	-Lagrange's method for matrix formulation - Application to periodic piezoelectric arrays subjected to fluid-loading
 Hex20	Allik, Webman (1974)	u, v, w: quadratic ϕ : quadratic	u, v, w ϕ	80	- Application to response of sonar transducers
 Hex20	Koko, <i>et al.</i> (1997)	u, v, w: quadratic ϕ : quadratic θ : quadratic	u, v, w ϕ θ	100	- Thermo-piezo-electric constitutive laws - Guyan condensation of the electric dofs - Application to beams and plates

Abbildung 4.30.: Charakteristik von piezoelektrischen SOLID Finiten Elementen, [Ben00]

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
 Shell4	Lammering (1991)	u,v,w : linear β_x, β_y : linear	u,v,w β_x, β_y	28	-Shallow shell shear (+ RI) theory -Equivalent single layer model for 3-layers -Virtual displacemnt & potential principle -Upper/lower nodal electric potential dof
 Shell8	Thirupathi, Seshu, Naganathan (1997)	u,v,w: quadratic β_x, β_y : quadratic	u,v,w β_x, β_y	40	- 3D-degenerated shell theory - Piezo. effect as initial strain problem - Static analysis of smart turbine blades
 Shell-axi8	Guo, Cawley, Hitchings (1992)	u,v,w : quadratic φ : quadratic	u, v, w φ	32	- Generalized stress, strain, displacement, force variables (mechanical + electric) - No electric dofs condensation - Modal analysis and harmonic response
 Shell-axi3	Varadan, Chin, Varadan (1993)	u,w: linear φ : linear	u, w φ	9	- Potential energy including both elastic and electric energies - Lagrange formulation of motion eqns. - Application to Mooney transducer
 Shell12	Tzou, Ye (1994)	u,v,w φ in-plane:quadratic thickness:linear	u,v,w φ	48	- Layer-wise constant shear angle theory - Degenerated 3D-shell theory - Laminated piezoelectric shell continuum - Energy functions for the displacement and electric potential functional

Abbildung 4.31.: Charakteristik von piezoelektrischen SHELL Finiten Elementen, [Ben00]

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
 2D/3D	Heyliger et al. (1994)	u,v: piecewise linear w variable: constant/linear φ : linear	u^j, v^j, w^j φ^j $j=1,\dots,N$ $i=1,\dots,M$	variab -1e	- Discrete layer theories with R1 : a) through thickness: 1D polynomials b) in-plane: 2D functions -Static condensation of electric dofs - Induced potential , Thermal environment
	Suleman, Venkayya (1995)	u,v,w: bilinear $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: bilinear φ : linear	u,v,w $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ $\varphi_1, \dots, \varphi_{np}$	24 + np	- Mindlin plate element (C^0) + uniformly reduced numerical integration and hourglass stabilization - 1 potential dof per piezoelectric layer
 Quad4	Veley, Rao (1995)	u,v,w: bilinear φ : linear	u,v,w φ	16	- Combination of a 3D piezoelectric element (Hex element defined by pseudo-nodes for top/bottom surfaces) and an ACLD element (Quad/Hex/Quad) - Application to ACLD treatments
 Quad4	Chen, Wang, Liu (1997)	w: cubic φ : linear	w, w_x, w_y φ	16	- Kirchhoff plate element (bending only) - Guyan reduction for the electrical dofs
 Quad8	Ray, Bhattacharyya, Samanta (1994)	u,v,w, l_x, l_y, l_z , m_x, m_y, m_z , $n_x, n_y, \varphi^1, \varphi^2$: quadratic	all	104	- 11 variables higher-order shear deformable theory - Linear potential in thickness - Nodal electric dofs condensed
 Quad9	Carrera (1997)	u,v,w: quadratic $\sigma_{\alpha 3}$: quadratic	u,v,w, β_α $D_{\alpha, \alpha_{1,2}}$ $R_{\alpha 3}$ $\sigma_{\alpha 3}^a, \sigma_{\alpha 3}^b$ φ^c φ^d φ^e φ^f	variab -1e +	- Multilayered plates including piezo-layers - Higher order shear deformation theory (but $\sigma_{33}=\epsilon_{33}=0$, and standard C^0 F.E.) - In-plane displacement: zig-zag effect - Interlaminar equilibrium and top/bottom transverse shear stress conditions fulfilled - Stress dofs eliminated at the layer level - Layer voltage dofs condensed/layer level
 Quad9	Yin, Shen (1997)	u,v,w β_x, β_y $\psi = -E_3$ quadratic	u,v,w β_x, β_y $\psi = -E_3$	54	- Mindlin plate theory (C^0) - Linear voltage but transverse field dof - Damage detection (strain sensing)

Abbildung 4.32.: Charakteristik von piezoelektrischen plattenartigen Finiten Elementen (electrical dof), [Ben00]

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
 Tria3	Shen, Sharpe Jr. (1997)	u, v : linear w : Discrete Kirchoff Theory (DKT)	u, v w, β_x, β_y	15	- Aeroelastic analysis of hypersonic panel flutter supression (Non linear) - Thermal effect considered - Piezoelectric effect by thermal analogy
 Quad4	Hwang, Hwang, Park (1994)	w : DKT approximation	w, β_x, β_y	12	- Discrete Kirchhoff bending theory - Equivalent single layer model - Modal reduction technique - Piezoelectric effect by thermal analogy
 Quad4	Baz, Ro (1996)	u_i, v_i : bilinear $i=1,3,5$ w : bicubic	u_i, v_i $i=1,3,5$ w w_x, w_y	36	- 3-layer theory; 1,5 : constraining layers, 3: base plate, sensors+plate= 1 layer - 7 layers reduced to 5 layers for ACLD - Shear strain neglected in the piezos.
 Quad8	Battisti, Rotunno, Sermoneta (1997)	w : quadratic (incomplete) β_x, β_x : quadratic (incomplete)	w β_x, β_x	24	- Reissner-Mindlin plate element (C^0) - Equivalent single layer model - Modal synthesis - No shear effect in the piezo-layers - Electrostatic energy neglected
 Quad8	Liu, <i>et al.</i> (1997)	u, v, w: quadratic (incomplete) β_x, β_x : quadratic (incomplete)	u, v, w β_x, β_x	40	- Reissner-Mindlin plate element (C^0)+RI - Equivalent single layer model - Modal analysis technique - Electrostatic energy neglected
 Quad8	De Sciuva, Icardi, Villani (1997)	u, v: cubic in each layer w : cubic (but constant through thickness)	u, v w, w_x, w_y g_1, g_2 rotations	56	- Geometrically nonlinear multilayer theory with shear effect and off-axis angle - Inter-laminar TS stresses continuity and top/bottom stress-free conditions satisfied - Principle of virtual displacement + reduced constitutive equations ($\sigma_{33}=0$)
 Quad9	Chandrashekha-ra, Teneti (1995)	u, v, w: quadratic β_x, β_x : quadratic	u, v, w β_x, β_x	45	- First-order shear deformation theory (C^0) - Equivalent single layer model - Piezo. mass, stiffness, thermal expansion - Electrostatic energy neglected

Abbildung 4.33.: Charakteristik von piezoelektrischen plattenartigen Finiten Elementen (without electrical dof), [Ben00]

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
 Beam2 with offset nodes	Shen (1994)	u : linear w : cubic Hermite β : linear	u w, w_x β	8 + V_u, V_b	- Timoshenko beam theory using an extended Hu-Washizu Principle (Mixed) - Special assembly actuator/beam/sensor elts. for longitudinal-bending coupling - Local Rayleigh-Ritz method for piecewise continuous fit to the deflection shape - Upper/lower potential dofs per element
 Beam2	Carpenter (1997)	u : linear v cubic Hermite ϕ linear	u v, v_x ϕ	8	- Euler-Bernoulli strain model - Includes electric field work - Axial vibration and plane bending

Abbildung 4.34.: Charakteristik von piezoelektrischen Balken-Finiten Elementen (electrical dof), [Ben00]

Shape	Authors (year)	Approximations	Nodal dofs	Total dofs	Comments
Beam2	Robbins, Reddy (1991)	CBT, u : linear w : cubic	u w, -w _x	6	- 2 equivalent single layer (CBT/SDBT) & 2 multi-layer models (MLBT1,2)
	SDBT:	u, w, β : linear	u, w, β	6	- Piezo. by thermal analogy: σ ₁ =E ₁ (ε ₁ -Λ ₁)
	MLBT1:	u: p/w linear w : constant	u _{j=j=1,N+1} w	2N+2	- Principle of virtual displacement without electrical contribution
	MLTB2:	u, w: p/w linear	u _j , w _j j=1,...,N+1	4N+4	- N= finite element subdivisions (>= number of material layers)
Beam2	Baz, Ro (1994)	u ₁ , u ₃ , linear w :cubic	u ₁ , u ₃ w, w _x	8	- PVDF/ ViscoElastic/ PVDF/Beam struct. - 3 layer theory (1:actuator, 3:beam+piezo)
	Hermite				- No shear in PVDF facings and the beam - Damping:Augmented Thermodyn. Fields
Beam2	Benjeddou, Trindade, Ohayon (1997, 1999)	w : cubic Hermite ū _c , ū _c or ū _r , ū _r : linear	w, w _x & ū _c , ū _c or ū _r , ū _r	8	- Three-layer theory: Euler-Bernoulli facings (f) and Timoshenko core(c) - Variables=mean and relative axial displacements and deflection - Induced potential in piezo. facings - Shear actuation mechanism: piezo. core
	Islam, Craig (1994)	u: linear w: cubic Hermite	u w, -w _x	6	- Euler-Bernoulli beam theory (C ¹) - Equivalent single layer model - Pin force/moment engineering approach - Application to damage detection
	Smyser, Chandrashekhara (1997)	u: linear w:cubic Hermite β: linear	u w, -w _x β	8	- Shear deformation theory - Equivalent single layer model - Modal superposition/Neural network - No electric contribution
Beam2	Surace, Cardascia, Anghal (1997)	u: linear w, w _{b,x} : cubic Hermite	u, w, w _x w _{b,x} w _{b,xx}	10	- Timoshenko beam: w=w _b +w _s - Principle of virtual displacement + converse constitutive equations
	Aldraihem, Wetherhold, Singh (1997)	T: w cubic β quadratic E-B: w cubic	w β w, -w _x	4	- Timoshenko vs. Euler-Bernoulli bending - No bending-twisting coupling - Piezo by Engineering approach
Beam3	Lesieutre, Lee (1996)	u, β (β _A) quadratic w: cubic Hermite	u, β (β _A) w, w _x	13	- No-shear in piezo/beam - Shear angle:β=β ^E +β ^A , A=Anelastic - Additional Anelastic Displ. Field dof - Piezo.: by blocked (strain=0) stress work.
	Aldraihem, Wetherhold (1997)	w : quadratic θ, β, α: linear β, α: rotations/y θ:twisting angle	w θ, β, α	9	- bending-twisting Timoshenko laminate - Equivalent single layer model - St. Venant and warping torsion permitted - PZT/Ep composite (bending actuation)

Abbildung 4.35.: Charakteristik von piezoelektrischen Balken-Finiten Elementen (without electrical dof), [Ben00]

4.3. Zukunftsweisende Nutzung moderner Programmtechnik und notwendige Schnittstellen zur Entwicklung optimierter Faserverbundstrukturen

4.3.1. Entwicklung von Schnittstellen — Auslegung und Optimierung von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen unter Berücksichtigung des Fasergehaltes und der Topologieoptimierung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden verschiedene Werkzeuge und Aspekte zur Optimierung effizienter Tragwerke vorgestellt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS sollten Optimierungsmöglichkeiten und der Einsatz aktiver Werkstoffe im Bauwesen aufgezeigt werden. Hierbei besteht die Notwendigkeit zwischen verschiedenen verwendeten Programmsystemen Daten auszutauschen. Da der Datenaustausch zwischen einigen Programmen standardmäßig nicht automatisiert stattfindet, bestand die Notwendigkeit eigene Schnittstellen zu entwickeln. In diesem Rahmen wurde die prototypische Schnittstelle **IFAS** entwickelt. Diese wird im Nachfolgenden näher erläutert.

Bei der Entwicklung optimierter Tragwerke aus Faserverbundbauteilen werden verschiedene Programmsysteme entsprechend ihrer optimalen Eigenschaften eingesetzt:

- Formfindung mit Sofistik[®]
- Ermittlung der Hauptspannungen mit Ansys[®] ⇒ Datenübertragung an Rhino[®] ⇒ grafische Darstellung der Hauptspannungen als Vektoren
- Topologieoptimierung mit Ansys[®] ⇒ Datenübertragung an Rhino[®] ⇒ grafische Darstellung der topologieoptimierten Struktur ⇒ Weiterbearbeitung der Daten als Vektordaten
- Datenübergabe mittels erarbeiteter Schnittstellen

Durch die Formfindung besteht die Möglichkeit die Struktur für die einzelnen Lastfälle bzw. den maßgebenden Lastfall anzupassen. Auf diese Weise können vor allem Spannungen infolge Eigengewicht reduziert bzw. ausgeschlossen werden, vgl. Abbildungen 4.36 und 4.37.

Nachdem die Form infolge des maßgebenden Lastfalls ermittelt wurde, besteht die Möglichkeit diese Form aus dem Formfindungsprogramm in das CAD-Modell zurückzuführen. Hierzu kann die schon zuvor beschriebene Schnittstelle von Jon Mirtischin (geometrygym) verwendet werden.



Abbildung 4.36.: Ausgangsstruktur - Formgebung über (parametrisches) CAD-Modell

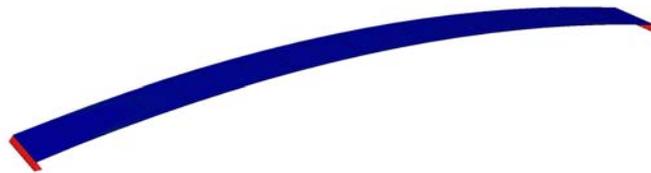


Abbildung 4.37.: formgefundene Struktur unter Eigengewicht

Bei Faserverbundstrukturen ist die Auslegung der Faserausrichtung entsprechend der Hauptspannungen von wesentlicher Bedeutung, vgl. Abschnitt 3.6.3 und Abbildung 4.38. Die Hauptspannungen können über die Schnittstelle **IFAS**, vgl. Abbildung 4.39, aus dem FE-Programm Ansys[®] ausgelesen und über die Programmieroberfläche Grasshopper[®] im CAD-System Rhinoceros[®] vektoriell dargestellt werden. Es besteht somit die Möglichkeit den einzelnen Fasersträngen individuelle Eigenschaften zuzuweisen, bis hin zur Festlegung aktiver Eigenschaften.

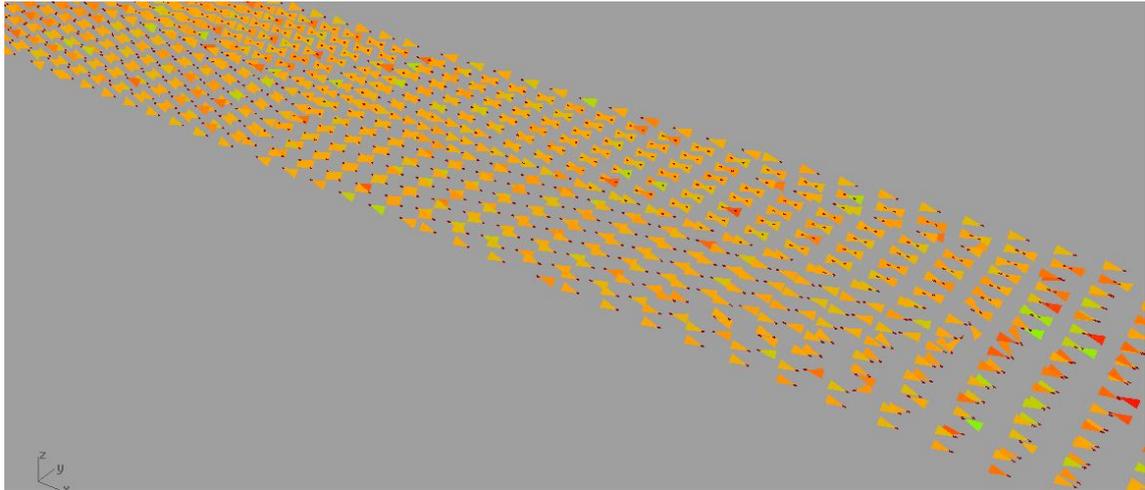


Abbildung 4.38.: Hauptspannungen vektoriell dargestellt unter Nutzung der **IFAS**-Schnittstelle

Neben der Formoptimierung eines Tragwerks können auch Bereiche geringer Belastung materiell ausgespart werden. Diese Bereiche müssen speziell identifiziert werden und sind häufig nur grafisch dargestellt. Mit **IFAS** besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse der Topologieoptimierung vektoriell darzustellen. Auf diese Weise ist die Topologieoptimierung nicht auf die grafische Darstellung beschränkt, sondern kann für die weitergehende Bearbeitung und Optimierung bzw. Systemauslegung herangezogen werden, vgl. Abbildungen 4.40 und 4.41. Ebenso können auf diese Weise physische Modelle 3D geplottet bzw. laserschnitten werden. Diese Vorgehensweise ist im Sinne der aktuellen technischen Entwicklung einer durchgehend digitalen Bearbeitungskette, vor allem bei der Entwicklung bei Freiformobjekten, von großem Interesse.

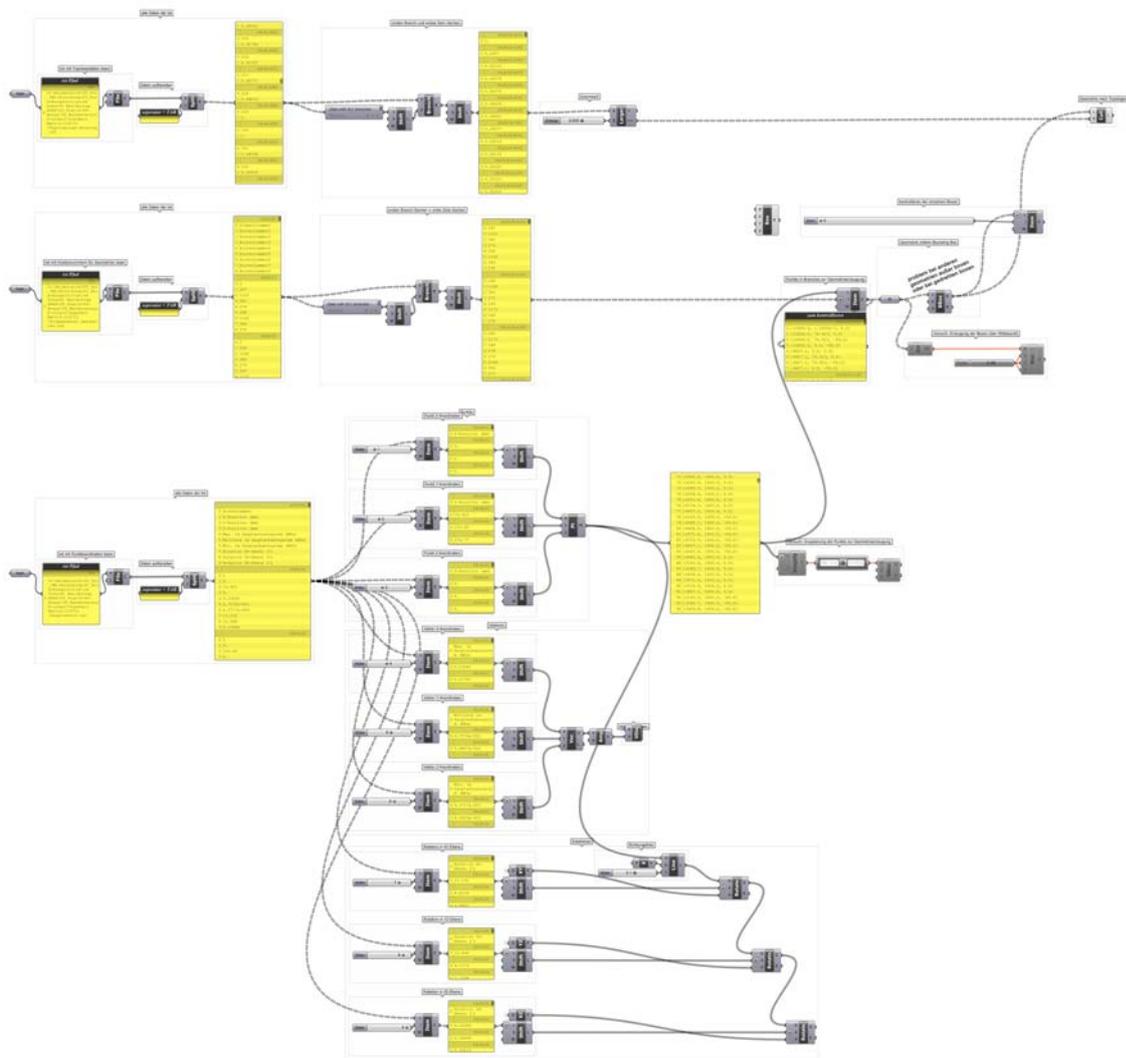


Abbildung 4.39.: **IFAS**-Schnittstelle zur Übertragung der FE-Ergebnisse aus Ansys® in Rhino® unter Nutzung von Grasshopper®

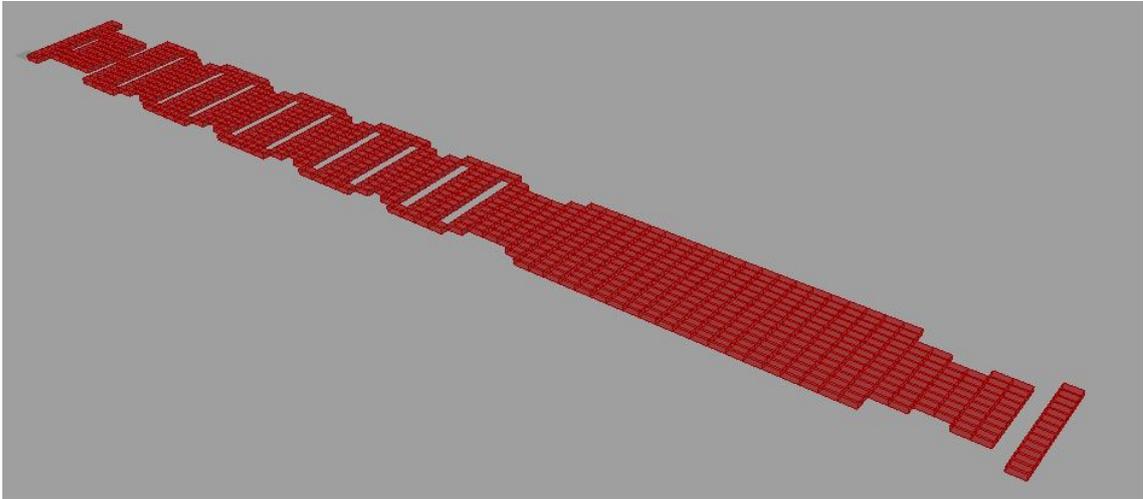


Abbildung 4.40.: Topologieoptimierung vektoriell dargestellt unter Nutzung der **IFAS**-Schnittstelle

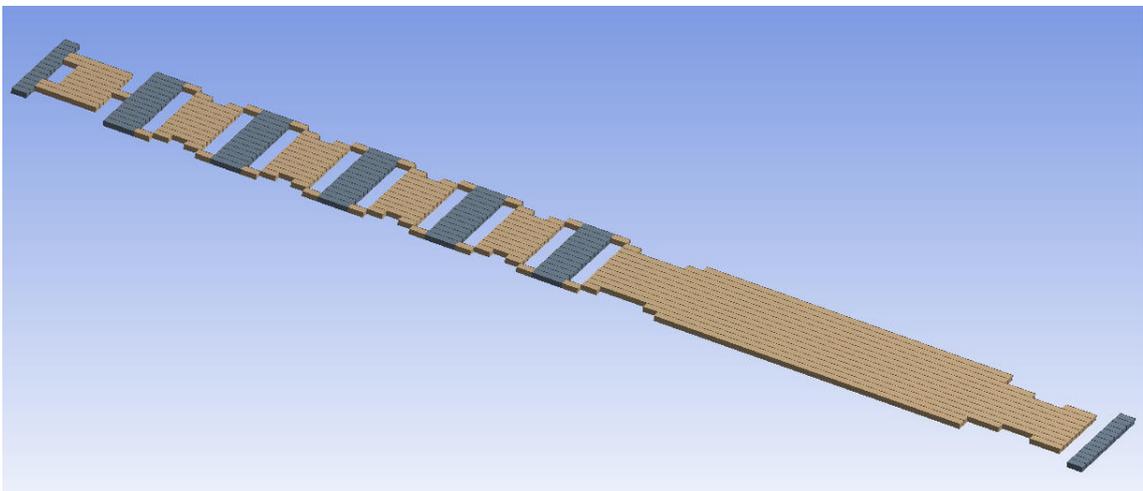


Abbildung 4.41.: Topologieoptimierung als grafische Darstellung im FE-Programm Ansys®

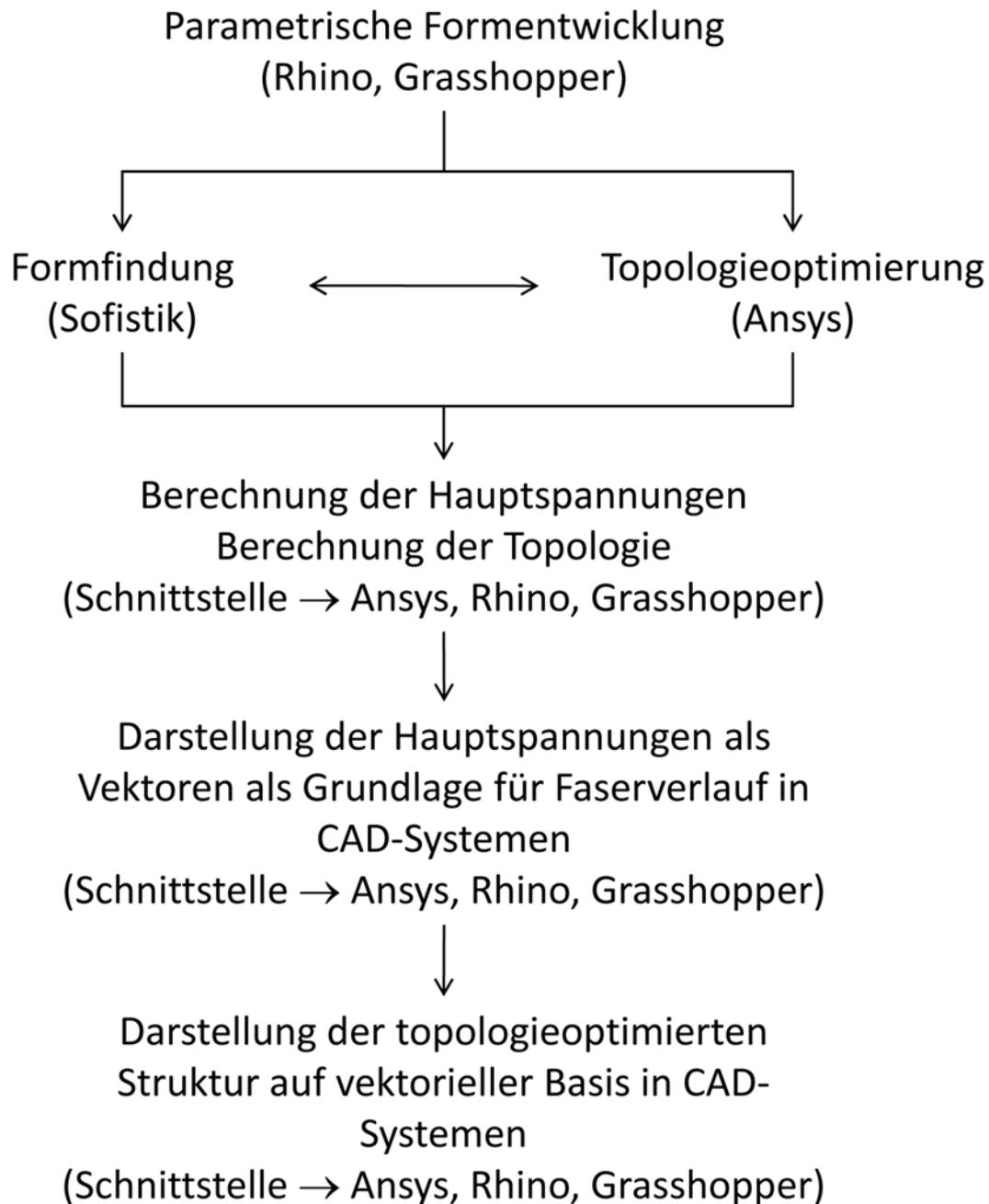


Abbildung 4.42.: Workflow der Optimierung mit Ansys® und Sofistik®

5. Erstellung von Anwendungshilfen — Identifikation geeigneter intelligenter Materialien für verschiedene Anwendungszwecke

5.1. Definition von im Bauwesen einsetzbarer aktiver Werkstoffe

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf unterschiedliche Belastungsarten und die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen eingegangen. Durch die Anwendung aktiver (smarter) Materialien können optimierte Systeme hinsichtlich ihrer Schwingungs- und Verformungseigenschaften angepasst werden.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionswerkstoffe, diese können hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien klassifiziert werden. In Abbildung 5.1 erfolgt eine Einteilung hinsichtlich realisierbarer Spannungen und Dehnungen. Ebenso ist eine Übersichtsdarstellung hinsichtlich der Arbeitsfrequenz und Arbeitsdichte möglich, vgl. Abbildung 5.2.

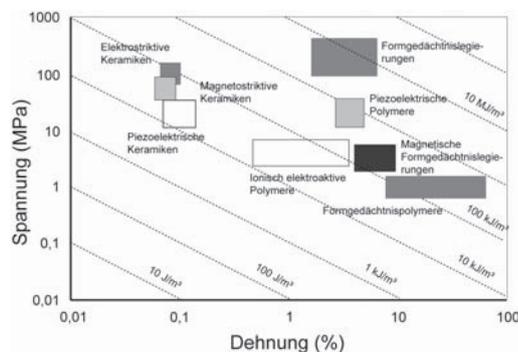


Abbildung 5.1.: Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Spannung und Dehnung [Lag08a]

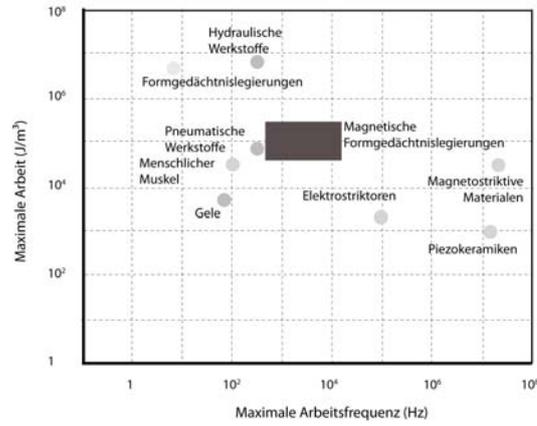


Abbildung 5.2.: Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Arbeitsfrequenz und Arbeitsdichte [SP04]

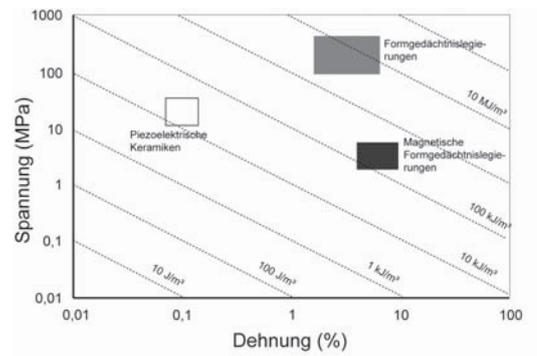


Abbildung 5.3.: Funktionswerkstoffe Einteilung hinsichtlich Spannung und Dehnung [Lag08a]

Auf Grundlage der Recherchearbeit werden die derzeit für das Bauwesen wesentlichen Funktionswerkstoffe hervorgehoben und weiter untersucht, vgl. Abbildung 5.3. Hierzu zählen:

- Piezoelektrische Keramiken
- Formgedächtnislegierungen
- Magnetische Formgedächtnislegierungen.

Diese Auswahl kann selbstverständlich entsprechend weiterer Erkenntnisse und Entwicklungsschritte weiter ausgearbeitet werden. Die wesentlichen Eigenschaften der zu untersuchenden Funktionswerkstoffe hinsichtlich verschiedener Eigenschaften sind in Abbildung 5.3 sehr gut zusammengefasst:

- hohe - langsame Reaktionszeit
- große - kleine Dehnraten
- große - kleine realisierbare Kraftübertragung

Mit Hilfe dieser Diagramme soll es vor allem Praktikern und Ingenieuren ermöglicht werden, für verschiedene Anwendungen die jeweiligen Materialien auszuwählen.

Neben der Auswahl anhand eines Diagrammes sollen die Ergebnisse in Form einer Tabelle bzw. Anwendungsprogramms zugänglich gemacht werden. Hierbei wurde eine Eingabemaske unter Berücksichtigung der verschiedenen Parameter erstellt, wobei das Programm eine der Anforderung entsprechende Auswahl herausfiltert. Es sollen folgende Parameter berücksichtigt werden:

- Spannungen
- Dehnungen
- Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten
- Art der Aktivierung - elektrisch, mechanisch, passiv
- Art der Deaktivierung - Kühlung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt wurde, eignen sich Funktionsmaterialien sowohl für aktorische als auch sensorische Anwendungen. Aus diesem Grund muss bei der Erstellung von Anwendungshilfen auf diese unterschiedlichen Eigenschaften eingegangen werden. Hierzu werden zunächst sensorische Materialien klassifiziert und im Anschluss Anwendungshilfen für aktorische Funktionswerkstoffe aufbereitet.

5.2. Piezoelektrische Keramiken

Piezoelektrische Keramiken können aufgrund des piezoelektrischen und inversen piezoelektrischen Effekts sowohl als Aktor wie auch als Sensor eingesetzt werden.

Nachfolgend werden die wesentlichen, allgemeinen Eigenschaften kurz dargestellt:

- hohe erzielbare Reaktionszeiten
- geringe erzielbare Dehnwege
- Übertragbarkeit hoher Druckbelastungen

Auf die Herstellung von Piezoaktuatoren und -sensoren haben sich verschiedene Firmen spezialisiert. Diese Firmen stellen Piezokeramiken für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche her:

- Physikinstrumente Karlsruhe — Sensoren und Aktoren — www.physikinstrumente.de
- Ceramtec GmbH Plochingen — Sensoren und Aktoren — www.ceramtec.de
- piezosystemsjena — Piezoaktoren — www.piezोजना.com
- SI - Scientific Instruments GmbH — Piezoaktoren und -sensoren — www.si-gmbh.de
- THORLABS — Piezoaktoren — www.thorlabs.de
- Dynamic Structures & Materials, LLC — Piezoaktoren — www.dynamic-structures.com
- CEDRAT — Piezoaktoren — www.cedrat.com
- Piezomechanik — Piezoaktoren — www.piezomechanik.com

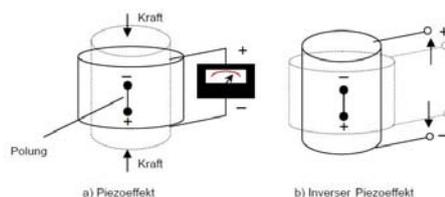


Abbildung 5.4.: Piezoelektrische und inverser Piezoelektrischer Effekt in [AW04]

5.2.1. Bauarten und aktuelle Entwicklungen piezoelektrischer Aktoren

Die Nutzung von Piezokeramiken für aktorische Anwendungsfelder ist aufgrund der hohen Arbeitsfrequenz vielfältig einsetzbar, jedoch sind die realisierbaren Stellwege sehr gering. Diesem Problem wird mit innovativen Aktorbauweisen begegnet.

Stapelaktoren

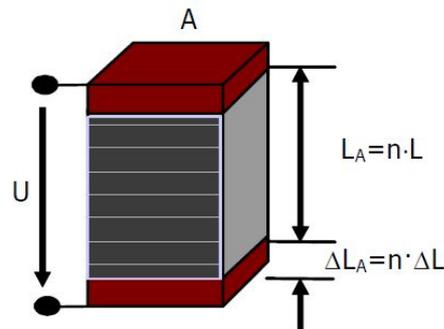


Abbildung 5.5.: Prinzipieller Aufbau eines Stapelaktors in [AW04]

Die Vorteile von Stapelaktoren liegen im relativ großen Stellweg, homogener Belastungen, hohe Lebensdauer, schnelle Abkühlung und den Entfall einer Rückstellvorrichtung. Als Nachteil ist der erhöhte Herstellungsaufwand zu nennen, [FI].

Biegeaktoren

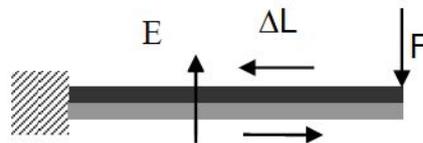


Abbildung 5.6.: Prinzipieller Aufbau eines Biegeaktors in [AW04]

Die Vorteile von Biegeaktoren liegen im relativ großen Stellweg. Als Nachteil sind inhomogene Belastungen, eingeschränkte Lebensdauer und problematische Rückverformungen zu nennen, [FI].

Tubusbauform

Tubusse sind piezokeramische Röhren mit außen- und innenliegender Elektrodenbeschichtung. Unter Anlegen eines elektrischen Feldes können die Tubusse sich je nach Elektrodenanordnung axial oder radial verformen.

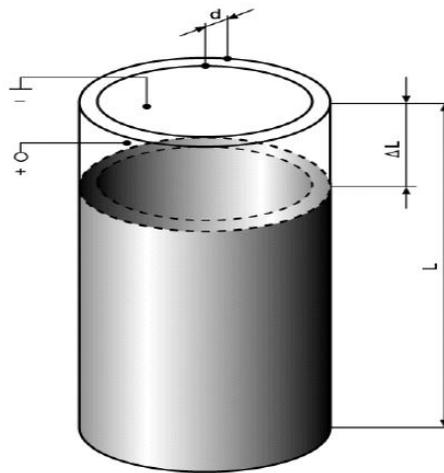


Abbildung 5.7.: Prinzipieller Aufbau eines Tubusaktors in [AW04]

Piezowaben

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens hat Dr. Jörg Melcher vom DLR-Institut für Faser-verbundleichtbau und Adaptronik ein „Bionisches Schwingungserregersystem“ entwickelt. Hierbei wurde ein piezokeramischer Aktor entwickelt, welcher durch eine Bienenwabe inspiriert wurde. Diese Aktorensysteme bieten mehrere Vorteile, sie können in einem Lasersinterprozess wachsen, sind für hochdynamische Lasten geeignet und sind auf Grund der Wabenform hinsichtlich Spannungskonzentration und damit einhergehender Versagensszenarien weniger anfällig, vgl. [Mel09].

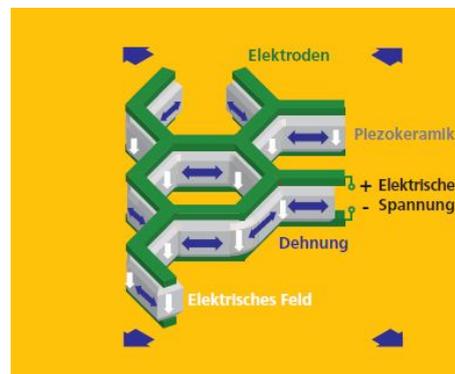


Abbildung 5.8.: Wirkungsweise der Piezowaben [Mel09]

5.2.2. Auswahl von Piezoaktoren

Die Auswahl eines für die jeweilige Anwendung geeigneten Piezoaktors ist aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Bauformen und Herstellern sehr aufwändig. Aber durch die große Bandbreite an verschiedenen Angeboten ist es möglich, für vielfältige Anwendungsfelder die geeignete Bauform mit den am besten ausgelegten Eigenschaften zu nutzen. Die Ermittlung eines geeigneten Aktors ist immer in Absprache mit dem Hersteller zu vollziehen. Hierzu sind folgende Fragen im Vorfeld zu klären, vgl. [Gmb]:

- Handelt es sich um statische oder quasi-statische Belastungen?
 - Welchen Stellweg soll der Aktor beim maximalen Spannungshub erzeugen?
 - Welche Kraftänderung soll der Piezoaktor beim maximalen Spannungshub erzeugen?
 - Welche statische Kraft (z.B. Gewicht), Grundlast etc. wirkt auf den Aktor?
- Handelt es sich um eine dynamische Belastung?
 - Welche Frequenz soll bei maximalem Hub erreicht werden?
 - Welche maximale Frequenz soll überhaupt erreicht werden (bei welcher Auslenkung)?
 - Welche kürzeste Anstiegs-/Abfallzeit einer bestimmten Stellbewegung soll erzielt werden?
 - Welche Masse ist an den Aktor angekoppelt?

Zu einer groben Vordimensionierung sollen im Rahmen dieser Arbeit Handwerte zur Auswahl von Piezoaktoren aufgezählt werden:

- „Bei üblicher open-loop-Spannungssteuerung weist ein Piezostapel eine Steifigkeit von ca. 20 - 25% der eines Stahlkörpers gleicher Dimensionierung auf, „ [Gmb].
 - Typische Betriebsfrequenzen liegen bei 100 Hz bis über 1000 Hz. Somit sind Resonanzerscheinungen im Bauwesen auszuschließen.
-

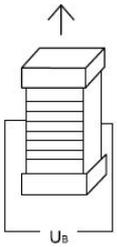
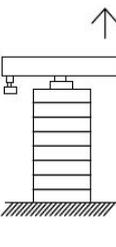
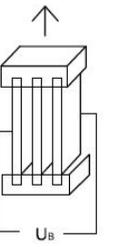
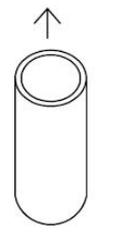
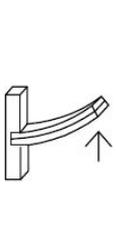
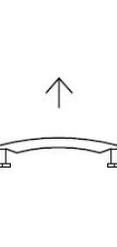
Längenänderung	$x=d_{33} \cdot U_B$			$x=d_{31} \cdot U_B$		
Standard-Bauteilformen	 Stapel	 Stapel mit Hebelübersetzung	 Streifen	 Tubus	 Blegewandler	 Biegescheibe
Typische Stellwege	20-200 μm	<1000 μm	<50 μm	<50 μm	<1000 μm	<500 μm
Typische Stellkräfte	< 30.000 N	< 3.500 N	< 1.000 N	< 1.000 N	< 5 N	< 40 N
Typische Betriebs-spannungen	60 - 200 V 200 - 500 V 500 - 1000 V	60 - 200 V 200 - 500 V 500 - 1000 V	60 - 500 V	120 - 1000 V	10 - 400 V	10 - 500 V

Abbildung 5.9.: Piezoaktorenübersicht nach [Bas00]

5.3. Formgedächtnislegierungen

In Abschnitt 2.1 wurden die wesentlichen Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen erläutert. Hierzu zählen unter anderem:

- Änderung der Steifigkeit und Form in Abhängigkeit von Temperatur oder mechanischer Spannung
- Realisierungen von Dehnungen bis zu 8%
- Die Verformungsgeschwindigkeit von < 1 Hz ist relativ gering
- Formänderung als Einweg-, Zweiwegeeffekt und Pseudoelastizität möglich

Im Weiteren sollen genauere Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen dargelegt werden. Anhand dieser Informationen soll eine erleichterte Vorauswahl von FGL-Arten für spezielle Einsatzgebiete ermöglicht werden.

Auf die Herstellung von Formgedächtnis-Aktuatoren haben sich verschiedene Firmen spezialisiert. Diese Firmen bzw. Forschungseinrichtungen stellen Formgedächtnislegierungen für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche her:

- TiNi Aerospace, Inc. Innovative Mechanism Solutions — www.tiniaerospace.com
- Johnson Matthey Medical — jmmedical.com
- smaterial — www.smaterial.com
- CASMART — casmart.tamu.edu
- SMA at IP ASCR — department.fzu.cz/ofm/sma//index.php?file=./home.html

5.3.1. Formgedächtnislegierungsarten

Zu den derzeit gebräuchlichsten Formgedächtnislegierungen gehören unter anderem CuZnAl, CuAlNi, FeNiCoTi, FeMnSi und NiTi- Legierungen. In den nachfolgenden Tabellen wurden aus verschiedenen Literaturquellen die wesentlichen materialbeschreibenden Parameter zusammengestellt. Hierbei ist erkennbar, dass diese Legierungsarten ähnliche, im Detail aber doch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Aus diesem Grund ist die Vorauswahl von Formgedächtnislegierungen für spezielle Anwendungen sehr sinnvoll und kann durch folgende prinzipielle Fragen unterstützt werden:

- Umgebungstemperatur in [°C]
 - Ist der Umwandlungseffekt mehrfach durchzuführen [ja/nein]
 - Dehnungsweg im Bereich der Phasenumwandlung [%]
 - erforderliche Zugfestigkeit [N/mm²]
 - Bruchdehnung [%]
 - erforderliche Druckspannung [N/mm²]
 - Korrosionsbeständigkeit [ja/nein]
 - Biokompatibilität
-

Tabelle 5.1.: Technisch nutzbare Formgedächtnislegierungsarten, vgl. [F1]

Eigenschaften	NiTi	CuZnAl	CuAlNi	FeNiCoTi	FeMnSi
Umwandlungs- temperatur [°C]	-50...100	-100...100	80...200	-150...300	50...250
max. Einweg- effekt [%]	8	5	5	1,5	2,0
max. Zweiweg- effekt [%]	6	1	1	0,5	0,3
max. Pseudoelas- tizität [%]	8	2	2	1,5	1,5
Probleme	schlecht, zerspanbar, teuer	Entmischung, Grobkorn	schlecht kaltum- formbar	Stabilität und Effekt geringe	Stabilität und Effekt geringe
Vorteil	Effektgröße, Stabilität	kosten- günstig	kosten- günstig	kosten- günstig	kosten- günstig

Tabelle 5.2.: FGL - Eigenschaften in [Gla11]

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte [g/cm ³]	6,4...6,5	7,8...8,0	7,1...7,2
Zugfestigkeit [MPa]	800...2000	400...700	700...800
Bruchdehnung [%]	40...50	10...15	5...6
Maximale As-Temperatur [°C]	120	120	170
Überhitzbarkeit [°C]	400	160	300
max. Dehnung bei Einwegeffekt [%]	8	4	5
max. Dehnung bei Zweiwegeffekt [%]	4	1	1,2
Zahl der Zyklen [n]	100.000	10.000	1.000
Verminderung der Effektgröße [%]	kein Abbau	ca. 10 %	ca. 10%

Tabelle 5.3.: Eigenschaften von FGL aus NiTi, CuAlNi und CuZnAl [Mus05]

	NiTi	CuAlNi	CuZnAl
Umwandlungs-temperatur [°C]	-100...+100	-150...+200	-200...120
Hysteresenbreite [°C]	15...30	20...30	10...20
Anzahl der thermischen Zyklen	100.000	5.000	10.000
max. Dehnung bei Einwegeffekt [%]	8	6	4
max. Dehnung bei Zweiwegeffekt [%]	5	1	0,8
Dichte [g/cm ³]	6,4...6,5	7,0...7,2	7,8...8,0
Elastizitätsmodul Martensit [GPa]	70		
Elastizitätsmodul Austenit [GPa]	35	80...100	70...100
Zulässige Spannungen für zyklische Beanspruchung [MPa]	150	100	75
Zugfestigkeit [MPa]	800...1000	700...800	400...700
Bruchdehnung [%]	40...50	5...6	10...15
Korrosionsbeständigkeit	sehr gut	gut	befriedigend
Biokompatibilität	sehr gut	schlecht	schlecht

Tabelle 5.4.: Maximal erzielbare Arbeitsdichte und Wirkungsgrad von NiTi-Drähten in [Köh02]

Lastfall	Arbeitsdichte [J/kg]	Wirkungsgrad [%]
Zug	460	1.3
Torsion	80	0.23
Biegung	4.6	0.013

Tabelle 5.5.: Eigenschaften und Werkstoffkennwerte von NiTi, [FI]

Eigenschaften	Einheit	NiTi-Legierungen
1. Physikalische Eigenschaften		
Schmelzpunkt	°C	1300
Dichte	10 ³ kg/m ³	6,5
spezifische Wärmekapazität	J/kgK	470-620
thermische Leitfähigkeit des Martensit	W/mK	8,6
thermische Leitfähigkeit des Austenit	W/mK	18
linearer therm. Ausdehnungskoeffizient des Martensit	10 ⁻⁶ K ⁻¹	6,6
linearer therm. Ausdehnungskoeffizient des Austenit	10 ⁻⁶ K ⁻¹	11
Korrosionseigenschaften und Biokompatibilität	-	sehr gut
Verschleißbeständigkeit	-	gut
2. Elektrische und magnetische Eigenschaften		
spezifischer elektrischer Widerstand des Martensit	Omega m	0,8
spezifischer elektrischer Widerstand des Austenit	Omega m	1,0
magnetische Permeabilität	-	<1,002
magnetische Suszeptibilität		3x10 ⁶
3. Mechanische Eigenschaften		
E-Modul des Martensit	GPa	70-80
E-Modul des Austenit	GPa	23-41
Zugfestigkeit kaltverfestigt	MPa	1300-2000
Zugfestigkeit vollständig gegläht	MPa	700-1100
Streckgrenze Austenit (konventionell)	MPa	550-700
Plateauspannung Martensit	MPa	70-200
Plateauspannung Austenit	MPa	200-650
Querkontraktionszahl	-	0,33
Bruchdehnung kaltverfestigt	%	5-20
Bruchdehnung vollständig gegläht	%	20-60
4. Umwandlungs- und Formgedächtniseigenschaften		
Umwandlungstemperaturen	°C	-50 - 100
Temperaturhysterese	°C	5 - 50
max. Beanspruchungstemperatur (kurzzeitig)	°C	300
max. Belastung	MPa	600-900
max. Dehnung pseudoelastisch / pseudoplastisch	%	10 / 8
Umwandlungsenthalpie	J/kg	20.000
pseudoelastische Energiespeicherung	J/g	6,5
max. Arbeitsvermögen	J/cm ³	10
Belastungsrate	MPa/K	5-15
Dämpfungskapazität	%SDC	15

Fortsetzung auf nachfolgender Seite

Tabelle 5.5 – Fortsetzung von vorhergehender Seite

Eigenschaften	Einheit	NiTi-Legierungen
max. Umwandlungsdehnung und -spannung bei 1 Zyklus	% / MPa	8 / 600
bis 100 Zyklen		4 / 400
bis 100.000 Zyklen		2 / 200
über 100.000 Zyklen		1 / 150
5. Verarbeitungseigenschaften		
Warmumformbarkeit	-	gut
Kaltumformbarkeit	-	schnell verfestigend
Zerspanbarkeit	-	schlecht

Tabelle 5.6.: FGL - Anwendungsgebiete in [Gla11]

Technik / FG-Effekt	Einweg	Zweiweg	Pseudo-Elastizität
Verbindung, Befestigung	Rohrverbindungen		Dichtungen, Brillenrahmen
Regelung		Ventilsteuerung, Wärme-, Kälteschutz, Gewächshaustemperatur	
Kraftfahrzeug		Schließsystem, Öffnung von Nebellampen, Schalldämmung	hochdämpfende Legierungen
Datenverarbeitung	Steckverbindungen für Schaltkreise, geflochtene Abschirmung von Kabeln	Kopf/Scheibe-Systeme, magn. Datenspeicherung, Farbänderung für optische Speicherung	
Energie/ Motor		Wärmekraftmaschinen, Steuerung von Solarzellen	
Automation		Roboterglieder, Manipulatoren	
Medizin	Implantate (Osteosynthese)	Endoskopsteuerung	Zahnspangen, Stents
Kleidung	Versteifung von Gewebe		Gummi-Ersatz

5.3.2. Anwendungen von Formgedächtnislegierungen

Anwendungen in der Aktorik, nach [FI]:

- Schliess-/ Verriegelungsmechanismen in der Haushaltsgeräte- und Automobilindustrie
- Ventilantriebe in der Haushaltsgeräte- und Automobilindustrie
- Antriebe von Sicherheitseinrichtungen im Brandschutz
- Klappenverstellrichtungen im Bereich Heizungs- und Klimatechnik
- Stellantriebe in der Gebäude- und Automobiltechnik
- muskeläquivalente Antriebe in der Robotertechnik und Prothetik
- Mikropumpen und Mikrogreifer

Tabelle 5.7.: Vergleich Aktor-Bauformen in [FI]

Bauform	Vorteile	Nachteile
Zugdraht/ Druckstab	große Kraft, homogene Belastung, hohe Lebensdauer, schnelle Abkühlung	sehr kleiner Stellweg, Befestigungsmöglichkeit nötig
Torsionsdraht	großer Stellwinkel	inhomogene Belastung, Lebensdauer eingeschränkt, gleichmäßige Rückverformung problematisch
Schraubenfeder	sehr großer Stellweg, geringer Platzbedarf	spezielle Temperform, inhomogene Belastung, ungleichmäßige Abkühlung
Biegestreifen	großer Stellwinkel	inhomogene Belastung, Lebensdauer eingeschränkt, Rückverformung problematisch
Schichtverbund	großer Stellwinkel, homogene Belastung, hohe Lebensdauer, schnelle Abkühlung, Rückstellvorrichtung	hoher Herstellungsaufwand

Anwendungen als elastische Elemente, nach [FI]:

- Stents/ Zahnspangen
- Flexible medizinische Instrumente wie Katheter oder Klammern
- Brillengestelle
- Elastische Elemente zur Formerhaltung in Bekleidungsstücken
- Gurtkraftbegrenzer
- Festkörpergelenke
- Elemente zur Dämpfung von Vibrationen in Kupplungen und Getrieben
- Erdbebedämpfungsrichtungen in Gebäuden



Abbildung 5.10.: FGL - Öffnungsmechanismus in [Gla11]

5.4. Magnetische Formgedächtnislegierungen

Magnetische Formgedächtnislegierungen weisen im Gegensatz zu konventionellen Formgedächtnislegierungen sehr hohe Aktivierungsfrequenzen auf. Dies wird durch die Aktivierung über ein Magnetfeld möglich. Hierbei können auch Dehnungen bis zu 10% gemessen werden. Vor allem NiMnGa-Legierungen weisen große Dehnungen auf, vgl. Abbildung 5.11.

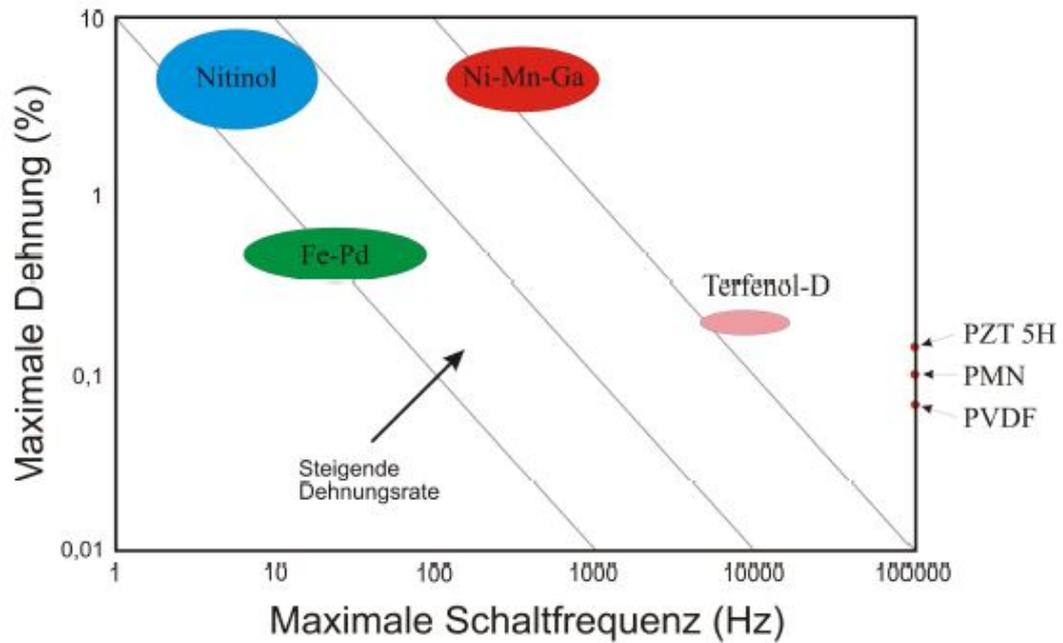


Abbildung 5.11.: Maximale Schaltfrequenzen und Dehnungen gängiger Aktormaterialien [CW03] in [Thi05]

Im Bereich der magnetischen Formgedächtnislegierungen müssen noch viele Untersuchungen angestellt werden und diese in Anwendungsgebiete zu überführen, einige Forschungsergebnisse sind in [KL05] dargelegt.

5.5. Anwendungshilfen

Nachfolgend wird auf Grundlage der Eigenschaftenrecherche der Funktionswerkstoffe eine Anwendungshilfe erstellt und vorgestellt.

Mit Hilfe dieser Anwendungshilfe bzw. Diagramme soll es vor allem Praktikern und Ingenieuren ermöglicht werden, für verschiedene Anwendungen die jeweiligen Materialien auszuwählen. Die Anwendungshilfe ist in weiteren Forschungsvorhaben durch ergänzende Recherchen von smarten Materialien auszuarbeiten und fortzuschreiben. Dies erscheint vor allem aufgrund der ständigen Weiterentwicklung im Bereich der Materialwissenschaften notwendig.

Auf den folgenden Seiten wird **SMARTchoice**, ein Mock-up für ein Auswahlprogramm zur Definition passender Funktionsmaterialien im Bauwesen, vorgestellt. **SMARTchoice** bietet derzeit die Möglichkeit sensorische, wie auch aktorische Materialien hinsichtlich folgender Kriterien auszuwählen:

- Spannungen
- Dehnungen
- Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten
- Art der Aktivierung - elektrisch, mechanisch, passiv
- Art der Deaktivierung - Kühlung

Der konzeptionelle Aufbau des Auswahltools **SMARTchoice** wird im folgenden erläutert. Für die Ermittlung geeigneter Funktionsmaterialien werden verschiedene Auswahlfenster angeboten. Zum einen besteht die Möglichkeit sensorische Materialien und zum anderen können aktorische Materialien hinsichtlich verschiedener Funktionen selektiert werden.

5.5.1. Auswahlmatrix Sensorik

Derzeit können sensorische Materialien für die Eigenschaften Druck, Temperatur, Verformung und Beschleunigung untersucht werden, vgl. Abbildung 5.12. In späteren Ausbaustufen des Programms ist es auch denkbar multiple Auswahlkriterien zu untersuchen.

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Druck	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Temperatur	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Verformung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Beschleunigung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Druck	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text" value="Piezo"/>
Temperatur	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Verformung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Beschleunigung	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>

zurück zur Übersicht

Abbildung 5.12.: Auswahlmatrix Sensorik in SMARTchoice

5.5.2. Auswahlmatrix Aktorik

Für die Auswahl aktuatorischer Werkstoffe steht analog zu den sensorischen Werkstoffen eine Auswahlmatrix zur Verfügung. In dieser Matrix besteht die Möglichkeit, Materialien hinsichtlich der Eigenschaften Reaktionszeit, Eignung für Faserverbundwerkstoffe, Stellweg, Eignung für Erdbbensicherheit, Art der Aktivierung, Umgebungstemperatur, bauphysikalische Ansprüche, schalltechnische Ansprüche und verformungstechnische Ansprüche zu untersuchen, vgl. Abbildung 5.13.

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Reaktionszeit [s] [Hz]	<input type="checkbox"/> <1 Hz <input type="checkbox"/> >1 Hz	<input type="text"/>
Eignung für Faserverbundwerkstoffe	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Stellweg [mm] [cm] [%]	<input type="checkbox"/> < 1 mm <input type="checkbox"/> > 1 mm	<input type="text"/>
Eignung für Erdbbensicherheit [m/s ²]	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Art der Aktivierung [aktiv/passiv]	<input type="checkbox"/> aktiv <input type="checkbox"/> passiv	<input type="text"/>
Umgebungstemperatur [°C]	<input type="checkbox"/> 0-100°C <input type="checkbox"/> > 100°C	<input type="text"/>
Bauphysikalische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Schalltechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Verformungstechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>

Einzelkriterium	Auswahl	Smart-Material
Reaktionszeit [s] [Hz]	<input type="checkbox"/> <1 Hz <input type="checkbox"/> >1 Hz	<input type="text"/>
Eignung für Faserverbundwerkstoffe	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Stellweg [mm] [cm] [%]	<input type="checkbox"/> < 1 mm <input type="checkbox"/> > 1 mm	<input type="text"/>
Eignung für Erdbbensicherheit [m/s ²]	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Art der Aktivierung [aktiv/passiv]	<input checked="" type="checkbox"/> aktiv <input type="checkbox"/> passiv	<input type="text" value="FGL, Piezo, MSM"/>
Umgebungstemperatur [°C]	<input type="checkbox"/> 0-100°C <input type="checkbox"/> > 100°C	<input type="text"/>
Bauphysikalische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Schalltechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>
Verformungstechnische Ansprüche	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="text"/>

zurück zur Übersicht

Abbildung 5.13.: Auswahlmatrix Aktorik in SMARTchoice

Die vom Programm als geeignet ausgegebenen Materialien können in dieser Matrix angeklickt werden und öffnen somit ein Diagramm mit den wesentlichen Eigenschaften, vgl. Abbildungen 5.14 und 5.15.

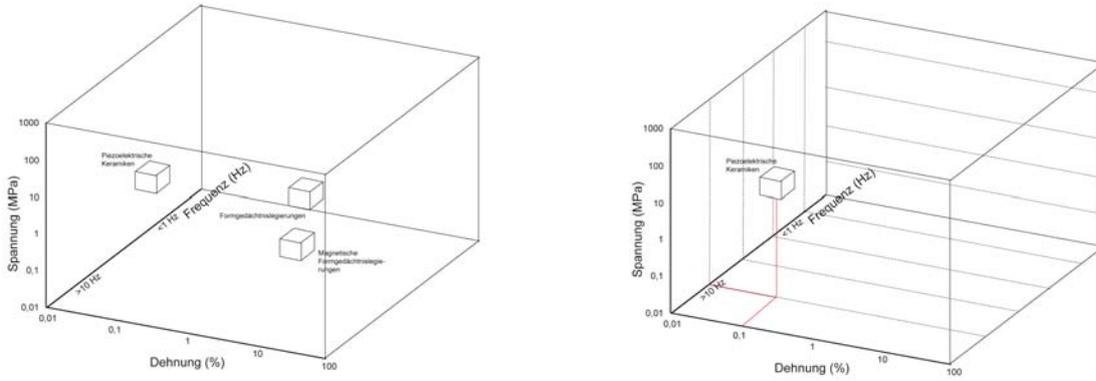


Abbildung 5.14.: Funktionsmaterialien - Auswahlmatrix, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08b]

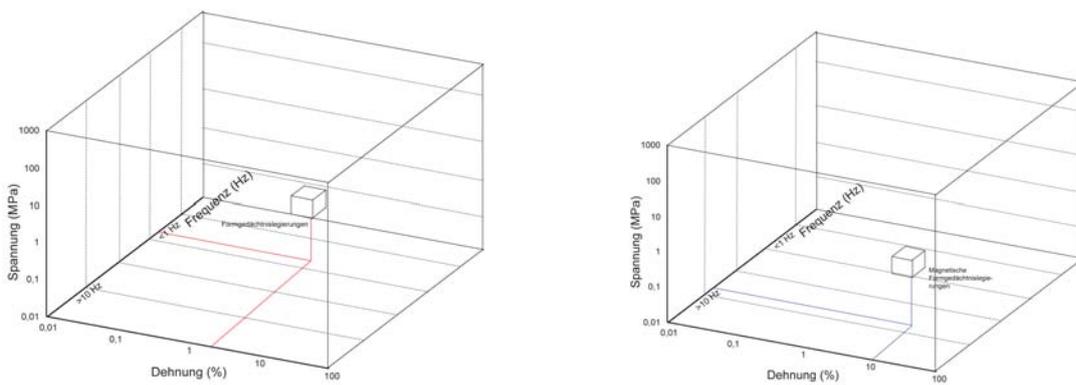


Abbildung 5.15.: Funktionsmaterialien - Auswahlmatrix, erweiterte Grafik des Ansatzes von [Lag08b]

6. Demonstrationsobjekt

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens hinsichtlich aktiver Faserverbundwerkstoffe sollen an einem Demonstrationsobjekt näher untersucht, veranschaulicht und verifiziert werden. Hierzu wird ein leichtes, materialsparendes und multifunktionales Bauteil unter Nutzung moderner Simulationsmethoden und -programme entwickelt und rechnerisch untersucht.

6.1. Vorüberlegungen

Funktionswerkstoffe bieten im konstruktiven Ingenieurbau viele Anwendungsmöglichkeiten um den aktuellen Anforderungen hinsichtlich ressourcenschonendem Bauen, Nachhaltigkeit und Effizienz gerecht zu werden. Die Anwendung von Smart Materials wurde in den letzten Jahren an vereinzelt Projekten erprobt und ist somit schon heute ein spannendes Arbeitsfeld für praktisch tätige Ingenieure und Architekten. Die vorgestellten Projekte konnten zeigen, dass der Einsatz bei entsprechender Planung durchaus sinnvoll sein kann. Vor allem im Bereich der Bauwerksuntersuchung und der Schwingungstilgung konnten bereits umfangreiche Erfolge verzeichnet werden. Allerdings ist neben dem Einsatz von Funktionswerkstoffen die Standsicherheit auch immer durch konservative Methoden sicherzustellen. Der Nutzerkomfort von Brücken und Hochbauten kann jedoch durch den Einsatz von aktiven Systemen verbessert werden. Im Hinblick auf die Robustheit sollten bei Dämpfungsmaßnahmen passive Systeme ohne externe Energiezufuhr verwendet werden. Aber auch im Bereich der Ertüchtigung bestehender Bauten von historischer (kulturhistorischer) Bedeutung ist der Einsatz möglich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von Smart Materials an genau identifizierten Bereichen in Tragwerken zielführend sein kann. Somit geht der Mehrwert der beschriebenen neuartigen Anwendungen über die hohen Kosten der Funktionswerkstoffe hinaus.

Der Einsatz aktiver Materialien sollte aufgrund der hohen Kosten aber auch aufgrund der hohen energetischen und materialtechnischen Herstellungsaufwendungen genau untersucht werden.

Am Beispiel des Screenhaus.SOLAR [RG10] wurden die Materialaufwendungen für die Herstellung des Kinos im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen untersucht.



Abbildung 6.1.: Screenhaus.Solar [RG10]

Anhand dieser Grafik wird deutlich, welche Unterschiede bei Leichtbaukonstruktionen und konventionellen Konstruktionen hinsichtlich Materialgewicht und Herstellungsaufwand (ökologischer Rucksack) zu verzeichnen sind.

Screenhaus.SOLAR - ECOLOGICAL BACKPACK (data sheet)

material	Screenhaus.SOLAR		double garage (reinforced concrete)		double garage (brickwork)	
	weight [t]	ecological weight [t]	weight [t]	ecological weight [t]	weight [t]	ecological weight [t]
wood	0,52	7,72	-	-	-	-
reinforcement	-	-	1,18	85,08	0,84	60,72
steel	0,20	14,46	-	-	-	-
reinforced concrete	-	-	63,00	300,76	35,00	167,09
brickwork	-	-	-	-	8,96	70,40
membrane (PTFE)	0,18	86,77	-	-	-	-
roof sealing (PE)	-	-	0,11	225,19	0,11	225,19
ton	0,90	108,95	64,29	611,03	44,91	523,40

Legend: ■ weight of construction ■ ecological backpack

Abbildung 6.2.: Ökologischer Rucksack [RG10]

Das Screenhaus wurde unter verschiedenen Randbedingungen optimiert. Bei solch leichten Tragkonstruktion stellt das Eigengewicht gegenüber dem Traggewicht nur ein Minimum dar. Dennoch ist auch ein Tragwerk des Leichtbaus für alle eventuell auftretenden Lastfälle zu optimieren. Als weitere Optimierungsvarianten stellen sich folgende Szenarien dar: Das Tragwerk wird für die häufigen Lastfälle ausgelegt und die weiteren Lastfälle

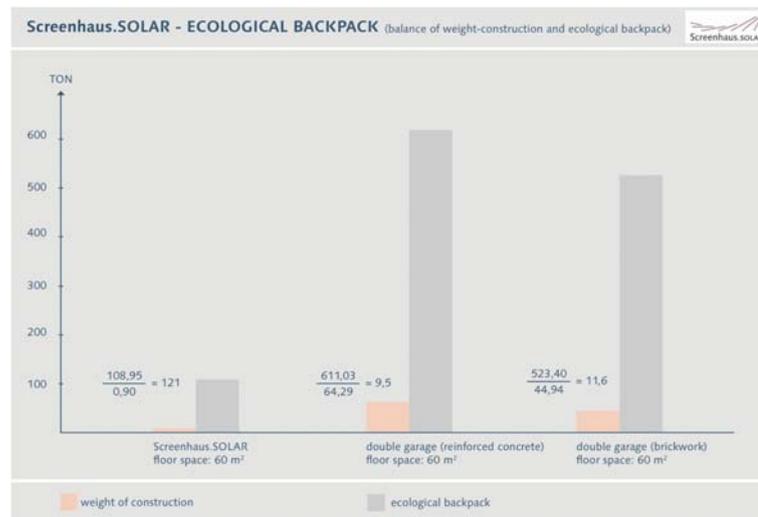


Abbildung 6.3.: Ökologischer Rucksack [RG10]

(seltene Lastfälle) werden über adaptive Systeme gesteuert. Oder das Tragwerk wird für Zustände der Tragfähigkeit ausgebildet und die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (Verformung, Schwingung) werden mit Hilfe adaptiver Systeme gesteuert.



Abbildung 6.4.: Screenhaus.Solar im Schnee [RG10]

Die schon mehrfach angesprochenen Kosten für aktive Materialien sind aufgrund der geringen Nachfrage sehr hoch. Doch auch innerhalb der Materialgruppen, wie zum Beispiel (Formgedächtnislegierungen) treten sehr hohe Unterschiede auf.

Table 2 - Property values of selected shape memory alloys					
Property	unit	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni	Fe-Mn-Si-Cr
Young's modulus austenite martensite	GPa	70-98 27	70-100 70	80-100 80	140 (1) ^d
yield strength austenite martensite	MPa	100-800 50-300	150-350 80-300	150-300 150-300	~200 (1)
ult. tensile strength austenite martensite	MPa	800-1500 700-2000	400-900 700-800	500-1200 1000-1200	650 (1)
elongation at failure austenite martensite	%	15-20 20-60	10-15	8-10	29 (1)
recovery strain	%	8	3.5	2	3.4 (3)
max. recovery stress	MPa	600-900	400-700	300-600	400 (3)
superelastic energy storage	Joule/g	6.5	1.8		non
specific damping capacity (SDC) ^a	%	15-20	30-85	10-20	-
fatigue strength N=10 ⁶	MPa	350	270	350	-
resistivity ^b	$\Omega\text{m} \cdot 10^{-6}$	0.5-1.1	0.07-0.13	0.1-0.14	1.0-1.3 (2)
cost ratios ^c		10-100	1-10	2-20	-
Taken from [4]					
Reference	(1) measurements with Fe-27%Mn-6Si-5Cr at 22°C (2) data given by the material supplier (3) from [21] for Fe-28%Mn-6Si-5Cr-1.5VN (mass%)				
^a dependent on frequency and amplitude					
^b varies for martensite and austenite					
^c varies greatly with shape, required quantities, etc.					
^d higher values was given by the material supplier					

Abbildung 6.5.: Formgedächtnislegierungen Kostenübersicht [JCMR05]

6.2. Relevante Entwurfskriterien

Das Bauteil muss den nachfolgenden Ansprüchen genügen:

- leichte Bauweise
- materialsparend
- mobil
- multifunktional
- Beachtung einer eventuellen Erweiterbarkeit/ Rückbaubarkeit
- Untersuchung der Oberflächenausbildung im Hinblick auf eine möglichst geringe Windbelastung des Pavillons

Folgende einzelne Arbeitsschritte zum Entwurf, der Formfindung, der Berechnung und Dimensionierung des Pavillons sind durchzuführen:

- parametrischer Entwurf - damit Änderungen frühzeitig und effektiv einfließen und umgesetzt werden können
- parameterbasierte statische und dynamische Berechnung
- Analyse der Verformungen und Knotenverschiebungen - Systemanpassung und -optimierung
- grafische und numerische Aufarbeitung der Systemsteifigkeitsveränderungen und -verbesserungen aufgrund der Topologieoptimierung im vorangegangenen Arbeitsschritt
- Ermittlung von Zonen geringer Steifigkeit und großer Verformungen - in diesen Bereichen ist der Einsatz aktiver Materialien zu diskutieren und deren Anwendung in genau identifizierten Bereichen zu untersuchen.

Des Weiteren ist auf die folgende Fragestellung einzugehen:

- materialgerechtes Entwerfen
- Schalenträgerwerke müssen einer Formfindung unterzogen werden, damit sie nur (oder zu großen Teilen) Normalkräfte abtragen
 - FVK-Bauteile sind für die Lastabtragung von Normalkräften sehr geeignet
- Biege- und Querkräfte sind in Schalenträgerwerken zu vermeiden
 - FVK-Bauteile sind für die Lastabtragung von Querkräften ungeeignet, Abtragung der Lasten über Matrix

- Herkömmliche Schalenträgerwerke sind häufig mit Rippen zur Verhinderung einer möglichen Beulgefahr unterstützt
 - Integration speziell ausgerichteter Fasern zur Verhinderung der Beulgefahr, ohne sichtbare Rippenstrukturen
- Herkömmliche Schalenträgerwerke haben meist keine Öffnungen, schlechte Belichtung und Belüftung
 - Integration speziell ausgerichteter Fasern zur Versteifung der Konstruktion und Ermöglichung der Integration von Öffnungen
- Nutzung aktiver (smarter) Materialien als Faserstränge zur Versteifung der Schalenträgerwerke
 - Integration der aktiven Fasern an genau identifizierten Bereichen, nachdem keine weitere Verbesserung durch adaptive Topologie- und Formoptimierung erreicht werden konnte

Beispielhafte Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen im Pavillonbau:



Abbildung 6.6.: Pavillon Schwerin - ox2-Architekten, nach Daniel Trappen in [FOM03]

Neben der Betrachtung von Schalenträgerwerken ist auch hinsichtlich Faltungen bzw. einer Kombination von Faltungen und Schalenträgerwerken zu überlegen, vgl. Abbildung 6.7.

6.3. Schalenträgerwerke - rechnerische Voruntersuchungen

Als erste Voruntersuchung für die Formfindung des Versuchsbaus wurden verschiedene Schalenkonfigurationen untersucht. Hierbei wurde unter anderem auf die Formfindung und schalenspezifischen Probleme eingegangen. In den nachfolgenden Abbildungen (6.8, 6.9, 6.10, 6.11) werden die qualitativen Spannungsverläufe der Schalenkonfigurationen mit und ohne Öffnungen verdeutlicht. Dies bestätigt den Ansatz, dass bei Schalenträgerwerken im Bereich von Öffnungen erhöhte Aufmerksamkeit hinsichtlich der Verformungen und Spannungsspitzen gelegt werden.



Abbildung 6.7.: Renzo Piano Salzhaus; 1966 - [www.kunststoffbauten.de/img/small_salzhalle-piano1966.jpg]

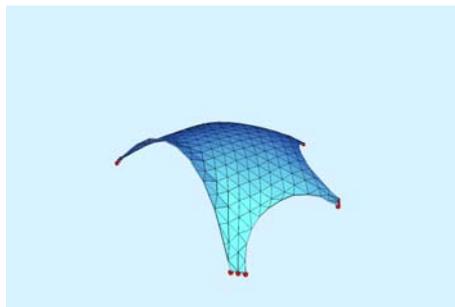


Abbildung 6.8.: Naturtheater Grötzingen - Formfindung im virtuellen Raum

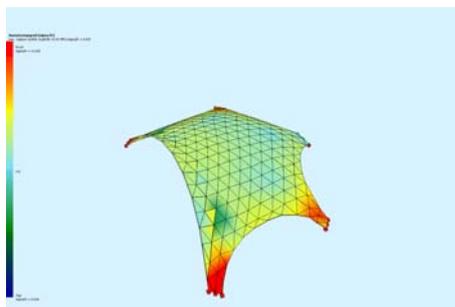


Abbildung 6.9.: Naturtheater Grötzingen - Spannungsverlauf



Abbildung 6.10.: Naturtheater Grötzingen - Öffnungen

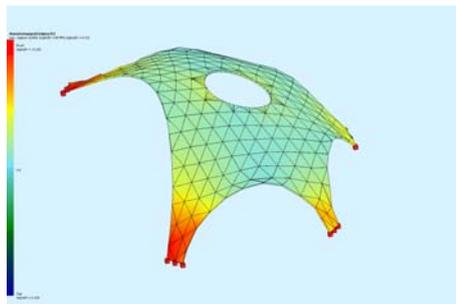


Abbildung 6.11.: Naturtheater Grötzingen - Öffnungen und Spannungsverlauf

6.4. Demonstrationsobjekt - DO1

Anhand des Demonstrationsobjektes werden die Möglichkeiten des Einsatzes aktiver Werkstoffe in Faserverbundstrukturen aufgezeigt. Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Schnittstellen werden hierbei auf ihre Leistungsfähigkeit geprüft. Diese stehen im Fokus der Diskussion der nachfolgenden Kapitel, die Berechnungen und Optimierungen stellen vielmehr die prinzipiellen Möglichkeiten dar.

Als Demonstrations- bzw. Verifikationsobjekt wird ein Bogentragwerk gewählt. Das Bogentragwerk ist als parametrisches Verbindungsbauteil für Schalentragwerke einsetzbar.

6.4.1. Definition der Geometrie- und Materialparameter

Bei der Entwicklung und der Wahl der Materialparameter wurden faserverstärkte Kunststoffe eingesetzt, als Vorzugsmaterial wurde GFK gewählt. Sämtliche Abmessungen gelten als exemplarisch, da das Objekt parametrisch erzeugt wurde.

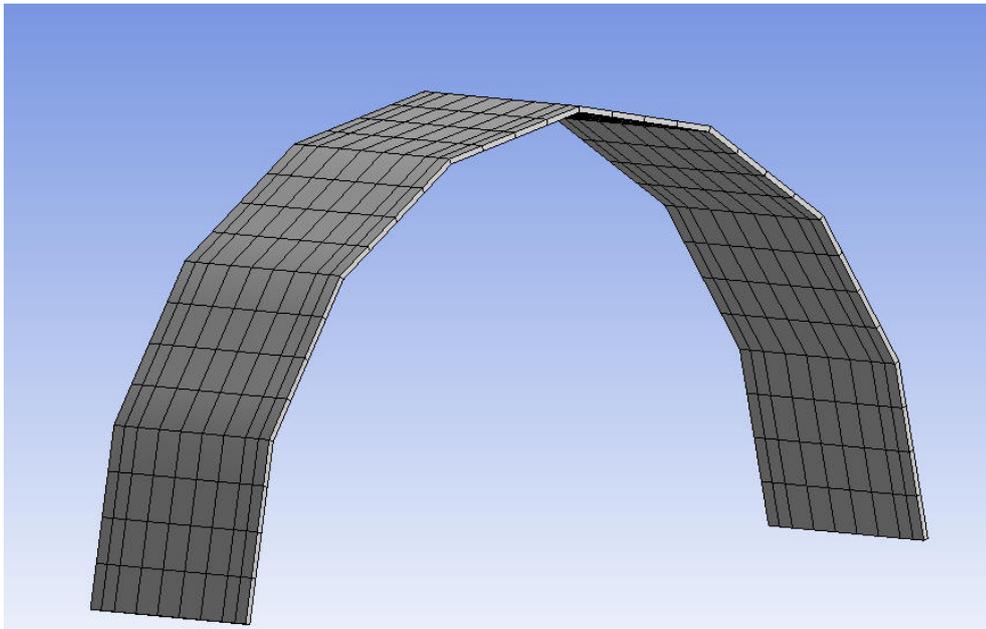


Abbildung 6.12.: Demonstrationsobjekt DO1 — bogenförmiges Fugenbauteil

6.4.2. Lastfälle

Es werden im Rahmen der Untersuchungen folgende Lastfälle berücksichtigt:

- LF Eigengewicht
- LF Wind (statisch)
- LF Wind (dynamisch)

Bei der rechnerischen Überprüfung des Demonstrationsobjektes wurden neben dem Eigengewicht auch reduzierte Windlasten, nach DIN EN 13782, angewendet, da das Bauteil prinzipiell temporären Charakter aufweist.

6.4.3. Berechnungsergebnisse

Auf Basis der zuvor definierten Lastfälle wurden die notwendigen statischen und dynamischen Berechnungen durchgeführt.

Anhand der Berechnung der Einzellastfälle sollen vor allem die möglichen Optimierungsverfahren für die einzelnen Lastfälle verdeutlicht werden.

Berechnungsergebnisse LF Eigengewicht

Die Berechnung des Objektes infolge Eigengewicht, vgl. Abbildung 6.13, liefert folgende Spannungen und Verformungen, vgl. Abbildung 6.14. Ein weiterer Hinweis auf das prinzipielle Tragverhalten wird dank der Modalanalyse erkennbar. Hierbei wird das Strukturverhalten unter dynamischen Lasten deutlich, bzw. können sehr schnell „weiche Zonen“ identifiziert werden, vgl. Abbildungen 6.15 und 6.16.

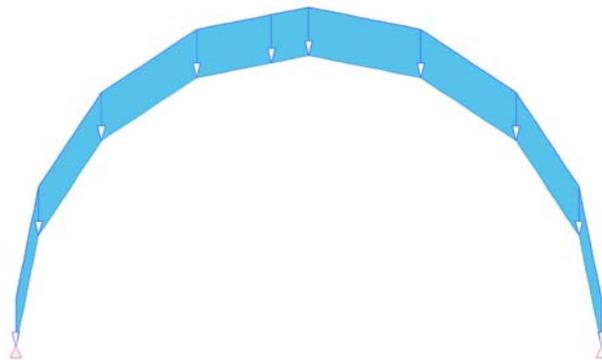


Abbildung 6.13.: DO1 — Darstellung des Lastfall Eigengewicht

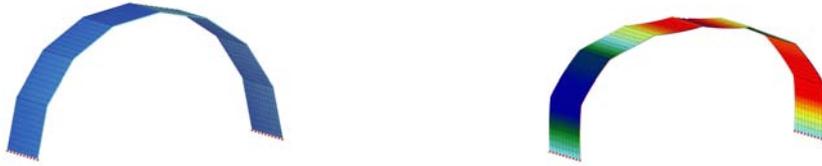


Abbildung 6.14.: DO1 — Darstellung System und Verformung unter Eigengewicht



Abbildung 6.15.: DO1 — Darstellung 1. und 2. Eigenfrequenz



Abbildung 6.16.: DO1 — Darstellung 3. und 4. Eigenfrequenz

Tabelle 6.1.: DO1 — Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse infolge Formfindungsprozessen

Variante	Höhe des Bogens	max. Hauptzugspannung [N/mm ²]	max. Hauptdruckspannung [N/mm ²]	Verschiebung lokal z [mm]
Ausgangssystem	100%	100%	100%	100%
formgefundenes System	105%	120%	116%	128%

Die Eigenspannungen und -verformungen können durch eine Optimierung der Form, der Formfindung, reduziert bzw. eliminiert werden. Hierzu wird das Eigengewicht der Struktur in entgegengesetzter Richtung angesetzt, vgl. Abbildungen 6.17 und die Steifigkeit der Struktur gleichzeitig auf einen sehr geringen Wert, nahe Null, reduziert, vgl. Tabelle 6.1.

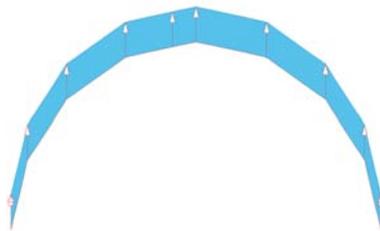


Abbildung 6.17.: DO1 — Darstellung des Formfindungsprozesses durch entgegenwirkendes Eigengewicht



Abbildung 6.18.: DO1 — System vor und nach der Formfindung

Berechnungsergebnisse LF Wind

Die Ermittlung der Windlasten stellt für den berechnenden Ingenieur häufig eine große Herausforderung dar. Dies gilt vor allem bei frei geformten Bauwerken oder Bauteilen, da hierbei die gängigen Normen keine oder keine genauen Angaben liefern. Sofern keine globalen Werte aus der Norm für die Berechnung verwendet werden sollen, welche zwar häufig auf der „sicheren Seite“ liegend anzusehen sind, aber auch zu größeren Schnittgrößen und Materialaufwendungen führen, sind genauere Verfahren anzustreben.

Hierzu zählen derzeit Windkanalversuche, welche nur mit maßstäblichen Modellen und Messungen durchführbar sind oder Fluid-Dynamische Computerberechnungen.

Für die Durchführung einer Fluid-Dynamischen Berechnung ist ein entsprechendes Modell, vgl. Abbildungen 6.19 zu erstellen und beispielsweise das Simulationsprogramm „Autodesk Algor Simulation Professional“ zu verwenden. Als Ergebnis können hierbei der Staudruck, vgl. Abbildung 6.20 und Strömungslinien, vgl. Abbildung 6.21 ermittelt werden.

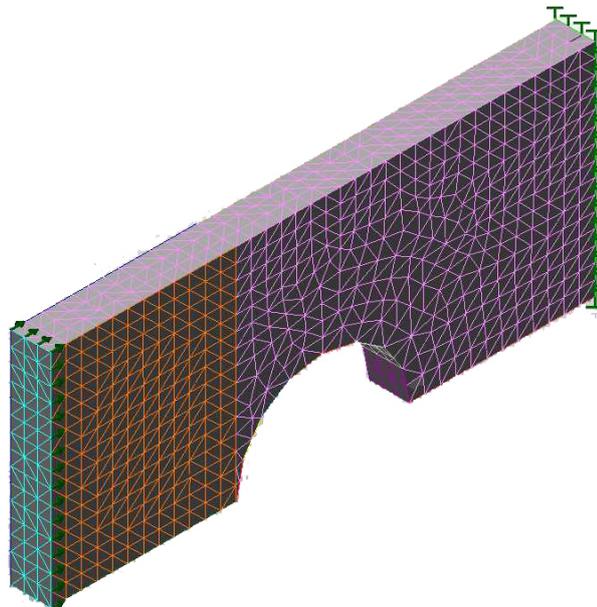


Abbildung 6.19.: DO1 — Windanalyse des Demonstrationsobjektes

Ein wesentlicher Vorteil ist aber vor allem, dass die Windlasten über einen zu betrachtenden Zeitraum ermittelt werden können. Es besteht die Möglichkeit neben der maximalen Windlast auch den zeitlichen Windkraftverlauf zu berechnen und darzustellen, vgl. Abbildungen 6.22 und 6.23 und 6.24 und 6.25. Diese Werte können in einem FE-Programm weiterverarbeitet und punktgenau als Belastung angenommen werden, vgl. Abbildungen 6.26 und 6.27.

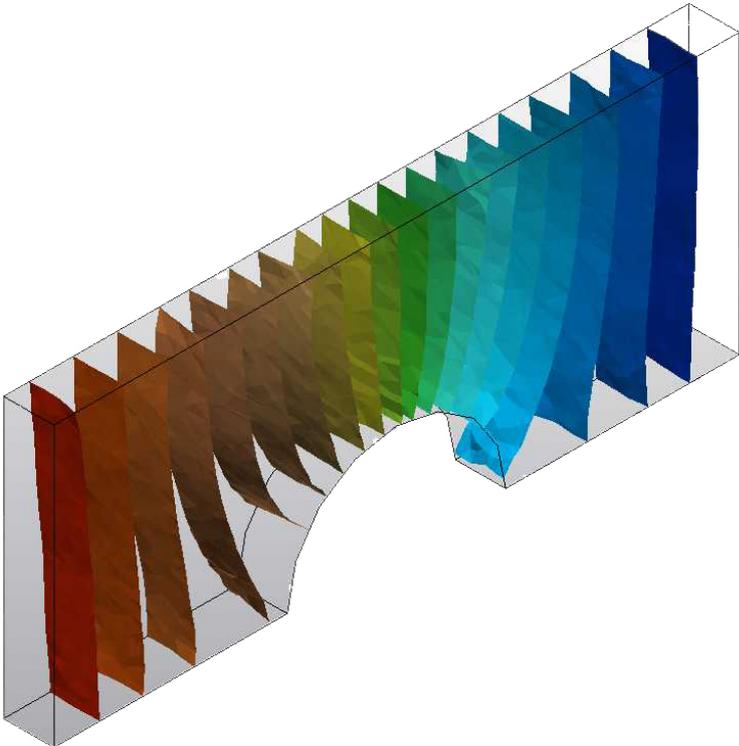


Abbildung 6.20.: DO1 — Windanalyse - Staudruck

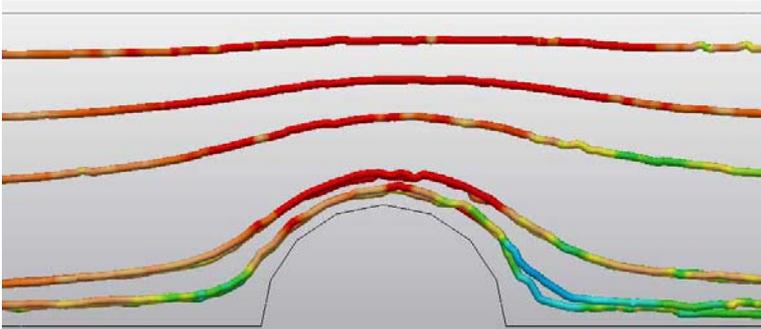


Abbildung 6.21.: DO1 — Windanalyse - Strömungslinien

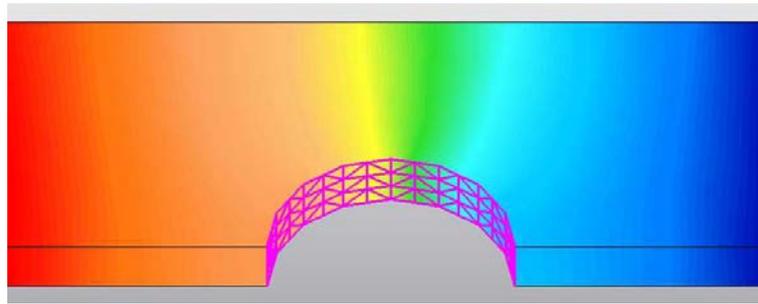


Abbildung 6.22.: DO1 — Windanalyse - Druckanalyse

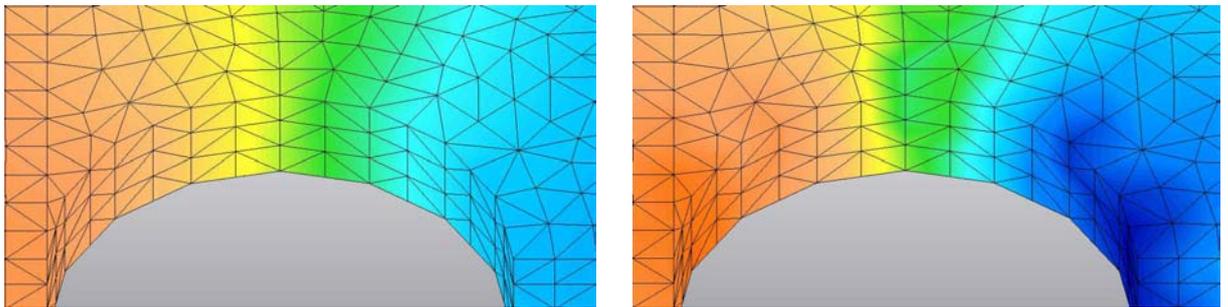


Abbildung 6.23.: DO1 — Windanalyse Zeitschritt 1 + 2

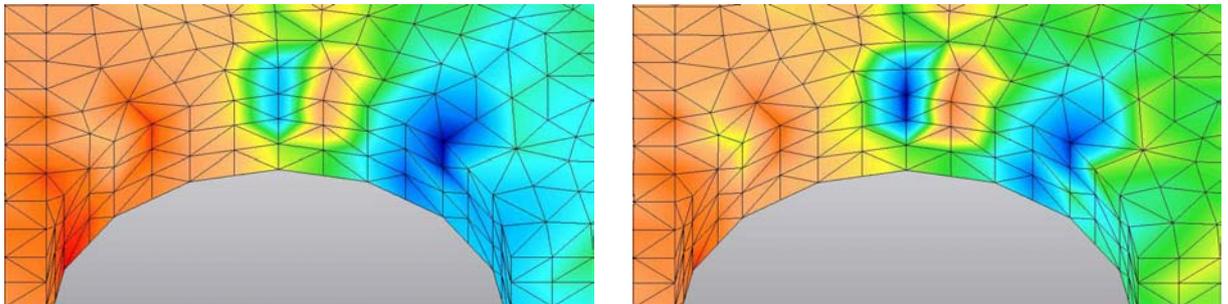


Abbildung 6.24.: DO1 — Windanalyse Zeitschritt 3 + 4

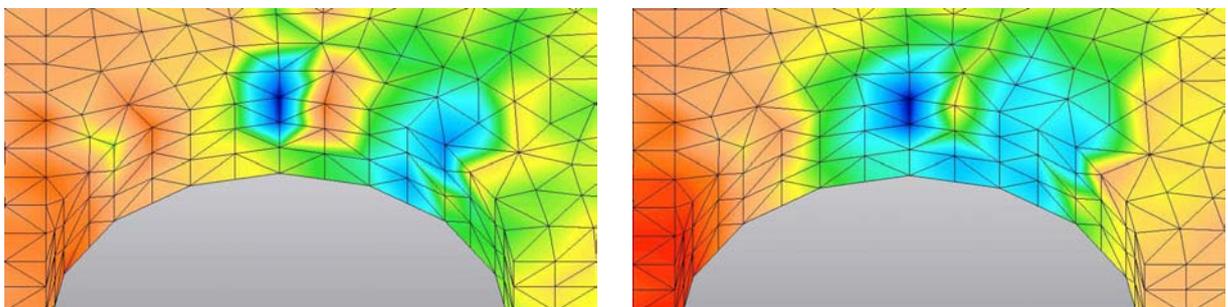


Abbildung 6.25.: DO1 — Windanalyse Zeitschritt 5 + 21

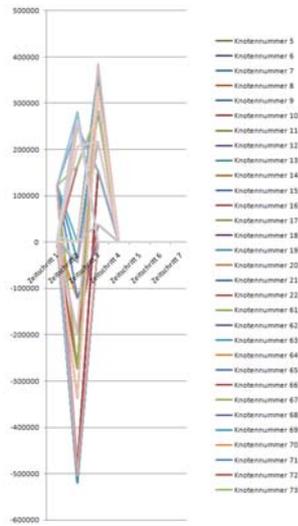


Abbildung 6.26.: DO1 — Windanalyse - dynamischer Staudruck, knotenbezogen

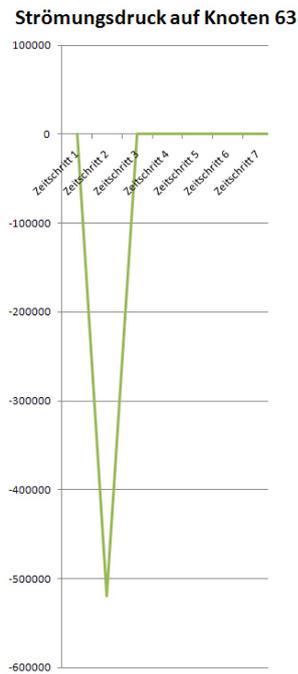


Abbildung 6.27.: DO1 — Windanalyse - dynamischer Staudruck, Knoten 63

Im Gegensatz zu den punktgenau ermittelten Werten, werden häufig globale Werte, vgl. Abbildung 6.28 verwendet.



Abbildung 6.28.: DO1 — Windbelastung

Das Tragwerk als Bogentragwerk ist für seitliche, horizontale und vor allem unsymmetrische Lasten, im Gegensatz zu symmetrischen Eigenlasten, sehr anfällig. Dies ist unter anderem an den Verformungen und Spannungen zu erkennen, vgl. Abbildung 6.29. Im Rahmen der Analyse wurden die relevanten Bereiche des Tragwerks ermittelt und die Steifigkeit dieser Bereiche erhöht, vgl. 6.30. Durch genau diese Vorgehensweise lässt sich das Bauteil effektiv ertüchtigen ohne eine pauschale Steifigkeitserhöhung anwenden zu müssen, welche zu vermehrtem Materialaufwand führen würde.



Abbildung 6.29.: DO1 — Spannungsverteilung infolge Windbelastung

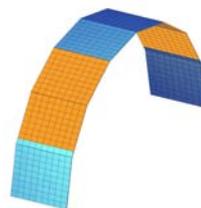


Abbildung 6.30.: DO1 — optimierte Strukturteile infolge Windbelastung, gelb eingefärbt

Tabelle 6.2.: DO1 — Ertüchtigung des Tragwerkes durch Steifigkeitserhöhung

	Ausgangssystem	10%-ige Steifigkeitserhöhung	50%-ige Steifigkeitserhöhung	100%-ige Steifigkeitserhöhung	200%-ige Steifigkeitserhöhung
Verschiebung global in y-Richtung	100%	93%	73%	60%	47%
Vergleichsspannung max.	100%	100%	100%	100%	100%

In der nachfolgenden Tabelle, 6.2, sind die Möglichkeiten der gezielten Materialversteifung exemplarisch berechnet. Hierbei wurden die Verschiebung in horizontaler Richtung und die maximalen Vergleichsspannungen infolge Windlast berechnet. Die Gegenüberstellung verdeutlicht die beträchtliche Reduzierung der Verformung infolge Steifigkeitserhöhung. Diese Steifigkeitserhöhung kann beispielsweise durch den Einbau aktiver Materialien, wie z.B. Piezokeramiken bzw. Formgedächtnislegierungen, erzielt werden. Der Einsatz aktiver Materialien sollte sich des Weiteren nur auf die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit auswirken. Die Grenzzustände der Tragfähigkeit sind passiv auszulegen.

6.4.4. Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse und Optimierung

In den einzelnen Berechnungen für die Lastfälle Eigengewicht und Wind konnten zwei mögliche Optimierungsverfahren gezeigt werden. Zum einen wurde die Form für den Lastfall Eigengewicht optimiert, des Weiteren wurden maximal belastete Bereiche für den asymmetrischen Lastfall Wind identifiziert und ertüchtigt.

Für die abschließende Optimierung besteht die Möglichkeit, den Fasergehalt innerhalb der Struktur anhand der Hauptspannungen auszurichten. Hierzu kann die im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS entwickelte Schnittstelle **IFAS** verwendet werden, vgl. Abschnitt 4.3.

Die Hauptspannungen können nach Übertragung in das CAD-Programm Rhino® vektoriell bearbeitet werden und der Faserverlauf an konstruktive Randbedingungen angepasst werden, vgl. Abbildung 6.31. Diese Spannungsvektoren können als splines in FE-Programmen mit Materialeigenschaften belegt werden. Auf diese Weise kann das Material als wirkliches Faserverbundmaterial berechnet werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, die Faseranordnung für spezielle Verlegeroboter vorzubereiten. Es ist somit möglich die wesentlichen Daten für das „Tailor Fiber Placement“ zu liefern.

Neben der Faserverlegung entsprechend der Hauptspannungen liefert die Topologieoptimierung eine gute Möglichkeit, den Materialeinsatz an unbelasteten Stellen zu minimieren, vgl. Abbildung 6.32. Diese Daten sind auch für die realistische Darstellung eines Prototypen in 3D nutzbar, indem die Daten einem 3D-Drucker zugespielt werden.

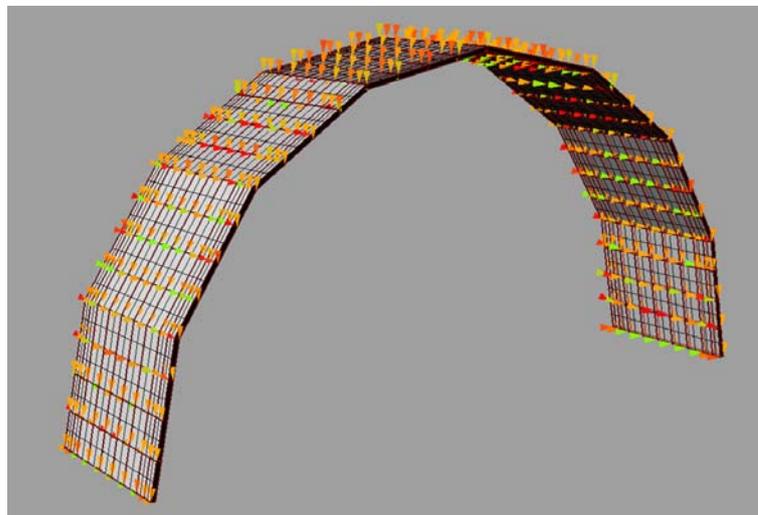


Abbildung 6.31.: DO1 — Hauptspannungen vektoriell dargestellt unter Nutzung der **IFAS**-Schnittstelle

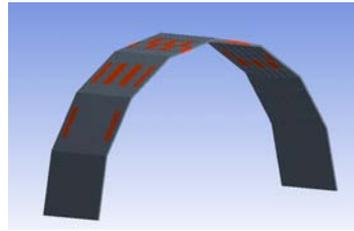
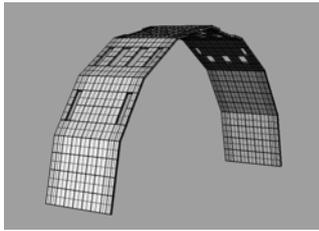


Abbildung 6.32.: DO1 — Topologieoptimierung vektorieLL dargestellt unter Nutzung der **IFAS**-Schnittstelle — Topologieoptimierung als grafische Darstellung im FE-Programm Ansys

6.4.5. Herstellung der Fuge - Zusatzintegrationsmöglichkeiten

Herstellmöglichkeiten

Neben der klassischen GFK-Herstellung mittels Positiv- und Negativform, gibt es auch die Möglichkeit die Struktur schalungsfrei zu errichten, vgl. Abschnitt 3.4.2. Diese Möglichkeit bietet vor allem im Hinblick auf die Verlegung der Faserstränge entsprechend der Hauptspannungen wesentliche Vorteile. Diese Faserstränge können beispielsweise als prepreg-Stränge in CFK zwischen verschiedenen Hochpunkten gespannt werden und die restliche Struktur von einem GFK- oder CFK-Gewebe umschlossen werden. Sobald die Struktur komplett hergestellt ist, kann die Aushärtung mittels Autoklav oder konventionellem Herstellungsverfahren fertiggestellt werden.

Zusatzintegrationsmöglichkeiten

Der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe wird aufgrund der vielfältigen Formmöglichkeiten sehr häufig für Freiformtragwerke eingesetzt. Des Weiteren besteht aufgrund der individuellen Fügbarkeit auch die Möglichkeit weitere Funktionen direkt in das Tragwerk zu integrieren.

- Lichtleitfasern
- Mehrkomponentenmaterial
- aktive Piezokeramiken als Versteifungsmaterial

Die Integration von LED-Lichtleitfasern bietet beispielsweise die Möglichkeit das Objekt direkt zu beleuchten. Diese Technik kann aber auch zur Steigerung der Sicherheit als Warnelement genutzt werden. Hierzu können die Lichtleitfasern aktiviert werden, wenn ein Erdbeben auftritt und die Struktur erschüttert wird oder andere kritische Grenzzustände auftreten.

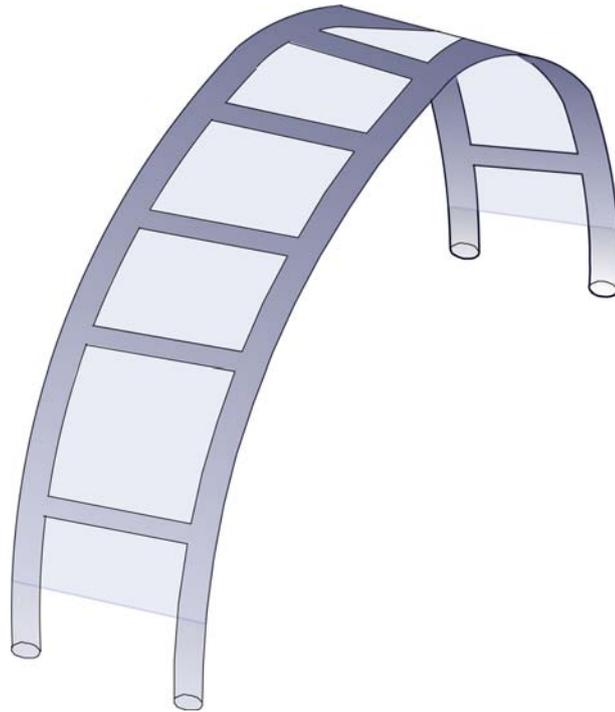


Abbildung 6.33.: DO1 — Herstellungsmöglichkeit

Der Einsatz von Materialien mit mehreren Komponenten bietet die Möglichkeit unterschiedliche Temperatursausdehnungskoeffizienten, vgl. Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 zu nutzen und somit die Struktur auf einfache Art und Weise aktiv mit der Umgebung (Luftfeuchte und Temperatur) interagieren zu lassen.

So können zum Beispiel Materialien mit unterschiedlichem Temperatursausdehnungskoeffizient genutzt werden, welche bei wechselnden Temperaturen mit Bewegung reagieren und so zum Beispiel Vorspannzustände bzw. Öffnungsvorgänge erzeugen, vgl. Abbildungen 6.34 und 6.35.

Es besteht neben der Nutzung des Temperatursausdehnungskoeffizienten auch die Möglichkeit, unterschiedliches Quell- und Schwindverhalten, vgl. Tabelle 6.5 auszunutzen, vgl. Abbildung 6.36. Hierbei können vor allem Kunststoffe und Holzwerkstoffe angewendet werden.

Entsprechend der Tabelle 6.5 wurden verschiedene Versuche durchgeführt, vgl. Abbildungen 6.37, 6.38 und 6.39. Hierbei wurden verschiedene Holzwerkstoffe mit Kunststoffprodukte verklebt und unterschiedlichen Feuchtegehalten ausgesetzt. Auf diese Weise konnte eine relativ einfache „aktive“ Steuerung von Strukturbauteilen über veränderliche Umgebungsbedingungen erprobt werden.

Tabelle 6.3.: Materialien unterschiedlicher Eigenschaften, vgl. [KCGL10]

Kunststoff	Dichte [g/cm ²]	Gebrauchstemp- peratur [°C]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Zug-E- Modul [N/mm ²]	linearer Ausdehnungs- koeffizient 10 ⁻⁶ /K
PVC (P - duktil)	1,46	65-70/75-90	50 - 75	1000 - 3500	70 - 80
UP (GFK- faserverstärkt)	1,80	150/200	80 - 240	7.000 - 23.000	9 - 30
EP (CFK- faserverstärkt)	1,70	130/180	1.350 - 2.800	165.000 - 300.000	0,2

Tabelle 6.4.: Eigenschaften verschiedener Faserverbundwerkstoffe, vgl. [KCGL10]

Werkstoff	Spezi- fikation	Dichte [kg/dm ³]	Zugfestig- keit längs [N/mm ²]	Zug-E- Modul längs [N/mm ²]	Zugfestig- keit quer [N/mm ²]	Zug-E- Modul quer [N/mm ²]	Wärmeaus- dehnungs- koeffizient 10 ⁻⁶ /K
Glasfaser- verstärkter Kunststoff	pultrudier- tes Laminat	1,8	240	23.000	50	7.000	9,0/30,0
Glasfaser- verstärkter Kunststoff	Wirrfaser- laminat	1,5	80	7.000	80	7.000	30,0
Glasfaser- verstärkter Kunststoff	Misch- laminat	1,6	120	12.000	120	12.000	25,0
Glasfaser- verstärkter Kunststoff	Wickel- laminat	1,6	160	15.000	50	8.000	15,0/30,0
Kohlenstoff- faserver- stärkter Kunststoff	hochfest	1,6	2.800	165.000	0	-	0,2
Kohlenstoff- faserver- stärkter Kunststoff	mittel- modulig	1,6	2.800	210.000	0	-	0,2
Kohlenstoff- faserver- stärkter Kunststoff	hoch- modulig	1,6	1.350	300.000	0	-	0,2

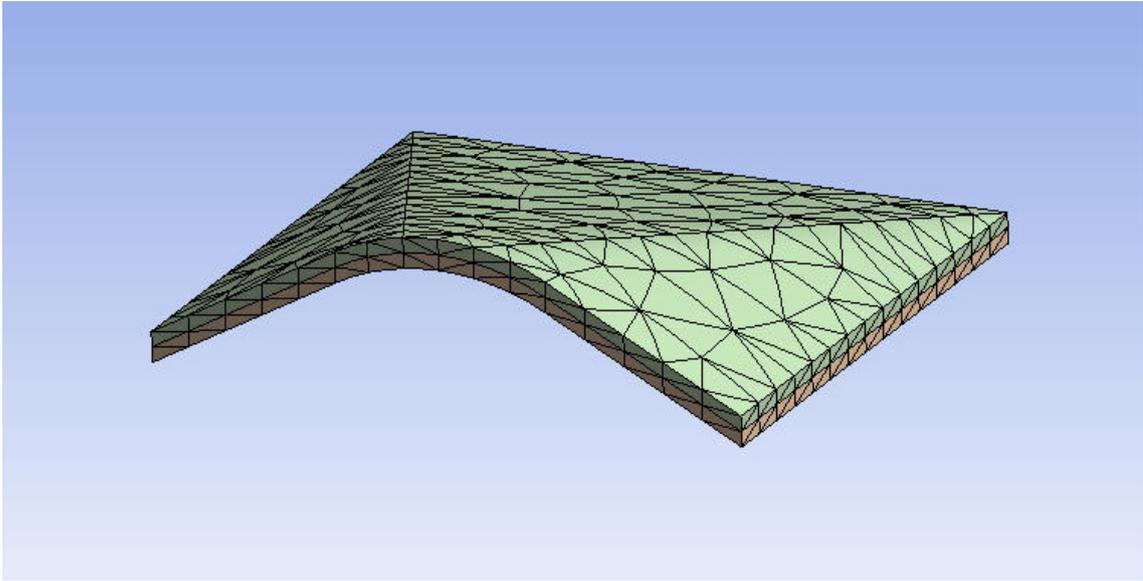


Abbildung 6.34.: Schalenstruktur unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperaturausdehnungskoeffizienten

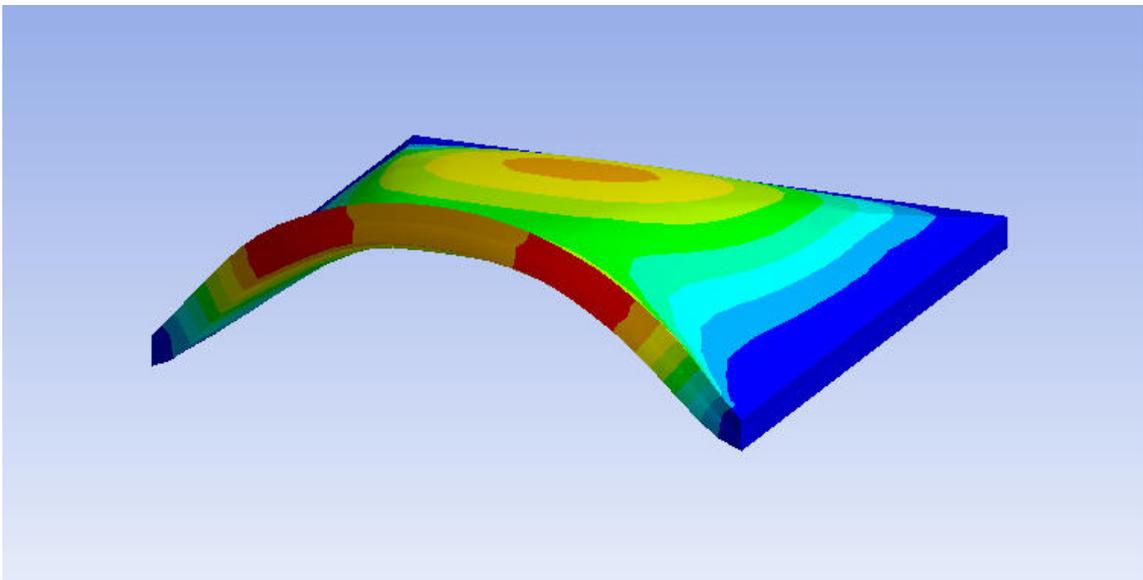


Abbildung 6.35.: Schalenstruktur unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperaturausdehnungskoeffizienten - Verformungen

Tabelle 6.5.: Quellen und Schwinden von Holz nach DIN 52184

Holzart	maximales Quellmaß %		
	längs	radial	tangential
Fichte	0,2 - 0,4	3,7	8,5
Kiefer	0,2 - 0,4	4,2	8,3
Lärche	0,1 - 0,3	3,4	8,5
Buche	0,2 - 0,6	6,2	13,4
Eiche	0,3 - 0,6	4,6	10,9
Teak	0,2 - 0,3	2,7	4,8

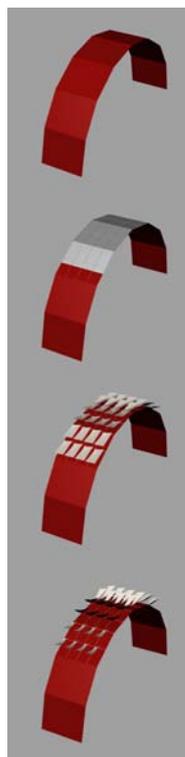


Abbildung 6.36.: DO1 — Öffnungsmechanismen durch Nutzung Holz-PVC-Kunststoffverbund



Abbildung 6.37.: Holz-Kunststoff-Versuch - Buche radiale Faserausrichtung mit Plexiglasplatte

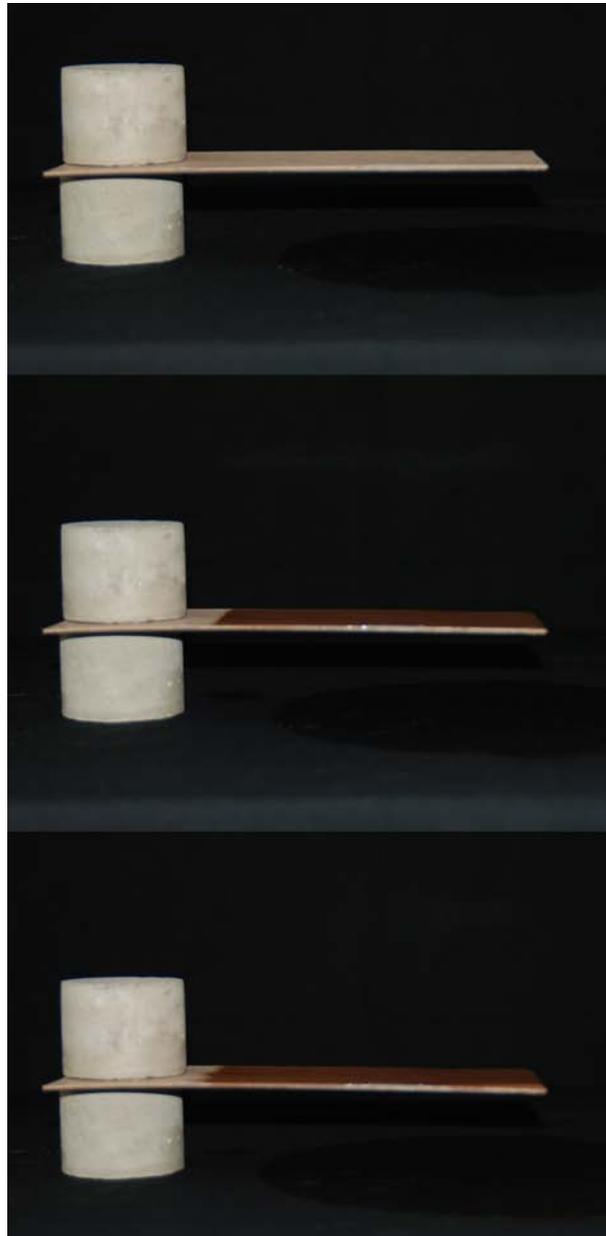


Abbildung 6.38.: Holz-Kunststoff-Versuch - Buche Faserausrichtung längs mit Plexiglasplatte



Abbildung 6.39.: Holz-Kunststoff-Versuch - MDF mit Plexiglasplatte

Die zuvor dargestellten Holz-PVC-Versuche verdeutlichen die Möglichkeiten „natürlicher Aktivitätssteuerung“ in Form von Temperaturunterschieden bzw. Quellvorgängen um Öffnungs- und Schließungsprozesse zu vollführen. Diese Eigenschaften sollten auch immer, sofern anwendbar, genutzt werden, da keine technische Integration notwendig wird. Zudem sind hierfür keine energetischen Aufwendungen notwendig.

Bei gewissen Anwendungen sind die gewünschten Form- bzw. Strukturänderungen ebenso interessant, aber der zeitliche Ablauf bzw. die Verlässlichkeit der Quellvorgänge nicht ausreichend. In diesem Fall können technische Strukturänderungsmaßnahmen ergriffen werden und beispielsweise Piezokeramiken angeordnet werden, vgl. Abschnitt 4.2.4.

Im Nachfolgenden wird ein exemplarischer Balken vorgestellt, welcher als Öffnungsklappe oder als strukturintegriertes lastabtragendes Bauteil wirken kann. Hierbei wurde im mittleren Bereich ein Piezoelement vorgesehen, welches unter Nutzung der hohen Aktivierungsgeschwindigkeiten die Struktur formverändern und versteifen kann, vgl. Abbildungen 6.40 und 6.41.

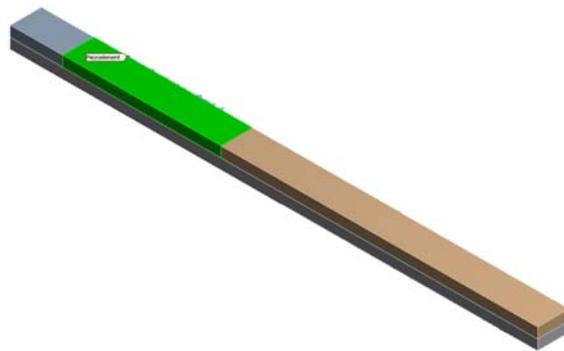


Abbildung 6.40.: aktives Piezo-GFK-Element

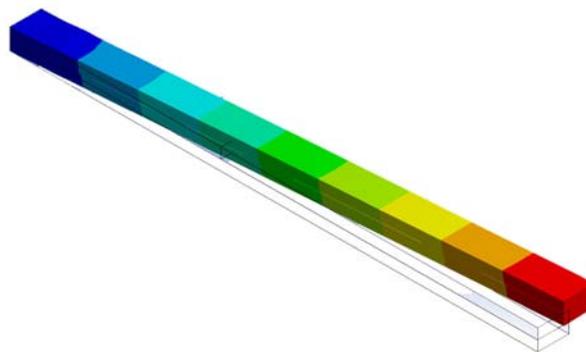


Abbildung 6.41.: aktives Piezo-GFK-Element - Darstellung der Verformung

6.5. Demonstrationsobjekt - DO2

Anhand des Demonstrationsobjekt DO2, einer Freiformschale, soll die Übertragbarkeit der zuvor gezeigten Ergebnisse und die Einsatzmöglichkeit der Schnittstellen im 3-dimensionalen Raum gezeigt werden.

Die Freiformschale stellt ein fiktives räumliches Objekt dar, welches einer freien Dach- oder Fassadenform entsprechen kann, vgl. Abbildung 6.42. Die Generierung erfolgte parametrisch, die Datenübergabe basierte auf gängigen CAD- bzw. den im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS entwickelten Schnittstellen. Die Struktur wurde im mittleren Bereich symmetrisch belastet. Infolge dieser Belastung konnten die Hauptspannungen berechnet werden, vgl. Abbildung 6.44. Ebenso wurde die Struktur hinsichtlich der Topologie optimiert, wobei eine maximale Gewichtsersparnis von 20% angestrebt wurde, vgl. Abbildung 6.44. Auch bei diesem Beispiel konnten die gewonnenen Daten über **IFAS**-Schnittstelle zwischen FE- und CAD-System ausgetauscht werden, vgl. Abbildung 6.45. Die Struktur, wie auch die Hauptspannungen in vektorieller Form können für die weitere Bearbeitung in verschiedenen CAD-Programmen genutzt werden. Auch das Faserlayout lässt sich auf diese Weise sehr effektiv bearbeiten.

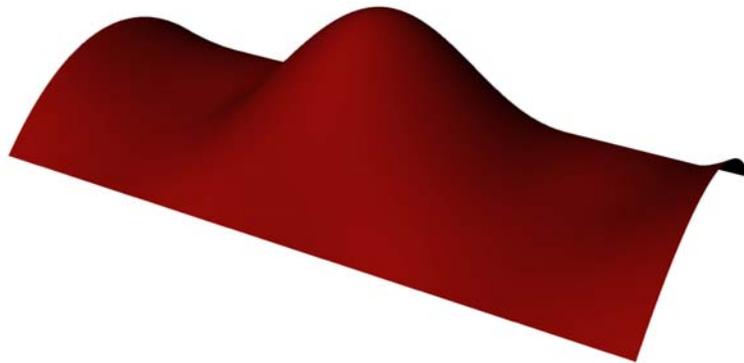


Abbildung 6.42.: DO2 — Freiformschale

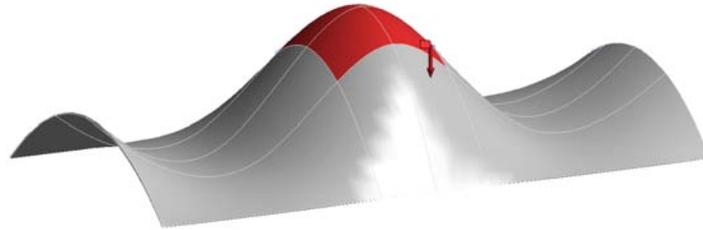


Abbildung 6.43.: DO2 — Belastung



Abbildung 6.44.: DO2 — Hauptspannungen und Topologieoptimierung

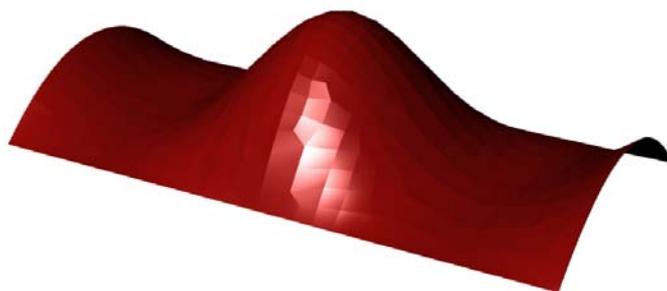


Abbildung 6.45.: DO2 — Struktur nach Re-Import



Abbildung 6.46.: DO2 — Hauptspannungen und Topologieoptimierung nach Re-Import

6.6. Demonstrationsobjekt - DO3

Das Demonstrationsobjekt DO3, ein quaderförmiges FVK-Tragwerk, ist im Rahmen des Entwurfsseminars „Wir bauen den Illumaten“ im Sommersemester 2011 an der Bauhaus-Universität Weimar (Prof. Tragwerkslehre, Prof. Entwerfen und Tragwerkskonstruktion und Prof. Massivbau) entstanden. Die Aufgabe bestand darin, ein kleines Bauwerk mit einer Kantenlänge von ca. 2 m, bei minimalem Packmaß, minimalem Gewicht und maximaler Steifigkeit zu entwerfen und zu realisieren. Bei diesen Randbedingungen fiel die Wahl auf Faserverbundwerkstoffe.

Während der Bearbeitung wurden verschiedene Versuche und Berechnungen durchgeführt. Ziel dieser Berechnungen war es, die anfänglich 2 mm starke Schalenstruktur zu ertüchtigen. Im Rahmen der weiteren Optimierung und Berechnungen, wurden neben der Erhöhung der Schalenstärke auf 3 mm vor allem wesentliche zu versteifende Bereiche in der Struktur analysiert, vgl. Abbildung 6.47. Diese Verstärkungszone wurden im Rahmen des Entwurfes als Sandwichkonstruktionen mit einer Stärke von 6 mm geplant. Denkbar ist für weitere Überlegungen die Anwendung aktiver Materialien zur Ertüchtigung. An diesem Beispiel kann sehr gut die Auswirkung von exakt ermittelten Verstärkungszone und deren Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit verdeutlicht werden.



Abbildung 6.47.: DO3 — FVK - Würfel - Verstärkungszone

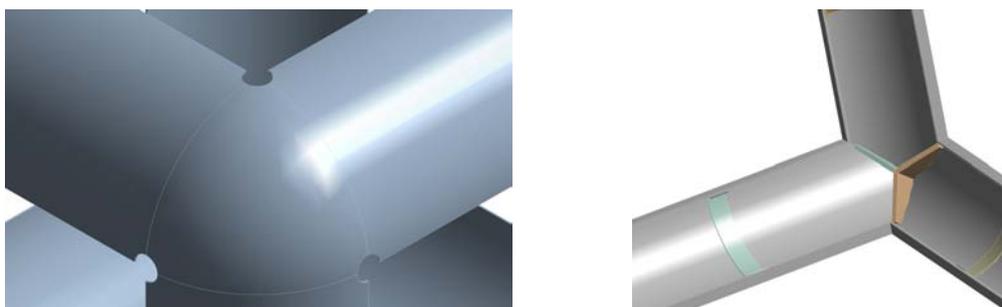


Abbildung 6.48.: DO3 — FVK - Würfel - konstruktive Randbedingungen

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Aktive Faser-Verbundwerkstoffe für Adaptive Systeme (AFAS)“ konnte gezeigt werden, dass Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen in speziellen Bereichen angewendet werden. Diese bieten vor allem für die Umsetzung freier Formtragwerke viele Vorteile. Zu nennen ist hierbei die absolute Gestaltungsfreiheit, welche häufig lediglich durch den Schalungsbau eingeschränkt wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens AFAS bestand darin, die Anwendungen von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen durch das Aufzeigen weiterer Optimierungspotenziale zu erweitern. Hierzu wurden zunächst optimierte Tragstrukturen in der Natur (Bionik) und der Luft- und Raumfahrt recherchiert. Die Verwendung der Kenntnisse dieser Disziplinen im Bauwesen bietet einen großen Innovationsschub. Vor allem bei der Entwicklung faserverstärkter Strukturen können viele Erkenntnisse aus der Natur genutzt werden, da viele Pflanzen aus „natürlichen Faserverbundwerkstoffen“ bestehen. Vor allem aber ist die Natur ein Vorreiter auf dem Gebiet der Formfindung. Bäume, Blätter und Panzer von Käfern sind für die jeweilige Lebens- und Belastungssituation über die Jahrtausende evolutionär angepasst. Diese Erkenntnis bietet auch bei der Entwicklung „technischer Faserverbundstrukturen“ viele Vorteile. Konventionelle FVK-Bauwerke werden häufig mit orthotropen Fasermatten (GFK oder CFK-Matten) bewehrt. Diese Verlegeart entspricht einer pauschalen einfachen Herstellung, widerspricht aber einem optimierten, dem Lastfluss angepassten Materialaufbau. Erst durch die Optimierung der Struktur in Form (äußere Erscheinung) und Materialaufbau (innere Erscheinung) können alle Potentiale der Materialeinsparung umgesetzt werden.

Neben der Form- und Materialoptimierung konnten die vorteilhaften Möglichkeiten der aktiven Strukturbeeinflussung gezeigt werden. Da hierbei simultan auf Belastungszustände reagiert werden kann. Hierzu wurden verschiedene aktive Materialien gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten kategorisiert. Um eine anschaulichere Arbeitsweise mit diesen Daten zu ermöglichen, wurde mit **SmartChoice** ein Mock-Up für ein Anwendungs- und Auswahltool vorgestellt. Dieses Tool bietet dem Praktiker eine übersichtliche Möglichkeit für verschiedene Anwendungsgebiete das jeweilig einsetzbare Funktionsmaterial auszuwählen.

Die ganzheitliche Planung einer aktiven Faserverbundstruktur erfordert den Einsatz unterschiedlicher Softwareprodukte. Die auszuwählenden Programmsysteme müssen parametrisches Arbeiten ermöglichen, da auf diese Weise eine zügige Systemanpassung und -optimierung möglich ist. Des Weiteren sind entsprechende Schnittstellen notwendig, damit

ein kontinuierlicher Datenaustausch erfolgen kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AFAS wurde die prototypische Schnittstelle **IFAS** zur Übertragung der Berechnungsergebnisse aus dem Finiten-Element-Programmsystem in das CAD-Programm entwickelt. Auf diese Weise werden die rechnerischen Ergebnisse vektoriell darstellbar. Die Ergebnisse für weitere Bearbeitungsschritte genutzt werden.

7.2. Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Anwendung optimierter Faserverbundstrukturen im Bauwesen vielfältige zukunftsorientierte Möglichkeiten bietet und vor allem einen großen ökonomischen wie auch ökologischen Vorteil darstellt. Im Hinblick auf weitere Arbeiten bieten diese Ergebnisse eine wesentliche Grundlage. Hierbei sollten die Möglichkeiten der parametrischen Strukturentwicklung und -optimierung unter Nutzung evolutionärer Algorithmen genutzt werden. Auf diese Weise können eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten entsprechend eines evolutionären Algorithmus erzeugt und geprüft werden. Des Weiteren ist die prototypische Schnittstelle **IFAS** weiter auszuarbeiten. Ebenso sind die Steuer- und Regelungstechnischen Aspekte weiter zu vertiefen. Die Bauhaus-Universität Weimar vertieft die gewonnenen Erkenntnisse in Form von Studienabschlussarbeiten und Promotionen. Ebenso werden die Themen der aktiven Faserverbundwerkstoffe als fester Bestandteil in der Lehre vermittelt und intensiviert.

Literaturverzeichnis

- [arc] /ARCH+ 198/199 IBA hamburg ARCH+ Berlin 2010
- [Arc10] ARCHITEKTEN ox2: *Busbahnhof Münchener Freiheit @MISC and 'how-published'*. <http://www.monacomedial.de/muenchenwiki/index.php/Bild:Muenchnerfreiheittram.jpg/>, apr 2010
- [AS05] ADDINGTON, M. ; SCHODEK, D.: *Smart Materials and Technologies for the architecture and design professions*. New York : Elsevier Architectural Press, 2005
- [Asc10] ASCHENBRENNER, Norbert: *Mit Wetterprognosen Gebäude automatisieren @MISC and 'howpublished'*. http://www.innovations-report.de/html/berichte/architektur_bauwesen/wetterprognosen_gebaeude_automatisieren_152107.html/, apr 2010
- [AW04] AL-WAHAB, Muhammed A.: *Neue Aktorsysteme auf Basis strukturierter Piezokeramik*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2004
- [BA10] BEARTH ; AG, Deplazes A.: *Neue Monte Rosa-Hütte oberhalb von Zermatt-CH @MISC and 'howpublished'*. http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Nachhaltig-Bauen-Monte-Rosa-Huette-oberhalb-Zermatt-CH_836452.html/, apr 2010
- [Bac96] BACHMANN, H.: *Vibration Problems in Structures*. Basel, Boston, Berlin : Birkhäuser Verlag, 1996
- [Bac02] BACHMANN, H.: *Erdbebensicherung von Bauwerken*. Basel, Boston, Berlin : Birkhäuser Verlag, 2002
- [Bac09] BACHMANN, H.: Erdbebenertüchtigung des Feuerwehrgebäudes in Basel durch schwimmende Lagerung. In: *Bautechnik - Ernst- und Sohn Verlag* (2009)
- [Bas00] BASCHE, A.: *Piezo-Aktoren: Physikalische Grundlagen - Arbeitsprinzipien - Anwendungsbereiche* / HTW des Saarlandes. 2000. – Diskussionspapier
- [BD05] BLETZINGER, Kai-Uwe ; DAOUD, Matthias Firl F.: *Techniken der Formoptimierung*. (2005)

-
- [Ben00] BENJEDDOU, A.: Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. In: *Computers & Structures* 76 (2000), S. 347–363
- [BGT10a] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; TESSMANN, Oliver: Digitale Tragwerksplanung. In: *Detail Praxis - Digitale Prozesse* (2010), S. 72–73
- [BGT10b] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; TESSMANN, Oliver: Fußgängerbrücke in Reden. In: *Detail Praxis - Digitale Prozesse* (2010), S. 76
- [BGT10c] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; TESSMANN, Oliver: Sphäre Deutsche Bank in Frankfurt. In: *Detail Praxis - Digitale Prozesse* (2010), S. 74–75
- [BGT10d] BOLLINGER, Klaus ; GROHMANN, Manfred ; TESSMANN, Oliver: Structured Becoming - Evolutionary Process in Design Engineering. In: *Architectural Design* 206 (2010), S. 34–39
- [BKS95] BULENDA ; KNIPPERS ; SAILER: Finite Elemente in der Baupraxis. In: *Ernst und Sohn Verlag* (1995)
- [Bla] BLACK, S.: Structural Health monitoring: composites get smart / <http://www.compositesworld.com/articles/structural-health-monitoring-composites-get-smart.aspx>. – Forschungsbericht
- [Ble00] BLETZINGER, Kai-Uwe: Theoretische Grundlagen der numerischen Formfindung von Membrantragwerken und Minimalflächen. In: *Beton-Kalender* (2000), S. 441–456
- [Bol00] BOLLER, C.: Smarte Werkstoffe und Strukturen und ihre Anwendung in der Luft- und Raumfahrt. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* (2000)
- [BW05] BULENDA, Thomas ; WINZIGER, Thomas: Verfeinerte Berechnungen von Gitterschalen. In: *Stahlbau* 1 (2005), S. 33–38
- [CW03] CUI, J. ; WUTTIG, M.: Tutorial FTD: Smart Materials. In: *MRS Fall Meeting 2003* (2003)
- [Dav10] DAVIS, Lara: *Palazzo dello Sport*. Website, 2010. – Available online at http://www.limacon-design.com/Nervi/Structural_analysis.html; visited on July 13th 2010.
- [Deg09] DEGISCHER, H. P.: *Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Wiley-VCH, 2009
- [DL05] DONG, B. ; LI, Z.: Cement-based piezoelectric smart composites. In: *Elsevier* (2005)
- [DNK05] DUAN, Y. F. ; NI, Y. Q. ; KO, J. M.: Cable Vibration Control using Magnetorheological Dampers. In: *SAGE Publications* (2005)
-

-
- [Dou09] DOUMPIOTI, C.: Makro-Faserstrukturen. In: *188 Form Follows Performance - ARCH+ Verlag, Aachen* (2009)
- [EB11] ELSACKER, Elise ; BONTINCKX, Yannick: *Kinetic Pavillon*. Website, 2011. – Available online at <http://www.kineticpavilion.com>; visited on April 12th 2011.
- [ES10] ENGELSMANN, Stephan ; SPALDING, Valerie: Leichtbau mit Kunststoffen. In: *Detail 11* (2010), S. 1212–1222
- [Evo10] EVOLO: Fibre Composite Adaptive Systems. (2010). – Available online at <http://www.evolo.us/architecture/fibre-composite-adaptive-systems/>; visited on December 13th 2010.
- [FI] FG-INNOVATION: Formgedächtnislegierungen (Memory-Metalle) - Eine kurze Einführung / FG-Innovation. – Forschungsbericht
- [FOM03] FOMEKK, Bauhaus-Universität W.: *ForschungsForum FOMEKK*. Weimar : FOMEKK, 2003
- [FOM04] FOMEKK, Bauhaus-Universität W.: *2. ForschungsForum - Faserverstärkter Kunststoffe von der Entwicklung zur Anwendung*. Weimar : FOMEKK, 2004
- [Gla11] GLATZEL, Uwe: Vorlesungsskript, Metallische Werkstoffe, Formgedächtnislegierungen, Universität Bayreuth. (WS2010/11)
- [Gmb] GMBH, Dr. Lutz P.: *Einstieg in die Piezoaktorik*
- [Grü11] GRÜNWEG, Tom: *Mega City Vehicle - BMW gründet eigene Marke für Stromer-Flotte*. Website, 2011. – Available online at <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,747055,00.html>; visited on July 13th 2010.
- [GV05] GENZEL, Elke ; VOIGT, Pamela: *Kunststoffbauten Teil 1: Die Pioniere*. Weimar : Universitätsverlag Weimar, 2005
- [GWK00] GROHMANN, A. ; WOLLMERSPERGER, T. ; KRÖPLIN, B.: Adaptive Strukturen und gekoppelte Mehrfeldprobleme. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* (2000)
- [Hah03] HAHNEBACH, B.: *Formgedächtnislegierungen für adaptive Tragwerke*, Bauhaus-Universität Weimar and EMPA Dübendorf, Diplomarbeit, 2003
- [HK10] HAUSCHILD, Moritz ; KARZEL, Rüdiger: *Digitale Prozesse - Planung Gestaltung Fertigung*. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2010
- [Hoe10] HOECKER, Egon: *Orgel in der Jahrhunderthalle*. Website, 2010. – Available online at http://www.breslau-wroclaw.de/wb/media/familienforschung/zeggert/orgel_jahrhunderthalle.jpg; visited on July 19th 2010.
-

-
- [Ima99] IMAOKA, Sheldon: Ansys Tip of the Week: Conversion of Piezoelectric Material Data. (1999)
- [JCMR05] JANKE, L. ; CZADERSKI, C. ; MOTAVALLI, M. ; RUTH, J.: Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. In: *Materials and Structures - Springer Verlag* (2005), S. 578–592
- [Jer00] JERONIMIDIS, G.: Structure-Property Relationships in Biological Materials M. Elices in Structural Biological Materials - Design and Structure-Property Relationships. In: *PERGAMON - M. Elices - Structural Biological Materials - Design and Structure-Property Relationships* (2000)
- [JP11] JOHNSON, Jason K. ; PAYNE, Andrew: *Firefly Primer 1.005*. 2011
- [KCGL10] KNIPPERS, Jan ; CREMERS, Jan ; GABLER, Markus ; LIENHARD, Julian: *Atlas Kunststoffe + Membranen Werkstoffe und Halbzeuge Formfindung und Konstruktion*. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2010
- [KFA11] KEILIG, Alexander ; FRANKE, Rene ; ARNOLD, Alexander Seinbüchel M.: *Steckox @MISC and 'howpublished'*. <http://pneukox.wordpress.com/>, jul 2011
- [Köh00] KÖHNLEIN, J.: Smart Materials - Intelligente Werkstoffe. In: *Stahlbau - Ernst-und Sohn Verlag* (2000)
- [Köh02] KÖHL, M.: *Entwicklung von Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen*, Universität Karlsruhe - Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2002
- [Kir09] KIRKBY, E.: *Active Sensing and Repair Composite*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Diplomarbeit, 2009
- [KL05] KIEFER, Björn ; LAGOUDAS, Dimitris C.: Magnetic Field-Induced Martensitic Variant Reorientation in Magnetic Shape Memory Alloys. In: *Philosophical Magazine* (2005)
- [Lag08a] LAGOUDAS, D. C.: *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*. New York : Springer Verlag, 2008
- [Lag08b] LAGOUDAS, D. C.: *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*. Springer Verlag, 2008
- [Lau03] LAU, K.-T.: Fibre-optic sensors and smart composites for concrete applications. In: *Magazine of Concrete Research - THOMAS TELFORD PUBLISHING* (2003)
- [Lin10] LINNE, Stefan: *Lösbare kraftschlüssige Verbindungen für modulare Bauwerke aus Faserverbundkunststoffen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2010
-

-
- [Lip07] LIPKA, Andreas: *Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung*, Universität Stuttgart Institut für Baustatik und Baudynamik, Diss., 2007
- [Mel09] MELCHER, Jörg: Der Trick der Bienen. In: *DLR-Nachrichten 119* (2009)
- [Men10] MENGES, Achim: Architektonische Form- und Materialwerdung am Übergang von Computer Aided zu Computational Design. In: *Analog und Digital 5/2010* (2010), S. 420–425
- [MHBM07] MESKOURIS, K. ; HINZEN, K.-G. ; BUTENWEG, Ch. ; MISTLER, M.: *Bauwerke und Erdbeben*. Wiesbaden : Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, 2007
- [Mol11] MOLDENHAUER, Herbert: Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. In: *Lightweight Design 1* (2011), S. 51–56
- [Mor04] MORITA, K.: US-Japan cooperative Structural Testing Research Program on Smart Structural Systems / Panel Update. 2004. – Forschungsbericht
- [Mus05] MUSLOFF, André: *Experimentelle Untersuchung und Aufbau von Adaptiven Strukturen*, TU Berlin, Diss., 2005
- [MW10] MENZEL, Stephan ; WIEDEMANN, Bernhard: Methode zur Auslegung tragender Bauteile aus Faserverbundkunststoff. In: *Lightweight Design 6* (2010), S. 48–53
- [Ne08] NORMUNG E.V., DIN Deutsches I.: *DIN EN 1995-1-1 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*. Berlin : Beuth Verlag, 2008
- [New04] NEWSLETTER, CADFEM S.: Multiphysik in ANSYS Workbench: Piezoelektrischer Aktor. (2004)
- [Pig07] PIGACHE, Francois: Tutorial Excel program for Ansys piezoelectric simulation (Extended program from S. Imaoka, Engineering consultant). (2007)
- [Rap03] RAPP, H.: Aktive Strukturen an der uniBW - Seminar für Leichtbau 22.10.2003 / Institut für Leichtbau, Universität der Bundeswehr München, Germany. 2003. – Forschungsbericht
- [RG10] RUTH, Jürgen ; GUMPP, Rainer: *Screenhaus.SOLAR - Ein Kino im Solarkleid EnergyTerminal.SOLAR - Ein modernes Lagerfeuer*. Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [Rit07] RITTER, A.: *smart materials in architektur, innenarchitektur und design*. Basel, Berlin, Boston : Birkhäuser - Verlag für Architektur, 2007
- [Sch05] SCHMIDT, H.: Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2005)
-

-
- [Sch10] SCHEURER, F.: File-to-Factory oder: Der Wert der Experten. In: *Analog und Digital* 5/2010 (2010), S. 482–486
- [Sch11] SCHLEICHER, Simon: *Gelenkfreie Klappen bei Strelizie reginae - Optimierung und Weiterentwicklung des Flectofin*. Website, 2011. – Available online at http://www.simonschleicher.com/Flectofin_Bremen.pdf; visited on February 07th 2011.
- [SL11] SCHLEICHER, S. ; LIENHARD, J.: *Adaptive facade shading systems inspired by natural elastic kinematics*. 2011. – Available online at <http://simonschleicher.wordpress.com/2011/02/13/paper-presentation-adaptive-architecture-conference/>; visited on March 11th 2011.
- [SP04] SCHULTZ, L. ; PETRY, W.: Änderung von Mikrostruktur und Form fester Werkstoffe durch äußere Magnetfelder / Antrag auf Einrichtung eines DFG Schwerpunktprogramms; Änderung von Mikrostruktur und Form fester Werkstoffe durch äußere Magnetfelder. 2004. – Forschungsbericht
- [SS02] SCHLAICH, Jörg ; SCHÖBER, Hans: Filigrane Kuppeln. In: *tec21* 12 (2002), S. 21–27
- [SSL06] SONG, S. ; SETHI, V. ; LI, H.-N.: Vibration control of civil structures using piezoelectric smart materials: A review. In: *Engineering Structures - Elsevier* (2006)
- [Teu04] TEUFFEL, P.: Entwerfen adaptiver Strukturen. In: *ILEK TU Stuttgart* (2004)
- [Thi05] THIENHAUS, S.: *Mikrostruktur und Phasenbildung hochorientierter TiNiCu- und NiMnAl-Formgedächtnisschichten, hergestellt mittels Molekularstrahl-Epitaxie*, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2005
- [Tra09] TRAUTZ, M.: Das Prinzip des Faltens. In: *Experimentelles Bauen - Detail Verlag* (2009)
- [Wag05] WAGENKNECHT, Gerd: *Stahlbau-Praxis*. Berlin : Bauwerk Verlag, 2005
- [Wal11] WALSER, Alexander F.: *Formfindung von Schalen mit numerischen Hängemodellen*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2011
- [WD05] WEBER ; DISTL: Acceptance of stayed cable systems using pre-stressing steels / FIP Recommendations. 2005. – bulletin
- [WDN05] WEBER, F. ; DISTL, H. ; NÜTZEL, O.: Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke. In: *Stahlbau - Ernst- und Sohn Verlag* (2005)
- [Wie07] WIEDEMANN, Johannes: *Leichtbau - Elemente und Konstruktion*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007
-

- [WS10] WINGER ; SETH: Piezoelectricity form Dancing. (2010), S. 4
- [Zim06] ZIMMERMANN, Gregor ; KASSEL, Universität (Hrsg.): *Membran Beton Gitterschalen Tragwerke - Entwicklung und Vorbemessung*. Universität Kassel, 2006
-

A. Projektzeitplan

Phase I	01.08.2009 - 31.10.2009
	Aufzeigen von derzeitigen Anwendungen von adaptiven Systemen in Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau
	Aufzeigen, Recherche erster Forschungsarbeiten zu aktiven Systemen im Bauwesen (Health Monitoring)
	Aufzeigen möglicher Einsatzgebiete aktiver Bauteile im Bauwesen aus architektonischer Sicht
	Aufzeigen möglicher Einsatzgebiete aktiver Bauteile im Bauwesen aus statischer Sicht
	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse
Phase II	01.11.2009 - 31.03.2010
	Übertragung der Anwendungsfelder im Maschinenbau und der Luft- und Raumfahrt auf das Bauwesen
	Aufzeigen der Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen
	Definition von einsetzbaren aktiven Werkstoffen, welche Werkstoffe sind im Bauwesen sinnvoll einsetzbar?
	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse
Phase III	01.04.2010 - 31.03.2011
	Erstellung von Anwendungshilfen (Identifikation geeigneter intelligenter Materialien für den jeweiligen Anwendungszweck) anhand der Vorüberlegungen und Recherchen in Phase II
	Verifikation der Arbeitshilfen an einem Beispielobjekt: <ul style="list-style-type: none"> • Numerische Untersuchung der Beispielobjekte mittels Strukturanalyse-Software (FE-Programme und Stabwerksprogramme) • Ergebnisse der Untersuchungen fließen in die Arbeitshilfen direkt ein
	Überprüfung der Ergebnis-Übertragbarkeit auf freigeformte und lineare Bauteile. ⇒ Die Ergebnisse fließen in die Arbeitshilfen direkt ein.
	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse
Phase IV	01.04.2011 - 30.04.2011
	Zusammenfassung der Gesamtergebnisse in einem Abschlussbericht

B. Öffentlichkeitsarbeit

Veröffentlichungen

Das Forschungsvorhaben wurde auf der DEUBAU in Essen beim Forschungsforum der Forschungsinitiative Zukunft Bau präsentiert, vgl. Abbildung 2.1.



Abbildung 2.1.: Flyer Forschungsforum der Forschungsinitiative Zukunft Bau auf der DEUBAU in Essen

Des Weiteren wurde das Forschungsvorhaben im Rahmen des Wissenschaftstages „Energie.Experiment.Erlebnis - Ein Tag im Land der Ideen“ an der Bauhaus-Universität Weimar mit dem nachfolgenden Plakat und Flyer präsentiert.

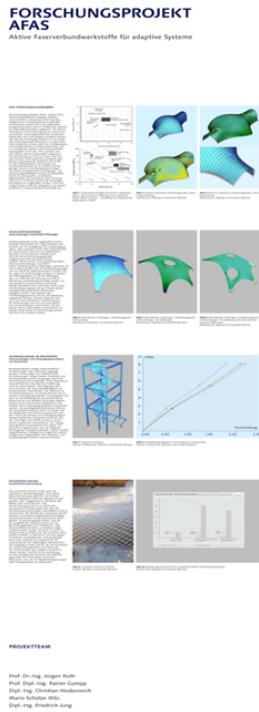


Abbildung 2.2.: AFAS-Plakat



Abbildung 2.3.: AFAS Flyer

Diplom- und Studienarbeiten / Seminare

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden verschiedene Diplom- und Studienarbeiten betreut:

- Adaptiv gesteuerte Fassadenprofile und -systeme - Materialeinsparung und Filigranität
- Fußgängerstege und Treppen mit adaptiver Steifigkeit
- Parametrische Formfindung von Membrantragwerken auf Kunststoffstützen mit Hilfe innovativer CAD- und Statik-Software

Die Themen ressourcenschonendes Bauen und adaptive Bauteile werden weiterhin an der Bauhaus-Universität Weimar aufgegriffen und mit Studenten verschiedene Projekte bearbeitet.

Projekttreffen

Über die Projektlaufzeit wurden zwei Arbeitsgruppentreffen durchgeführt und mit dem Fördermittelgeber (BBSR) und den Gutachtern (Herrn Prof. Grohmann, Universität Kassel und Herrn Dipl.-Ing. Thoralf Krause, SKZ Halle) interessante Diskussionen durchgeführt.