

Lehrstuhl für Holzbau- und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Adaptive Dachtragwerke
Entwicklung eines Entwurfsverfahrens
Betrachtung ausgewählter Aspekte

Robert Pawlowski

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Eberhard Schunck, i. R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Die Dissertation wurde am 18.01.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 10.07.2006 angenommen.

Vorwort

Die Dissertation „Adaptive Dachtragwerke“ entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baukonstruktion und am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München.

Angeregt zu dieser Arbeit wurde ich von Herrn Prof. Dipl.-Ing. Eberhard Schunck, dem ich meinen aufrichtigen Dank für seine Betreuung und Unterstützung sowie für die Übernahme des Hauptberichts ausspreche. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger danke ich in gleicher Weise für seine wertvollen Anstöße und Anregungen, die ich während langer, äußerst interessanter und lehrreicher Gespräche bekam sowie für die Übernahme des Mitberichtes. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter danke ich für das Schaffen optimaler Bedingungen am Lehrstuhl und die Übernahme des Mitberichtes.

Allen Mitgliedern des Lehrstuhls bin ich für die freundschaftliche Atmosphäre dankbar. Herrn Dipl.-Ing. Jörn von Grabe, Dipl.-Ing. Klaudius Henke, Herrn Dr.-Ing. Stefan Lutzenberger und Herrn Dipl.-Ing. René Stein danke ich herzlich für die vielfältigen fachlichen Diskussionen, Herrn Ullrich Münchow für die kollegiale Unterstützung.

Weiter möchte ich den wissenschaftlichen Hilfskräften und Diplomanden danken, die nicht unerheblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, vor allem Frau Dipl.-Ing. Mona Hermes, Herrn Dipl.-Ing. Ralph Kämmerle, Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Mysliwietz, Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Pech und Frau Dipl.-Ing. Hrisa Ritzkova.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Guido Ludescher bedanke ich mich für die freundliche Leihgabe des FE-Programms „Rahmen“.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Sonja und meinen Kindern Antonia, Vincent und Konstantin für ihre Unterstützung, Verständnis und Liebe.

München, im Juli 2006

Robert Pawlowski

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Betrachtung der Schnittgrößen- und der Verformungsadaption weitgespannter Dachtragwerke. Zunächst wird der Stand der Technik auf dem Gebiet der Adaption fachübergreifend dargestellt. Die für adaptive Aufgaben sehr interessanten *smart materials* werden dabei ausführlicher beschrieben. Im Weiteren werden die Dachtragwerke systematisiert und die Grundlagen der Tragwerksoptimierung und des Leichtbaus dargestellt. Anschließend wird ein Entwurfsverfahren adaptiver Dachtragwerke mit längenveränderbaren Tragwerkselementen entwickelt, mit dessen Hilfe Systemverformungen und -schnittgrößen optimiert werden können. Es folgt eine Betrachtung ausgewählter Aspekte adaptiver Dachtragwerke, insbesondere der zur Adaption erforderlichen Arbeiten. Die daraus resultierenden Perspektiven schließen die Arbeit ab.

Abstract

This thesis focuses on the results and insights derived from adapting and analysing the internal forces and deformations of wide-spanned, lightweight roof structures. The first and second sections consist of an interdisciplinary depiction of state-of-the-art adaptation techniques with a detailed description of the interesting *smart materials* increasingly employed in adaptronics. In an effort to systemize the roof structures, the next section expounds the principles of structural optimization and lightweight engineering. The thesis then proceeds to develop a design analysis method for adapting roof structures using structural elements of variable length, with whose help it is possible to achieve optimum system deformations and internal forces. This is followed by a discussion on selected aspects of adaptive roof structures with special emphasis on the adaptation work involved. The final section takes a look at the conclusions and associated prospects.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Adaption in der Natur	2
1.3	Adaption in der Technik	4
1.4	Adaption in der Bautechnik	9
2	Adaptive und sensorische Systeme und ihre Elemente	14
2.1	Systemübersicht	14
2.1.1	Adaptive Systeme	15
2.1.2	Sensorische Systeme	19
2.1.3	Regelbare Systeme	20
2.1.4	Aktive Systeme	20
2.1.5	Adaptronische Systeme	20
2.2	<i>Smart materials</i>	22
2.2.1	Formveränderbare Materialien	24
2.2.1.1	Thermotriktive Materialien	24
2.2.1.2	Piezoelektrische Materialien	31
2.2.1.3	Elektrostriktive Materialien	35
2.2.1.4	Magnetostriktive Materialien	37
2.2.1.5	Elektrochemische Materialien	39
2.2.1.6	Chemomechanische bzw. chemotriktive Materialien	40
2.2.2	Steifigkeitsveränderbare Materialien	42
2.2.2.1	Elektrorheologische Fluide	42
2.2.2.2	Magnetorheologische Fluide	44
2.3	Regelkreiselemente	46
2.3.1	Regelung und Steuerung	46
2.3.2	Sensoren	49
2.3.3	Aktuatoren	55
2.3.3.1	Aktuatorenkenngrößen	57
2.3.3.2	Formveränderbare Aktuatoren	59
2.3.3.3	Steifigkeitsveränderbare Aktuatoren	68
2.3.3.4	Übersicht der Aktuatoren auf der Basis von <i>smart materials</i>	72
3	Dachtragwerke als Leichtbaukonstruktionen	75
3.1	Leichtbau- und Optimierungsprinzipien	75
3.2	Dachtragwerke	81

4	Entwurf adaptiver Dachtragwerke	84
4.1	Entwurfsverfahren	84
4.1.1	Wahl und Optimierung des Tragsystems	86
4.1.2	Vorbemessung	87
4.1.3	Sensitivitätsanalyse	90
4.1.4	Aktuatorenwahl	94
4.1.5	Adaptionsberechnung	95
4.1.6	Nachrechnung nach Theorie höherer Ordnung	101
4.2	Ausgewählte Aspekte adaptiver Dachtragwerke	103
4.2.1	Adaptionsarbeit	104
4.2.1.1	Einfluss des Zeitpunktes der Adaption und der Lastaufbringung	105
4.2.1.2	Einfluss der Aktuatorendehnungen und der Tragwerksverformungen	109
4.2.1.3	Berechnung der Adaptionsarbeiten für das Fachwerkssystem c2_12	112
4.2.1.4	Interpretation der Berechnungsergebnisse der Adaptionsarbeiten	123
4.2.2	Maßnahmen zur Reduzierung der Adaptionsarbeit	125
4.2.2.1	Einfluss der Adaptionsziele	125
4.2.2.2	Einfluss der Vorspannung bzw. der Systemüberhöhung	127
4.2.3	Vergleich von Systemen mit unterschiedlichen Stützweiten, System d3	129
4.2.3.1	Adaptionsbedingungen und Adaptionsberechnungen	129
4.2.3.2	Zusammenfassung der Ergebnisse für verschiedene Stützweiten	136
4.2.4	Vergleich unterschiedlicher Tragsysteme	139
4.2.4.1	Adaption, System d1	139
4.2.4.2	Adaption, System c2	148
4.2.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für verschiedene Systeme	150
4.2.5	Adaptabilität und Redundanz ausgewählter Tragsysteme	152
4.2.6	Konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Aktuatorenbeanspruchung	157
4.2.7	Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit adaptiver Dachtragwerke	158
4.3	Anwendungsmöglichkeiten	161
5	Zusammenfassung und Ausblick	167
6	Literaturverzeichnis	170
6.1	Materielle Literatur	170
6.2	Immaterielle Literatur	187
7	Abbildungsverzeichnis	189
8	Bezeichnungen	193
9	Beschreibung des Adaptionsprogramms	196
10	Glossar	210

1

Einführung

1.1

Motivation

Die rasche Entwicklung von Adaptronik und *smart materials* eröffnet neue Perspektiven für viele Bereiche der Technik.

Technische Systeme können durch Integration von Sensoren, Aktuatoren und Regelung adaptiv ausgebildet werden. Adaptive Systeme stehen in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung, erkennen die Einwirkungen und reagieren auf sie. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen, die in Hinblick auf die unterschiedlichen Einwirkungen nur einen Kompromiss darstellen, können adaptive Systeme, dank ihrer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, leichter, effizienter und wenn notwendig sicherer ausgebildet werden. Überträgt man diese Erkenntnisse auf Tragwerke, so ergeben sich neue Möglichkeiten im Umgang mit den aus dem Gesetz von Rubner¹ (1885) resultierenden Tragfähigkeitsgrenzen tragender Strukturen: Bei einer gegebenen Stützweite können höhere Lasten getragen werden bzw. leichtere Tragwerke gebaut werden. Durch den Einsatz von adaptiven Tragwerken werden die vorhandenen Querschnitts- und Systemsteifigkeiten effektiver genutzt. Dies führt nicht nur zur Erhöhung der Tragfähigkeit, sondern verspricht ökologische und ökonomische Vorteile.

¹ [Franz/Schäfer1988, S.4]

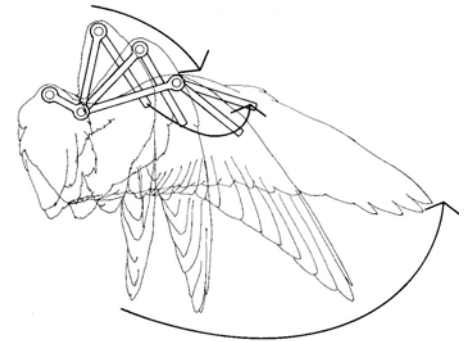
1.2

Adaption in der Natur

In der Natur gibt es viele Beispiele für adaptive Systeme.

Vogelflügel

Vögel können die Geometrie und das Profil ihrer Flügel an die Flugsituation anpassen und dadurch äußerst genau die Fluglinie einhalten, große Entfernungen kräfteschonend zurücklegen und, wenn notwendig, hohe Geschwindigkeiten erreichen. Für die Anpassung der Flügel benötigen Vögel nur sehr kurze Zeitspannen, die im Bereich von Millisekunden liegen.²



1.1: Vogelflügel als Beispiel für adaptive Systeme in der Natur³

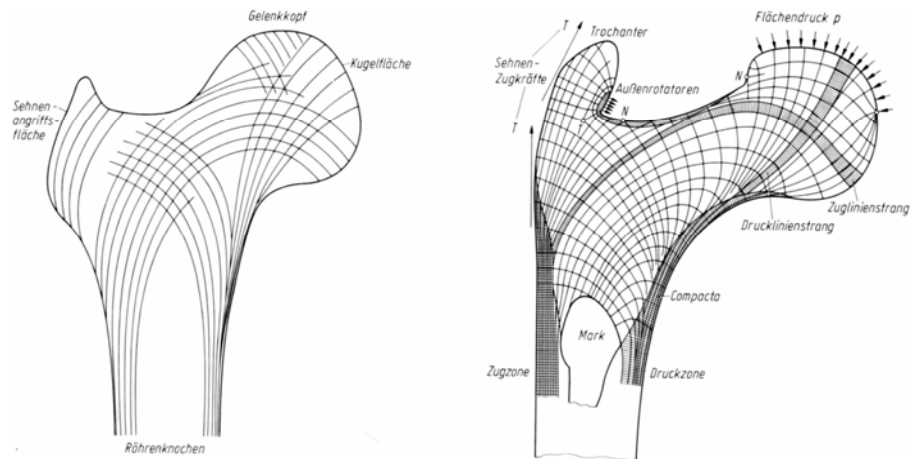
Knochen

Röntgenaufnahmen eines menschlichen Oberschenkelknochens zeigen die an die äußeren Beanspruchungen angepasste Knochenform: Die einwirkenden Lasten werden durch ein Raumgitter aus dünnen Knochen-schichten, die sich gegenseitig aussteifen, aufgenommen und zum Röhrenknochen weiter geleitet. Die Anordnung der Knochen-schichten folgt dabei den Richtungen der Hauptspannungslinien, wodurch die Lasten über Druck- und Zugkräfte innerhalb des Knochens aufgenommen werden. Ändert sich die Lage oder die Größe der Lasten über einen längeren Zeitraum, so passt der Knochen durch An- bzw. Abbau des Knochenma-

² [Zuk/Clark1970, S. 16ff.]

³ [www.llb.mw.tum.de], [Zuk/Clark1970, S. 19]

terials seine Form an die neue Beanspruchung an. Für die Anpassung werden in diesem Fall mehrere Monate benötigt.



1.2: Hauptspannungslinien in einem Oberschenkelknochen⁴

Bäume

Ähnliches Verhalten können wir bei Bäumen beobachten. Bäume reagieren auf langfristig wirkende Lasten (zum Beispiel aus einer Richtung kommender Wind) bzw. erlittene Schäden (zum Beispiel Blitzeinschlag) durch entsprechendes Wachstum, wobei die Form des Baumstamms und der Äste an die äußeren Beanspruchungen angepasst wird. Betrachtet man einen Schnitt durch die Jahresringe, so ist es möglich nicht nur das Alter des Baums zu bestimmen, sondern Aussagen über die im Verlauf der Jahre einwirkenden Beanspruchungen zu treffen.⁵

⁴ [Franz/Schäfer1988, S. 9]

⁵ [Mattheck1997, S. 149]

1.3

Adaption in der Technik

Viele technische Systeme haben bereits einen Entwicklungsstand erreicht, bei dem eine Steigerung der Leistungsfähigkeit mit herkömmlichen Methoden nur schwer möglich ist. Die Ursache dafür liegt immer häufiger in prinzipbedingten Grenzen dieser Systeme. Um diese Grenzen zu überwinden, wird vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie im Automobil- und Maschinenbau intensive Forschung auf dem Gebiet der adaptiven Systeme betrieben. Begünstigt wird diese Entwicklung durch die aus der Werkstoffforschung kommenden Impulse, speziell durch die Entwicklung neuer Materialien mit veränderbaren Eigenschaften, der so genannten *smart materials*.

Mehrere Forschungsvorhaben auf dem Gebiet adaptiver Systeme werden gegenwärtig bearbeitet. Einige daraus resultierende technische Anwendungen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Weltraumfachwerke

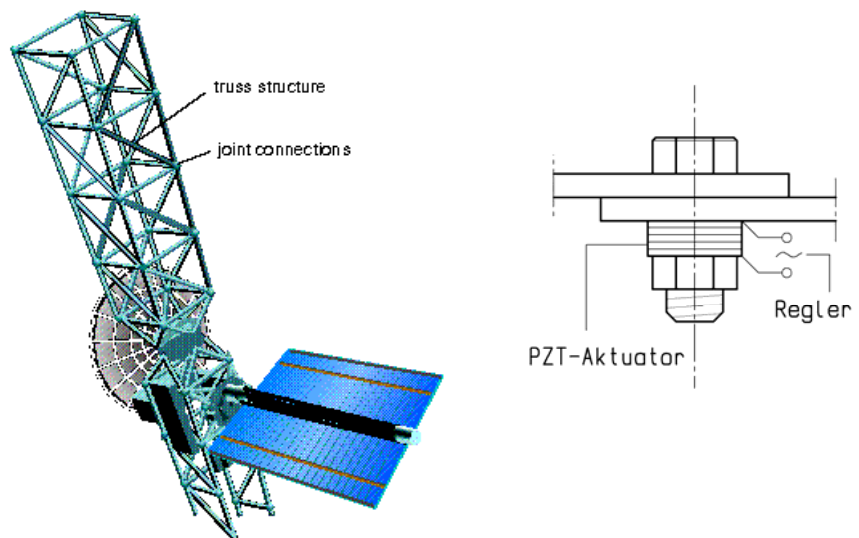
Orbitalstrukturen können durch unterschiedlichste Mechanismen (Temperaturänderung, Gravitationskräfte) zu niederfrequenten Schwingungen (unter einem Hertz) angeregt werden. Sollen hochpräzise Einrichtungen wie zum Beispiel sehr genau auszurichtende Antennen oder astronomische Beobachtungsgeräte durch diese Strukturen getragen werden, sind solche Schwingungen unerwünscht und möglichst rasch zu tilgen. Aufgrund des schwachen Dämpfungsvermögens der Orbitalstrukturen, die häufig als Raumfachwerke mit gelenkiger Fügung der Stäbe ausgebildet werden, ist es notwendig neue Konzepte zur Schwingungsreduzierung dieser Konstruktionen zu entwickeln.⁶

Beispielsweise kann dies durch Dissipation⁷ der Reibungsenergie, die durch die Schlupfbewegungen in den Fügstellen der Fachwerkstäbe

⁶ [www.mecha.uni-stuttgart.de]

⁷ s. Glossar

infolge der Strukturschwingungen hervorgerufen wird, realisiert werden. Dazu werden ausgesuchte Schraubenverbindungen der einzelnen Fachwerkstäbe adaptiv ausgebildet: Die Anpresskräfte (Normalkräfte) in den Stabverschraubungen werden aktiv über Piezo-Unterlegscheiben verändert. Bei geeigneter Ansteuerung lässt sich aus den Mikro- und Makroschlupfbewegungen⁸ in den Verbindungsstellen eine deutliche Erhöhung der dissipierten Energie erzielen, wodurch das Schwingungsverhalten optimiert werden kann. Zur Regelung dieser Strukturen werden gegenwärtig Konzepte auf der Basis von neuronalen Netzen untersucht.⁹



1.3: Adaptives Fachwerk für die Raumfahrt¹⁰

VLT Teleskope (*very large telescopes*)

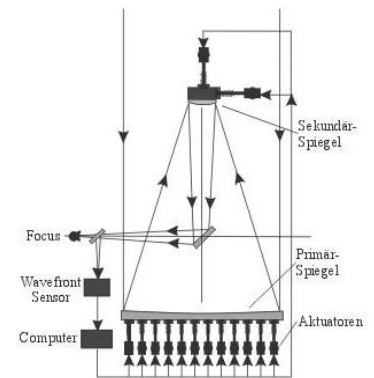
Das theoretische Auflösungsvermögen von Teleskopen wird gewöhnlich durch Luftunruhe, Temperaturänderungen und die Schwerkraft beeinträchtigt. Um die negativen Einflüsse zu reduzieren, wird unter anderem die Form des Hauptspiegels aktiv beeinflusst. Dies kann auf zwei Arten erfolgen: Zum einen kann eine optimale Krümmung der elastischen Spiegeloberfläche durch mehrere einzelne Stellelemente eingestellt werden.

⁸ s. Glossar

⁹ [Gaul/Albrecht/Wirnitzer2000, S. 86-97], [Neumann1995, S. 74 ff.]

¹⁰ [www.mecha.uni-stuttgart.de]

Dies ist zum Beispiel bei den VLT Teleskopen der ESO in Chile der Fall, bei denen auf diese Weise Genauigkeiten von 50 Nanometer erreicht wurden. Eine Alternative dazu stellen mehrere entsprechend gegeneinander gedrehte und auf die Spiegelrückseite geklebte Piezofolien dar, die die Krümmung der Spiegelfläche durch eigene Längenänderungen beeinflussen können.¹¹



1.4: VLT Teleskope der ESO und Prinzipskizze der aktiven Optik¹²

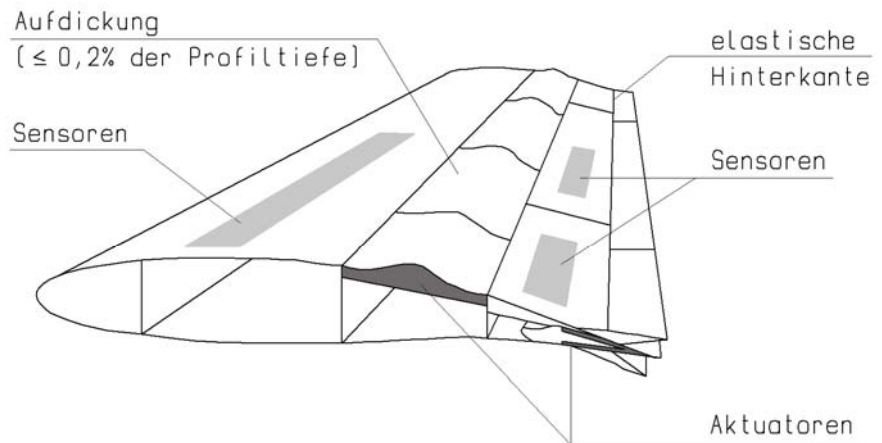
Flugzeugflügel

Die Wirtschaftlichkeit und die ökologische Verträglichkeit von Flugzeugen werden im Wesentlichen durch ihren Treibstoffverbrauch bestimmt. Der Treibstoffverbrauch ist unter anderem vom Gesamtluftwiderstand abhängig. Dieser setzt sich zusammen aus dem induzierten Widerstand (verursacht durch Luftwirbel an der Tragfläche) und dem Wellenwiderstand (verursacht durch am Tragflächenprofil gestaute und dann umgelenkte Luft). Bei Starrflügelflugzeugen kann die Profilform der Tragflügel nur bedingt an die Geschwindigkeit und das während des Fluges kleiner werdende Gewicht des Flugzeugs angepasst werden. Die unveränderbare Flügelform stellt einen Kompromiss zwischen verschiedenen Flugzuständen und Belastungen dar. Demgegenüber wird eine aktive Anpassung der Geometrie an die äußeren Bedingungen durch adaptive Ausbil-

¹¹ [www.eso.org]

¹² [www.eso.org]

derung des Tragflügels gewährleistet. Um den induzierten Widerstand zu verringern, wird die Flügelhinterkante flexibel ausgebildet. Der Wellenwiderstand wird wiederum durch eine veränderbare Aufdickung auf der Trägeroberseite reduziert. Beides wird durch den Einsatz von multifunktionalen Werkstoffen, zum Beispiel piezoelektrischen Materialien¹³ oder Form-Gedächtnis-Legierungen¹⁴, in Verbindung mit einem geeigneten Regelalgorithmus erreicht. Ein adaptiver Tragflügel ermöglicht eine optimale Gestaltregelung mit sehr schnellen Reaktionszeiten bei einem Gewichtersparnis gegenüber herkömmlichen hydraulisch betriebenen Stellelementen.



1.5: Adaptiver Tragflügel mit piezoelektrischen Stellelementen¹⁵

Künstliche Muskeln

Mittlerweile wird intensiv an künstlichen Muskeln für Formadaptionaufgaben gearbeitet. Als Materialien werden beispielsweise elektrisch aktivierbare Polymergele eingesetzt, die ihr Volumen signifikant verändern können. Wird ein elektrostriktives Gel zum Beispiel in den oben beschriebenen Tragflügeln eingebettet, so ist es möglich, alleine durch Ionenflüsse das Volumen der Gele zu variieren und folglich die Flügel-

¹³ s. Kapitel 2.2.1.2

¹⁴ s. Kapitel 2.2.1.1, [Musolff2001, S. 72]

¹⁵ nach [www.dlr.de], [Weber1998, S. 7]

aufdickung in Abhängigkeit von dem Wellenwiderstand an die äußeren Belastungen anzupassen. Dadurch wäre eine weitere Gewichtsreduktion möglich.¹⁶

Weitere Anwendungen

Weitere Beispiele für adaptive Systeme sind in vielen Technikbereichen zu finden. Sie reichen von Systemen der Mikro- und Nanotechnologie bis zu großen Systemen bzw. Strukturen, wie zum Beispiel adaptive Rotorblätter von Hubschraubern, Schwingungsisolierung von Satelliten während der Startphase und aktive Fahrzeugaufhängung.¹⁷

¹⁶ [www.uni-stuttgart.de]

¹⁷ [Neumann1995, S. 120 ff.], [Weber1998, S. 5 ff.], [Elspass/Flemming1998, S. 159 ff.], [www.dlr.de]

1.4

Adaption in der Bautechnik Auch im Bereich des Bauingenieurwesens denkt man über Möglichkeiten nach, die durch die Nutzung der Adaptionsprinzipien eröffnet werden. Bereits in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts hat Freyssinet¹⁸ vorgeschlagen, Tragwerke mit variabler Vorspannung (*reactive system*) auszubilden. In derselben Zeit beschäftigte sich Zetlin¹⁹ mit der Verformungskontrolle von Türmen. In den 70er Jahren haben Zuk und Clark²⁰ weitere Einsatzbereiche für adaptive Systeme im Bauwesen aufgezeigt. In Deutschland hat sich Domke²¹ überwiegend in den 80er Jahren mit aktiven Tragwerken beschäftigt. Seit den 90er Jahren befasst sich Sobek²² mit dem Thema adaptiver Systeme. Mittlerweile mündete die weltweite Forschung²³ auf dem Gebiet adaptiver Tragwerke in einigen praktischen Anwendungen, die für die Bereiche der Schwingungskontrolle und der Reduzierung der aus Erdbebeneinwirkungen resultierenden Beanspruchungen von Spencer und Nagarajaiah²⁴ (2003) zusammengefasst wurden. Im Folgenden werden einige Beispiele beschrieben.

Schwingungen

Bei Tragseilen weitgespannter Schrägseilbrücken können durch kombinierte Effekte aus Regen, Wind und Verkehr Schwingungen mit großen Amplituden entstehen. Um diese zu vermeiden werden Dämpfer auf der Basis von smart materials eingesetzt.

¹⁸ [Zuk/Clark1970, S.35]

¹⁹ [Zuk/Clark1970, S.35]

²⁰ [Zuk/Clark1970, S. 34 ff.]

²¹ [Domke et al. 1981], [Domke et al. 1984], [Domke1991], [Domke1992]

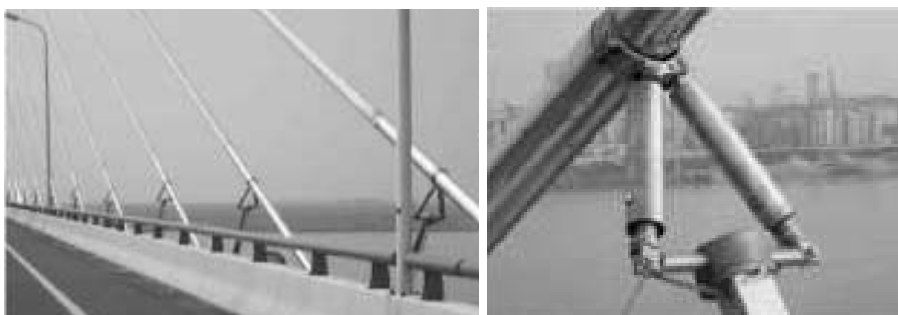
²² [Sobek/Haase/Köhnlein1998], [Sobek/Haase1998], [Sobek/Haase/Teuffel2000], [Sobek2000], [Sobek/Teuffel2002]

²³ [Liu/Tomizuka/Ulsoy2005], [Casciati2003], [Kobori et al.1998], [Housner et al. 1994] [Sakamoto/Koshika/Kobori200]

²⁴ [Spencer/Nagarajaiah2003, S. 845 ff.]

Dongting Lake Brücke

Ein bekanntes Beispiel dafür ist die 2002 fertig gestellte *the Dongting Lake Bridge* in Yeuyang in Südchina. Um das Schwingungsverhalten der 156 Schrägseile zu verbessern, wurden hier 312 Dämpfer auf der Basis von magnetorheologischen Fluiden²⁵ (Lord SD-1005 MR) eingesetzt.²⁶ Die Steifigkeit der Dämpfer wird in Abhängigkeit von den dynamischen Einwirkungen verändert.



1.6: *The Dongting Lake Bridge*, MR Dämpfer an den Schrägseilen

Eiland Brücke

Für die ca. 412 m lange Eiland Brücke (2003) in der Nähe von Kampen in Holland wurde ein adaptiver magnetorheologischer Seildämpfer (*adaptive cable damper, ACD*²⁷) mit variablen Dämpfungskennlinien im Langzeitversuch eingesetzt.²⁸ Systemdämpfungsvergleiche aus Aufschwingversuchen mit und ohne *ACD* zeigen, dass je nach Einstellung des Dämpfers, eine um Faktor vier bis neun höhere Systemdämpfung als bei einem System ohne *ACD* erzielt wird.

Die Maßnahmen zur Schwingungsreduktion von Schrägseilbrücken können auf andere Tragsysteme übertragen werden: Zum Beispiel Seilnetz- und Membrankonstruktionen sowie Zugglieder von abgespannten Masten und Türmen.

²⁵ s. Kapitel 2.2.2.2

²⁶ [Spencer/Nagarajaiah2003, S. 845 ff.]

²⁷ s. Glossar

²⁸ [Weber/Distl/Nützel2005, S. 582 ff.]

Erdbeben

Um Erdbebeneinwirkungen aufnehmen zu können, werden vor allem in Japan anpassungsfähige Gebäude mit variablen Steifigkeiten oder aktiven Dämpfungssystemen gebaut, wodurch das Antwortverhalten des Gebäudes in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz positiv beeinflusst wird.

Kyobashi Center

Bereits 1989 wurde das erste aktiv gedämpfte Gebäude, *Kyobashi Center* in Tokyo, fertig gestellt. Die Dämpfung erfolgt hier mit zwei je 50 kN starken hydraulischen *active mass damper (AMD)*.²⁹

The Nihon-Kagaku-Miraikan

Mittlerweile konnte die erreichbare Leistung der Dämpfer deutlich gesteigert werden. So wurden für das 2001 fertig gestellte *Nihon-Kagaku-Miraikan* Gebäude (*The Tokyo National Museum of Emerging Science and Innovation*), ebenfalls in Tokyo, zwei 300 kN starken magnetorheologischen Dämpfer eingesetzt.³⁰



1.7: *The Nihon-Kagaku-Miraikan*, MR Dämpfer³¹

The KaTRI

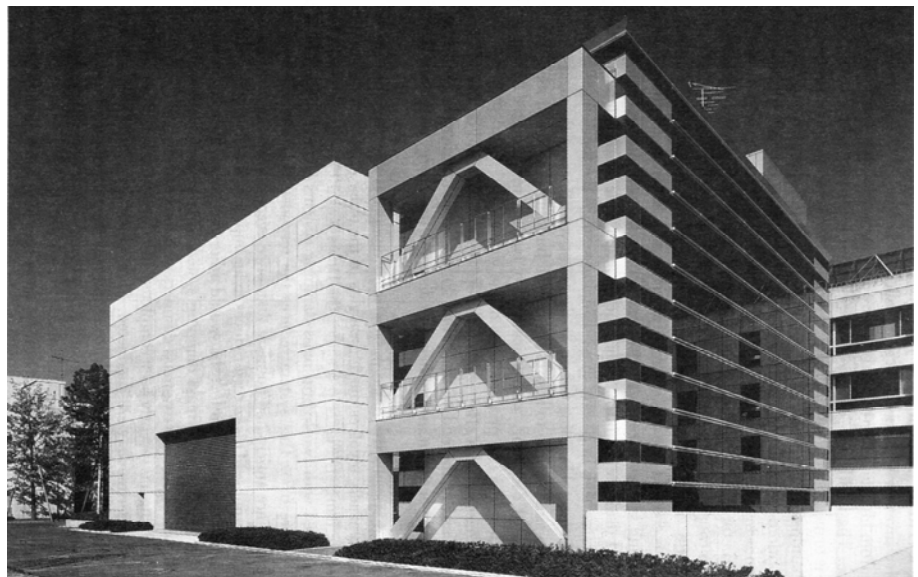
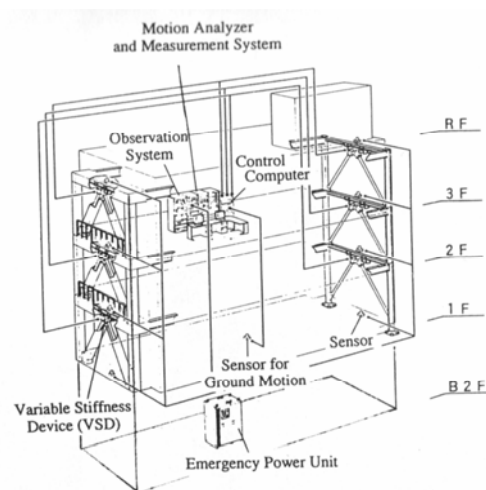
Das 1990 gebaute *The Kajima Technical Research Institute (the KaTRI)* in Tokyo ist das erste Gebäude mit variabler Steifigkeit.³² Durch den

²⁹ s. Glossar, [Spencer2003, S. 846]

³⁰ [Spencer2003, S. 854], [Liu/Tomizuka/Ulsoy2005, S. 3 f.]

³¹ [Spencer2003, S. 853], [Liu/Tomizuka/Ulsoy2005, S. 4]

Einsatz des hydraulischen *active variable stiffness system (AVS)*³³ können die auf das Gebäude einwirkenden Horizontallasten entweder durch ein steifes Fachwerkssystem oder durch ein weiches Rahmensystem aufgenommen werden, wodurch die Erregbarkeit des Tragwerks durch Erdbeben wesentlich reduziert wird.



1.8: The Kajima Technical Research Institute (KaTRI) in Tokyo³⁴

³² [Culshaw1996, S. 168 f.], [Spencer2003, S. 851 f.]

³³ s. Glossar

³⁴ [Culshaw1996, S. 168 f.]

Tragfähigkeitsanpassung,
pneumatische Tragwerke

Als weiteres Beispiel für anpassungsfähige Tragwerke im Bauwesen können pneumatische Konstruktionen genannt werden. Die Tragfähigkeit dieser Konstruktionen kann durch eine Veränderung des Innendrucks des Stützmediums an die äußeren Einwirkungen angepasst werden. So wird der Luftinnendruck einer Einfachmembrankonstruktion (Traglufthalle) in Abhängigkeit von der Wind- und Schneebelastung eingestellt.

Des Weiteren können Schlauchkonstruktionen als Aktuatoren adaptiver Tragwerke eingesetzt werden. Diese Idee wird beispielsweise von der Firma FESTO in Esslingen in Form des *fluidic muscle*, der als adaptives Spannglied eingesetzt wird, an Versuchsgebäuden untersucht.³⁵

³⁵ [Thallemer2000, S. 464 f.]

2

Adaptive und sensorische Systeme und ihre Elemente

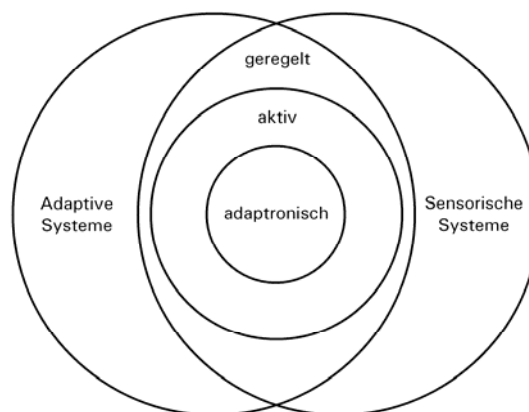
2.1

Systemübersicht

Durch die Integration variabler, multifunktionaler Bauteile können technische Systeme (zum Beispiel Tragwerke³⁶) selbstanpassungsfähig an unterschiedliche Einwirkungen ausgebildet werden. Die Anpassung erfolgt mit Hilfe selbst gesteuerter und selbst organisierter Vorgänge. Das in Wechselwirkung mit seiner Umgebung stehende System funktioniert gewöhnlich über ein Zusammenspiel von

- **Regelung- bzw. Steuerung** (Gehirn der Struktur)
- **Sensoren** (Sinne der Struktur) und
- **Aktuatoren** (Muskeln der Struktur)³⁷

Die einzelnen System- bzw. Strukturkonzepte können nach ihrer primären Wirkungsweise unterschieden werden.



2.1: Übersicht adaptiver und sensorischer Systeme³⁸

³⁶ s. Glossar

³⁷ s. Glossar und Kapitel 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.3

³⁸ in Anlehnung an [Elspass/Flemming1998, S. 4]

2.1.1

Adaptive Systeme

adaptiv

(lateinisch: *adaptare* – anpassen, passend machen)

Adaptive Systeme sind imstande bestimmte Anpassungsvorgänge durchzuführen. Sie bestehen aus dem System selbst und zumindest aus Aktuatoren (passive Adaption), häufiger aber zusätzlich auch aus Sensoren und Regelung bzw. Steuerung (aktive Adaption). Sie sind in der Lage ihre Eigenschaften zu verändern und dadurch Anpassungsprozesse in Abhängigkeit von den äußeren bzw. inneren Einflüssen zu realisieren.

Im Zusammenhang mit dem Begriff adaptiver Systeme werden die möglichen Adaptionformen bzw. Systemarten in Anlehnung an die von Housner et al.³⁹ durchgeführte Klassifizierung erläutert.

Passive Adaption

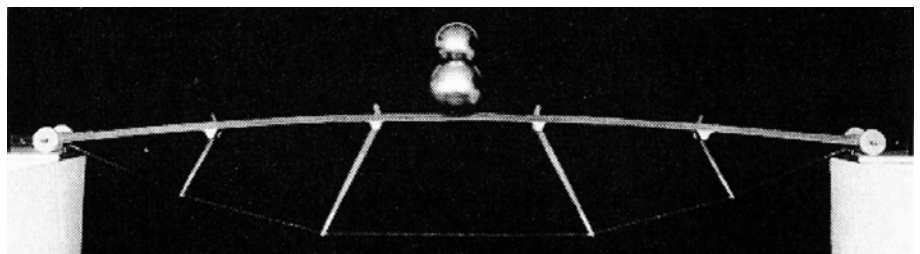
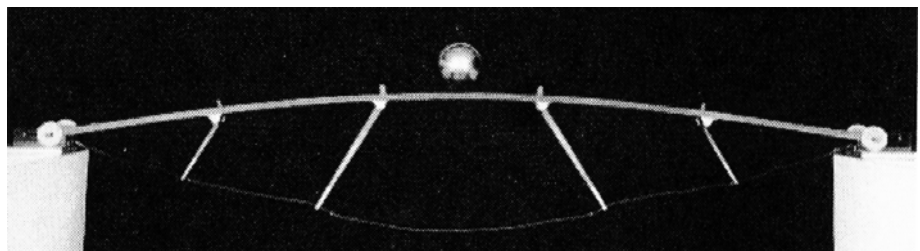
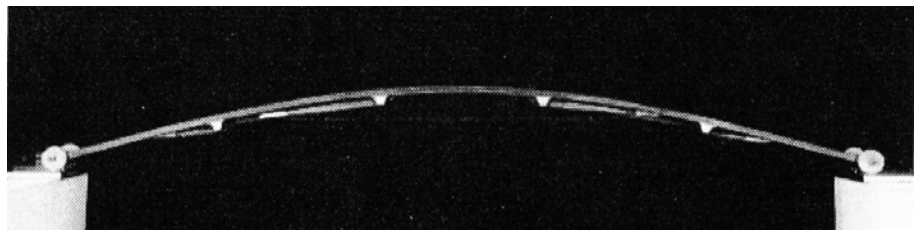
Passiv adaptierte Systeme reagieren direkt auf äußere Einwirkungen ohne Einsatz von Regelung- bzw. Steuerungseinheiten. Charakteristisch für diese Systeme ist die Tatsache, dass keine elektrische o. ä. Energie von außen zugeführt werden muss, um Adaptionziele zu erreichen. Als Beispiel können die zur Schwingungskontrolle von Bauwerken eingesetzten passiven Schwingungstilger⁴⁰ und Schwingungsdämpfer⁴¹ genannt werden: Die von außen eingebrachte Energie (aus Verkehrslasten, Wind, Erdbeben etc.) wird beispielsweise durch den als Feder-Masse-System ausgebildeten Schwingungstilger umgewandelt, wobei die Eigenfrequenz des Tilgers in der Regel für die erste Eigenfrequenz des Tragwerks eingestellt wird. Bei Schwingungsdämpfern werden viskoelastische bzw. viskofluide Medien zur Energiedissipation eingesetzt.

³⁹ [Housner et al.1997, S. 899]

⁴⁰ s. Glossar

⁴¹ s. Glossar

Ein weiteres Beispiel für passive Systeme ist der von Ziesel, Habeler, Schmid und Semler⁴² entwickelte „dynamische Träger“. Das Herzstück dieses Systems bildet eine bewegliche Unterspannung, die in Abhängigkeit von der Lasthöhe sukzessiv ausgeklappt werden kann. Dies geschieht ohne Zufuhr elektrischer o. ä. Energie, mit Hilfe von speziell geformten Verbindungselementen zwischen den Spreizen und dem Träger sowie einer einfachen mechanischen Umlenkung.



2.2: Passiv adaptierbarer unterspannter Träger⁴³

Außerdem ist auch das zwischen zwei Punkten freihängende Seil, das unter verschiedenen Lasten unterschiedliche Geometrien annimmt, ein einfaches Beispiel für die passive Systemadaption.

⁴² [Ziesel1989, S. 300 f.]

⁴³ [Ziesel1989, S. 294 f.]

Aktive Adaption

Im Gegensatz zu der passiven Adaption ist bei aktiver Adaption die Zufuhr externer Energie erforderlich. Diese wird eingesetzt, um die Regelung bzw. Steuerung, Sensoren und Aktuatoren zu aktivieren. Der Vorteil aktiver Adaption liegt in dem breiteren Spektrum der erreichbaren Systemreaktionen.⁴⁴

Semi-aktive Adaption

Die semi-aktiv adaptierten Systeme sollen die Vorteile der passiven und aktiven Adaption in sich vereinen und versprechen einen reduzierten Energiebedarf verbunden mit einer höheren Adaptionsflexibilität. Die semi-aktive Adaption wird beispielsweise durch den Einsatz von Dämpfungselementen mit regelbaren Ventilen realisiert, wodurch eine Anpassbarkeit an die äußeren Einwirkungen erreicht wird.

Hybride Adaption

Ein System wird als hybrid adaptiert bezeichnet, wenn die Adaptionsprozesse dieses Systems die Eigenschaften von passiven und aktiven Anpassungsvorgängen in sich vereinen. Als Beispiele können Strukturen mit *hybrid mass damper*⁴⁵ oder *hybrid base isolation*⁴⁶ genannt werden.

Adaptives Tragwerk, adaptive Struktur

Das adaptive Tragwerk ist imstande die durch die äußeren und inneren Einflussgrößen hervorgerufenen Kräfte und Verformungen in den einzelnen Tragwerkelementen an bestimmte, zuvor definierte Adaptionsziele anzupassen. Die Adaptionsziele können durch Veränderung der äußeren Einwirkungen und/oder der inneren Kräfte erreicht werden. Als Beispiel für die Veränderung der Einwirkungen kann eine gezielte Beeinflussung der Windbelastung durch das adaptive Tragwerk genannt werden. Dies kann durch eine Verbesserung der Gebäudeaerodynamik mit aktiven „Gebäudespoilern“ oder eine Formadaption der Querschnitte selber erfolgen⁴⁷. Die Adaption durch direkte Veränderung der inneren Kräfte wird zum Beispiel durch variable Steifigkeitsverteilung innerhalb des Trag-

⁴⁴ s. Kapitel 2.1.4

⁴⁵ s. Glossar

⁴⁶ s. Glossar

⁴⁷ Analog zum Beispiel des adaptiven Flugzeugflügels im Kapitel 1.3

werks und/oder durch variable Abmessungen (Längen, Krümmungen etc.) der einzelnen Tragwerkselemente erreicht.

Als Adaptionsziele können folgende Systemeigenschaften bzw. -größen genannt werden:

- Verringerung der Tragwerksverformungen
- Optimierung bzw. Homogenisierung der Kraftzustände im Tragwerk und dadurch Steigerung der Tragfähigkeit (zum Beispiel durch aktive Momentenumlagerung in statisch unbestimmten Rahmentragwerken)
- Erhöhung der Systemdämpfung, Optimierung des Schwingungsverhaltens (zum Beispiel Schrägseilssysteme mit magnetorheologischen Dämpfern)
- Erhöhung der Tragwerkssicherheit

Das Prinzip der Adaption setzt voraus, dass bestimmte Systemgrößen veränderbar sind:

- **Systemkräfte.** Durch die Einleitung von zusätzlichen Kräften (durch Aktuatoren) wird das System hinsichtlich seiner Verformungen (Verformungsadaption) oder Schnittgrößen (Schnittgrößenadaption⁴⁸) adaptiert. Die Krafteinleitung kann zum Beispiel durch Längenänderungen einzelner linien- oder flächenförmigen Tragwerkselemente erfolgen.
- **Systemgeometrie.** Zum Beispiel die Formadaption der Tragwerkselemente hinsichtlich der Verringerung der Einwirkungen (zum Beispiel Wind).
- **Steifigkeit.** Durch die Veränderung der Steifigkeiten der einzelnen Tragwerkselemente oder deren Bereiche werden die aus den veränderlichen Einwirkungen resultierenden wechselnden Beanspruchungen dieser Elemente homogenisiert, wodurch die aus verschiedenen Lastfällen sich

⁴⁸ Verformungsadaption (meistens Vertikalverschiebungen) wird im Folgenden auch als w-Adaption bzw. A_w bezeichnet. Schnittgrößenadaption wird in dieser Arbeit in Form der Adaption der Biegemomente angewendet und als M-Adaption bzw. A_M genannt.

ergebenden maximalen bzw. minimalen Schnittsgrößen (M, Q, N) reduziert werden (Steifigkeitsadaption⁴⁹).

- **Masse**. Durch die veränderbare Verteilung der Masse im System kann ebenfalls die Systembeanspruchung verringert werden. Dies erfolgt zum Beispiel mit den so genannten *tuned mass damper (TMD)*⁵⁰ bzw. *active mass damper (AMD)*⁵¹ und wird vor allem zur Reduktion der Wind- und Erdbebenbeanspruchung von Bauwerken eingesetzt.

- **Dämpfung**, zum Beispiel durch den Einbau von viskoelastischen Dämpfungselementen.

2.1.2

Sensorische Systeme

Sensorische Systeme können unterschiedliche Struktur- oder Umgebungszustände wie Position, Dehnungen, Verformungen sowie elektromagnetische und thermodynamische Eigenschaften erfassen. Die denkbaren Anwendungen sind: Systemüberwachung von Strukturen in Bereitschaftsstellung (zum Beispiel technische Notfallausrüstungen), Schadenserkennung und aktive Schadensbegrenzung.

Sensor

(lateinisch: *sentire* - fühlen, merken, meinen; *sensus* – Gefühl, Sinn, Bewusstsein)

Ein Sensor ist ein Funktions- oder Bauelement⁵², das mit Hilfe physikalischer oder chemischer Effekte der qualitativen oder quantitativen Erfassung physikalischer, chemischer oder elektrochemischer Größen und deren Umwandlung bevorzugt in elektrische Signale dient.

Sensorik

Sensorik wird auch als Sensortechnik bezeichnet und beschreibt die wissenschaftlich-technische Disziplin, die sich mit der Entwicklung und dem Einsatz von Sensoren befasst.

⁴⁹ Steifigkeitsadaption wird im Folgenden auch als EA- bzw. EI-Adaption bezeichnet.

⁵⁰ s. Glossar

⁵¹ s. Glossar

⁵² s. Glossar

2.1.3

Regelbare Systeme

Regelbare Systeme werden durch die Schnittmenge adaptiver und sensorischer Strukturen beschrieben. Durch das Bestücken einer konventionellen Struktur mit Sensoren und Aktuatoren, können die registrierten Eigenschaften oder Zustandsformen beeinflusst werden. Die Strukturkontrolle erfolgt durch Regelung bzw. Steuerung. Kennzeichnend für regelbare Strukturen sind die meistens geringe Anzahl der Aktuatoren und Sensoren, die gewöhnlich monofunktionell eingesetzt werden. Eine Automatiktür mit Näherungssensor und einem elektrischen Aktuator als Türöffner ist ein typisches regelbares System.⁵³

2.1.4

Aktive Systeme

Die aktiven Systeme sind eine Teilmenge der regelbaren Systeme. Kennzeichnend für die aktiven Systeme ist die Tatsache, dass die Sensoren und Aktuatoren der aktiven Systeme in die Struktur integriert werden und dadurch selbst zum Bestandteil der primären, lastabtragenden Struktur werden.⁵⁴

2.1.5

Adaptronische Systeme

Ein System ist dann adaptronisch (bzw. „intelligent“), wenn alle Funktionsbausteine eines Regelkreises in der Struktur enthalten sind und wenigstens ein Element multifunktional eingesetzt wird.⁵⁵

Regelkreis

Ein Regelkreis ist ein Wirkungskreis, der aus einer Regelstrecke (zum Beispiel die zu regelnde Anlage) und einem Regler besteht. Ein Messglied misst die zu regelnde Größe. Bei einer Abweichung vom Sollwert wird durch einen Regelbefehl das Stellglied gesteuert, um diese Abweichung aufzuheben. Ein Beispiel aus der Biologie ist die Steuerung der Pupillengröße in Abhängigkeit von der Helligkeit.

⁵³ [Elspass/Flemming1998, S. 4 f.], [Paradies1997, S. 2]

⁵⁴ [Elspass/Flemming1998, S. 4 f.], [Paradies1997, S. 2]

⁵⁵ [Neumann1995, S. 11 f.]

Regelkreiselemente	<p>Zu Regelkreiselementen zählen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Regelungs- bzw. Steuerungsmechanismus- Sensor bzw. Sensorennetzwerk- Aktuator bzw. Aktuatorennetzwerk
Funktionsbausteine	<p>Zu Funktionsbausteinen⁵⁶ werden Regelkreiselemente sowie sonstige interessante⁵⁷ Material- oder Werkstoffeigenschaften gezählt.⁵⁸ In diesem Zusammenhang werden die für Tragwerke relevanten <i>smart materials</i> in Kapitel 2.2 beschrieben.</p>
Multifunktionales Element	<p>Ein Element wird dann als multifunktional bezeichnet, wenn es mindestens zwei der folgenden Funktionsbausteine enthält:⁵⁹</p> <ul style="list-style-type: none">- Regelungs- bzw. Steuerungsmechanismus- Sensor bzw. Sensornetzwerk- Aktuator bzw. Aktuatornetzwerk- Sonstige interessante Material- oder Werkstoffeigenschaften
Adaptronik	<p>Adaptronik ist ein „Prozess zur Generierung ‚intelligenter‘ Strukturen auf der Basis multifunktionaler Elemente.“⁶⁰ „Adaptronik“ ist ein Kurzwort, welches aus den Begriffen „adaptiv“ und „Elektronik“ gebildet wurde, um das Forschungsgebiet der multifunktionellen technischen Strukturen und Systeme zu beschreiben. Die für die Adaptronik wichtigen Impulse kommen vor allem aus der Werkstoffforschung, speziell durch die Entwicklung neuer Materialien mit geeigneten Eigenschaften, den so genannten <i>smart materials</i>.</p>

⁵⁶ s. Glossar

⁵⁷ im Sinne von „außergewöhnliche“

⁵⁸ [Neumann1995, S. 11 f.]

⁵⁹ [Neumann1995, S. 11 f.]

⁶⁰ [Neumann1995, S. 11 f.]

2.2

Smart materials

(englisch: *smart, intelligent, active oder adaptive materials*)

deutsch: aktive, adaptive, multifunktionale, ggf. intelligente Materialien)

Im Allgemeinen versteht man unter *smart materials* Ein- oder Mehrkomponentenstoffe, die bestimmte materialtypische Eigenschaften aufgrund einer äußeren Einflussgröße selbstständig verändern können oder ungewöhnliche Eigenschaften zeigen.⁶¹ Die Eigenschaften der *smart materials* können z.B. durch Änderung der Temperatur, des Drucks oder unter Einfluss chemischer Substanzen, elektrischer oder magnetischer Felder, geändert werden. Im Gegensatz zu den „intelligenten“ Materialien müssen *smart materials* nicht zwangsläufig sensorische Funktionen aufweisen.⁶²

Nach der Art der veränderbaren Materialeigenschaft werden *smart materials* unterschieden in:

- Formveränderbare Materialien
- Lichtemittierende Materialien
- Farbveränderbare Materialien
- Phasenveränderbare (steifigkeitsveränderbare) Materialien
- Adhäsionsveränderbare Materialien
- Elektronenemittierende Materialien
- Energiespeichernde bzw. -abgebende Materialien

Eine allgemeine Übersicht der *smart materials* ist in der Tabelle 2.3 dargestellt. Die Beschreibung dieser Materialien wird auf die form- und steifigkeitsveränderbaren Materialien beschränkt und erfolgt zunächst fachübergreifend mit dem Fokus auf die Wirkungsweise einzelner Materialien. Auf die Nutzung der *smart materials* zur Adaption von Dachtragwerken wird in Kapitel 2.3.3 (Aktuatoren) eingegangen.

⁶¹ [Köhnlein2000, S. 430]

⁶² Die Begriffe *smart materials* und „intelligente“ Materialien werden häufig synonym verwendet.

<i>smart materials</i>							
	Formveränderbare Materialien	Lichtemittierende Materialien	Farbveränderbare Materialien	Phasenveränderbare Materialien	Adhäsionsveränderbare Mat.	Elektronenemittierende Mat.	Energiespeichernde Mat.
Temperaturänderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Thermostruktive Materialien - Form-Gedächtnis-Legierungen - Keramiken - Polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermolumineszierende Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermochrome Materialien - Polymerbeschichtungen - Metalloxidbeschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermorheologische Fluide 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermoadhäsive Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermoelektrische Materialien - Metalle - Halbleiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Phasenveränderbare Materialien - Salzlösungen • Supraleiter - Metalllegierungen
Mechanische und elektrische Einwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelektrische Materialien - Kristalle - Keramiken - Polymere 		<ul style="list-style-type: none"> • Piezochrome Materialien 			<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelektrische Materialien - Sensoren 	
Elektrische Energie	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrostruktive Materialien - Keramiken - Polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolumineszierende Materialien - Dünnschicht-elektrolumineszenz - Pulverelektrolumineszenz - Injektionslumineszenz - elektrisch leitfähige Polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrochrome Materialien - Polymerbeschichtungen - Metalloxidbeschichtungen - Elektrooptischer Effekt (Flüssigkristalle) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrorheologische Fluide 			
Magnetische Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> • Magnetostruktive Materialien - Keramiken - Form-Gedächtnis-Metalle 			<ul style="list-style-type: none"> • Magnetorheologische Fluide 			
Chemische Einwirkungen (Salz-, Alkohol-, Basen-, Säure-, Polymerlösungen, Gelierungen, Redox- und Oxydationreaktionen)	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrochemisch-, chemo-mechanisch- bzw. chemostruktive Materialien - Polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemolumineszierende Materialien - organische Stoffe - anorganische Stoffe 					
Lichtstrahlung		<ul style="list-style-type: none"> • Photolumineszierende Materialien - Fluoreszenz - Phosphoreszenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Photochrome Materialien - Polymerbeschichtungen - Metalloxidbeschichtungen 		<ul style="list-style-type: none"> • Photoadhäsive Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Photoelektrische Materialien - Silizium - Polymere 	
Protonenhaltiges Gas			<ul style="list-style-type: none"> • Gasochrome Materialien 				

2.3: Systematik der *smart materials*⁶³

⁶³ in Anlehnung an [Köhnlein2000, S. 431]

2.2.1

Formveränderbare Materialien

Die Formänderung dieser Materialien erfolgt durch Änderungen äußerer Einflussgrößen wie Temperatur, magnetisches bzw. elektrisches Feld oder chemische Umgebung.⁶⁴ Bei allen formveränderbaren Materialien wird der äußere Einfluss in eine Spannung umgewandelt, die dann zur Formänderung führt.⁶⁵

2.2.1.1

Thermostriktive Materialien

Thermostriktive Materialien sind Werkstoffe, deren Form durch Einwirkung von Temperatur wesentlich verändert wird. Diese Veränderung erfolgt nicht im Sinne einer Temperaturdehnung.

2.2.1.1.1

Form-Gedächtnis- Legierungen

(englisch: *shape memory alloys, SMA*

deutsch: Form-Gedächtnis-Elemente, Memorymetalle, Memorybauteile)

Form-Gedächtnis-Legierungen sind Materialien, die in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder von einer äußeren Spannung die martensitische⁶⁶ oder die austenitische⁶⁷ Atomgitterstruktur annehmen und folglich ihre Form bzw. Gestalt verändern können.⁶⁸

Die Entdeckung des Form-Gedächtnis-Effekts liegt über 70 Jahre zurück.⁶⁹ Zunächst wurde dieser Effekt an einer Gold-Kadmium-Legierung festgestellt. In der Folgezeit wurden mehrere SMA entwickelt. Zu den in der Technik verwendeten Materialien zählen Nickel-Titan-Legierungen, Kupfer-Zink-Aluminium-Legierungen und Kupfer-Aluminium-

⁶⁴ [Köhnlein2000, S. 430]

⁶⁵ [www.intellimat.com]

⁶⁶ Martensitische Phase ist bei tieferen Temperaturen stabil. Benannt nach dem deutschen Ingenieur Adolf Martens (1850 - 1914).

⁶⁷ Austenitische Phase ist bei höheren Temperaturen stabil.

⁶⁸ [Köhnlein2000, S. 430]

⁶⁹ [Schmidt-Mende1995, S. 348]

Nickel-Legierungen. Die wohl wichtigste Entwicklung im Bereich der SMA ist das bereits 1961 vorgestellte *Nitinol*. Dabei handelt es sich um eine Nickel-Titan-Legierung, die im *Naval Ordinance Laboratory* in den USA entwickelt wurde. Daher stammt auch der Name: **Nickel, Titan, Naval Ordinance Laboratory**.

Je nach Funktionseigenschaften wird bei Form-Gedächtnis-Elementen zwischen dem Einwegeffekt, dem Zweiwegeffekt und der Pseudoelastizität unterschieden.

Einwegeffekt

Der Einwegeffekt ist ein nicht reversibler Vorgang der Formumwandlung: Beim Erwärmen auf die legierungsabhängige Umwandlungstemperatur verformt sich das Material in eine eingeprägte Gestalt, die auch nach dem Abkühlen erhalten bleibt. Mit dem Einwegeffekt können auch sehr komplexe Formänderungen ausgeführt werden.

Zweiwegeffekt

Beim Zweiwegeffekt ist dieser Vorgang reversibel: Beim Abkühlen nimmt das Material die ursprüngliche Form wieder an. Dieser Prozess kann häufig wiederholt werden.

Der Zweiwegeffekt kann Form-Gedächtnis-Materialien „antrainiert“ werden: Dazu wird das Material in der martensitischen Phase durch äußere Krafteinwirkung in die gewünschte Form gebracht, danach bis über Umwandlungstemperatur erhitzt, um in der austenitischen Phase seine ursprüngliche Form anzunehmen. Anschließend erfolgt die Abkühlung des Materials, um wieder in die martensitische Phase zu gelangen. Durch Wiederholung dieses Vorgangs (ca. 20 bis 100 Mal), wird das Material in der martensitischen Phase die „antrainierte“ Form annehmen und bei Übergang in die austenitische Phase durch Erwärmung wieder in seine ursprüngliche Form zurückkehren.⁷⁰

⁷⁰ [www.smart.tamu.edu], [Monner2005, S. 15]



vor Erwärmung



in erwärmten Zustand



abgekühlt



vor Erwärmung



in erwärmten Zustand



abgekühlt

2.4: Einwegeffekt (links) und Zweiwegeffekt (rechts) von Form-Gedächtnis-Legierungen

Pseudoelastizität

Als Pseudoelastizität werden außergewöhnliche elastische Eigenschaften des Form-Gedächtnis-Materials bezeichnet, bei der Dehnungen oder Stauchungen erreicht werden können, die um das Fünf- bis Zehnfache höher liegen, als es bei gewöhnlichen Metalllegierungen üblich ist. Die Pseudo- oder Superelastizität beruht auf dem Übergang von austenitischer in martensitische Phase bei Einwirkung einer mechanischen Kraft. Bei Nachlassen der Kraft kehrt das Material wieder in seinen Ausgangszustand zurück. Als Beispiel für die Anwendung einer pseudoelastischen Form-Gedächtnis-Legierung können die so genannten Titanflex-Brillengestelle genannt werden.

Allgemeine Eigenschaften

Die Vorteile der Form-Gedächtnis-Legierungen liegen darin, dass sie pro Volumeneinheit eine große Arbeitsleistung vollständig in einem kleinen Temperaturintervall vollbringen können. Die dabei realisierbaren Bewegungsarten ermöglichen eine Ausübung von verschiedenen Kräften wie zum Beispiel Druck, Zug, Biegung oder Torsion.

Als Nachteil der Form-Gedächtnis-Materialien muss ihre meistens träge thermische Aktivierbarkeit genannt werden. Um diese zu verbessern, kann das Memorybauteil von einem Medium umströmt werden, dessen Temperaturänderung eine systemspezifische Formänderung bedingt. Eine weitere Alternative ist die „Selbstaktivierung“ durch die joulesche

Wärme eines stromdurchflossenen Bauteils. Allerdings müssen die Form-Gedächtnis-Materialien nicht nur erwärmt sondern auch abgekühlt werden. Allgemein gilt, dass die Dauer des Formänderungsprozesses einer Form-Gedächtnis-Legierung direkt durch die Aufheiz- und die Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst wird.⁷¹

Die Eigenschaften von SMA können im Herstellungsprozess sehr präzise bestimmt werden: Die Umwandlungstemperatur kann beispielsweise alleine durch die Legierungszusammensetzung mit einer Genauigkeit von weniger als $1/10^{\circ}\text{C}$ eingestellt werden.⁷²

Form-Gedächtnis-
Legierungen / Bimetalle

Form-Gedächtnis-Legierungen sind nicht mit Bimetallen zu verwechseln. Im Gegensatz zu Memorymetallen sind Formänderungen von Bimetallen lediglich auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen zweier miteinander verbundener Metalle zurückzuführen. Änderungen des Gittergefüges finden bei Bimetallen nicht statt.

In der folgenden Tabelle⁷³ werden die wichtigsten Form-Gedächtnis-Legierungen und ihre Kennwerte dargestellt.

⁷¹ [Neumann1995, S. 32 ff.]

⁷² [Jenditza1995, S. 350]

⁷³ [Culshaw1996, S. 126]

	NiTi Nickel-Titan	CuZnAl Kupfer-Zink- Alu	CuAlNi Kupfer-Alu- Nickel	FeNiCoTi Eisen-Nickel- Cobalt-Nickel
Temperaturbereich [°C]	-200 bis + 110	-200 bis + 100	-150 bis + 200	-150 bis + 550
Hysterese [K]	30	15	20	k. A.
Max. Dehnung, Einwegeffekt [%]	8	4	6	1
Max. Dehnung, Zweiwegeffekt [%]	4	0,8	1	0,5
Bruchspannung [N/mm ²]	800 – 1900	400 – 700	700 – 800	600 – 900
Zul. Spannung im Betrieb [N/mm ²] ⁷⁴	150	75	100	250
Anzahl der Wiederholungen	> 100.000	10.000	5.000	50
Dichte [kg/m ³]	6450	7900	7150	8000
El. Widerstand [10 ⁻⁸ Ωm]	80 – 100	7 – 12	10 – 14	k.A.
Elastizitätsmodul (a) [N/mm ²] ⁷⁵	70.000 - 110.000	70.000 – 100.000	80.000 – 100.000	170.000 – 190.000
Korrosionsbeständigkeit	sehr gut	befriedigend	gut	schlecht

2.5: Kennwerte von Form-Gedächtnis-Legierungen⁷⁶

⁷⁴ Diese Werte lassen sich durch die Zusammensetzung der Form-Gedächtnis-Legierungen erhöhen.

⁷⁵ für Austenit

⁷⁶ [Hesselbach1999, S.148], [Monner2005, S. 31]

2.2.1.1.2

Thermostriktive Keramiken (englisch: *thermostriktive ceramics*)

Thermostriktive Keramiken verändern signifikant ihre Form infolge von Temperatureinwirkung und weisen meistens einen negativen Temperaturkoeffizienten auf, der über die Zusammensetzung der Keramiken zwischen $\alpha \approx -8,7 \times 10^{-6}$ und $\alpha \approx 0$ eingestellt werden kann. Zu den Materialien gehören Oxidkomplexe aus Zirkoniumwolframat (ZrW_2O_8), Natriumzirkoniumphosphat ($NaZr_2P_3O_{12}$), kurz NZP, Kalziumtitanphosphat ($Ca_{0,5}Ti_2P_3O_{12}$), kurz CTP, oder Natriumtitanphosphat ($NaTi_2P_3O_{12}$). Die Eigenschaften dieser Keramiken sind je nach Material isotrop oder anisotrop.

Material	Temperaturbereich [°K]	Relative Temperaturdehnung [%]	Temperaturkoeffizient α [-]	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]
ZrW_2O_8	0 - 1050	0,5	$-8,7 \times 10^{-6}$	69.000
$NaZr_2P_3O_{12}$ (NZP)	bis über 1700	k. A.	bis zu $-5,5 \times 10^{-6}$	k. A.
$Ca_{0,5}Ti_2P_3O_{12}$ (CTP)		k. A.	bis zu $-5,5 \times 10^{-6}$	k. A.

2.6: Kennwerte thermostriktiver Keramiken⁷⁷

⁷⁷ in Anlehnung an [Haase/Köhnlein1998, S. 22]

2.2.1.1.3

Thermostriktive Polymere (englisch: *thermostriktive polymers*)

Die ersten Entwicklungen auf dem Gebiet der thermostriktiven Polymere reichen in die 1970er Jahre und gehen vor allem auf die Forschergruppe um Urry an der Universität Birmingham in Alabama zurück.⁷⁸ Mittlerweile kennt man Biopolymere, organische Polymere und Gele mit thermostriktiven Eigenschaften.

Die Wirkungsweise der thermostriktiven Polymere beruht auf dem Phänomen des inversen Temperaturüberganges, d. h. Entropieabnahme⁷⁹ bei Energiezufuhr von außen. Wird beispielsweise ein thermostriktiver Biopolymer erwärmt, so gehen bestimmte Polymerteile von einem ungeordneten in einen geordneten Zustand über und verschmelzen bei Temperaturen zwischen 15 und 25 °C zu einer dichten, klebrigen Masse. Ähnlich reagieren synthetische Polymere. Eine Steigerung der Zugbelastung eines synthetischen Polymers führt zur Abnahme der Entropie in der Atomstruktur des Polymers: Im Gegensatz zu herkömmlichen Materialien, zum Beispiel Metalle, bei denen die atomaren Bindungen durch äußere Belastung verschoben und ggf. gebrochen werden, bleiben die Bindungen zwischen den Rückgrat-Atomen der Polymere unbelastet. Stattdessen funktioniert die Lastabtragung über die Einschränkung von Torsionsbewegungen anderer um das Rückgrat angeordneter Atome, wodurch das ganze Molekül mit steigender Belastung eine geordnetere Form annimmt.

Seit den 1990er Jahren werden neben den Polymeren thermostriktive Gele entwickelt, die je nach ihrer chemischen Zusammensetzung schrumpfen oder quellen können. Ihre Wirkungsweise entspricht jener

⁷⁸ [Haase/Köhnlein1998, S. 23]

⁷⁹ s. Glossar

der Biopolymere. Als Grundstoffe für die thermostriktiven Gele werden Polyvinylmethylether und Poly-N-isopropylacrylamid am häufigsten eingesetzt.



2.7: Biopolymer bei niedriger (oben) und hoher Temperatur⁸⁰

Für technische Anwendungen sind die sehr hohen und vollständig reversiblen Dehnungen mancher thermostriktiven Polymere besonders interessant. In Versuchen wurde beobachtet, dass in Wasser eingelegte Bänder aus Biopolymeren bei Erwärmung des Wassers über den Übergangsbereich bis auf die Hälfte ihrer ursprünglichen Länge schrumpften und so unter Umständen mehr als das Tausendfache ihres Trockengewichts tragen können. Das Verhalten und die Eigenschaften dieser Materialien, wie zum Beispiel die Elastizität und maximal erreichbare Spannungen, sind mit den Muskeln von Säugetieren vergleichbar.⁸¹

2.2.1.2

Piezoelektrische Materialien

(englisch: *piezoelectric materials*)

Die Piezoelektrizität beschreibt die Wechselwirkung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Zustand eines ferroelektrischen Kristalls, dessen Gitter kein Symmetriezentrum bezüglich der positiven und

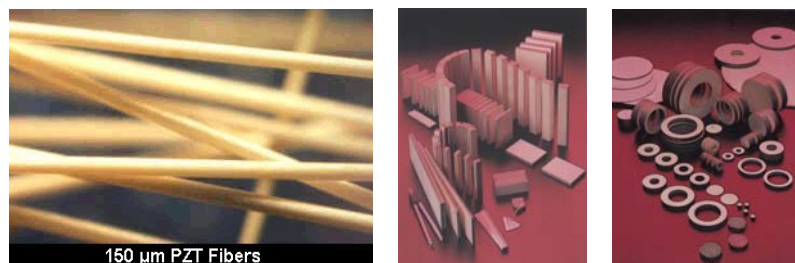
⁸⁰ [Haase/Köhnlein1998, S. 23]

⁸¹ [Köhnlein2000, S. 430ff.]

negativen Kristallionen besitzt. Zu diesen Materialien zählen ausschließlich Feststoffe, zum Beispiel Keramiken, Metallsalze oder bestimmte Kunststoffe.

Beim **piezoelektrischen Effekt** wird infolge einer mechanischen Verformung (Kraft) eine Verschiebung elektrischer Ladungen erzeugt und somit eine elektrische Spannung in einem piezoelektrischen Material induziert. Diese Eigenschaft bildet die Grundlage der Wirkungsweise piezoelektrischer Sensoren. Ein umgekehrtes Phänomen wird beim **inversen piezoelektrischen Effekt** hervorgerufen: Das Anlegen eines elektrischen Feldes führt zur Deformation des piezoelektrischen Materials. Je nach Richtung der elektrischen Spannung kontrahiert oder expandiert das Material. Dieser Effekt wird für die piezoelektrischen Aktuatoren genutzt.⁸²

Zunächst waren nur Einkristalle, wie zum Beispiel Quarz, Turmalin, Seignettesalz, Lithiumniobat (LiNbO_3), Kalium- sowie Ammonium-Hydrogen-Phosphat (KDP, ADP), mit piezoelektrischen Eigenschaften bekannt. In den 1940er Jahren sind die ersten polykristallinen Stoffe (piezoelektrische Keramiken) entdeckt worden. Zu den typischen Vertretern dieser Materialgruppe gehören Blei-Zirkonium-Titanat ($\text{Pb}[\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x]\text{O}_3$), kurz PZT, und Barium-Titanat (BaTiO_3). Außerdem steht uns in Polyvinylidenfluorid (PVDF) seit den 1960er Jahren ein teilkristalliner Kunststoff (Polymer) zur Verfügung.



2.8: PZT Fasern und verschiedene Formen der Piezokeramiken⁸³

⁸² [Elspass/Flemming1998, S. 14 ff.]

⁸³ [www.carenova.com], [www.edoceramics.com]

In Hinsicht auf die sensorischen und die aktuatorischen Anwendungen liegt der entscheidende Vorteil der piezoelektrischen Materialien in ihren sehr kurzen Reaktionszeiten.

Piezoelektrische Keramiken Die künstlich hergestellten Piezokeramiken (Polykristalline) sind im Vergleich zu natürlich vorkommenden piezoelektrischen Stoffen kostengünstiger und technisch variabler. Ihre Eigenschaften können durch die Zusammensetzung und den Herstellungsprozess an die geplanten Anwendungen angepasst werden.

Piezoelektrische Polymere Piezoelektrische Polymere bieten gegenüber Keramiken einige Vorteile: Sie sind einfach herzustellen, erlauben eine unkomplizierte Handhabung und ermöglichen eine nahezu beliebige Formanpassung, wodurch in der Summe eine problemlose Applikation ermöglicht wird. Außerdem weisen sie eine gute Linearität zwischen Feldstärke und Längenänderung auf.⁸⁴ Weitere Vorteile sind ein hoher Frequenzbereich und eine hohe Durchschlagfestigkeit der Polymere. Da sie ebenfalls eine hohe Sensitivität auf mechanische Einwirkungen aufweisen, eignen sich piezoelektrische Polymere sehr gut für sensorische Aufgaben.

Die Nachteile der Polymere im Vergleich zu Piezokeramiken liegen in der wesentlich niedrigeren Curie-Temperatur⁸⁵ von 100°C (bis zu 400°C für Piezokeramiken) und der geringeren Stellkraft.

⁸⁴ [Neumann1995, S. 64]

⁸⁵ s. Glossar

Werkstoff		Dichte [kg/m ³]	Deformationskonstante d_{33} ⁸⁶ [10 ⁻¹² m/V]	Curie-Temp. T_c [°C]	max. elektr. Feldstärke E_{max} [V/mm]	E-Modul [N/mm ²]	max. Dehnung [%]
Einkristall	Quarz	k. A.	2-7	570	k. A.	k. A.	k. A.
	Seignettesalz	k. A.	170	24	k. A.	k. A.	k. A.
	Lithiumniobat, LiNbO ₃	4.640	29 - 160	k. A.	600 - 1.000	ca. 100.000	0,1
polykristallin	Barium-Titanat, BaTiO ₃	5.700	80 - 190	115	k. A.	k. A.	k. A.
	PZT-Keramik, Blei-Zirkonium-Titanat, Pb _x (Ti,Zr) _{1-x} O ₃	7.600	110 - 480	180 - 400	600 - 2.000	50.000 - 70.000	0,12 - 0,18
teilkristallin	Piezo-Polymer, Polvinylidenfluorid, PVDF	1.470	12-28	100	20.000 - 30.000	2100 - 2500	0,07

2.9: Kennwerte ausgewählter Piezokeramiken⁸⁷⁸⁶ s. Glossar⁸⁷ [EDO2003, S. 2], [Ferroperm2003, S. 12], [Neumann1995, S. 65], [Haase/Köhnlein1998, S. 29 ff.], Clephas in [Janocha1999, S. 106 ff.], Döllgast in [Jendritza1995, S. 129 ff.], [Culshaw1996, S. 114 ff.], [Monner2005, S. 6 ff.]

2.2.1.3

Elektrostriktive Materialien (englisch: *electrostrictive materials*)

Die Elektrostriktion ist mit dem piezoelektrischen Effekt verwandt und beschreibt eine Volumenänderung unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Dieser Effekt ist bei allen dielektrischen Stoffen zu beobachten. Allerdings sind die erzielbaren Dehnungen mit 10^{-5} bis 10^{-7} Prozent meistens zu klein, um sie praktisch zu nutzen. Als Material mit ausgeprägten elektrostriktiven Eigenschaften kann vor allem Blei-Magnesium-Niobat (PMN) genannt werden.

Im Gegensatz zu piezoelektrischen Materialien sind elektrostriktive Materialien nicht polarisiert. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung tritt bei elektrostriktiven Materialien, unabhängig vom Vorzeichen, immer eine Verlängerung auf. Diese ist proportional **zum Quadrat** der elektrischen Feldstärke. Dadurch sind die Längenänderungen der elektrostriktiven Materialien, bei einer gegebenen Feldstärke, deutlich geringer als bei Piezokeramiken, bei denen die Längenänderung direkt proportional zur elektrischen Feldstärke ist.⁸⁸ Die Reaktionszeiten der elektrostriktiven Materialien sind schnell und liegen im Bereich von Millisekunden. Der Elastizitätsmodul beträgt je nach Material 25.000 bis 65.000 N/mm². Der Temperaturbereich in dem die elektrostriktiven Materialien arbeiten können, ist deutlich geringer als bei piezoelektrischen Materialien.⁸⁹

Ähnlich wie bei piezoelektrischen Stoffen werden auch hier elektrostriktive Keramiken und Polymere hergestellt.⁹⁰

⁸⁸ [Sobek/Haase/Teuffel2000, S. 544 ff.]

⁸⁹ [Haase/Köhnlein1998, S. 39], [Monner2005, S.12]

⁹⁰ [www.ecertec.com]

Elektrostriktive Keramiken Elektrostriktive Keramiken weisen keine piezoelektrische Eigenschaften auf und besitzen keine spontane Polarisierung. Für die Praxis bedeutet das, dass elektrostriktive Keramiken selbst beim Einsatz in sehr hohen Frequenzbereichen wenig oder keine Hystereseverluste aufweisen. Sie können bis zu Frequenzen von mehreren 100 kHz ohne Verluste verwendet werden. Allerdings sind diese Eigenschaften nur bei einer stabilen Temperatur gegeben.

Elektrostriktive Keramiken werden zum Beispiel aus Blei-Magnesium-Niobat: Blei-Titanat, Blei-Mangan-Niobat: Blei-Titanat und Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat hergestellt.⁹¹

Elektrostriktive Polymere Bei den 1965 vorgestellten, elektrostriktiven Polymeren handelt es sich um dieselbe Materialgruppe, wie bei thermostriktiven Polymeren. So gleichen sich auch die Materialeigenschaften beider Polymerarten.

Die Formänderungen der elektrostriktiven Polymere werden durch das Einlegen der Polymere in eine Lösung erzielt, die je nach angelegtem elektrischen Feld sauer oder alkalisch wird. In einer sauren Umgebung kontrahiert das Polymer, in einer alkalischen Umgebung expandiert es. Außerdem ist es möglich die Polymerfasern zu krümmen, wenn sie in Längsrichtung kontrahieren und in einer Wasser-Aceton-Lösung mit einer Spannung versorgt werden. Durch den Einsatz einer entsprechend programmierten Spannung kann sogar eine kontinuierliche, wellenartige Bewegung der Fasern erreicht werden.⁹²

⁹¹ [www.ecertec.com]

⁹² [Köhnlein2000, S. 432]

2.2.1.4

Magnetostriktive Materialien

(englisch: *magnetostrictive materials*)

Magnetostriktive Materialien zeigen eine Formänderung unter Einwirkung eines magnetischen Feldes. Der zugrunde liegende physikalische Effekt ist der Wirkungsweise der Piezomaterialien sehr ähnlich: Die zunächst ungeordneten Elementarmagnete werden durch die Einwirkung eines Magnetfeldes in Richtung des Feldes gedreht. Je höher die Intensität des Magnetfeldes ist, desto mehr Elementarmagnete richten sich nach dem Feld aus. Wenn am Ende dieses Prozesses die Hauptachse der Anisotropie des magnetostriktiven Materials entlang der Richtung des Magnetfeldes liegt, ist der Sättigungszustand erreicht und die Volumenänderung am größten.⁹³

Verwendete Materialien sind Nickel-, Kobalt- oder Eisenlegierungen die man zur Erhöhung der Effektivität mit seltenen Erden⁹⁴ versetzt. Das wirkungsvollste Material ist *Terfenol-D* ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}$), welches aus Terbium, Dysprosium und Eisen besteht und dessen Name ein Kunstwort aus *Terbium*, *Ferrum* und *Naval Ordinance Laboratory* ist.⁹⁵ Die möglichen Längenänderungen von *Terfenol-D* betragen ca. 0,2%.

Das nichtlineare Dehnungsverhalten magnetostriktiver Materialien kann meistens gut durch eine lineare mathematische Gleichung beschrieben werden, so dass man von einem quasi-linearen Verhalten ausgehen kann.⁹⁶

Im Vergleich zu Piezomaterialien haben magnetostriktive Materialien einige Nachteile. Zunächst ist die Herstellung aufwendiger. Nachdem die besten Ergebnisse mit kristallinen Strukturen erzielt wurden, hängen die

⁹³ [Gandhi/Thompson1992, S. 77]

⁹⁴ s. Glossar

⁹⁵ [Haase/Köhnlein1998, S. 41 f.]

⁹⁶ [Claeyssen1999, S. 124 f.]

Dimensionen und die Vielfalt der erhältlichen Geometrien von der Effektivität der verfügbaren Kristallzüchtungsverfahren ab. Beispielsweise ist Terfenol-D als Zylinder mit bis zu 25 cm Länge erhältlich. Weitere Nachteile magnetostruktiver Materialien liegen in ihrer geringeren Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastung, ihrem höheren Energiebedarf⁹⁷ sowie der schwierigeren Bearbeitung magnetostruktiver Materialien im Vergleich zu piezoelektrischen Materialien.

Dichte	E-Modul	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	Curie-Temp.	Magnetostruktive Dehnung
[g/cm ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[°C]	[%]
9,25 - 9.25	25.000 - 65.000	28	700	380	0,08 - 0,2

2.10: Kennwerte von Terfenol-D⁹⁸

Ferromagnetische Formgedächtnis-Materialien

(englisch: *ferromagnetic shape memory alloys, FSMA*)

Vor über zehn Jahren sind bei einer Mangan-Gallium-Nickellegierung (Ni₂MnGa), die bereits als thermostriktive Formgedächtnislegierung bekannt war, magnetostruktive Eigenschaften entdeckt worden.⁹⁹

Im Gegensatz zum klassischen temperaturinduzierten oder thermoelastischen Effekt, bei dem eine Transformation von der Martensitphase zur Austenitphase erforderlich ist, vollzieht sich der magnetische Formgedächtniseffekt gänzlich innerhalb der Martensitphase: Die Form ändert sich, wenn relativ zum Magnetfeld günstig ausgerichtete Zwillingstruk-

⁹⁷ [Gandhi/Thompson1992, S. 77]
⁹⁸ [Etrema2002, S. 2], [Monner2005, S. 31]
⁹⁹ [www.nickelmagazine.org]

turen auf Kosten anderer Zwillingstrukturen im Werkstoff wachsen.¹⁰⁰

Der wesentliche Vorteil der ferromagnetischen Form-Gedächtnis-Materialien liegt darin, dass die Reaktion auf Magnetismus rascher und effizienter erfolgt als die herkömmliche temperaturinduzierte Reaktion der Form-Gedächtnis-Materialien. Außerdem besitzen FSMA-Materialien im Allgemeinen gute mechanische Eigenschaften.

Die erzielbaren Dehnungen konnten in den letzten Jahren von etwa 0,2% bei -8°C auf 10% bei Raumtemperatur gesteigert werden. Das bedeutet, dass ferromagnetische Form-Gedächtnis-Materialien (Ni₂MnGa) eine 30 Mal größere Dehnung aufweisen als andere magnetisch kontrollierte Werkstoffe, allerdings bei deutlich geringerer Beanspruchbarkeit.

2.2.1.5

Elektrochemische Materialien

(englisch: *electrochemical materials*)

Die Reaktionen der elektrochemischen Materialien werden durch den Übergang von Elektronen bestimmt und sind daher präzise steuerbar.

Eine Volumenänderung des Materials durch elektrochemische Reaktionen kann entweder durch eine Änderung einer bestehenden oder durch die Produktion einer neuen Substanz realisiert werden. Dabei führt eine Oxidation zu einer Expansion und eine Reduktion zu einer Kontraktion des Materials. Allerdings sind solche Prozesse meistens nicht vollständig reversibel und die damit erzielbaren Kräfte und Wege gering.¹⁰¹

Eine interessante Anwendung der elektrochemischen Vorgänge ist die Erzeugung und Umsetzung von Gasen. Die Gaserzeugung erfolgt dabei durch Elektrolyse. Für die Gasumsetzung liegen bereits Erfahrungen aus

¹⁰⁰ [www.nickelmagazine.org], [www.adaptamat.com]

¹⁰¹ [Megede1999, S. 195 ff.]

der Energiekonversion in Brennstoffzellen vor. Durch diese Prozesse wird die elektrische Energie in eine Volumenarbeit umgewandelt.¹⁰²

2.2.1.6

Chemomechanische bzw. chemostruktive Materialien (englisch: *chemomechanical materials, chemostruktive materials*)

Chemomechanische Materialien können chemische Energie direkt in mechanische Energie umwandeln. Da ein präzises Steuern dieser Materialien durch chemische Reaktionen schwierig ist, wird eine Volumenänderung häufig durch einen elektrochemischen Prozess eingeleitet: Die elektrische Antriebsenergie wird zunächst in chemische und anschließend in mechanische Energie umgewandelt. Die Vorteile dieser Methode liegen in der Kontrollierbarkeit, Umwandlungs- und Speicherfähigkeit sowie in der Transportierbarkeit elektrischer Energie.¹⁰³

Zu den Materialien, die Energie chemomechanisch bzw. elektrochemomechanisch umwandeln können, gehören zum Beispiel natürliche und synthetische gummiartige Materialien (Schwollen im Diluent), vernetzte Collagene (Kontraktion von Collagenfasern in einer Salzlösung), polyelektrische Gele und leitfähige Polymere. Die Eigenschaften dieser Materialien sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.¹⁰⁴

¹⁰² [Kempe1995, S. 368 ff.]

¹⁰³ [Schünemann/Wurmus1995, S. 391 ff.]

¹⁰⁴ [Megede1999, S. 195 ff.]

2. Adaptive und sensorische Systeme

2.2 Smart materials
2.2.1 Formveränderbare Materialien

Material	Wirkungsweise	Volumen-änderung
Synthetischer Gummi (in Lösung)	Ausdehnung, wenn Polymerabschnitte die umgebende Lösung anziehen, um möglichst viel Kontaktfläche zu schaffen. Kontraktion, wenn das Polymer die umgebende Lösung abstößt. Wenn die Lösung verdampft, kehrt das Material zu seinem ursprünglichen Volumen zurück.	ca. 300% (Ausdehnung)
Vernetzte Collagen-Fasern	Wenn bestimmte Collagene mit Formaldehyd in Kontakt kommen, vernetzen sich die Fasern. Anschließend in Salzlösung variierender Konzentration getaucht, verändern sie ihr Volumen um bis zu 40%.	≤ 40%
Polyelektrolyte Gele	Ein polyelektrolytes Gel kann als wasserhaltiges Netz von langen Polymermolekülen beschrieben werden. Wird dieses in Wasser getaucht, so dehnt es sich aus, bis die Rückstellkraft der Vernetzungen den hydrostatischen Druck innerhalb des Gels kompensiert. Durch ein elektrisches Feld wird der pH-Wert variiert, als Folge davon verrichtet das Polymer mechanische Arbeit.	k. A.
Leitfähige Polymere	Leitfähige Polymere sind Halbleiter, in welchen der Grad der Dotierung und damit die Leitfähigkeit reversibel geändert werden kann. Während dessen wandern Gegenionen in oder aus dem Polymer, was zu einer Volumenänderung des Polymers führt.	Einige Prozente
Biologische Muskeln	In Muskelzellen resultiert die Kontraktion aus der Verschiebung verschieden angeordneter Makromoleküle. Die Myosin-Fasern bilden Brücken, um ein hexagonales Fachwerk aus Actin-Fasern zu verbinden. Diese Fasern arbeiten, wenn chemische Energie und ein Nervenimpuls einwirken. Nachdem die molekulare Reaktion nicht reversibel ist, braucht jeder Muskel nach Kontraktion eine „fremde Kraft“ (den Antagonisten), um wieder in die ursprüngliche Form zu gelangen.	ca. 35% (bei einer Spannung von ca. 20 N/cm ²)

2.11: Eigenschaften von chemomechanischen Materialien¹⁰⁵

¹⁰⁵ in Anlehnung an [Wurmus/Kallenbach1999, S. 207 ff.],
[Schünemann/Wurmus1995, S. 391 ff.], [Hermes2002, S. 35]

2.2.2

Steifigkeitsveränderbare Materialien

Steifigkeitsveränderbare oder auch phasenveränderbare Materialien sind Suspensionen, deren Viskosität (Steifigkeit) durch die Einwirkung eines elektrischen oder magnetischen Feldes, seltener durch Temperaturänderung, verändert wird. Die Viskosität der Suspension kann, in Abhängigkeit von der Stärke des äußeren Einflusses, vom flüssigen bis zum erstarrten Zustand variiert werden. Je nach Art der Einflussgröße, spricht man von elektro-, magneto- oder thermorheologischen Materialien. Die elektro- und magnetorheologischen Fluide werden bereits in der Praxis zur Lösung technischer Aufgabenstellungen adaptiver Systeme eingesetzt, beispielsweise zur Dämpfung der durch Wind oder Erdbeben erregter Schwingungen von Bauwerken (s. Kapitel 1.4).

2.2.2.1

Elektrorheologische Fluide

(englisch: *electrorheological fluid*, *ER fluid*, *ERF*)

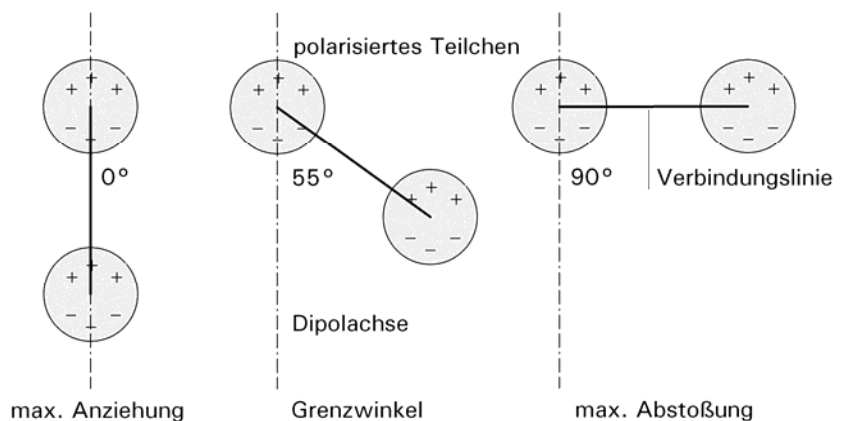
Ein elektrorheologisches Fluid ist eine Suspension, deren Viskosität durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes in weiten Bereichen reversibel verändert werden kann. Darüber hinaus zeichnen sich elektrorheologische Fluide durch ihre sensorischen Eigenschaften aus: Bei einem eingeschalteten elektrischen Feld ändert sich der Stromfluss im Fluid, wenn das Fluid durch eine mechanische Kraft bewegt wird.¹⁰⁶

Die Hauptbestandteile elektrorheologischer Fluide sind eine Trägerflüssigkeit mit hoher Durchschlagfestigkeit (zum Beispiel Silikonöl, Paraffinöl, Hydrokarbonate, chlorierte Kohlenwasserstoffe) und hochpolarisierbare Feststoffteilchen (Eisenoxide, Gelatine, Gips, Kohlenstoff, Aluminiumsilikat) mit einem Durchmesser von ca. einem bis zu hundert Nanometern. Außerdem werden unterschiedliche Aktivatorsubstanzen und Dispersionsmittel hinzugefügt.

¹⁰⁶ Entdeckt von G. Oppermann und 1986 zum Patent angemeldet.

Das elektrorheologische Phänomen beruht auf der Tatsache, dass die positiv geladenen Atomkerne der suspendierten Feststoffteilchen und die negativ geladenen Elektronen bei eingeschaltetem elektrischen Feld von den entgegengesetzten Elektroden angezogen werden: Die inneren Ladungen werden gegeneinander verschoben, wodurch ein elektrischer Dipol mit einer positiven und einer negativen Seite entsteht. Dabei ist die Ladungsverschiebung umso größer, je höher die Polarisierbarkeit der Feststoffteilchen ist.

Die Wechselwirkungen zwischen den Dipolen werden mit Hilfe zweier polarisierter Teilchen und dem Winkel ihrer Verbindungslinie zur Dipolachse in der folgenden Abbildung dargestellt.



2.12: Wechselwirkung zwischen zwei polarisierten Feststoffteilchen

Die Größe der Anziehungs- bzw. Abstoßkraft zwischen den Teilchen hängt von der Lage ihrer Verbindungslinie zur Dipolachse ab. Die Anziehung zwischen den Teilchen ist maximal, wenn die Verbindungslinie in einem Winkel von 0° zur Dipolachse verläuft. Bis zu einem Winkel von 55° ziehen sich die Teilchen an, ab 55° stoßen sie sich ab. Die maximale Abstoßung tritt bei einem Winkel der Verbindungslinie zu der Dipolachse von genau 90° auf. In diesem Fall liegen gleiche Pole direkt nebeneinander. Werden die Teilchen abgestoßen, so bewegen sie sich weiter auf gekrümmten Bahnen umeinander, bis sich zwei Partikel direkt gegenüber stehen, so dass die gegenseitige Anziehung überwiegt und

sie aneinander haften bleiben. Auf diese Weise werden durch das Anlegen eines elektrischen Feldes aus den zunächst frei beweglichen Feststoffteilchen dünne Ketten gebildet, die sich dann sukzessive zu dickeren Strängen zusammenlagern. Durch das Wachstum der Teilchenkettens wird eine Viskositätsänderung eines elektrorheologischen Fluids bewirkt.¹⁰⁷

Die Viskosität elektrorheologischer Fluide kann mit großen Feldstärken um 5000 V/mm innerhalb von Millisekunden, reversibel um das Zehnfache verändert werden, wobei die aufnehmbare Scherkraft proportional zur angelegten Spannung ist. Zur Erzeugung des elektrischen Feldes eignet sich sowohl Gleich- als auch Wechselstrom. Allerdings ist ab ca. 100 Hz eine deutliche Abnahme der Scherkraft zu beobachten. Das Temperaturverhalten des Fluids hängt stark von der stofflichen Zusammensetzung ab. Die maximale Arbeitstemperatur liegt bei ca. 150°C.¹⁰⁸

2.2.2.2

Magnetorheologische Fluide

(englisch: *magnetorheological fluid*, *MR fluid*, *MRF*)

Die Viskositätsänderung magnetorheologischer Fluide wird durch den Einfluss eines Magnetfeldes bewirkt.

Das Wirkungsprinzip dieser in den 1940er Jahren¹⁰⁹ entdeckten Materialien entspricht dem der elektrorheologischen Fluide. Als Trägerflüssigkeit werden ähnlich wie bei elektrorheologischen Fluiden Silikonöl, Kerosin oder synthetisches Öl verwendet. Da die Feststoffteilchen ferromagnetisch sein müssen, bestehen sie oft aus Eisen-Nickel- oder Eisen-Kobalt-Legierungen.¹¹⁰ Der Durchmesser der Feststoffteilchen liegt gewöhnlich

¹⁰⁷ [Halsey1993, S. 50 ff.]

¹⁰⁸ [Carlson1999, S. 181 ff.], [www.lord.com/mr], [Rech/Bölter/Kormann1995, S. 108 ff.]

¹⁰⁹ Entdeckt und weiterentwickelt von Jacob Rabinow in dem US National Bureau of Standards [Rabinow1948, S. 1308-1315], [Carlson1999, S. 180].

¹¹⁰ [Köhnlein2000, S. 436]

zwischen drei und fünf Mikrometern. Größere Durchmesser lassen sich einfacher magnetisieren, sind aber schwieriger gleichmäßig in der Flüssigkeit zu verteilen. Kleinere Durchmesser führen zur Abnahme der Belastbarkeit der Fluide. Dieser Nachteil lässt sich durch den Einsatz von Oxiden mit Durchmessern von ca. 30 Nanometern als Partikelmaterial wesentlich reduzieren. Das so entstandene nano-magnetorheologische Fluid bietet den Vorteil einer erhöhten Materialstabilität.

Die reversiblen Viskositätsänderungen magnetorheologischer Fluide können das Zehnfache der Werte von elektrorheologischen Fluiden erreichen. Die dazu erforderliche magnetische Feldstärke liegt zwischen 50 und 600 kA/m. Die Scherspannung ist proportional zum Quadrat der magnetischen Feldstärke und bleibt bei konstanter magnetischer Feldstärke nahezu gleich.¹¹¹ Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand ist bei magnetorheologischen Fluiden eine deutliche Volumenänderung zu beobachten.¹¹²



Unter der Einwirkung des magnet. Feldes wird das MR-Fluid fest und ohne wieder flüssig.

2.13: Magnetorheologischer Effekt¹¹³

Die beschriebenen *smart materials* können sowohl für sensorische als auch aktuatorische Anwendungen eingesetzt werden. Die Nutzung von *smart materials* für sensorische Aufgaben wird in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Die Einsatzmöglichkeiten als Aktuatoren werden in Kapitel 2.3.3 dargestellt und bewertet.

¹¹¹ [Köhnlein2000, S. 436]

¹¹² [Carlson1999, S. 181 ff.]

¹¹³ [www.lord.con/mr]

2.3

Regelkreiselemente

2.3.1

Regelung und Steuerung

„Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“¹¹⁴

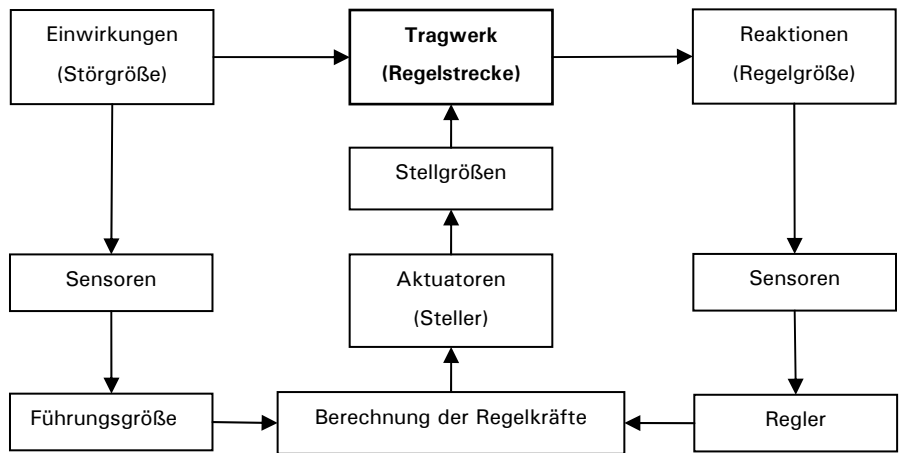
Beispiel adaptives bzw. aktives Tragwerk

Ein Regelkreis¹¹⁵ eines adaptiven bzw. aktiven Tragwerks besteht in den meisten Fällen aus dem Tragwerk¹¹⁶ selbst, einem Sensoren- und einem Aktuatorennetzwerk sowie einer Regelungs- bzw. Steuerungseinheit. Die von den Sensoren erfassten Daten, zum Beispiel die Beanspruchung der einzelnen Tragwerkselemente, werden an die Regelungs- bzw. Steuerungseinheit weiter gegeben. Hier werden die aus der Signalverarbeitung kommenden Daten nach einem Vergleich mit den Soll-Werten des Systems, mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus, in Aktivierungssignale für die Aktuatoren umgewandelt und bei Bedarf verstärkt. Auf der Grundlage dieser Daten werden durch die Aktuatoren Veränderungen im Tragwerk erzeugt. Der neue Zustand wird wiederum durch Sensoren erfasst und durch die Regelung bzw. Steuerung verarbeitet und als „aktualisierte“ Information an die Aktuatoren weiter geschickt werden. Hierdurch wird eine erneute Anpassung der Tragwerksreaktionen ermöglicht.

¹¹⁴ [DIN 19226-1:1994-02, S. 7]

¹¹⁵ Auch Regelsystem genannt.

¹¹⁶ In diesem Zusammenhang auch Strecke oder Regelstrecke genannt.



2.14: Aufbau eines Regelsystems¹¹⁷

Allerdings gibt es auch einige wenige adaptive Systeme, die ohne Regelung bzw. Steuerung Adaptionsvorgänge durchführen können. Dazu gehören zum Beispiel Form-Gedächtnis-Elemente, die in sich sowohl sensorische als auch aktuatorische Eigenschaften vereinen und bei Überschreitung einer bestimmten Temperatur ohne zusätzliche Impulse reagieren können. Diese Eigenschaft kann bei einfachen Systemen genutzt werden, zum Beispiel bei An- und Aus-Mechanismen.

negative Rückkopplung

In der Regelungstechnik werden Systeme mit negativer Rückkopplung gebaut. Am Beispiel eines Tragwerkstabes, dessen Normalkraft auf eine zuvor berechnete Größe gesteigert werden soll, bedeutet das, dass die Krafteinleitung durch Aktuatoren um so stärker kontinuierlich zurück geht, je geringer der Abstand der vom Sensor gemessenen Kraft zum angestrebten Wert ist.

Regelung - Steuerung

Eine solche Rückkopplung stellt die Bedingung dar, dass von einer **Regelung** (*closed loop control*) gesprochen werden kann. Ist das nicht der Fall, so spricht man von einer **Steuerung** (*open loop control*).¹¹⁸

¹¹⁷ in Anlehnung an [Weber1998, S. 43]

¹¹⁸ [DIN 19226-4:1994-02, S. 5]

Dimensionierung Regelungssystem

Die Dimensionierung von Regelungssystemen erfolgt auf der Basis von Differenz- oder Differentialgleichungen, mit denen die Leistungsanforderungen an ein System erfasst und simuliert werden. Die Differenz zwischen den gemessenen und den gewünschten Werten des Systems wird mit einer mathematischen Funktion beschrieben und minimiert. Die Voraussetzung für eine effektive Optimierung der gewünschten Eigenschaften, ist eine geeignete Formulierung dieser Gleichungen.¹¹⁹

Eine weite Verbreitung finden linear-quadratische Regelungen (LQ-Regelungen) und linear-quadratische Gauß'sche Regelungen (LQG-Regelungen). Komplexe Systeme verlangen unter Umständen nach leistungsfähigeren Methoden, wie genetische Algorithmen¹²⁰ und Wavelet-Transformationen.¹²¹

adaptive Regelung

Eine innovative Alternative zu den herkömmlichen Regelungssystemen, ist die so genannte adaptive Regelung. Durch dieses Regelungsprinzip werden die Reaktionen des Regelungssystems an die während des Betriebs vorhandene Bedingungen kontinuierlich angepasst: Das aktuelle Verhalten einer Größe oder eines Prozesses wird ausgewertet und mit dem gewünschten Verhalten verglichen. Die zur Optimierung des Regelungssystems notwendigen Änderungen werden **in Abhängigkeit vom Ergebnis** dieses Vergleichs ausgeführt.¹²²

Die Erfassung der Parameter kann zeitkontinuierlich oder diskret erfolgen. Werden die verschiedenen Signale zu einzelnen (diskreten) Zeitpunkten definiert, spricht man von einer diskreten adaptiven Regelung. Werden dagegen die Regelungsparameter kontinuierlich nachgeführt, handelt es sich um ein kontinuierlich adaptives System. Aus der Kombination der beiden Regelungsarten resultiert ein Hybridsystem, bei dem

¹¹⁹ [www.innovationsreport.de]

¹²⁰ S. Glossar

¹²¹ [Boller2000, S. 558], s. Glossar

¹²² [www.innovationsreport.de]

eine kontinuierliche Wirkungsweise des Systems durch eine gelegentliche Anpassung der Reglerparameter zu diskreten Zeitpunkten und dazu eine simultane stetige Signalerzeugung in Echtzeit gewährleistet wird.¹²³

neuronale Netze

Bedingt durch die ggf. hohe Anzahl von Sensoren und Aktuatoren und begünstigt durch die steigende Leistungsfähigkeit von Rechnerprozessoren, gewinnen neuronale Netze als Mittel zur Regelung aktiver Systeme immer mehr an Bedeutung. Die besondere Eigenschaft neuronaler Netze, deren Grundlage von der Hebb'schen Lernregel (1949) gebildet wird, besteht in ihrer Fähigkeit komplexe Muster zu erlernen, ohne dass die diesen Mustern zugrunde liegenden Regeln zuvor abstrahiert und definiert werden müssen. Basierend auf diesem Arbeitsprinzip sind neuronale Netze imstande auch sehr komplexe Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Verschiebungen mathematisch zu erfassen und für Adaptionberechnungen zur Verfügung zu stellen, ohne dass die Reaktionen des Systems programmiert werden müssen.¹²⁴

2.3.2

Sensoren

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, handelt es sich bei einem Sensor um ein Funktionselement, mit dem physikalische, chemische oder elektrochemische Größen erfasst und in elektrische Signale umgewandelt werden.

Sensoren werden nach folgenden Kriterien unterteilt:

- Wirkungsweise bzw. Messprinzip
- Bauart
- Messgrößen, Eingabe- und Ausgabesignal

¹²³ [www.innovationsreport.de]

¹²⁴ [www.math.uni-muenster.de], [www.uni-bielefeld.de]

Wirkungsweise,
Messprinzip

Die Signalerfassung kann mit verschiedenen Wandlerarten erfolgen: Resistive, induktive, kapazitive, faseroptische, piezoelektrische, magnetische, radioaktive, ladungstechnische oder photoelektrische Sensoren belegen die große Vielfalt der verschiedenen Messprinzipien. Für adaptive Systeme werden vor allem faseroptische und piezoelektrische Sensoren sowie Sensoren auf der Basis der *CMOS*-Technik (*complementary metal oxide silicon*) eingesetzt.

Die faseroptischen Sensoren sind kostengünstig und technisch weit entwickelt. Zur Messung von statischen und quasi-statischen Beanspruchungen werden sie zunehmend in Form von Bragg-Gitter-Sensoren¹²⁵ eingesetzt. Dagegen erlaubt das Mach-Zehnder-Verfahren¹²⁶ Messungen bei Frequenzen über einem Kiloherz.¹²⁷

Die piezoelektrischen Sensoren werden überwiegend als Dehnungsmesser eingesetzt. Ihre Wirkungsweise beruht auf dem in Kapitel 2.2.1.2 beschriebenen piezoelektrischen Effekt. Die meisten Piezosensoren werden aus Keramiken hergestellt und können als Plättchen und Fasern ausgebildet werden. Ein wesentlicher Nachteil keramischer Sensoren besteht in ihrer Sprödigkeit und geringen Dehnfähigkeit. Eine Verbesserung dieser Qualitäten verspricht die Entwicklung piezoelektrischer Polymere, die allerdings noch eine geringere thermische Stabilität als Keramiken aufweisen. Die durch Piezosensoren abgedeckten Frequenzbereiche können mittlerweile sowohl schmal- als auch breitbandig sein.

Werden Sensoren mit Mikroprozessoren ausgestattet bzw. auf der Grundlage von *smart materials* hergestellt, so verwendet man in diesem Zusammenhang die Begriffe „intelligente Sensoren“ und „smarte Sensoren“. Für diese Sensorenart können außer piezoelektrischer Materialien

¹²⁵ s. Glossar

¹²⁶ s. Glossar

¹²⁷ [Boller2000, S. 557]

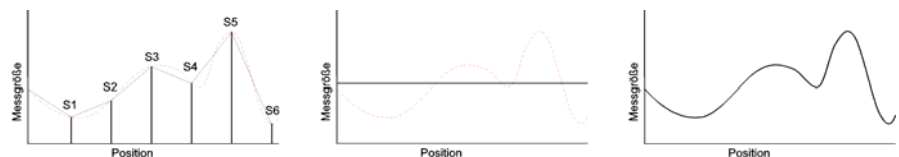
andere multifunktionale Materialien eingesetzt werden, wie zum Beispiel elektroaktive Polymere und magnetostruktive Keramiken.

Die *CMOS*-Technik¹²⁸ erlaubt eine kostengünstige Herstellung von leistungsfähigen, energieschonenden Mikrosensoren zur Messung unterschiedlicher Größen, beispielsweise der Beschleunigung. Ein *CMOS*-Sensor wird durch seine filigrane Struktur gekennzeichnet und besteht aus einer Messeinheit und mehreren integrierten Schaltkreisen zur Signalverstärkung und -weiterverarbeitung.

Bauart

Sollten Sensoren nach ihrer Bauart klassifiziert werden, so unterscheidet man zwischen Punktsensoren, integrierten Sensoren und verteilten Sensoren.

Ein **Punktensor** misst einen lokalen Wert an einer eng begrenzten Fläche. Ein **integrierter Sensor** ermittelt einen durchschnittlichen Wert einer über eine Länge oder Fläche verteilten Messgröße. Ein **verteilter Sensor** ist imstande, eine Funktion eines oder mehrerer Parameter über die ganze Geometrie des Sensors hinweg zu erzeugen.



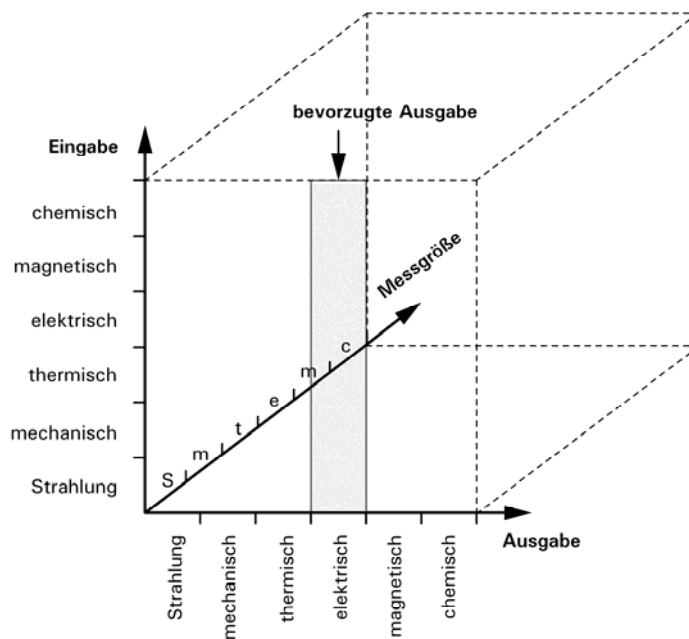
2.15: Ausgabearten für Punktsensoren, integrierte Sensoren und verteilte Sensoren¹²⁹

Mess-, Eingabe- und Ausgabegröße

Eine Gesamtübersicht der möglichen Ein- und Ausgabesignale sowie Messgrößen von Sensoren wird im Folgenden anhand des Middlehoek'schen Sensorwürfels dargestellt.

¹²⁸ s. Glossar

¹²⁹ nach [Culshaw1996, S. 34], [Hermes2002, S. 73]



2.16: Ansichtssaxonometrie des Middlehoek'schen Sensorenwürfels¹³⁰

Bewertungskriterien

Zur Beurteilung der Sensorenqualität werden verschieden Kriterien verwendet, von denen die wichtigsten im Folgenden zusammengefasst werden:¹³¹

- Wirkungsprinzip
- Empfindlichkeit, Querempfindlichkeit, zum Beispiel Temperaturempfindlichkeit
- Auflösungsvermögen
- Linearität / Hysterese
- dynamisches Verhalten (Bandbreite)
- Abmessungen
- Zuverlässigkeit
- Herstellung, Kosten

¹³⁰ nach [Culshaw1996, S. 37], [Hermes2002, S. 75]

¹³¹ [Culshaw1996, S. 31 ff.], [Paradies1997, S. 12], [PI2002, S. 5-1 ff.], [Brignell/White1999, S. 241 ff.]

Sensorennetzwerk

Zur Strukturüberwachung ist ein Netzwerk von Sensoren notwendig. In einem gebündelten System werden Punktsensoren, integrierte Sensoren und verteilte Sensoren miteinander kombiniert. Die Kommunikation zwischen den Sensoren erfolgt entweder drahtgebunden oder schnurlos.

Sensorenentwurf

Bei der Interpretation von eingehenden Daten des Sensors und der Ermittlung einer angemessenen Reaktion ergeben sich grundlegende entwurfsrelevante Aufgabenstellungen:¹³²

- die Erfassung der Signale durch Sensoren muss selektiv erfolgen können. Die durch unerwünschte bzw. zufällige Signale verursachten Störgeräusche sind zu minimieren. Dies ist im Niederfrequenzbereich besonders schwierig. Das Gesamtverhalten des ggf. dreidimensionalen Tragwerks muss aus den Daten der einzelnen Sensoren zusammengesetzt werden.
- eventuelle Korrekturen bzw. Anpassungen müssen an beliebigen Stellen durch Interpolationen der lokalen Ergebnisse zuverlässig realisierbar sein.
- ein ggf. nicht lineares Verhalten der Sensoren wird mit Hilfe von Linearisierungsverfahren korrigiert.
- da kein Sensor nur auf eine einzige physikalische oder chemische Einflussgröße reagiert, muss die Querempfindlichkeit der Sensoren beachtet werden. Die häufigste störende Einflussgröße ist die Temperatur.
- eventuelle Schwächen im Zeitverhalten bzw. Frequenzbereich der Sensoren werden durch das Filtern der Signale kompensiert.

¹³² [Culshaw1996, S. 137 ff.]

Um den hohen Anforderungen an die Sensorenetzwerke adaptiver Systeme gerecht zu werden, kommen folgende Kompensationsprinzipien beim Entwurf von Sensorenetzwerken zur Anwendung:

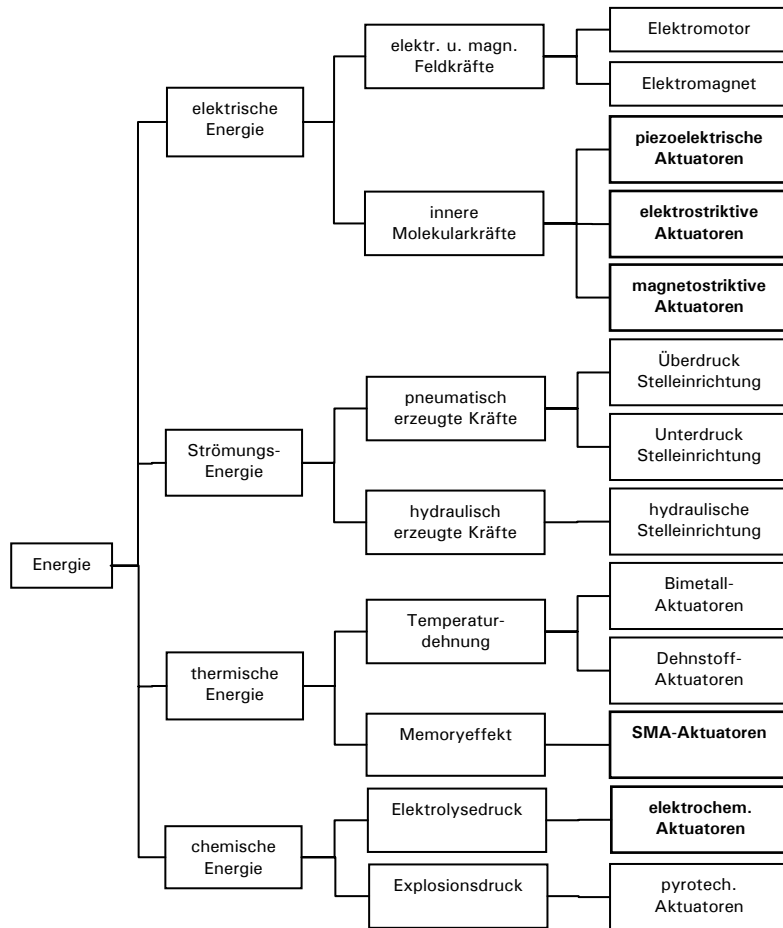
- die strukturelle oder bauliche Kompensation stellt die am häufigsten eingesetzte Kompensationsform dar. Die Grundlage dieser Kompensationsart wird durch eine geschickte Wahl der Sensorenqualitäten gebildet, die gezielt auf die zu messende Größe abgestimmt werden und somit die Sensorenreaktionen auf andere, nicht relevante Größen minimiert werden.
- die zugeschnittene Kompensation wird genutzt, wenn nominell identische Sensoren Unterschiede in Erfassung der Daten aufweisen. Bei diesem Verfahren werden die Sensoren speziell behandelt („zugeschnitten“), um eventuelle Reststörungen zu minimieren.
- die überwachte Kompensation beruht auf einer Messung der Querempfindlichkeit eines Sensors und einer computergesteuerten Kompensation, die entweder anhand eines Modells oder unter Verwendung von Kalibrierungsdaten erfolgt. Das Mittel für die überwachte Kompensation ist der „Sensor im Sensor“. Diese Methode findet vor allem bei chemischen Sensoren Anwendung.
- die schlussfolgernde Kompensation wird angewandt, wenn kein direkter Zugriff auf das zu erfassende System möglich ist. Bei dieser Kompensationsart wird das Verhalten des realen Systems an einem Hilfsmodell simuliert. Die schlussfolgernde Kompensation wird beispielsweise bei nuklearen Reaktoren oder dem menschlichen Gehirn genutzt. Sie hat den wesentlichen Nachteil, dass das Hilfsmodell zwangsläufig nur eine Annäherung an das wirkliche Systemverhalten darstellt. Für adaptive Systeme bleibt die schlussfolgernde Kompensation nur eine Randerscheinung.¹³³

¹³³ [Brignell/White1999, S. 241 ff.]

2.3.3

Aktuatoren

Als Aktuatoren werden Wandlerelemente bezeichnet, die unter dem Einfluss physikalischer oder chemischer Einwirkungen ihre physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Geometrie und Steifigkeit, verändern. Mit Hilfe von Aktuatoren können beispielsweise das Verformungs- und Schwingungsverhalten von Tragwerken oder ihre Beanspruchungszustände beeinflusst werden. Aktuatoren werden nach der Art der Aktivierungsenergie und nach ihrem Wirkungsprinzip unterteilt.



2.17: Einteilung der Aktuatoren nach der Aktivierungsenergie und ihrem Wirkungsprinzip¹³⁴

¹³⁴ in Anlehnung an [Jenditza1995, S.39], Aktuatoren auf der Basis von *smart materials* sind fett markiert.

Aktuatoren geregelter Systeme

Aktuatoren geregelter Systeme bestehen aus mehreren Funktions-
elementen. Hydraulik- und Pneumatikzylinder sowie elektrische Stell-
antriebe sind Beispiele dafür. Sie wandeln die unter anderem in Drucköl
bzw. Druckluft gespeicherte Energie in kinetische Energie um. Sie eignen
sich für die Übertragung großer Kräfte und erfordern relativ wenig
Raum.¹³⁵

Aktuatoren aktiver Systeme

Die Aktuatoren der aktiven Strukturen sind meistens monolithisch auf-
gebaute Wandler, deren wesentlicher Vorteil in der direkten Trans-
formation der Aktivierungsenergie in mechanische Energie (und umge-
kehrt) liegt.

Smarte Aktuatoren

Multifunktionelle Aktuatoren, die in sich sensorische und aktuatorische
Funktionen vereinen, werden als „smarte Aktuatoren“ bezeichnet. Im
Gegensatz zu herkömmlichen Aktuatoren benutzen „smarte Aktuatoren“
mehrere zur Verfügung stehende Signale, wie zum Beispiel Stromstärke
und gleichzeitig Stromspannung, um Einwirkungen mechanischer oder
anderer Art zu kompensieren.¹³⁶

Intelligente Aktuatoren

„Intelligente“ Aktuatoren sind Wandler, in denen mikroelektronische
Berechnungseinheiten implementiert werden, wodurch das Verhalten der
Aktuatoren stetig (dynamisch) kontrolliert werden kann. Sie sind
imstande eventuelle Störungen automatisch zu korrigieren.

CMOS-Aktuatoren

Besonders kleine Aktuatoren können mit Hilfe der *CMOS*-Technik
(*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) hergestellt werden. Ihre
Abmessungen betragen nur Bruchteile von Millimetern. Derartige Mikro-
aktuatoren können Ultraschall, Bewegungen, Licht oder elektro-
magnetische Signale erzeugen.¹³⁷

¹³⁵ [Jendritza1995, S. 42 ff.]

¹³⁶ [Janocha1999, S. 99 ff.]

¹³⁷ [Korvnik/Schlaich2000, S. 29 ff.]

In Abhängigkeit von den genutzten physikalischen Effekten und den veränderbaren Eigenschaften der eingesetzten Materialien, werden die Wandler adaptiver Tragwerke in formveränderbare und steifigkeitsveränderbare Aktuatoren unterteilt. Im Folgenden werden die Aktuatoren auf der Basis von *smart materials* beschrieben. Auf die Darstellung der Aktuatoren geregelter Systeme, wie zum Beispiel Hydraulik-, Pneumatikzylinder oder elektrische Stellantriebe, wird in dieser Arbeit mit dem Hinweis auf die einschlägige Literatur¹³⁸ verzichtet.

2.3.3.1

Aktuatorenkenngrößen

Bevor die einzelnen *smarten* Aktuatoren beschrieben werden, sollen die wichtigsten Aktuatorenkenngrößen definiert werden.¹³⁹

Freie (aktive) Dehnung $\varepsilon_{A,0}$

Als freie Dehnung $\varepsilon_{A,0}$ wird die ungehinderte längenbezogene Dehnung des *smart materials* bezeichnet, die durch Energiezufuhr erreichbar ist:

$$\varepsilon_{A,0} = \bar{\delta}_{A,0} / l_{A,0} \quad (1)$$

mit

$\bar{\delta}_{A,0}$ = max. erreichbare Längenänderung

$l_{A,0}$ = ungedehnte Länge

Blockierspannung $\sigma_{A,B}$

Eine Blockierspannung $\sigma_{A,B}$ wird in einem *smart material* erreicht, wenn die aktive Dehnung vollständig verhindert wird.

$$\sigma_{A,B} = E_A \times \varepsilon_{A,0} \quad (2)$$

mit

E_A = Elastizitätsmodul des Aktuators

¹³⁸ [Stoll1999], [Kallenbach/Bögelsack1991]

¹³⁹ [Monner2005, S. 4 ff.]

Blockierkraft $F_{A,B}$

Aus der Definition der Blockierspannung folgt die Definition der Blockierkraft. Blockierkraft ist die Kraft, die zum vollständigen Zurückdrücken eines maximal gedehnten Aktuators erforderlich ist.

$$F_{A,B} = A_A \times \sigma_{A,B} = A_A \times E_A \times \varepsilon_{A,0} = E A_A \times \bar{\delta}_{A,0} / l_{A,0} = k_A \times \bar{\delta}_{A,0} \quad (3)$$

mit

$$k_A = E A_A / l_{A,0} = \text{Feder- bzw. Dehnsteifigkeit des Aktuators} \quad (4)$$

Energiedichte W_E

Die Federarbeit der umgebenden Struktur ist:

$$W_E = \frac{\lambda}{(1+\lambda)^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_A \cdot \delta_{A,0}^2 \quad (5)$$

mit

$$\bar{W}_E = \frac{\lambda}{(1+\lambda)^2}, \quad \lambda = \frac{k_S}{k_A} \quad (6)$$

k_S = Federsteifigkeit der umgebenden Struktur

Mit der Energiedichte W_E wird die maximale Energie beschrieben, die bei einem minimalen Aktuatorenvolumen auf die Struktur übertragen werden kann. Der Koeffizient \bar{W}_E zeigt, dass ein optimales Steifigkeitsverhältnis zwischen Aktuator und Struktur mit $\lambda = 1$ erreicht wird.

max. Energiedichte

Die maximale Energiedichte ergibt sich demzufolge zu:

$$\max. W_E = \frac{1}{8} \cdot k_A \cdot \delta_{A,0}^2 \quad (7)$$

mit $\lambda = 1$

max. spezifisches
 Arbeitsvermögen
 des Aktuators

$$\max. W_A = \frac{W_E}{\rho_A} = \frac{1}{8} \cdot \frac{k_A \cdot \delta_{A,0}^2}{\rho_A} \quad (8)$$

mit

ρ_A = Rohdichte von smart material

2.3.3.2

Formveränderbare Aktuatoren

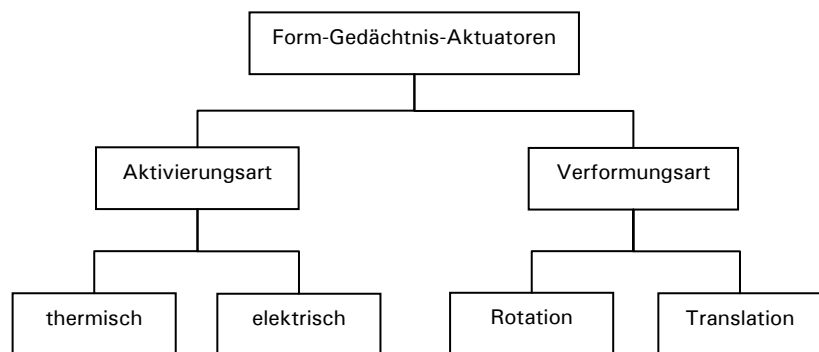
Zu dieser Gruppe gehören Aktuatoren auf der Basis von Form-Gedächtnis-Legierungen sowie piezoelektrische, elektrostriktive, magnetostruktive, elektrochemische und chemomechanische Aktuatoren.

Aktuatoren auf der Basis von Form-Gedächtnis- Legierungen

Aktuatoren auf der Basis von Form-Gedächtnis-Legierungen sind imstande nach der Verformung in eine vordefinierte Form zurückzukehren.

Die eingesetzten Materialien sind robuste Metalllegierungen mit hohen Umwandlungstemperaturen, einer kleinen Hysterese zwischen der Verformung und Rückverformung und einer hohen Stabilität des Formänderungseffekts selbst.¹⁴⁰ Häufig werden Legierungen auf der Basis von Nickel-Titan verwendet, wie zum Beispiel *Nitinol (Nickel-Titanium-Naval-Ordinance-Laboratory)*.¹⁴¹

Die Unterteilung der Form-Gedächtnis-Aktuatoren erfolgt nach der Art der Aktivierung und nach der Art der Verformung.



2.18: Einteilung nach Aktivierungs- und Verformungsart von Form-Gedächtnis-Aktuatoren

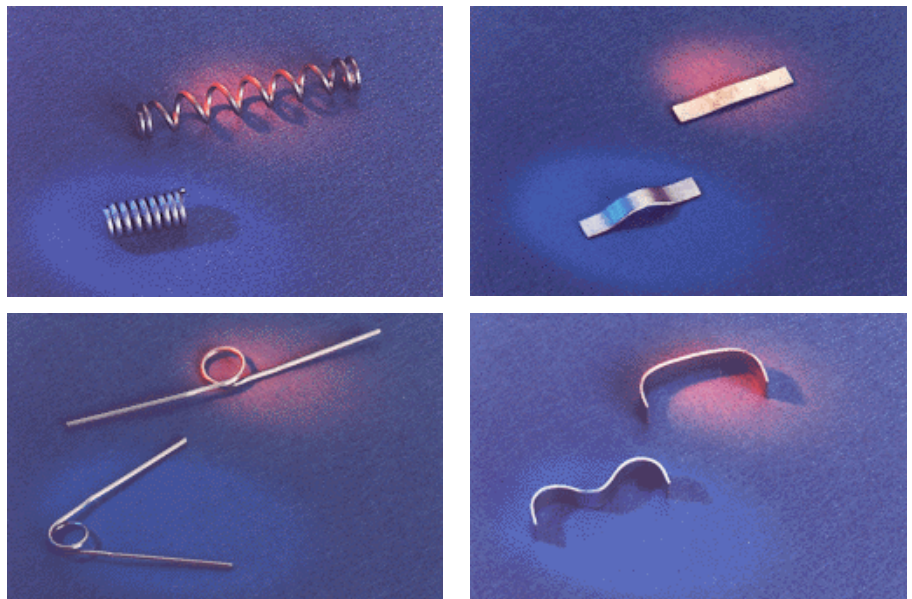
Form-Gedächtnis-Aktuatoren zeichnen sich durch große Stellwege aus:

¹⁴⁰ [Schmidt-Mende1995, s. 348 ff.]

¹⁴¹ [Sobek/Haase/Teuffel2000, S. 544 ff.]

Nickel-Titan-Legierungen mit Einwegeffekt, die zum Beispiel für Verbindungsmittel eingesetzt werden können, erreichen Dehnungen von bis zu acht Prozent. Für wiederholbare Bewegungen, die für Aktuatoren relevant sind, bedient man sich Materialien mit Zweiwegeffekt. Die maximalen Dehnungen liegen hier bei vier Prozent.

Die zulässigen Spannungen sind von der Zyklenzahl abhängig: Bei Wiederholungsraten bis 1000 können durch Aktuatoren auf der Basis von Nickel-Titan-Legierungen Spannungen bis 160 N/mm^2 übertragen werden. Werden die Zyklenzahlen auf über 10.000 gesteigert, gehen die maximalen Spannungswerte auf ca. 130 N/mm^2 zurück. Das E-Modul dieser Legierung liegt für die martensitische Phase zwischen 21.000 und 69.000 N/mm^2 und zwischen 70.000 und 110.000 N/mm^2 für die austenitische Phase.¹⁴²



2.19: Bauformen der Form-Gedächtnis-Aktuatoren¹⁴³

¹⁴² [Culshaw1996, S. 126], [Hesselbach1999, S.148], [Monner2005, S. 15 ff.]

¹⁴³ [www.amtbe.com]

Die Bauformen der Form-Gedächtnis-Aktuatoren reichen von einfachen, linienförmigen Zug-, Druckstäben und Biegebalken bis hin zu räumlichen, gekrümmten Elementen, die beispielsweise als Translations- bzw. Torsionsfeder eingesetzt werden können und mit denen die erreichbare Längenänderung auf bis zu 200 % gesteigert werden kann.¹⁴⁴

Form-Gedächtnis-Aktuatoren können entweder thermisch oder elektrisch aktiviert werden. Ihre Reaktionszeiten liegen für das Erwärmen unter einer halben Sekunde und für das Abkühlen bei bis zu einigen Sekunden.¹⁴⁵ Die thermische Aktivierung bietet den Vorteil einer direkten Umwandlung der thermischen Energie des den Aktuator umgebenden Mediums in mechanische Arbeit. Da diese Aktivierungsart keine externe Energieversorgung benötigt und dadurch unabhängig von deren Unterbrechungen ist, eignen sich die thermisch angesteuerten Aktuatoren als Bestandteile eines Sicherungssystems.¹⁴⁶

Demgegenüber benötigen die elektrisch aktivierten Form-Gedächtnis-Aktuatoren, bei denen die erforderliche Wärme durch elektrischen Strom direkt innerhalb des Aktuators erzeugt wird, eine externe Energiequelle. Der wesentliche Vorteil dieser Aktuatoren liegt in ihrer besseren Positionierbarkeit, die bei der Anwendung von kurzen Stromimpulsen als Aktivierungssignal in Verbindung mit Positionssensoren und Regelung bzw. Steuerung unter der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten, Hysteresis- und Energieverlusten erreicht werden kann.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Form-Gedächtnis-Aktuatoren kann unter anderem durch das Kühlmedium, ihre Bauform und die Wahl eines Aktuators mit hoher Umwandlungstemperatur gesteigert werden: Zum Beispiel können durch Wasserkühlung die Abkühlgeschwindigkeiten um

¹⁴⁴ [Schmidt-Mende1995, S. 356]

¹⁴⁵ Bei Aktivierung mit einem kurzen Stromimpuls

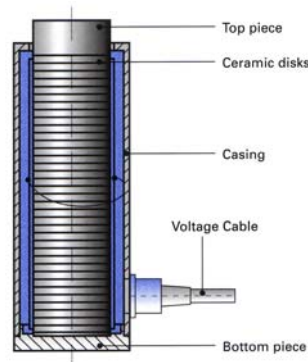
¹⁴⁶ Der Umwandlungsprozess kann zum Beispiel direkt durch die Außentemperatur ausgelöst werden.

mehr als das Zehnfache gegenüber einer Luftkühlung erhöht werden. Eine Vergrößerung des Verhältnisses zwischen der Oberfläche und dem Volumen des Aktuators führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Reaktionszeiten, genauso wie aktive Kühlung durch erzwungene Konvektion. Letztendlich bewirkt die Wahl eines Aktuators mit einer hohen Umwandlungstemperatur, eine Vergrößerung der Differenz zwischen der Umgebungstemperatur und der Umwandlungstemperatur, wodurch die Abkühlzeiten der Aktuatoren verkürzt werden.¹⁴⁷

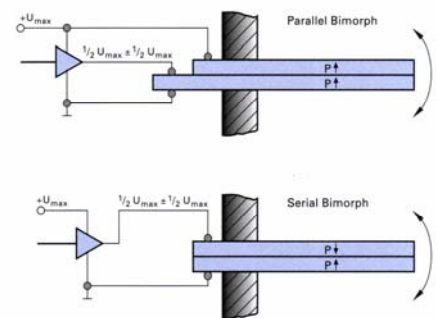
Piezoelektrische
 Aktuatoren

Die Wirkungsweise der piezoelektrischen Aktuatoren beruht auf dem inversen Piezoeffekt: Das Anlegen eines elektrischen Feldes führt, je nach seiner Richtung, zur Kontraktion oder Expansion des piezoelektrischen Materials.

Die Bauformen piezoelektrischer Aktuatoren umfassen Stapel-, Biege- und Laminaraktuatoren sowie die so genannten Moonies.



Stapelaktuator

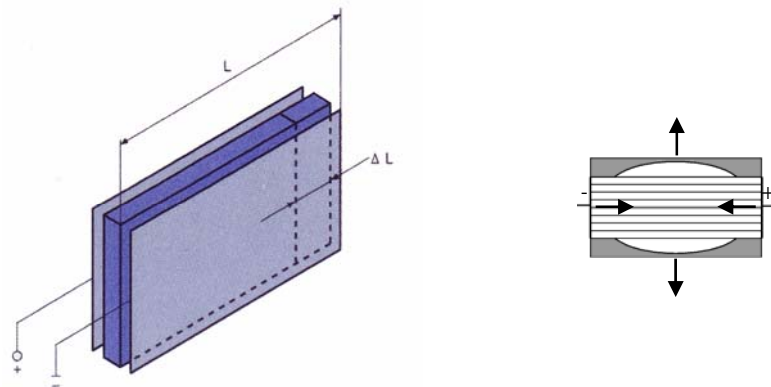


Biegeaktuator

2.20: Bauformen piezoelektrischer Aktuatoren: Stapel- und Biegeaktuator¹⁴⁸

¹⁴⁷ [Hesselbach1999, S. 146 ff.]

¹⁴⁸ [PI2002, S. 4-41 ff.]



Laminaraktor

Moonie

2.21: Bauformen piezoelektrischer Aktuatoren: Laminaraktor und Moonie¹⁴⁹

Stapelaktuatoren bestehen aus mehreren aufeinander gestapelten und miteinander verklebten piezokeramischen Scheiben. Die Scheibendicken der Stapelaktuatoren werden in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Feldstärke, die bei piezoelektrischen Keramiken um 2000 V/mm beträgt, und der daraus resultierenden anlegbaren Spannung gewählt. Die Dicken der einzelnen Scheiben betragen ca. 100 µm bei Niedervoltaktuatoren (ca. 150 V) und reichen bis zu 0,5 mm (500 µm) bei Hochvoltaktuatoren (ca. 1000 V).¹⁵⁰

Biegeaktuatoren bestehen aus unterschiedlich (serienbimorphe Biegeaktuatoren) oder gleich (parallelbimorphe Biegeaktuatoren) polarisierten, miteinander verbundenen Piezostreifen, die beim Anlegen eines elektrischen Feldes, entweder bedingt durch die unterschiedliche Polarisierung oder mit Hilfe einer getrennten Aktivierung, axiale Kontraktion oder Expansion erfahren. Daraus resultiert eine Querauslenkung am freien Ende des Streifens, welche um mindestens eine Größenordnung höher liegt als bei der axialen Verformung und bis zu einem Millimeter betragen

¹⁴⁹ [PI2002, S. 4-41 ff.]

¹⁵⁰ [piezojena2002, S. 64 ff.]

¹⁵¹ [Gandhi/Thompson1992, S. 184 ff.]

kann. Bedingt durch ihre geringe Steifigkeit, eignen sich die Biegeaktuatoren nicht zur Übertragung größerer Kräfte und werden vor allem als Biegewandler für wenig beanspruchte Stellsysteme verwendet.¹⁵¹

Laminaraktuatoren stellen die flächenförmige Variante der Piezoaktuatoren dar und bestehen aus dünnen Keramikstreifen, die auf die tragende Struktur aufgebracht werden.¹⁵²

Mit dem **Moonie** werden bei einer Kontraktion der Piezokeramiksichten die halbmondförmigen elastischen Begrenzungsplatten aufgebogen, wodurch die erreichbaren Stellwege um Faktor Zehn vergrößert werden können.¹⁵³

Die Längenänderungen der Piezoaktuatoren hängen von der elektrischen Feldstärke, dem Aktuatoren Aufbau, der äußeren mechanischen Belastung und den Eigenschaften des gewählten piezoelektrischen Materials ab. Im Normalfall liegen die Stellwege unterhalb eines Millimeters. Mit Bimorphwandlern können sie aber auf einige Millimeter gesteigert werden. Die größten Dehnungen werden bei hohen elektrischen Feldstärken von 1500 – 2000 V/mm erreicht, wobei hier die Grenzen durch die Durchschlagfestigkeit der piezoelektrischen Materialien definiert werden: Zu hohe elektrische Feldstärken verursachen ein Durchschlagen zwischen den Elektroden, zu hohe negative Feldstärken, d. h. Feldstärken, die entgegen der Polarisierungsrichtung gerichtet sind, führen zu einer vollständigen Entpolarisierung, was eine Zerstörung der Keramik bedeutet.¹⁵⁴ Der Zusammenhang zwischen der Dehnung des Materials und der anliegenden elektrischen Feldstärke ist hysteresebefahet und kann für kleine Feldstärken in erster Näherung als linear angenommen werden.

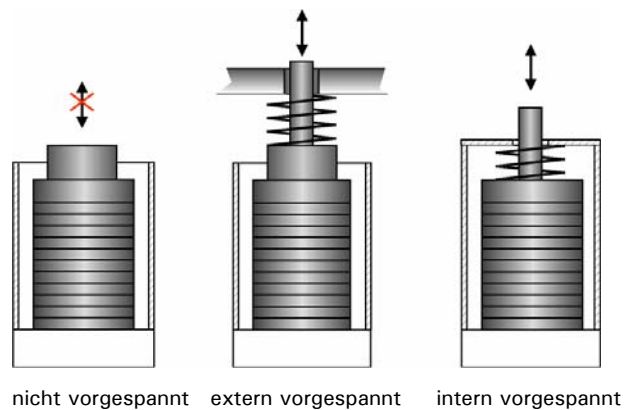
¹⁵² [PI2002, S. 4-41 ff.]

¹⁵³ [Neumann1995, S. 66]

¹⁵⁴ [Clephas1999, S. 109]

Die Bruchspannungen erreichen Werte von bis zu 250 N/mm². In der Praxis sollen die auftretenden Spannungen die Grenze von 20 bis 30% der Bruchspannungen nicht überschreiten und sind wegen der Sprödigkeit von Piezoelektrika und des Aufbaus der Aktuatoren (zum Beispiel geklebte Keramikplättchen bei Stapelaktuatoren) ohne weitere Maßnahmen auf Druckspannungen beschränkt.¹⁵⁵

Um Zugkräfte zu übertragen, werden Aktuatoren mit ca. 1/10 der maximalen Druckbelastung mechanisch extern oder intern vorgespannt.¹⁵⁶



2.22: Piezoelektrische Stapelaktuatoren mit und ohne Vorspannung¹⁵⁷

Die E-Moduli piezoelektrischer Materialien liegen zwischen 50.000 und 100.000 N/mm².¹⁵⁸

Die großen Vorteile piezoelektrischer Aktuatoren liegen in ihren kurzen Reaktionszeiten, von teilweise weniger als 10 ms (Millisekunden), und einer herausragenden Positioniergenauigkeit mit maximalen Abweichungen im Bereich von sub-Nanometern.¹⁵⁹

¹⁵⁵ [Sobek/Haase/Teuffel2000, S. 544 ff.]

¹⁵⁶ [Sobek/Teuffel2002, S. 205], [PI2002, S. 4-47]

¹⁵⁷ [PI2002, S. 4-47]

¹⁵⁸ [Clephas1999, S. 106 ff.], [Culshaw1996, S. 49]

¹⁵⁹ [PI2001, S. 4-11]

Elektrostriktive Aktuatoren

Die elektrostriktiven Aktuatoren werden ebenfalls aus Keramiken hergestellt. Ihre Eigenschaften entsprechen bis auf die kleineren erreichbaren Dehnungen und den schmäleren Temperaturbereich, in dem sie arbeiten können, denen der piezoelektrischen Aktuatoren.¹⁶⁰

Magnetostriktive Aktuatoren

Magnetostriktive Aktuatoren basieren auf dem in Kapitel 2.2.1.4 beschriebenen magnetostriktiven Effekt. Das bekannteste Material ist *Terfenol-D* (**T**erbium-**F**errum-**N**aval-**O**rdinance-**L**aboratory).

Die Dehnungen magnetostriktiver Aktuatoren erreichen im allgemeinen Werte von bis zu 0,2%, was bei maximal herstellbaren Längen um 250 mm, zu Aktuatorenauslenkungen von bis zu 0,5 mm führt. Das E-Modul magnetostriktiver Aktuatoren beträgt bis zu 65.000 N/mm².

Um größere Dehnungen von bis zu 0,4% zu erreichen, können die so genannten dynamischen magnetostriktiven Aktuatoren eingesetzt werden. Sie sind im Gegensatz zu den stationären Aktuatoren bidirektional aufgebaut und können sowohl Zug- als auch Druckkräfte erzeugen. Die größeren Auslenkungen dieser Aktuatoren resultieren aus der Kombination von Dehnungen und Kontraktionen in der Eigenfrequenz des Materials, wodurch große Spitzenamplituden erreicht werden. Dabei werden selbst bei hohen Belastungen große Kräfte erzeugt und eine gute Effizienz erreicht.

Gegenüber piezoelektrischen Aktuatoren bieten magnetostriktive Aktuatoren den Vorteil einer höheren Leistungsfähigkeit, selbst unter einer starken Belastung, insbesondere für niederfrequente, dynamische Beanspruchungen.

¹⁶⁰ [Elspass/Flemming1998, S. 61]

Das Dehnungsverhalten magnetostriktiver Aktuatoren ist zunächst nicht linear, kann aber durch Vormagnetisierung und mechanische Vorspannung verbessert werden. Dies ist allerdings mit einer Verringerung der Dehnungsraten verbunden. Zur Erfassung des Verhaltens magnetostriktiver Aktuatoren wurden bereits einige Modelle entwickelt.¹⁶¹

Die Anregung der magnetostriktiven Aktuatoren erfolgt durch das Anlegen von strombetriebenen Magnetspulen: Die Dehnung des Aktuators wird durch die Stromspannung geregelt.



2.23: Magnetostriktive Aktuatoren

Ferromagnetische Form- Gedächtnis-Aktuatoren

Die Entwicklung der Aktuatoren auf der Basis von ferromagnetischer Form-Gedächtnis-Legierungen wird vor allem durch die Firma *AdaptaMat*¹⁶² vorangetrieben. Die durch diese Firma angebotenen Aktuatoren erreichen Stellwege von bis zu fünf Millimetern und können Kräfte von ca. zwei Kilonewton übertragen.

¹⁶¹ [Claeyssen1999, S. 124 ff.]

¹⁶² [www.adaptamat.com]

Elektrochemische Aktuatoren

Die elektrochemischen Aktuatoren¹⁶³ entsprechen in ihrer Wirkungsweise den pneumatischen Stellantrieben, benötigen aber kein Leitungssystem: Der elektrochemische Aktuator erzeugt das Druckmedium durch Umwandlung von elektrischer Energie in eine Volumenarbeit, ohne dass das Gas zu- oder abgeführt werden muss. Darüber hinaus lassen sich elektrochemische Aktuatoren einfacher regeln als herkömmliche, pneumatische Stellantriebe.¹⁶⁴

Chemomechanische bzw. chemostriktive Aktuatoren

Chemomechanische bzw. chemostriktive Aktuatoren werden auf der Basis von Materialien hergestellt, die unter chemischem Einfluss eine Volumenänderung erfahren.¹⁶⁵ Als Beispiel können Gelfasern aus Polyacrylnitril (PAN) genannt werden, mit denen ein Modell eines menschlichen Arms bewegt wurde. Je nach dem ob den Gelfasern eine zweimolare Salzsäure oder Natronlauge zugegeben wurde, führte der Arm eine Drehbewegung um 70 Grad nach oben oder nach unten in der Zeit von ca. fünf Sekunden aus.¹⁶⁶

2.3.3.3

Steifigkeitsveränderbare Aktuatoren

Aktuatoren auf der Basis von elektro- und magnetorheologischen Fluiden zählen zu den steifigkeitsveränderbaren Aktuatoren. Sie gehören nicht zu der Gruppe der Stellelemente und werden vor allem in variablen Dämpfungssystemen zur Beeinflussung der dynamischen Eigenschaften der Tragwerke eingesetzt.¹⁶⁷

Rheologische Aktuatoren werden nach der Art der Aktivierung und des Betriebs unterschieden.

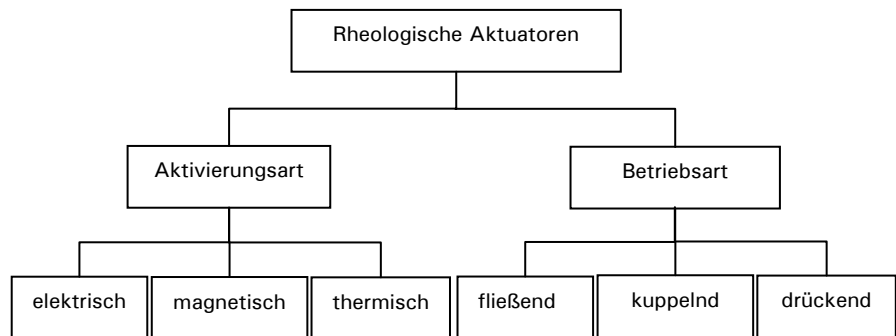
¹⁶³ auch EC Aktuatoren, ECA

¹⁶⁴ Kempe in [Jendritza1995, S. 368 ff.]

¹⁶⁵ s. Kapitel 2.2.1.6

¹⁶⁶ [Haase/Köhnlein1998, S. 45]

¹⁶⁷ [Sobek/Haase/Teuffel; 2000, S. 544 ff.]



2.24: Einteilung von Aktuatoren auf der Basis rheologischer Fluide

Aktuatoren auf der Basis
 elektrorheologischer Fluide

Die reversiblen Viskositätsänderungen der elektrorheologischen Aktuatoren (ER-Aktuatoren) werden durch ein elektrisches Feld verursacht.

Die Vorteile der ER-Aktuatoren liegen vor allem in den schnellen Reaktionszeiten von ein bis zwei Millisekunden und in dem niedrigen Gewicht von ca. 10 bis 20 kN/m³.¹⁶⁸ Eine weitere wertvolle Eigenschaft resultiert aus dem von Oppermann (1986) entdeckten Zusammenhang zwischen dem Stromfluss im Fluid und der auf das Fluid einwirkenden äußeren Belastung: Die Änderung der Stromstärke kann als Messgröße für die Geschwindigkeit der Bewegung genutzt werden und zudem über eine externe elektronische Steuereinheit die Spannung des elektrischen Feldes regeln. Folglich kann so die Viskosität des Fluids direkt je nach Größe der einwirkenden Kraft angepasst werden.¹⁶⁹

Zu den Nachteilen elektrorheologischer Aktuatoren gehören die hohen erforderlichen Stromspannungen, das sensible Temperaturverhalten mit einer Temperaturobergrenze von 150 °C und Schwächen in der chemischen und mechanischen Langzeitstabilität, vor allem wegen der Sedimentationsprozesse der Fluide.¹⁷⁰

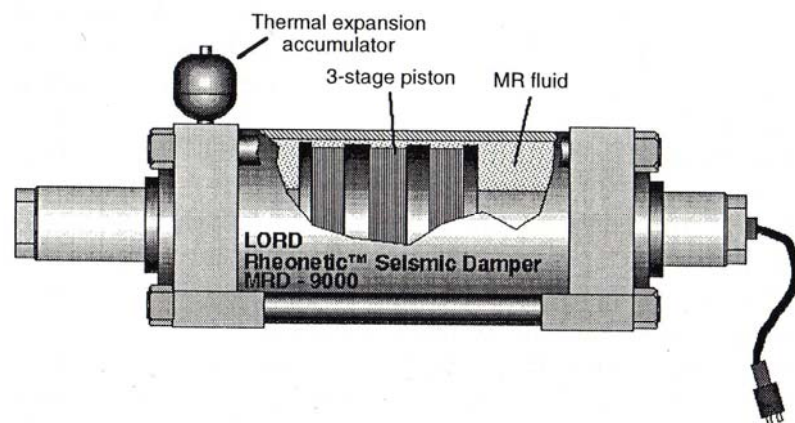
¹⁶⁸ Die Bestandteile des Fluids müssen nicht eisenhaltig und dadurch schwer sein.

¹⁶⁹ [Köhnlein2000, S. 436], [Haase/Köhnlein1998, S. 122]

¹⁷⁰ [Bullough1999, S. 161 ff.], [Neumann1995, S. 48 ff.], [Monner2005, S. 18]

Aktuatoren auf der Basis
magnetorheologischer
Fluide

Die Wirkungsweise von Aktuatoren auf der Basis magnetorheologischer Fluide (MR-Aktuatoren) entspricht derjenigen der Aktuatoren auf der Basis elektrorheologischer Fluide. Der Unterschied besteht in dem Aktivierungsmedium: Die magnetorheologischen Aktuatoren werden durch Anlegen oder Verändern magnetischer Felder betrieben. Sie werden vorrangig als Dämpfer, zum Beispiel für Erdbebenlasten im Hochbau, eingesetzt. Der weltweit führende Hersteller dieser Aktuatoren ist die Firma *LORD*.¹⁷¹



2.25: MR-Dämpfer, *LORD Rheonetic™ Magnetically Responsive Technology*¹⁷²

Die Vorteile der magnetorheologischen Aktuatoren liegen in einem einfachen und robusten Aufbau, hohen aufnehmbaren Lasten von bis zu 300 kN¹⁷³ und schnellen Reaktionszeiten im Bereich einiger Millisekunden.¹⁷⁴ Die Fließspannung magnetorheologischer Aktuatoren ist gut kontrollierbar und liegt mindestens eine Größenordnung höher als die der besten elektrorheologischen Fluide mit vergleichbarer Viskosität. Darüber hinaus ist die zur Erzeugung einer bestimmten mechanischen Leistung

¹⁷¹ [www.lord.com/mr]

¹⁷² [Lord2002, S. 2]

¹⁷³ [Spencer/Nagarajiah2003, S. 853]

¹⁷⁴ [Jenditza1995, S. 108]

erforderliche Fluidmenge der MR-Aktuatoren um die Hälfte kleiner als bei ER-Aktuatoren.¹⁷⁵

Die Langzeitstabilität der MR-Fluide ist zufrieden stellend. Allerdings muss durch die Wahl richtiger Mischverhältnisse der Fluidkomponenten der Gefahr der sedimentären (infolge von Gravitation) und zentrifugalen (infolge von Rotation) Trennungsprozessen von Partikeln und Fluid begegnet werden. Beide Prozesse werden durch den Unterschied in der Dichte (Gewicht) zwischen den schweren ferromagnetischen Partikeln (magnetisierbar) und dem Fluid begünstigt. Allerdings sind magnetorheologische Fluide unempfindlich gegenüber Verunreinigungen, Luftblasen und Hohlräumen.

Die Aktivierung der magnetorheologischen Fluide ist im Vergleich zu elektrorheologischen Fluiden unkompliziert und stromschonend.

¹⁷⁵ Die Mindestmenge eines Fluids in einem aktiven Bauteil ist proportional zur plastischen Viskosität und umgekehrt proportional zum Quadrat der maximal erzeugten Fließspannung.

2.3.3.4

Übersicht der Aktuatoren

auf der Basis von

smart materials

Aktuatoren mit formveränderbaren <i>smart materials</i>							
Basismaterial	Dichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	max. Dehnung [%]	Betriebs- frequenz [Hz]	Blockier- spannung [N/mm ²]	Energie- dichte W_E [J/cm ³]	spezifische Arbeit W_A [W/kg]
Form-Gedächtnis- Legierung (NiTi)	6450	ca. 70.000- 110.000 (austenit)	ca. 2-8	einige Hz	425	1,59	247
Piezokeramiken (PZT)	7600	ca. 50.000- 70.000	0,12 - 0,18 0,1 in Betrieb	100.000	72	0,0108	1,42
Piezopolymere (PVDF)	1470	ca. 2.100- 2.500	0,07	100.000	1,61	0,000141	0,096
Elektrostriktive Keramiken (PMN)	9150- 9250	25.000- 65.000	0,1	10.000	70	k. A.	k. A.
Elektrostriktive Polymere (PVDF-TrFE)	1900	1000	2-4	100.000	40	0,2	105
Magnetostriktive Materialien (Terfenol-D)	9150- 9250	ca. 25.000- 65.000	0,075-0,2	10.000	82,5	0,0155	1,67
Ferromagnetische- Form-Gedächtnis- Elemente	8360	450 - 820	2-10	100-1.000	18	0,0675	8,1

2.26: Kennwerte der Aktuatoren auf der Basis formveränderbarer *smart materials*

Aktuatoren mit steifigkeitsveränderbaren <i>smart materials</i>						
Basismaterial	Dichte [kg/m ³]	Viskositätsänderungs-Faktor	max. Schubspannung [N/mm ²]	zul. Belastung [kN]	Betriebsfrequenz [Hz]	Reaktionszeit [ms]
Elektro-rheologische Fluide	1000 – 2000	bis 10	0,004-0,01	k. A.	1000 Hz	einige
Magneto-rheologische Fluide	3000 – 4000	bis 100	0,05-0,1	ca. 300	1500 Hz	einige

2.27: Kennwerte der Aktuatoren auf der Basis steifigkeitsveränderbarer *smart materials*

Die wesentlichen Vorteile der Aktuatoren auf der Basis von *smart materials* gegenüber den Stallelementen der geregelten Systeme (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch etc.) liegen in ihrem einfachen Aufbau, kleinen Abmessungen, Robustheit sowie im energieschonenden und wartungsarmen bis wartungsfreien Betrieb.

Die Anwendung bestimmter Aktuatoren innerhalb eines adaptiven Dachtragwerks setzt voraus, dass die aus der vorgesehenen Funktion erforderlichen Kenngrößen mit den Leistungsdaten der Aktuatoren übereinstimmen. Im Einzelnen handelt es sich dabei zunächst um Adaptionswege, -kräfte, Steifigkeits- bzw. Viskositätsänderungen, Reaktionszeiten bzw. Betriebsfrequenzen, Beschleunigung und Kraft-Dehnungsverhalten (Linearität). Zu weiteren Kriterien zählen Baugröße, Kosten, Wartung und Zuverlässigkeit des Aktuators.

Sollen große Kräfte bzw. Wege realisiert werden, so können neben herkömmlichen Stellantrieben unter Umständen Form-Gedächtnis-Aktuatoren eingesetzt werden. Allerdings sind diese Aktuatoren wegen der langen Reaktionszeiten zunächst nur zur Aufnahme statischer bzw. quasi-statischer Einwirkungen, zum Beispiel Schnee, geeignet. Darüber

hinaus sind die Kosten für Form-Gedächtnis-Aktuatoren gegenwärtig noch sehr hoch.

Um dynamische Einwirkungen kompensieren zu können, müssen die Form-Gedächtnis-Aktuatoren entweder mit anderen Aktuatoren, zum Beispiel mit magnetorhologischen Aktuatoren (MR-Aktuatoren), kombiniert werden, oder die Aktivierungszeiten müssen durch geeignete Maßnahmen verkürzt werden.

Demgegenüber können Aktuatoren mit kleineren Änderungseffekten, wie piezoelektrische, elektro- oder magnetostriktive Stallelemente, in Mikro- bzw. Makromechanismen eingesetzt werden, mit denen äußere Einwirkungen, zum Beispiel durch die Verbesserung der Gebäudeareodynamik, beeinflusst werden.¹⁷⁶

Die Entwicklung auf dem Gebiet der elektrisch aktivierbaren Polymergele befindet sich zwar noch im Laborstadium, verspricht aber hinsichtlich der erreichbaren Adaptionen sehr gute Ergebnisse.¹⁷⁷

¹⁷⁶ [Korvink/Schlaich2000, S. 29 ff.]

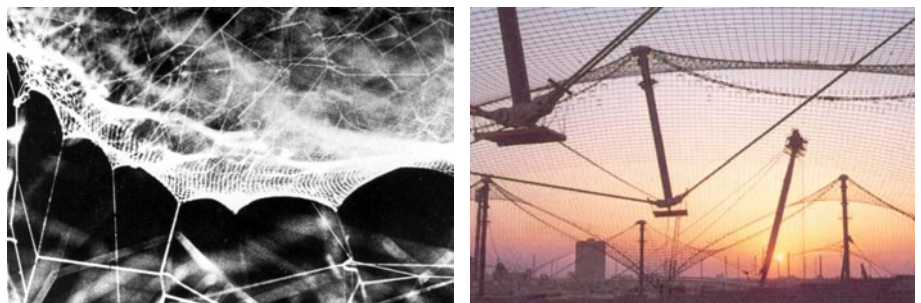
¹⁷⁷ [www.uni-stuttgart.de]

3 Dachtragwerke als Leichtbaukonstruktionen

3.1 Leichtbau- und Optimierungsprinzipien

Leichtbau ist ein Konstruktionsprinzip, das aus der Natur hervorgeht und in der Technik angewendet wird. Das Entwurfsziel des Leichtbaus besteht zunächst in der Minimierung des Konstruktionsgewichts ohne die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion zu verringern. Weitere nicht minder wichtige Ziele werden durch Anforderungen an Nutzung und Form sowie Ökonomie und Ökologie definiert.

In der Natur ist Leichtbau allgegenwärtig: Spinnfäden, Insekten (Insektenchalen, Insektenflügel), Skelette und Pflanzen sind Beispiele dafür. Leichtbauprinzipien finden Anwendung in vielen Bereichen der Technik, unter anderem werden Leichtbaukonstruktionen im Bauwesen realisiert. Als Beispiele können Membranen, Schalen- und Seiltragwerke, sowie wandelbare Bauwerke genannt werden.



3.1: Leichtbauten in der Natur und in der Bautechnik, Spinnennetz und Seilnetz¹⁷⁸

¹⁷⁸ [Otto/Rasch1995, S. 34], [Holgate1997, S. 71]

Leichtbauarten

Die dabei eingesetzten Methoden erlauben die Unterteilung des Leichtbaus in Material-, System- und Strukturleichtbau.¹⁷⁹

Materialleichtbau wird durch die Verwendung von Materialien mit einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zur nutzbaren Festigkeit und Steifigkeit gekennzeichnet. Zu den klassischen Leichtbaumaterialien gehören: Aluminium, Holz, Kunststoffe und textile Werkstoffe. Allerdings kann man auch aus „schweren“ Materialien wie Stahl, Stahlbeton (Schalen)¹⁸⁰ oder Mauerwerk (Gewölbekonstruktionen)¹⁸¹ effiziente und im Endeffekt leichte Tragwerke bauen, wenn die Materialien gemäß ihren Eigenschaften eingesetzt werden (s. Strukturleichtbau).

Im Systemleichtbau werden die einzelnen Konstruktionselemente multifunktional ausgebildet und übernehmen zum Beispiel sowohl tragende als auch raumabschließende Funktionen.¹⁸²

Im Strukturleichtbau wird die Minimierung des Konstruktionseigengewichts unter Einhaltung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für eine gegebene Nutzung (Belastungen, Lichtraumprofil, Auflagerpunkte etc.) durch die Optimierung der tragenden Struktur erreicht.

Die für den Leichtbau relevanten Entwurfsaspekte lassen sich wie folgt zusammenfassen:¹⁸³

- Normalkraftbeanspruchungen sind Biegebeanspruchungen vorzuziehen.
- Zugkräfte können über lange Wege gewichtsarm geleitet werden, müssen aber verankert sein.

¹⁷⁹ [Sobek1995, S. 324 f.]

¹⁸⁰ zum Beispiel Schalen von Isler, Candela

¹⁸¹ zum Beispiel Gewölbekonstruktionen von Dieste

¹⁸² zum Beispiel Fahrzeugscheiben

¹⁸³ [Sobek1995, S. 325], [Schlaich2002, S. 76 ff.]

- Druckkräfte verursachen Stabilitätsprobleme und sollen über kurze Wege geleitet werden. Flächenförmige Bauteile sollen durch geeignete Formgebung gegen Stabilitätsversagen gesichert werden.
- Druckkräfte die über lange Wege geleitet werden sollen, sind in selbststabilisierende Systeme einzubinden (zum Beispiel Speichenradstrukturen).
- Wenn möglich, sollen die Kräfte innerhalb des Tragwerks „kurzgeschlossen“ werden, wodurch vor allem das Gewicht der Fundamente reduziert werden kann.
- Vorspannen des Tragwerks führt zu Verringerung der Verformungen und zu Erhöhung der Tragfähigkeit.
- Verwendung von Materialien mit günstigem Verhältnis von Festigkeit zur Rohdichte. Bei Zugfestigkeit spricht man in diesem Zusammenhang von Reißlänge¹⁸⁴.



3.2: Kombination von Material-, System- und Strukturleichtbau, *Eden-Projekt*¹⁸⁵

Der Entwurf von Leichtbaukonstruktionen wird im Allgemeinen auf den Ebenen des Tragsystems (Tragwirkung als Träger, Seil, Bogen, Fachwerk, Rahmen etc.), der Geometrie (Topologie, Form, Dimensionierung) und der Technologie (Werkstoffe, Bauweisen, Fertigung und Fügung) durchgeführt.¹⁸⁶ Im System- und Strukturleichtbau werden adaptive Systeme immer häufiger eingesetzt. In diesem Zusammenhang werden die

¹⁸⁴ s. Glossar

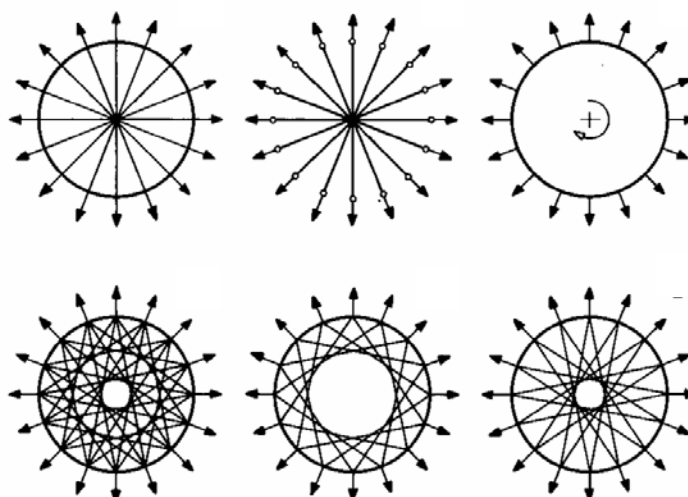
¹⁸⁵ [Schunck et al. 2002, S. 433 ff.], [Detail2000/6, S. 987 ff.]

¹⁸⁶ in Anlehnung an [Wiedemann1995-2, S. 18]

Begriffe adaptiver Systemleichtbau und adaptiver Strukturleichtbau oder allgemein adaptiver Leichtbau verwendet. Aufgrund der polyvalenten Eigenschaften von *smart materials*, können o. g. Leichtbauformen nicht immer klar voneinander getrennt werden. Häufig müssen sie kombiniert werden, um eine den Anforderungen gerechte Konstruktion realisieren zu können.

Die theoretischen Grundlagen des Leichtbaus, insbesondere des Strukturleichtbaus, gehen auf Maxwell¹⁸⁷ und Michell¹⁸⁸ zurück, die Grundsätze über optimale Kräftepfade für minimalen Volumenaufwand formulierten.

Maxwell zeigte, dass der Massenaufwand von Tragwerken kräftepfadunabhängig sein kann und bei gemischten Strukturen die Summe des Spannungsvolumens minimiert werden muss, um den Massenaufwand zu reduzieren.



3.3: Beispiele für Maxwellstrukturen¹⁸⁹

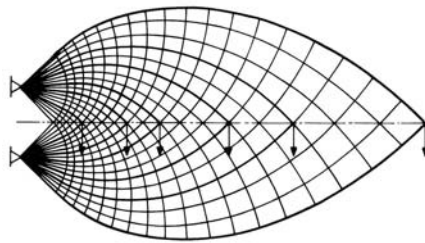
¹⁸⁷ [Maxwell1869, S. 175]

¹⁸⁸ [Michell1904, S. 589 ff.]

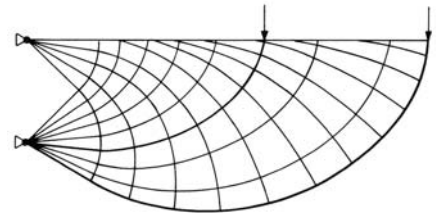
¹⁸⁹ [Wiedemann1996-2, S. 258], s. auch Glossar

So ist das Gewicht aller in der Abbildung 3.3 dargestellten Strukturen gleich und somit unabhängig von der Art der Stabführung.¹⁹⁰ Allerdings wird diese theoretische Unabhängigkeit in der Praxis durch das Gewicht von Verankerungselementen der Zugstäbe relativiert.¹⁹¹

Michell beschäftigte sich ebenfalls mit den Entwurfstheorien und konnte nachweisen, dass die Pfade der Optimalstabwerke bestimmten Orthogonaltrajektorien folgen müssen.



symmetrisch ohne Begrenzung,
Spannungsverhältnis $\sigma_z/\sigma_D = 1$



unsymmetrisch mit oberer Begrenzung
Spannungsverhältnis $\sigma_z/\sigma_D = 1$

3.4: Optimalstabwerk nach Michell für eine Einzellast und zwei punktförmige Auflager¹⁹²

Da die Ansätze von Maxwell und Michell eine weitgehende Idealisierung des realen Tragverhaltens voraussetzten und nur für bestimmte einfache Lastfälle zu Lösungen führen, hatten sie zunächst keine praktische Bedeutung. Erst durch numerische Verfahren, mit denen die Entwicklung von optimalen Strukturen für beliebige Einwirkungskombinationen ermöglicht wurde, erlangten die Erkenntnisse dieser Entwurfstheorien einen praktischen Wert und wurden von Cox und Hemp dargestellt.¹⁹³

¹⁹⁰ [Wiedemann1996-2, S. 245 ff.]

¹⁹¹ [Sobek1995, S. 328]

¹⁹² [Michell1904, S. 589 ff.]

¹⁹³ [Cox1958], [Hemp1958], [Hemp1964], [Wiedemann1996-2, S. 247 ff.]

Die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Strukturoptimierung wurden in den Arbeiten von Ramm, Bletzinger und Sigmund dokumentiert.¹⁹⁴

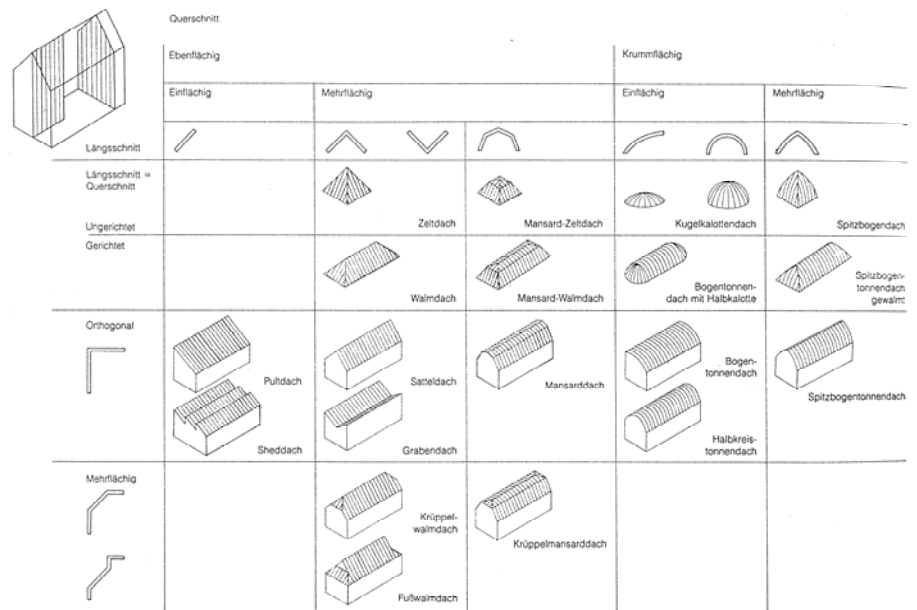
¹⁹⁴ [Bletzinger1990], [Ramm1996, S. 68 ff.], [Bletzinger/Maute1966, S. 131 ff.],
[Sigmund2000]

3.2

Dachtragwerke

Innerhalb eines Gebäudes ist das Tragwerk neben dem Raumabschluss und der Gebäudetechnik ein Bestandteil der Konstruktion. Die Elemente des Tragwerks, die zur Aufnahme und Weiterleitung der Einwirkungen auf die Dachkonstruktion dienen, bilden das Dachtragwerk. Zu den Einwirkungen auf die Dachtragwerke gehören zum Beispiel Eigen-, Schnee-, Eis-, Wind-, Erdbeben- und Personenlasten sowie Temperatur als auch Lasten aus Kranbahnen, Hubschrauberlandeplätzen etc.

Das Dachtragwerk wird durch die Wahl der Dachform wesentlich beeinflusst. Eine Systematik der Dachformen geneigter Dächer wird in der folgenden Abbildung dargestellt.



3.5: Systematik der Formen geneigter Dächer¹⁹⁵

¹⁹⁵ [Schunck et al. 2002, S. 35]

Systematik
der Dachtragwerke

Dachtragwerke können nach ihrer **Geometrie** (gerade bzw. eben oder räumlich) und der **Art der primären Beanspruchung** der Tragwerkelemente (Normal- bzw. Membrankräfte und/oder Biegemomente) gegliedert werden.

Auf dieser Grundlage wird zwischen folgenden Tragsystemen differenziert:

- gerade bzw. ebene Systeme sowie räumliche Systeme mit einer primären Beanspruchung durch Normal- bzw. Membrankräfte.
- gerade bzw. ebene Systeme sowie räumliche Systeme mit einer primären Beanspruchung durch Biegung ggf. mit Normal- bzw. Membrankräften.

Für die in Kapitel 4 durchgeführte Bewertung ausgewählter Systeme wird diese Unterteilung weiter verfeinert und zu einzelnen Systemgruppen zusammen gefasst:

- Systemgruppe a, primär durch Zugkräfte beanspruchte Tragsysteme, zum Beispiel Jauerth-Träger
- Systemgruppe b, primär durch Druckkräfte beanspruchte Tragsysteme, zum Beispiel Bogentragwerke mit einer geometrieaffinen Belastung
- Systemgruppe c, primär durch Zug- und Druckkräfte beanspruchte Tragsysteme, zum Beispiel Fachwerke
- Systemgruppe d, primär durch Biegung bzw. Biegung und Normalkraft beanspruchte Tragsysteme, zum Beispiel, Träger, unterspannte Träger, Rahmen etc.

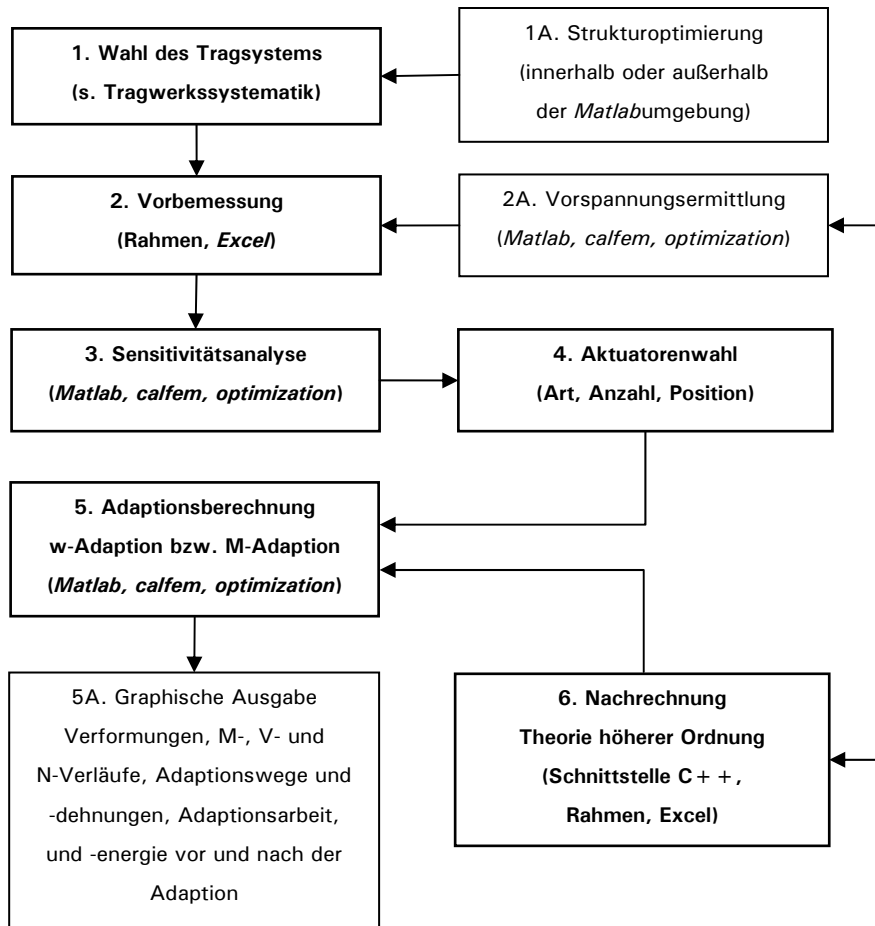
		Geometrie									
		gerade / eben					räumlich				
							nicht gekrümmt		gekrümmt		
Primäre Beanspruchung	Normal- bzw. Membrankräfte						linienförmig		flächenförmig		
		Zugstab (A)	Seil			Seilbinder (a1)	Seilbinder, räumlich		Seilnetz, vorgespannt	Membran, pneumatisch v.	Membran, mech. vorgesp.
Druckstab (B)	Bogen			Seilbinder (b1)	Tensegrity	Stabkuppelschale		Kuppelschale			
Zug- und Druckstab (C)		Bogen, verspannt		Fachwerk (c2)	Fachwerk, räumlich	Stabtonnenschale	Stabhyparschale	Tonnenschale	Hyparschale		
Biegung oder Biegung mit Normal- bzw. Membrankräften	Träger (D)	Trägergelenkzug	Hänge-, bzw. Sprengwerk	Träger, unterspannt (d1)	Träger, untersp., räumlich						
			Sprengwerk	Träger, abgehängt (d2,d3)	Träger, abgeh., räumlich						
		Rahmen	Rahmen, aufgelöst		Rahmen, räumlich	Rahmenkuppel					
	Trägerrost			Träger, Vierendeel (d4)	Trägerrost, Vierendeel						
	Platte				Faltwerk			Biegeschale			

3.6: Systematik der Dachtragwerke

4
Entwurf adaptiver
Dachtragwerke

4.1
Entwurfsverfahren

Das Entwurfsverfahren ist unter Verwendung folgender Programme entwickelt worden: C + + , *Matlab*, *calfem toolbox*, *optimization toolbox*, *Excel link toolbox*¹⁹⁶, *Maple*, *Excel*, FEM „Rahmen“¹⁹⁷. In der folgenden Abbildung ist der Ablauf des Verfahrens dargestellt.



4.1: Ablauf des Entwurfsverfahrens

¹⁹⁶ [Mathworks2002], [Calfem2004]

¹⁹⁷ Rahmen für Windows 9x/NT/2000/NT © 2005 Guido Ludescher

Adaption mit variablen Elementlängen

Die Adaption der Dachtragwerke erfolgt mit in der Länge veränderbaren Elementen. Das zur Adaptionberechnung entwickelte Programm verfügt gegenwärtig über folgende Leistungsmerkmale:

- Eingabe:
 - Eingabe beliebiger Referenzpunkte für die Sensitivitätsanalyse
 - Freie Wahl der Systemvorspannung ($P \rightarrow 0$, $P \rightarrow g$, $P \rightarrow g + s/2$ etc.)
 - Freie Wahl von Anzahl und Lage der zu adaptierenden Tragwerksknoten
 - Freie Wahl von Aktuatorenanzahl und -lage
 - Eingabe von Adaptionstoleranzen
 - Algorithmenauswahl für die Adaptionberechnung
- Adaptionberechnung nach Theorie I. Ordnung:
 - Sensitivitätsanalyse: Einzelkraft, zugehörige Arbeit
 - Verformungsadaption (w-Adaption)
 - Momentenadaption (M-Adaption)
 - Automatische Berechnung der effektiven Dehnsteifigkeit des Systems Aktuator - Tragwerksstab
- Ausgabe:
 - Variable graphische Ausgabe mit automatischer Anpassung der Maßstäbe, Magnitudenfaktoren, Schriftgrößen etc.
- Nachrechnung nach Theorie höherer Ordnung:
 - bidirektionale Schnittstelle mit externem FEM Programm „Rahmen“ (C + +)

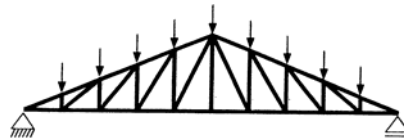
Berechnung der Systemvorspannung P

Die Einheit zur Berechnung der Systemvorspannung (Schritt 2A) kann unabhängig von der Adaptionberechnung genutzt werden. Die Ermittlung der Vorspannung unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen stellt eine wesentliche Vereinfachung der Berechnung dar, insbesondere dann, wenn mehrere Elemente im System vorgespannt werden sollen und/oder wenn die Vorspannkräfte für räumliche Systeme gesucht werden (s. Kapitel 4.1.2, 4.2.2.2).

4.1.1

Wahl und Optimierung des Tragsystems

Das Tragsystem wird auf der Grundlage, der im Kapitel 3.2 (Abbildung 3.6) dargestellten Tragwerksystematik gewählt. Seine Form, Topologie und Querschnitte werden unter Berücksichtigung der konstruktiven und formalen Anforderungen festgelegt. Als effizientes Entwurfswerkzeug können dazu die Methoden der Strukturoptimierung eingesetzt werden. Die Einbindung der Strukturoptimierung in das Entwurfsverfahren kann sowohl innerhalb als auch außerhalb der *Matlabumgebung* realisiert werden.¹⁹⁸



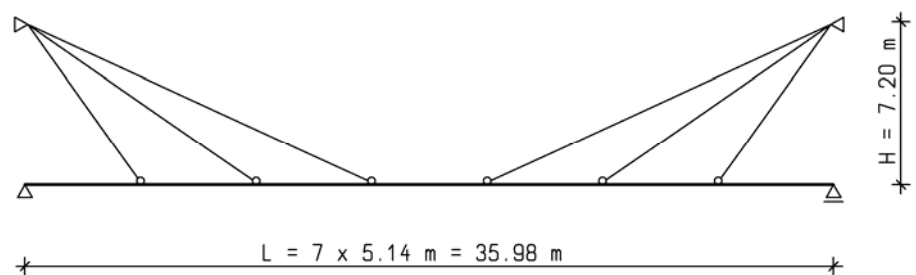
Ausgangsform, Gewicht 1,82 kN



Optimum, Gewicht 0,66 kN

4.2: Beispiel für Strukturoptimierung von Fachwerken¹⁹⁹

Im Folgenden wird das Entwurfsverfahren an dem in der Abbildung 4.3 dargestellten System d3_36 (abgehängter Träger) für den Fall der Verformungsadaption A_w erläutert.



4.3: System d3_36

¹⁹⁸ [Sigmund2001, S. 120 ff.], [Tcherniak/Sigmund2001, S. 179 ff.], [www.topopt.dtu.dk]

¹⁹⁹ [Bletzinger1990, S. 205]

Bei dem gewählten System handelt es sich um einen abgehängten Träger mit einer Stützweite von ca. 36 m und einer Höhe von 7,2 m. Der Träger wird aus Stahl S355 hergestellt. Als Zugglieder werden vollverschlossene Spiralseile (VVS) aus hochfesten Stählen eingesetzt.²⁰⁰ Für die Aktuatorenpositionierung stehen alle Seile zur Verfügung.

4.1.2

Vorbemessung

Für das gewählte System wird eine herkömmliche Vorbemessung des Tragwerks unter Einhaltung der Tragsicherheit durchgeführt. Die Gebrauchstauglichkeit wird zunächst außer Acht gelassen. Die aus der Vorbemessung resultierenden Querschnitte stellen die Eingangswerte für den Entwurf des adaptiven Tragwerks dar.

Die für die Vorbemessung relevanten Lasten sind Eigenlasten g , Schneelasten s und Windlasten w . Diese Einwirkungen wurden nach DIN 1055²⁰¹ ermittelt und haben folgende Werte:

$$\begin{aligned} g_{\text{HTR}} &= 0,46 \text{ kN/m} && \text{gesamte Trägereigenlast} \\ g_{\text{DACH+NTR}} &= 4,87 \text{ kN/m} && \text{mit } g_{\text{DACH}} = 0,50 \text{ kN/m}^2 \\ &&& \text{und Hauptträgerabstand von 9,0 m} \\ s &= 1,25 \text{ kN/m}^2 \\ w_{\text{SOG}} &= -0,30 \text{ kN/m}^2 && \text{für } H \leq 8,0 \text{ m,} \\ &&& \text{relevant für Systeme mit } L = 36,0 \text{ m} \\ w_{\text{SOG}} &= -0,48 \text{ kN/m}^2 && 8,0 \text{ m} \leq H \leq 20,0 \text{ m} \\ &&& \text{relevant für Systeme mit } L = 72/108/144,0 \text{ m} \end{aligned}$$

Für diese Lasten und die Vorspannung P ²⁰² ergeben sich die auf folgender Seite zusammen gefassten Einwirkungskombinationen, die alle vor-dimensioniert und adaptiert wurden.

²⁰⁰ [Pfeifer2004, S. 5-11]

²⁰¹ Angaben zu den Ausgaben s. Literaturverzeichnis

²⁰² Das System wird für die Eigenlast g vorgespannt, $P \rightarrow g$

$$\begin{aligned}
 \text{LF10} &= g + P \\
 \text{LF101} &= g_{\text{HTR}} / \text{Eigenlast Hauptträger (HTR)} \\
 \text{LF102} &= g_{\text{DACH+NTR}} / \text{Eigenlast Dach + Nebenträger (NTR)} \\
 \text{LF100} &= g \text{ ohne } P \text{ (Vorspannung)} \\
 \text{LF20} &= g + P + s \text{ (vollflächig)} \\
 \text{LF2010} &= g + P + s \text{ (vollflächig)} + A_w \text{ (Verformungsadaption)} \\
 \text{LF2020} &= g + P + s \text{ (vollflächig)} + A_M \text{ (Momentenadaption)} \\
 \text{LF30} &= g + P + s/2 \text{ (einseitig)} \\
 \text{LF3010} &= g + P + s/2 \text{ (einseitig)} + A_w \\
 \text{LF3020} &= g + P + s/2 \text{ (einseitig)} + A_M \\
 \text{LF40} &= g + P + w \text{ (Windsog)} \\
 \text{LF4010} &= g + P + w \text{ (Windsog)} + A_w \\
 \text{LF4020} &= g + P + w \text{ (Windsog)} + A_M \\
 \text{LF50} &= g + P + 1.5 * w \\
 \text{LF5010} &= g + P + 1.5 * w + A_w \\
 \text{LF5020} &= g + P + 1.5 * w + A_M \\
 \text{LF60} &= g_{\text{HTR}} + P + 0.8 * g_{\text{DACH+NTR}} + 1.5 * w \\
 \text{LF6010} &= g_{\text{HTR}} + P + 0.8 * g_{\text{DACH+NTR}} + 1.5 * w + A_w \\
 \text{LF6020} &= g_{\text{HTR}} + P + 0.8 * g_{\text{DACH+NTR}} + 1.5 * w + A_M
 \end{aligned}$$

In den Vordimensionierung und der Adaptionberechnung wird nur die Eigenlast des Hauptträgers (g_{HTR}) als Linienlast angesetzt. Alle anderen Lasten werden umgerechnet und als Einzellasten berücksichtigt, wodurch die punktuelle Lasteinleitung durch die Nebenträger erfasst wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden die Ergebnisausgabe auf die Lastfälle LF10, 20/2010, 30/3010 und 40/4010 reduziert.

Lastfälle ohne Adaption:

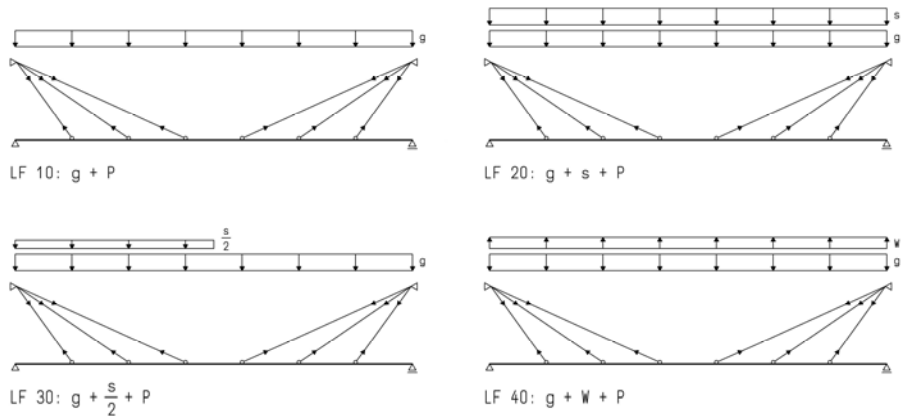
$$\begin{aligned}
 \text{LF10} &= g + P \\
 \text{LF20} &= g + P + s \\
 \text{LF30} &= g + P + s/2 \\
 \text{LF40} &= g + w
 \end{aligned}$$

Lastfälle mit Adaption:

$$\begin{aligned}
 \text{LF2010} &= g + P + s + A_w \\
 \text{LF2020} &= g + P + s + A_M \\
 \text{LF3010} &= g + P + s/2 + A_w \\
 \text{LF3020} &= g + P + s/2 + A_M \\
 \text{LF4010} &= g + P + w + A_w \\
 \text{LF4020} &= g + P + w + A_M
 \end{aligned}$$

4. Entwurf adaptiver
 Dachtragwerke

4.1. Entwurfsverfahren



4.4: Vereinfachte Lastfallübersicht für LF10, LF20/2010, LF 30/3010, LF 40/4010

Die Vorbemessung erfolgt mit Hilfe des Programms „Rahmen“ und einer Bemessungseinheit auf *Excel* Basis. Die Systemvorspannung wird mit dem auf der Basis von *Matlab*, *cal fem* und *optimization toolbox* entwickelten Programm ermittelt.

Optimierungsberechnung
 der Vorspannung P

Die Basis für die Ermittlung der Vorspannung bilden die in Matrizen-schreibweise erfassten Verformungsdaten des Systems ohne Vorspannung, die Verschiebungen aus der Einheitsvorspannung der einzelnen Elemente und die frei definierbaren Freiheitsgrade, deren Verschiebungen minimiert werden sollen.

Die Höhe der Vorspannung P in den einzelnen Tragsystemelementen wird durch die Lösung der unten stehenden Gleichung mit Hilfe von den in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Algorithmen ermittelt.

$$\begin{pmatrix} a_{\text{Start}_P_{P_1}} & a_{\text{Start}_P_{P_2}} & \dots \\ a_{\text{Start}_P_{P_21}} & a_{\text{Start}_P_{P_22}} & \dots \\ a_{\text{Start}_P_{P_31}} & a_{\text{Start}_P_{P_32}} & \dots \\ a_{\text{Start}_P_{P_41}} & a_{\text{Start}_P_{P_42}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{P_1} \\ a_{P_2} \\ a_{P_3} \\ a_{P_4} \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \end{pmatrix} \quad (9)$$

mit

$a_{\text{Start}_P_{P}}$ = Verschiebungen aus Einheitsvorspannung

a_P = Verschiebungen ohne Optimierung

P = Vorspannung

Die daraus resultierenden Querschnitte für das System d3_36 (abgehängter Träger) sind:

- Träger,
 - HEAA 160, $A = 30,40 \text{ cm}^2$, $I_y = 1283 \text{ cm}^4$, $I_z = 479 \text{ cm}^4$,
 $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Schrägseile, VVS-1, (von außen zur Mitte)
 - $d = 18,0 \text{ mm}$ (Sonderquerschnitt), $A = 2,00 \text{ cm}^2$, $E = 160.000 \text{ N/mm}^2$
 - $d = 22,0 \text{ mm}$, $A = 3,08 \text{ cm}^2$, $E = 160.000 \text{ N/mm}^2$
 - $d = 24,0 \text{ mm}$, $A = 3,66 \text{ cm}^2$, $E = 160.000 \text{ N/mm}^2$

4.1.3

Sensitivitätsanalyse

In der Sensitivitätsanalyse wird mittels einer FEM-Berechnung der Einfluss der Längen- oder der Kraftzustandsänderungen einzelner Tragsystemelemente auf die zu adaptierten physikalischen Größen bestimmter Systempunkte (Referenzpunkte, RP bzw. RK im Quellcode) untersucht. Auf dieser Grundlage werden die Positionen und die Art (Druck/Zug) der Aktuatoren festgelegt.

Die Wahl der Referenzpunkte erfolgt in Abhängigkeit von den anzusetzenden Lasten. Für Dachtragwerke lassen sich die Einwirkungen im Allgemeinen als symmetrische und asymmetrische Lastfälle zusammenfassen. Um die Sensitivität des gewählten Tragsystems zu beurteilen, genügt es, drei Referenzpunkte (vertikale Freiheitsgrade des gewählten Systemknotens) zu wählen. In den Viertelpunkten des Systems werden die Referenzpunkte I und III (RP I, RP III) für die asymmetrischen Einwirkungskombinationen angeordnet. In der Mitte des Systems wird der Referenzpunkt II (RP II) für die symmetrischen Belastungen platziert.

Die Sensitivitätsanalyse kann auf drei Arten durchgeführt werden:

- Variante 1:

Die Referenzpunkte RP I, RP II und RP III werden durch vertikale Einheitskräfte belastet, deren Größe in Abhängigkeit von der Lage im Sys-

tem und der relevanten Belastung gewählt wird. Die zur vollständigen Verformungsadaption erforderlichen Dehnungen, Längenänderungen und Arbeiten einzelner Elemente des untersuchten Tragsystems werden als richtungs- und größentreue Balkendiagramme dargestellt. Wenn sinnvoll, sind sie direkt unter den zugehörigen Elementen angeordnet. Richtungstreu bedeutet, dass die durch Längenänderungen der einzelnen Elemente verursachte Vertikalverschiebung des Referenzpunktes, durch in die gleiche Richtung, nach oben oder nach unten zeigenden Diagrammbalken dargestellt wird. Größentreu bedeutet, dass die Diagrammbalken mit einer der erforderlichen Längenänderung bzw. Arbeit adäquaten Länge gezeichnet werden. Ein höherer Balken zeigt einen größeren Aufwand des entsprechenden Tragsystemelements an, der erforderlich ist um die Verformung des Referenzknotens zu kompensieren.

Sollte dabei die Richtung der Vertikalbewegung der Referenzknoten geändert werden, so genügt es, die betreffenden Tragwerkselemente nicht mehr zu verlängern, sondern zu verkürzen. Die Bewegungsrichtung der Referenzknoten wird durch die Art der Beanspruchung (Zug- oder Druckkraft) der einzelnen Elemente bestimmt. Die Ausgabe der Sensitivitätsanalyse beinhaltet die zur Adaption der Referenzpunkte RP I, II, III erforderlichen Dehnungen, Längenänderungen und Arbeiten der einzelnen Elemente.

- Variante 2:

Hier wird eine bestimmte Vertikalverschiebung der Referenzpunkte (zum Beispiel 1cm) vorgegeben. Anschließend wird berechnet mit welcher Kraft bzw. Arbeit die einzelnen Tragwerkelemente gezogen oder gedrückt werden müssen, um diese vorgegebene Verschiebung zu realisieren. Die Ausgabe erfolgt analog der Variante 1.

- Variante 3:

Für die Aktuatorenpositionierung in Frage kommenden Elemente werden mit einer Einzelkraft oder Einheitsarbeit nacheinander gezogen. Die Ausgabe entspricht den zuvor beschriebenen Varianten mit dem Unter-

schied, dass ein höherer Balken einen größeren Einfluss (und nicht einen größeren Aufwand) des entsprechenden Tragsystemelements auf die vertikale Verformung des Referenzknotens bedeutet.

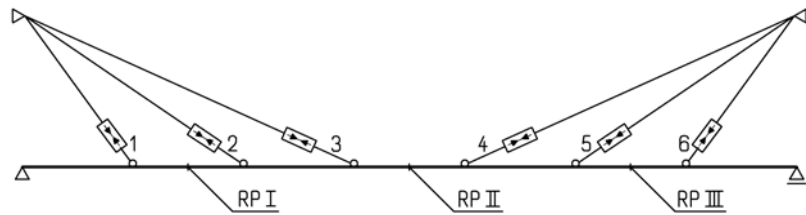
Sensitivitätsbedingungen

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse soll bei allen drei Varianten unter Berücksichtigung der Eigenlasten des Tragwerks und der Systemvorspannung erfolgen. Dadurch wird das reale Tragverhalten der Systeme korrekt erfasst, insbesondere dann, wenn Seile im Tragwerk vorhanden sind. So kann ein Anziehen oder Nachlassen einzelner Elemente in einem gewichtslosen Tragwerk zum Ausfall der Seile und dadurch zum Systemwechsel führen, der in einem realen Tragwerk (mit Eigenlast und Vorspannung) nicht stattfinden würde. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Größe der Einheitskräfte an Referenzpunkten im geeigneten Verhältnis zu der vorhandenen Belastung zu wählen.

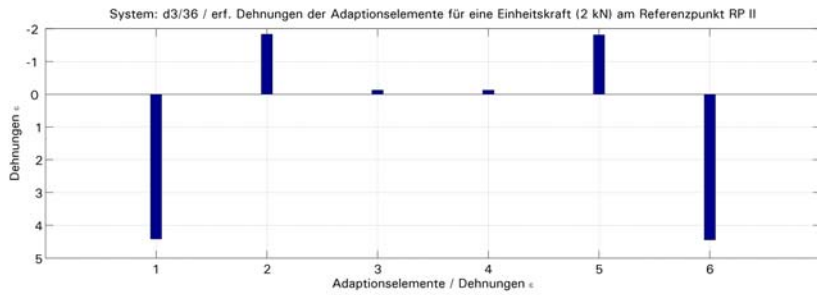
Darüber hinaus wird die Sensitivitätsanalyse um die Ausgabe von Verläufen der Normalkräfte in den Adaptionselementen während des Anpassungsprozesses ergänzt. Dadurch wird die Interpretation der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Systeme mit Stäben, deren Normalkraft infolge einer stetigen Dehnung das Vorzeichen wechselt (zum Beispiel in Fachwerken), vereinfacht.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse lassen sich die erforderliche Adaptionsarbeit, die Systemadaptabilität sowie die vorhandene Systemredundanz und die daraus resultierende Empfindlichkeit auf Systemstörungen beurteilen (s. Kapitel 4.2.5). Darüber hinaus können Aussagen über die zu wählende Aktuatorenart und -position gemacht werden (s. Kapitel 4.1.4).

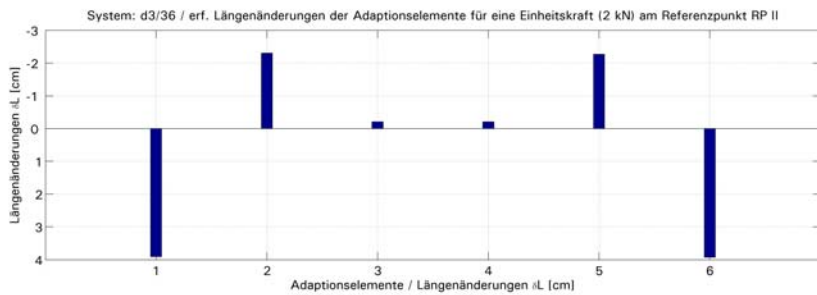
Sensitivitätsanalyse
 Variante 1, System d3_36



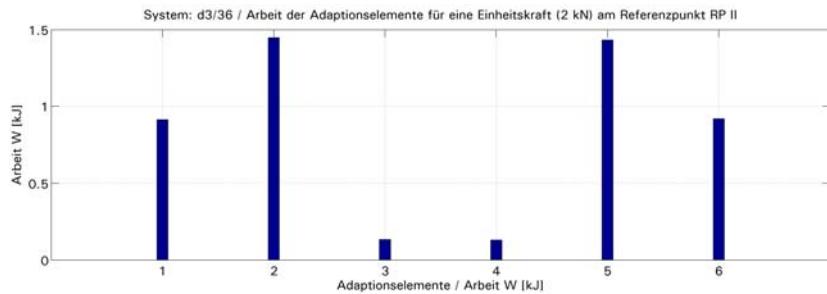
Dehnungen ϵ_A



Längenänderungen δ_A



Arbeiten W



4.5: System d3_36, Sensitivitätsanalyse Variante 1 für eine Einzelkraft am RP II

- Darstellung von Dehnungen, Längenänderungen und Arbeiten:
 Die nach oben gerichteten Dehnungs- bzw. Längenänderungsbalken bedeuten, dass ein Anziehen der zugehörigen Seile erforderlich ist. Je kleiner der Balken ist, desto kleiner sind die erforderlichen Änderungen. Die Darstellung der Arbeiten erfolgt unabhängig davon, ob die einzelnen Elemente angezogen oder nachgelassen werden müssen.

4.1.4

Aktuatorenwahl

Auf der Grundlage der Sensitivitätsanalyse werden die Aktuatoren im Tragsystem positioniert.

Aktuatorenart

Bedingt durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Aktuatoren ist es sinnvoll, die Stell- und Dämpferelemente in Zug, Druck und Zug-Druck beanspruchbare Aktuatoren zu unterteilen. Häufig ist es möglich, durch gezielte Anordnung der Aktuatoren im Tragsystem ihre Beanspruchungsart zu beeinflussen (s. Kapitel 4.2.6).

Lage der Aktuatoren

Die Effizienz der Aktuatoren wird unter Berücksichtigung ihrer physikalischen Eigenschaften (zunächst die maximale übertragbare Kraft und der erreichbare Adaptionsweg) für unterschiedliche Anordnungen im Tragwerk untersucht und miteinander verglichen, wodurch eine optimierte Positionierung der Aktuatoren ermöglicht wird.

Implementierung der Aktuatoren im FE-Modell

In Abhängigkeit von den Materialeigenschaften der Aktuatoren, insbesondere vom linearen oder nicht linearen Dehnungsverhalten, werden zwei Verfahren zur Implementierung der Aktuatoren im FE-Modell vorgeschlagen.

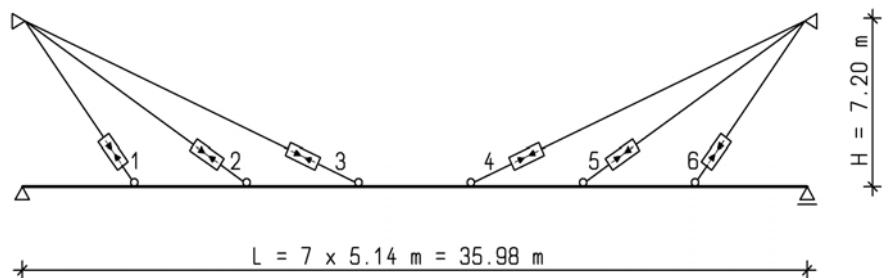
Für den günstigen Fall des linearen Materialverhaltens der Aktuatoren wird eine effektive Dehnsteifigkeit EA_{eff} für den Aktuator und das Tragwerkselement in dem es eingebaut werden soll, gebildet. Dadurch kann auf eine Modellierung des Aktuators mittels FE-Elementen im Rahmen des Vorentwurfs verzichtet werden. Die Berechnung der effektiven Dehnsteifigkeit EA_{eff} erfolgt mit der unten stehenden Formel.

$$EA_{\text{eff}} = \frac{\frac{E_{\text{Aktuator}} \times A_{\text{Aktuator}}}{L_{\text{Aktuator}}} \times \frac{E_{\text{Stab}} \times A_{\text{Stab}}}{L_{\text{Stab}}} \times L_{\text{ges}}}{\left(\frac{E_{\text{Aktuator}} \times A_{\text{Aktuator}}}{L_{\text{Aktuator}}} + \frac{E_{\text{Stab}} \times A_{\text{Stab}}}{L_{\text{Stab}}} \right)} = \frac{k_A \times k_S \times L_{\text{ges}}}{k_A + k_S} \quad (10)$$

Bei einem nichtlinearen Materialverhalten der Aktuatoren wird im Rahmen des ersten Entwurfs ebenfalls mit linearen Materialgesetzen gerechnet. Das nichtlineare Verhalten wird erst in Folgeberechnungen berücksichtigt, in der Aktuatoren als eigene finite Elemente diskretisiert und mit geeigneten Materialgesetzen beschrieben werden.

Bei beiden Verfahren basieren die Simulation und die Steuerung der Längenänderungen der Aktuatoren im FE-Modell auf der Analogie der Dehnungen der Stellelemente zu den aus der Temperaturänderung ΔT resultierenden Verformungen.

Für die weitere Berechnung des Systems d3_36 (abgehängter Träger) werden die Aktuatoren in allen Seilen des Tragsystems positioniert. Das Verhältnis der Steifigkeiten zwischen dem Tragwerk und den Aktuatoren wird mit $\lambda = 1$ (s. Kapitel 2.3.3.1) angesetzt.



4.6: System d3_36, Aktuatorenpositionierung

4.1.5

Adaptionsberechnung

Das Programm zur Adaptionsberechnung besteht aus einer FEM- und einer Optimierungseinheit. Das FEM-Programm wurde auf der Grundlage des Verschiebungsgrößen-Verfahrens unter der Verwendung der *calfe* toolbox entwickelt. Die zur Lösung der Optimierungsaufgaben untersuchten Algorithmen basieren auf folgenden Methoden:

- Methode der kleinsten Quadrate (MKQ, *least squares*). Hier wird ein System dahingehend optimiert, dass die quadratischen Abweichungen

(Fehlersumme) minimiert werden.

- Simplexverfahren von Nelder-Mead. Da diese Methode keine numerisch oder analytisch berechneten Gradienten verwendet, liefert sie häufig für unstetige Funktionen das gewünschte Ergebnis.

Als Optimierungsziele werden die gewünschten Zustände im Tragwerk (Ausgleich bzw. Minimierung der Schnittgrößen und Verformungen) definiert und berechnet. Die Ausgabe beinhaltet: Adaptionen, -arbeit, -energie (s. Kapitel 4.2.1), Schnittgrößen und Verformungsvergleiche der adaptierten und nicht adaptierten Systeme.

Verformungsadaption
 (w-Adaption)

Die Ermittlung der erforderlichen Adaptionen erfolgt analog zur Optimierungsberechnung für die Systemvorspannung P (s. Kapitel 4.1.2). Da eine volle Systemadaption (zum Beispiel die Reduzierung der Systemverformungen auf Null) nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist, wird die Adaptionenberechnung unter anderem um die Eingabe der gewünschten Verschiebungsabweichungen (Toleranzen) der Referenzpunkte ergänzt.

Die Optimierungsberechnung für die Verformungsadaption (w-Adaption) wird nach der folgenden Gleichung durchgeführt:

$$\begin{vmatrix} a_{Start_P_P_{11}} & a_{Start_P_P_{12}} & \dots \\ a_{Start_P_P_{21}} & a_{Start_P_P_{22}} & \dots \\ a_{Start_P_P_{31}} & a_{Start_P_P_{32}} & \dots \\ a_{Start_P_P_{41}} & a_{Start_P_P_{42}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{-P_1} \\ a_{-P_2} \\ a_{-P_3} \\ a_{-P_4} \\ \dots \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{tol_RK_A_1} \\ a_{tol_RK_A_2} \\ a_{tol_RK_A_3} \\ a_{tol_RK_A_4} \\ \dots \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \end{vmatrix} \quad (11)$$

mit

$a_{Start_P_P}$ = Verschiebungen aus Einheitsvorspannung

a_{-P} = Verschiebungen ohne Optimierung

P = Vorspannung

$a_{tol_RK_A}$ = Verschiebungstoleranzen der Referenzpunkte

Momentenadaption
 (M-Adaption)

Das Ziel der Momentenadaption ist die Stütz- und Feldmomente aneinander anzugleichen. Dies erfolgt mit der unten stehenden Gleichung:

$$\begin{aligned} & \max \left[\begin{array}{ccc} M_{P_opt2_{11}} & M_{P_opt2_{12}} & \dots \\ M_{P_opt2_{21}} & M_{P_opt2_{22}} & \dots \\ M_{P_opt2_{31}} & M_{P_opt2_{32}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{array} \right] * \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} + \begin{array}{c} M_{P_opt1_1} \\ M_{P_opt1_2} \\ M_{P_opt1_3} \\ \dots \end{array} \\ & + \min \left[\begin{array}{ccc} M_{P_opt2_{11}} & M_{P_opt2_{12}} & \dots \\ M_{P_opt2_{21}} & M_{P_opt2_{22}} & \dots \\ M_{P_opt2_{31}} & M_{P_opt2_{32}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{array} \right] * \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} + \begin{array}{c} M_{P_opt1_1} \\ M_{P_opt1_2} \\ M_{P_opt1_3} \\ \dots \end{array} = 0 \quad (12) \end{aligned}$$

mit

M_P_opt1 = Basismomente für Momentenadaption

M_P_opt2 = Einheitsmomente für Momentenadaption

P = Vorspannung

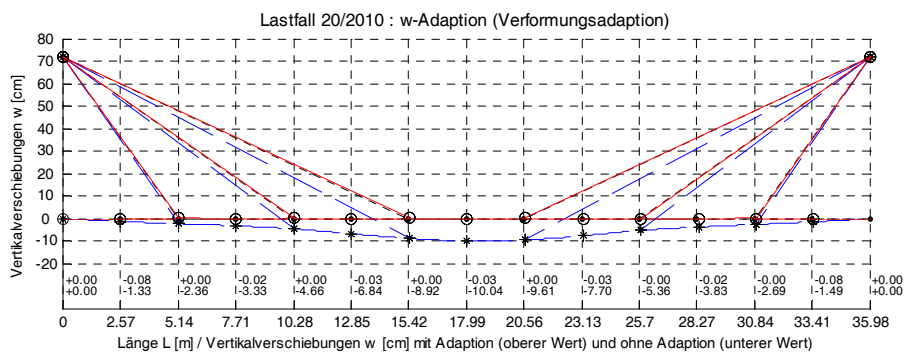
Adaptionsergebnisse

System d3_36, LF 20/2010

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Verformungsadaption (w-Adaption) des Systems d3_36 (abgehängter Träger) für den Lastfall LF20/2010 dargestellt. Die Berechnungen erfolgten unter der Annahme der Bedingungen des Grenzfalls β (s. Kapitel 4.2.1 Adaptionsarbeit).

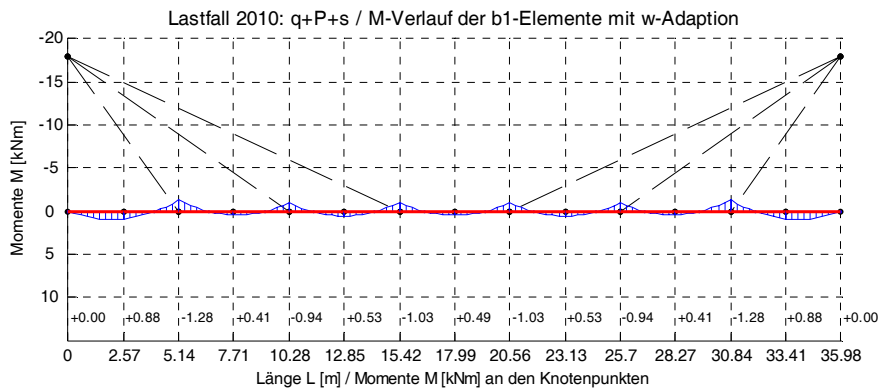
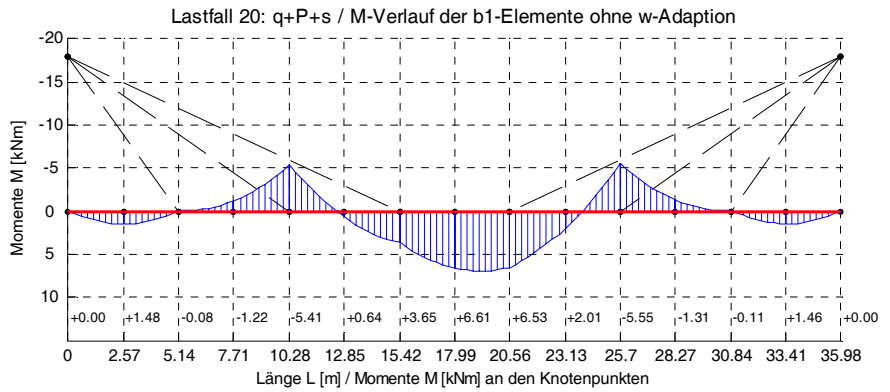
Vertikalverformungen

(Grenzfall β , s. Kapitel 4.2.1)

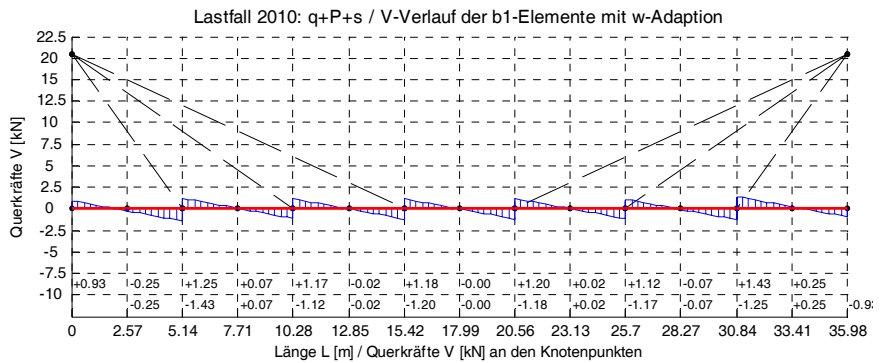
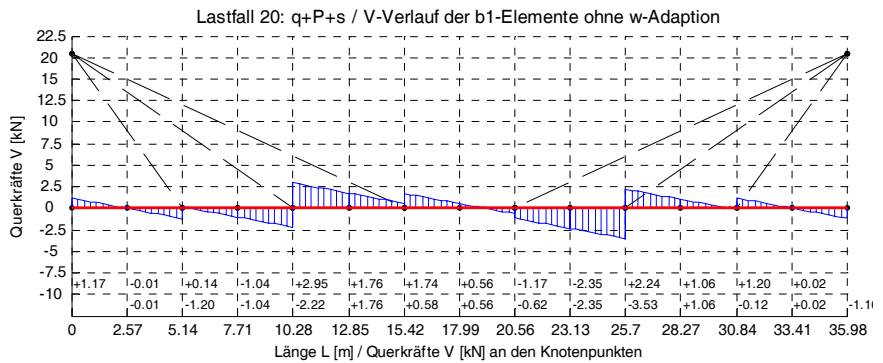


4.7: System d3_36, Vertikalverformungen, LF 20/2010

Biegemomente M
 (Grenzfall β)

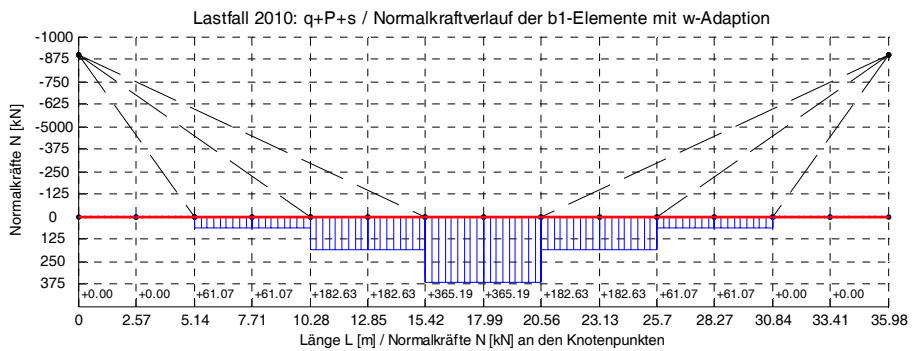
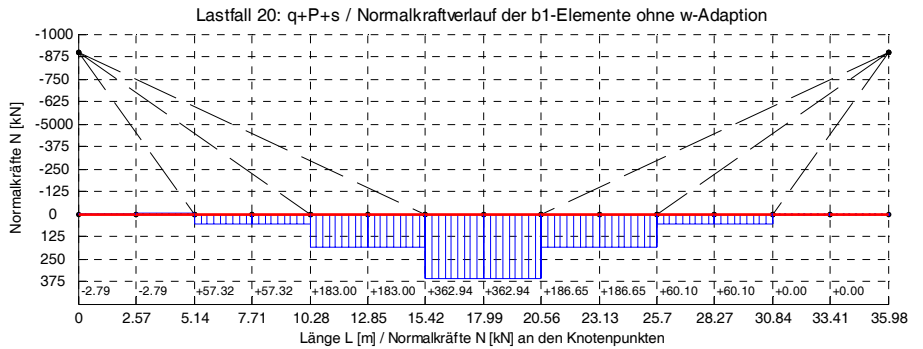


Querkräfte V
 (Grenzfall β)

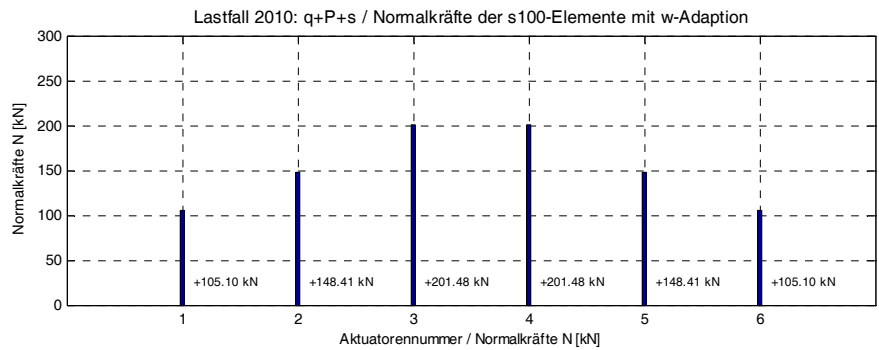
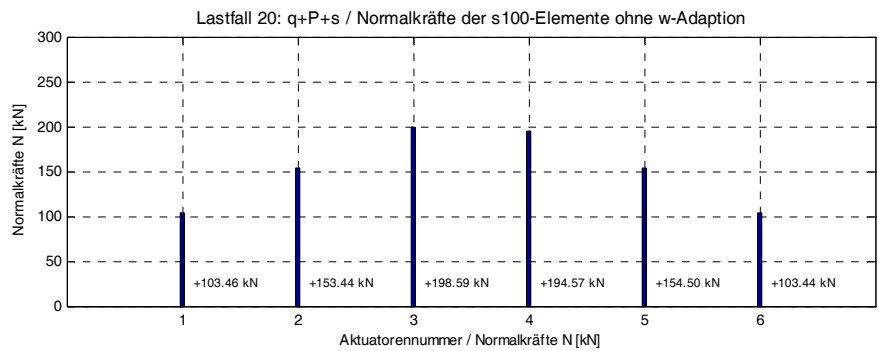


4.8: System d3_36, Biegemomente M [kNm] und Querkräfte V [kN], LF 20/2010

Normalkräfte N im Träger
 (Grenzfall β)

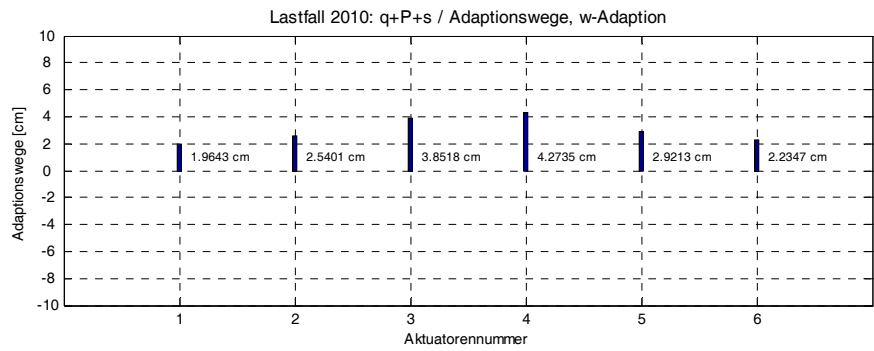
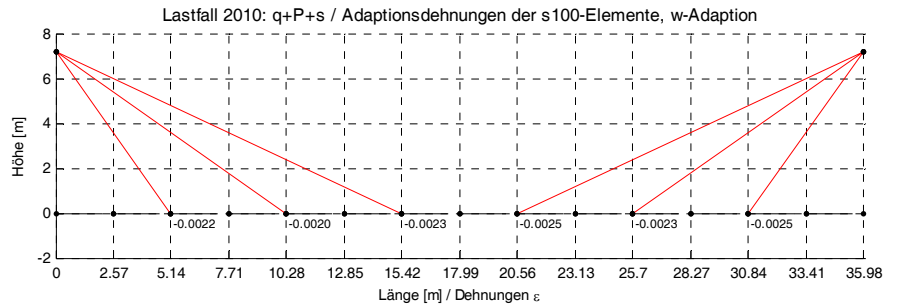


Normalkräfte N
 in den Abspannungen
 (Grenzfall β)



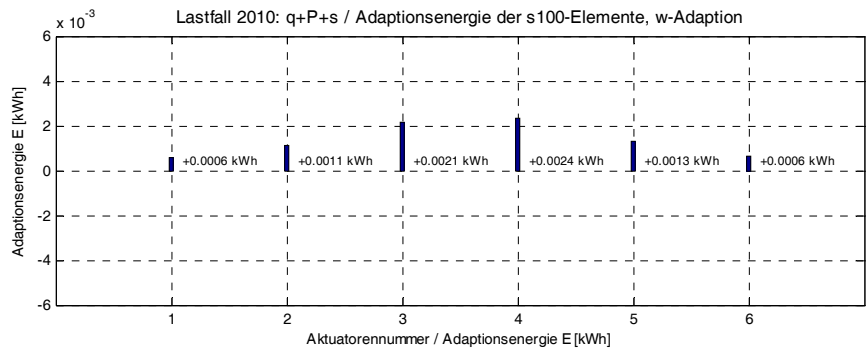
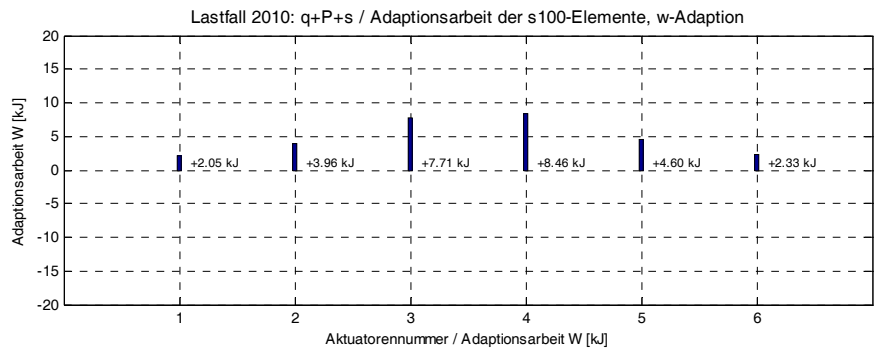
4.9: System d3_36, Normalkraft im Träger und in den Abspannungen, LF 20/2010

Adaptionsdehnungen ε_A
 und -stellwege δ_A
 (Grenzfall β)



4.10: System d3_36, Adaptionsdehnungen und -stellwege, LF 20/2010,

Adaptionsarbeit, -energie
 (Grenzfall β)



4.11: System d3_36, Adaptionsarbeit und -energie, LF 20/2010

Die Ergebnisse zeigen, dass das System d3_36 sich gut adaptieren lässt: Die Vertikalverformungen konnten von max. $w = -10,04$ cm (LF20) auf max. $w = -0,03$ cm (LF2010) reduziert werden. Die Veränderungen der Schnittgrößen im Träger, Verringerung der max. Knotenmomente von 6,61 kNm auf 0,88 kNm und der min. Momente von -5,55 kNm auf -1.28 kNm bei gleichzeitig nur geringfügig gestiegenen Normalkräften von 362,94 auf 365,19 kN, bringen Vorteile von ca. 20% hinsichtlich der Trägerbeanspruchung mit sich. Interessant dabei ist, dass die adaptierten Schnittgrößen im Träger gleich den Schnittgrößen im Lastfall LF10 = g + P sind und somit der Anteil der Schneelast vollständig kompensiert werden kann.

Um diese Veränderungen im System zu realisieren, sind nach der hier dargestellten Grenzbetrachtung β^{203} Adaptionen zwischen 1,96 cm und 4,27 cm und eine gesamte Adaptionsarbeit von 29,11 kJ²⁰⁴ erforderlich.

4.1.6

Nachrechnung nach
Theorie höherer Ordnung

Das für den Entwurf adaptiver Dachtragwerke entwickelte Berechnungsverfahren basiert auf der Theorie I. Ordnung. Dies hat den Vorteil der Anwendbarkeit des Superpositionsprinzips. Um die Richtigkeit der Optimierungsberechnungen kontrollieren zu können und die Auswirkungen der Nichtlinearitäten infolge von Tragwerksverformungen und infolge

²⁰³ s. Kapitel 4.2.1

²⁰⁴ Da die Adaptionen eine Verformung des Tragwerks entgegen der Richtung äußerer Einwirkungen verursacht, ist sie meistens negativ. Bei der Darstellung der Ergebnisse der Adaptionenberechnung wird das negative Vorzeichen außer Acht gelassen.

von Stellwegänderungen der Aktuatoren²⁰⁵ zu berücksichtigen, werden Nachrechnungen mit dem Programm *Maple* und einem externen FEM-Programm *Rahmen*²⁰⁶ durchgeführt. Um den Datentransfer mit dem Programm *Rahmen* zu automatisieren, wurde eine bidirektionale Schnittstelle (C + +) entwickelt.²⁰⁷

²⁰⁵ s. Kapitel 4.2.1

²⁰⁶ *Rahmen* für Windows 9x/NT/2000/NT © 2005 Guido Ludescher

²⁰⁷ [Ritzkova2005]

4.2

Ausgewählte Aspekte
 adaptiver Dachtragwerke

Das Potenzial der adaptiven Dachtragwerke wird an unterschiedlichen Systemen überprüft. Im Einzelnen werden folgende Aspekte untersucht: Adaptionsarbeit, Einfluss der Veränderung der Stützweite, Vergleich unterschiedlicher Tragsysteme, Adaptabilität und Redundanz ausgewählter Tragsysteme, Maßnahmen zur Beeinflussung der Aktuatorenbeanspruchung sowie Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit adaptiver Dachtragwerke (s. Abbildung 4.12).

Adaptionsaspekte	untersuchte Tragsysteme			
Adaptionsarbeit (Kap. 4.2.1 und 4.2.2, S. 105 ff.)	c2_12 			
Stützweiteneinfluss (Kap. 4.2.3, S. 120 ff.)	d3_36 	d3_72 	d3_108 	d3_144
unterschiedliche Tragsysteme (Kap. 4.1, 4.2.4, S. 96 ff. und 130 ff.)	d3_36 	d1_36_USP 	d1_36_SPR 	c2_36
Adaptabilität, Systemredundanz (Kap. 4.2.5, S. 143 ff.)	d1_36_V1 	d1_36_V2 	d3_36_V1 	d3_36_V2
Aktuatorenbeanspruchung (Kap. 4.2.6, S. 148 ff.)				
Sicherheit (Kap. 4.2.7, S. 150 ff.)	ohne Adaption $\gamma_F \approx 1,10$	mit Adaption $\gamma_F \approx 1,35/1,50$	ohne Adaption $\gamma_F \approx 1,35/1,50$	mit Adaption $\gamma_F \approx 1,35/1,50$

4.12: Übersicht der untersuchten Aspekte adaptiver Dachtragwerke und zugehörige Tragsysteme

4.2.1

Adaptionsarbeit

Als Adaptionsarbeit $W_{\text{Adaption}}^{208}$ wird die Arbeit bezeichnet, die zum Erreichen eines Adaptionsziels (Minimierung der Verformungen oder der Schnittgrößen) erforderlich ist.

Einerseits handelt es sich bei der Adaptionsarbeit um die Arbeit der adaptierenden Kräfte. Andererseits ist die Adaptionsarbeit die Arbeit, um deren Betrag sich das innere Potential des Tragwerks $\Delta\Pi_{\text{innen}}$ während der Adaption ändert.

$$W_{\text{Adaption}} = \sum_k W_{\text{außen}} = \int F_{\text{Adaption}} \cdot du_{\text{Adaption}} = - \sum \Delta\Pi_{\text{innen}} \quad (13)$$

mit Potential der inneren Kräfte:

$$-\Pi_{\text{innen}} = \frac{1}{2} \int_l \frac{1}{EA} \cdot N^2 dx + \frac{1}{2} \int_l \frac{1}{EI} \cdot M^2 dx \quad (14)$$

für Beanspruchung durch Normalkräfte N und Biegemomente M .

Dabei wird die Formänderungsarbeit der elastischen, inneren Kräfte W_{innen} im belasteten Tragwerk als innere Energie gespeichert (mit negativen Vorzeichen). Sie wird bei Entlastung freigegeben. Dieses Arbeitsvermögen bezeichnet man als Potenzial Π_{innen} der inneren Kräfte oder als Formänderungsenergie. In einem Adaptionsvorgang wird das Potenzial Π_{innen} der inneren Kräfte um den Betrag $\Delta\Pi_{\text{innen}}$ verändert.

Während der Adaption wird die Geometrie des Grundsystems verändert. Daraus resultiert, dass die Ausgangslängen der adaptierten Balken und Stäbe für die Betrachtung der Adaptionsvorgänge nicht konstant sind, sondern immer neu definiert werden müssen. Ein Adaptionsvorgang kann als mehrere nacheinander folgende statische Zustände mit jeweils

²⁰⁸ Um den Unterschied zu der Arbeit äußerer Lasten $W_{\text{außen}}$ eindeutig zu kennzeichnen wird in Kapitel 4.2.1 die erforderliche Adaptionsarbeit mit W_{Adaption} bezeichnet.

neuer Ausgangsgeometrie und neuen Schnittgrößen beschrieben werden.

Eine herkömmliche statische Analyse mit konstanten Ausgangslängen der Balken und Stäbe ist nicht geeignet, um Adaptionsvorgänge zu beschreiben. Vielmehr müssen die Auswirkungen von Geometrieänderungen des unbelasteten Tragwerks untersucht und beurteilt werden, um das Tragverhalten eines adaptiven Tragwerks zu erfassen. Darüber hinaus müssen mögliche Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, die sowohl aus den Aktuatorendehnungen als auch aus den Systemverformungen (Theorie II. Ordnung oder höher) resultieren können. Insbesondere können die Längenänderungen der Aktuatoren sehr groß sein und der Annahme der Theorie I. Ordnung nicht genügen.

In diesem Zusammenhang wird die Adaptionsarbeit im Wesentlichen durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Zeitpunkt der Adaption und der Lastaufbringung (Einfluss der Geometrie des unbelasteten Tragwerks)
- Größe der erforderlichen Aktuatorendehnungen und Größe der durch die äußeren Lasten verursachten Tragwerksverformungen

4.2.1.1
Einfluss des Zeitpunktes
der Adaption und
der Lastaufbringung

Zunächst sind der Zeitpunkt der Lastaufbringung und der Zeitpunkt der Adaption für die Größe der Adaptionsarbeit eines zuvor definierten Systems von Bedeutung. Demnach kann ein Tragsystem prinzipiell auf drei Arten adaptiert werden (s. Abbildung 4.13):

- Adaption **vor der** Lastaufbringung (**Grenzfall α**)
- Adaption **nach der** Lastaufbringung (**Grenzfall β**)
- Adaption **während** der Lastaufbringung

Adaption **vor der**
Lastaufbringung,
Grenzfall α

Im Grenzfall α wird die Geometrie des Tragwerks bereits vor der Lastaufbringung modifiziert (vorverformt, überhöht). Nach der vollständigen, allmählichen Lastaufbringung erreicht das Tragwerk die als Adaptionsziel

definierte Geometrie (w -Adaption) bzw. Schnittgrößen (M -Adaption).
In diesem Fall ist die Adaptionenarbeit, $W_{\text{Adaption},\alpha}$ am geringsten (s. Kapitel 4.2.2.2). Für statisch bestimmte Systeme ist sogar eine Systemanpassung ohne Arbeit möglich, wenn das Tragwerk als gewichtlos angenommen wird.

Adaption **nach** der
Lastaufbringung,
Grenzfall β

In der Grenzbetrachtung β wird das System erst nach der vollständigen Lastaufbringung adaptiert, d. h. die bereits aufgebrachte Last wird „hochgefahren“. In diesem Fall ist die erforderliche Adaptionenarbeit am größten. Die zugehörige Adaptionenarbeit wird mit $W_{\text{Adaption},\beta}$ bezeichnet. In der Praxis wird dieser Grenzfall zum Beispiel für Systeme relevant sein, deren Aktuatoren im Vergleich zur Geschwindigkeit der Lastaufbringung langsam sind und nur nachgefahren werden können. Außerdem entspricht der Grenzfall β dem Tragwerkszustand nach einem Ausfall des Adaptionensystems unter Last (zum Beispiel Schnee).

Adaption **während** der
Lastaufbringung

Zwischen diesen beiden Grenzfällen liegt die dritte Art der Adaption, bei der die Systemgeometrie bereits während der Lastaufbringung (im Idealfall zeitgleich) modifiziert wird. Die dafür erforderliche Adaptionenarbeit wird als W_{Adaption} bezeichnet.

Arbeit äußerer Lasten

Im Zusammenhang mit diesen Grenzfallbetrachtungen wird zwischen der Arbeit während bzw. nach der Adaption allmählich aufgebrachter, $W_{\text{außen}}^{209}$ (bzw. $W_{\text{außen},\alpha}$) und bereits vor der Adaption vollständig aufgebrachter äußerer Lasten $W_{\text{außen},\beta}$ unterschieden.

Für die Arbeit allmählich aufgebrachter, äußerer Lasten gilt:

$$W_{j, \text{außen}} = \int_0^{u_j} F_j \cdot du = \frac{1}{2} \cdot F_j \cdot u_j \quad (15)$$

für eine Last j

²⁰⁹ bzw. $W_{\text{außen},\alpha}$

und

$$W_{\text{außen}} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k F_j \cdot u_j \quad (16)$$

für k allmählich gesteigerte Lasten

mit

F = äußere Last (Einwirkung)

u = Verschiebung

Der Faktor $\frac{1}{2}$ resultiert aus der Proportionalität von Last und Verschiebung infolge der Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens.

Für die Betrachtung der Adaptionarbeit ist es wichtig, ob sich die äußeren Lasten während der Adaption ändern (Adaption während der Lastaufbringung, Grenzfall α) oder nicht (Grenzfall β). Grundsätzlich sind äußere Lasten und die aus der Adaption resultierenden Verschiebungen nicht proportional.

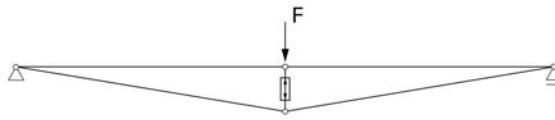
Im Grenzfall β bei unveränderter äußerer Last gilt:

$$W_{\text{außen}, \beta} = \sum_{j=1}^k F_j \cdot u_j \quad (17)$$

für k auf das Tragwerk bereits einwirkende Lasten.

Hier muss das Tragwerk aus seiner verformten Lage, ggf. unter Volllast, angehoben werden. Darüber hinaus ist die Arbeit bereits aufgebracht, äußerer Lasten für Betrachtungen relevant, die für Tragwerke nach einem Ausfall des Adaptionssystems durchgeführt werden.

Im Sonderfall sehr kleiner Adaptionswege können die kinematischen Vereinfachungen der Theorie I. Ordnung vorgenommen werden. Im Grenzfall α bzw. bei der Adaption während der Lastaufbringung kann daher näherungsweise eine proportionale Beziehung zwischen äußerer Last und Adaptionsverformung angenommen werden.

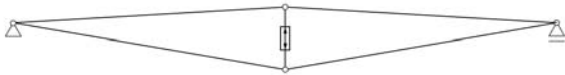


Grenzfall α : Adaption **vor** der Lastaufbringung

Grenzfall β : Adaption **nach** der Lastaufbringung

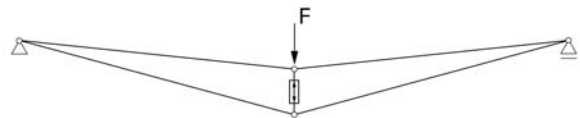
Schritt $\alpha 1$:

Die Systemgeometrie wird modifiziert (adaptiert).
 (Die Obergurtstäbe tragen die Last F mit ab.)



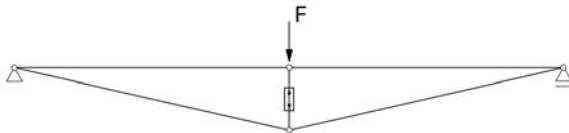
Schritt $\beta 1$:

Die Last F wird vollständig aufgebracht.



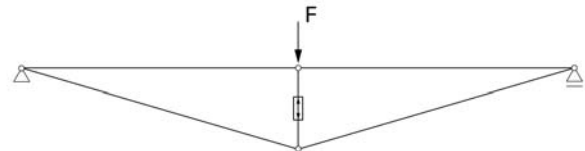
Schritt $\alpha 2$:

Die Last F wird vollständig aufgebracht.
 Erforderliche Adaptionenarbeit: $W_{Adaption,\alpha}$
 für statisch bestimmte Tragsysteme: $W_{Adaption,\alpha} = 0$ kJ



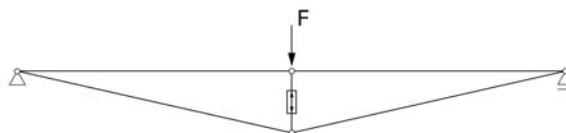
Schritt $\beta 2$:

Das System wird vollständig adaptiert.
 Erforderliche Adaptionenarbeit: $W_{Adaption,\beta}$



Adaption **während** der Lastaufbringung

Erforderliche Adaptionenarbeit: $0 < W_{Adaption} < W_{Adaption,\beta}$



4.13: Adaptionenarten am Beispiel eines Fachwerksystems

4.2.1.2

Einfluss der Aktuatoren-
dehnungen und der Trag-
werksverformungen

Die Längenänderung in einem Aktuator setzt sich aus dem Stellweg δ_A und elastischer Verlängerung u zusammen. Bezogen auf die aktuelle Länge $(l_{A,0} + \delta_A)$ beträgt die elastische Dehnung eines Aktuators:

$$\varepsilon_{el} = \frac{u}{l_{A,0} + \delta_A} \quad (18)$$

mit

u = elastische Verschiebung u

$l_{A,0}$ = Aktuatorenlänge vor der Adaption

δ_A = Aktuatorenstellweg

Bezogen auf die Ausgangslänge des Aktuators lässt sich mit dem Aktuatorenstellweg eine Aktuatorendehnung definieren:

$$\varepsilon_{Aktuator} = \frac{\delta_A}{l_{A,0}} \quad (19)$$

Aus der Gleichung (18) für die elastische Dehnung eines Aktuators ist ersichtlich, dass das Verhalten der Aktuatoren bezüglich des Stellwegs δ_A grundsätzlich nichtlinear ist. Allerdings ist das nichtlineare Aktuatorenverhalten nicht mit der Nichtlinearität der Verschiebung u nach der Theorie II. Ordnung zu verwechseln. Vielmehr müssen beide Formen von Nichtlinearität gleichzeitig betrachtet werden.

Wird das Materialverhalten der Aktuatoren für den Entwurf als linear angenommen, so lässt sich das Verhalten der adaptiven Tragwerke in Abhängigkeit von der Größe der zum Erreichen eines Adaptionenziels erforderlichen Aktuatorendehnungen und von der Größe der durch die äußeren Lasten verursachten Tragsystemverformungen auf vier Grundfälle zurückführen:

- **Kleine Aktuatorendehnungen** ($\bar{\delta}_A$ klein) und **kleine Systemverformungen** (u klein) infolge äußerer Lasten
→ Die Annahme einer linearen Spannungs-Dehnungsbeziehung für die eingesetzten Aktuatoren und eine Systemberechnung nach der Theorie I. Ordnung liefern für den Entwurf ausreichend genaue Ergebnisse.

- **Kleine Aktuatorendehnungen** ($\bar{\delta}_A$ klein) und **große Systemverformungen** (u groß) infolge äußerer Lasten
→ Das nichtlineare Verhalten der Aktuatoren infolge Stellwegänderung $\bar{\delta}_A$ kann für den Entwurf außer Acht gelassen werden. Eine Berechnung des Tragsystems nach der Theorie I. Ordnung soll durch eine Nachrechnung nach der Theorie II. Ordnung (oder höher) überprüft werden.

- **Große Aktuatorendehnungen** ($\bar{\delta}_A$ groß) und **kleine Systemverformungen** (u klein) infolge äußerer Lasten
→ Eine nichtlineare Betrachtung des Aktuatorenverhaltens infolge Stellwegänderung $\bar{\delta}_A$ ist erforderlich.

- **Große Aktuatorendehnungen** ($\bar{\delta}_A$ groß) und **große Systemverformungen** (u groß) infolge äußerer Lasten
→ Das nichtlineare Verhalten der Aktuatoren muss berücksichtigt werden. Der Einfluss der Theorie II. Ordnung muss untersucht werden.

Die Adaptionsdehnungen bzw. -wege der Aktuatoren können mit dem Prinzip der virtuellen Arbeit bestimmt werden.

Allgemein, für kleine und große Aktuatorendehnungen, kann die Adaptionarbeit eines Aktuators aus dem Integral der Aktuatorenkraft über seine Längenänderung berechnet werden:

$$W_{Adaption} = \int_l^{l+\delta} N_j \cdot dl \quad (20)$$

Bei kleinen Aktuatorendehnungen kann näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen Aktuatorenkraft und Stellweg δ_A angenommen werden. In diesem Fall kann die Adaptionarbeit von n Aktuatoren im Tragsystem für die Lastfälle vor der Adaption und nach der Adaption wie folgt ausgedrückt werden:

$$W_{Adaption} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (N_{j, \text{ vor Adaption}} + N_{j, \text{ nach Adaption}}) \cdot \delta_{A,j} \quad (21)$$

Sonderfall: statisch bestimmte Systeme mit kleinen Modifikationen

In dem Sonderfall eines statisch bestimmten Tragwerks, für dessen Adaption sowohl die erforderlichen Aktuatorendehnungen als auch die durch die äußeren Lasten verursachten Tragsystemsverformungen klein sind, wird das Potenzial Π_{innen} der inneren Kräfte durch die Adaption nicht wesentlich verändert ($\Delta \Pi_{\text{innen}} \approx 0$). Aus diesem Grund kann die Summe der Adaptionarbeiten gleich der Summe der äußeren Arbeiten angenommen werden, die durch die äußeren Lasten auf dem Weg der durch die Adaption verursachten Verformung verrichtet werden:

$$W_{Adaption} = \sum_{j=1}^k W_{j, \text{ außen}} \quad (22)$$

bzw.

$$W_{Adaption, \beta} = \sum_{j=1}^k W_{j, \text{ außen}, \beta} \quad (23)$$

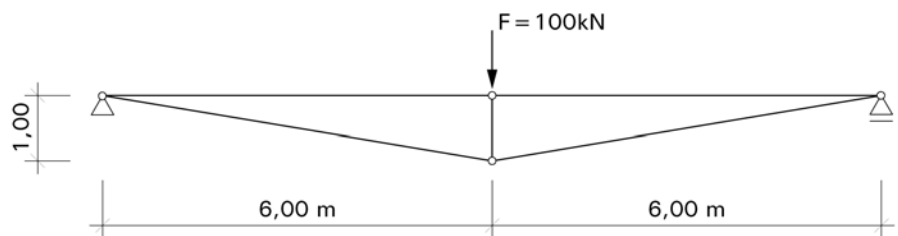
4.2.1.3

Berechnung der
 Adaptionsarbeiten für das
 Fachwerkssystem c2_12

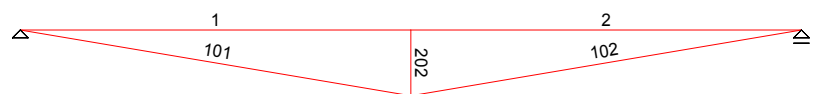
Im Folgenden werden Grenzbetrachtungen für die Adaptionsarbeiten eines einfachen, statisch bestimmten Tragwerks für quasistatische Lasten und unter Vernachlässigung von Energieverlusten durchgeführt.

Als Grundsystem dient das in Abbildung 4.14 dargestellte Fachwerk (System c2_12). Durch die Adaption sollen die Vertikalverformungen des Tragwerks am Knoten 2 auf Null minimiert werden. Die Eigenlast des Tragwerks wird vernachlässigt.

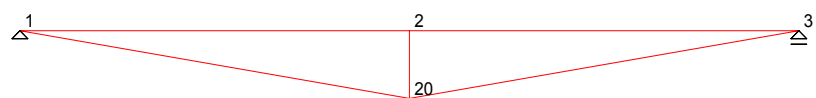
System c2_12



Stabnummern



Knotennummern



4.14: Statisch bestimmtes System c2_12, Geometrie, Stab- und Knotenübersicht

Die Stützweite des Grundsystems beträgt $L = 12,0$ m, die Systemhöhe liegt bei $H = 1,0$ m.

Die Querschnittswerte für die einzelnen Tragsystemelemente sind:

Obergurt, Stab 1 und 2:

$$E = 2,0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

$$A_1 = 100 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$EA_1 = 2,0 \times 10^6 \text{ kN}$$

Untergurt, Stab 101 und 102:

$$E = 2,0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

$$A_{101} = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$EA_{101} = 2,0 \times 10^5 \text{ kN}$$

Pfosten, Stab 202:

$$E = 2,0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

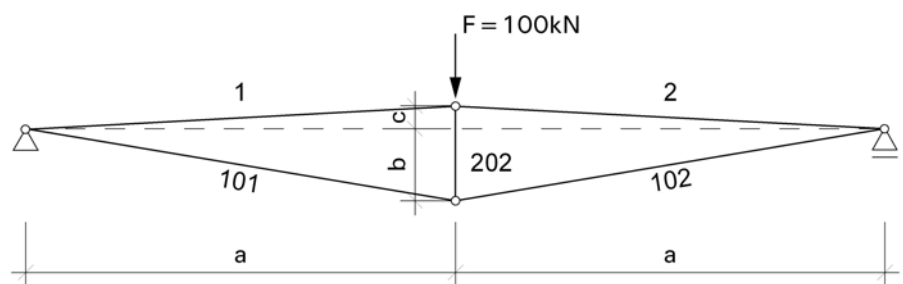
$$A_{202} = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$EA_{202} = 2,0 \times 10^5 \text{ kN}$$

Für das Fachwerksystem werden folgende Grenzfälle betrachtet:

- **Grenzfall α : Adaption vor der Lastaufbringung**

Die Schnittgrößen und die Adaptionsarbeit werden nach der Theorie I. Ordnung an einem System mit einer modifizierten Geometrie (s. Abbildung 4.15) ermittelt. Dabei wird das Fachwerksystem entweder durch eine Verkürzung der Untergurtstäbe 101 und 102 (Lastfall LF2) oder durch eine Verlängerung des Pfostens 202 (Lastfall LF3) bereits vor der Lastaufbringung so überhöht, dass nach der Belastung das Fachwerk die Geometrie des Grundsystems (s. Abbildung 4.14) einnimmt.



4.15: Fachwerksystem c2_12, Grenz betrachtung A, Geometrie

- **Grenzfall β : Adaption nach der Lastaufbringung**

Dieser Betrachtung wird das unverformte Grundsystem (s. Abbildung 4.14) zugrunde gelegt. Die Schnittgrößen und die Adaptionsarbeit werden ebenfalls nach der Theorie I. Ordnung und ohne

Berücksichtigung der Formänderungen des Tragwerks während des Adaptionvorgangs berechnet. Das System wird erst nach der vollständigen Lastaufbringung adaptiert.

Zwischen diesen beiden Grenzfällen ist die Systembetrachtung unter Berücksichtigung einer nichtlinearen Aktuatorenkraft-Stellwegbeziehung der Aktuatoren positioniert.

Lastfallübersicht

Für die einzelnen Grenzbetrachtungen ergeben sich folgende Lastfälle:

Grenzfall α :

- LF1: Systemüberhöhung ohne Last $F = 100$ kN. Dabei wird das System entweder durch Verkürzung der Untergurtstäbe 101 und 102 (relevant für Lastfall LF2) oder durch Verlängerung des Pfostens 202 (relevant für Lastfall LF3) modifiziert.
- LF2: Einwirkung durch Last $F = 100$ kN auf das mit den Untergurtstäben 101 und 102 überhöhte System.
- LF3: Einwirkung durch Last $F = 100$ kN auf das mit dem Pfosten 202 überhöhte System.

Grenzfall β :

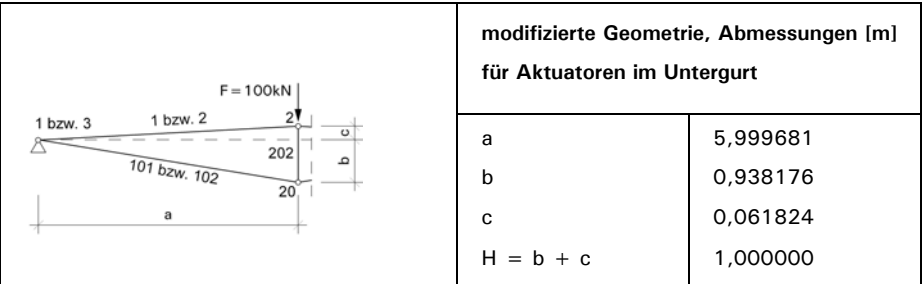
- LF1: Einwirkung durch Last $F = 100$ kN.
- LF2: Einwirkung durch Last $F = 100$ kN, vollständige Verformungsadaption des Knotens 2 mit Aktuatoren im Untergurt (Stab 101, 102).
- LF3: Einwirkung durch Last $F = 100$ kN, vollständige Verformungsadaption des Knotens 2 mit einem Aktuator im Pfosten (Stab 202).

Für die Analyse der Adaptionsarbeiten werden die Begriffe der Vergleichsadaptionsarbeiten W'_{Adaption} und W''_{Adaption} und die dazugehörigen Lastfälle LF2' und LF3' eingeführt. Mit Hilfe der Vergleichsadaptionsarbeit W'_{Adaption} werden die Adaptionsarbeiten der einzelnen Grenzfäl-

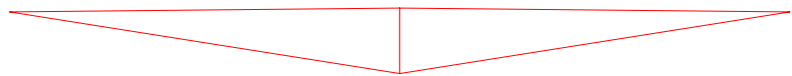
le gegenüber gestellt, die für die Systemanpassung während einer quasi-statischen Lastaufbringung erforderlich sind. Zum Beispiel im Grenzfall α handelt es sich bei der Vergleichsadaptionsarbeit W'_{Adaption} um die Arbeit, die notwendig wäre, um das modifizierte System während einer allmählichen Lastaufbringung in die überhöhte Lage zu adaptieren. In diesem Fall stellt die modifizierte Geometrie (s. Abbildung 4.15) das Ziel für die Adaption dar. Das System ist dann vollständig adaptiert, wenn die Vertikalverformung des Knotens 2 bezogen auf seine modifizierte Lage unter der Belastung gleich Null ist. Analog wird die Vergleichsadaptionsarbeit W''_{Adaption} als Arbeit definiert, die für die Adaption des Systems nach der vollständigen Lastaufbringung erforderlich ist.

Im Folgenden werden die Schnittgrößen der Grenzbetrachtung α in den Abbildungen 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 und der Grenzbetrachtung β in den Abbildungen 4.22, 4.23, 4.24 dargestellt. Ein Vergleich von Ergebnissen der Grenzbetrachtungen folgt in Abbildung 4.25. Darin ist bereits die nichtlineare Betrachtung der elastischen Dehnungen infolge Stellwegänderungen, s. Abbildung 4.26, berücksichtigt.

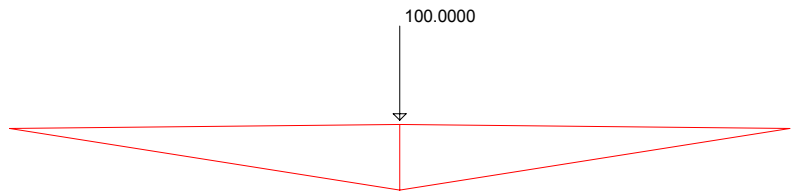
**Grenzfall α , Th. I. Ord.,
 Aktuatoren im Untergurt**



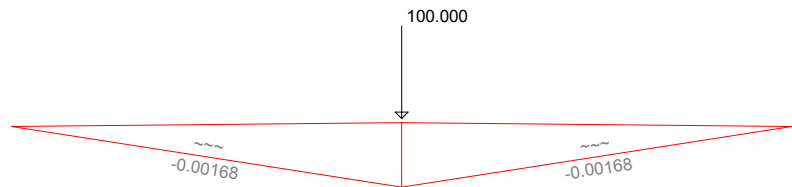
LF1: Geometriemodifikation ohne
 F = 100 kN



LF2: F = 100 kN

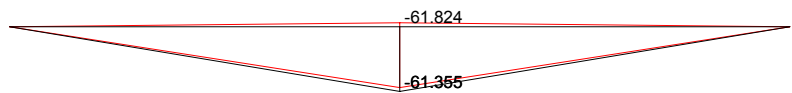


LF2': F = 100 kN und Adaption
 mit Aktuatoren im Untergurt
 (Stab 101, 102)



4.16: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\epsilon_{Adaption,\alpha}$

LF2:
 Vertikalverformung w [mm]

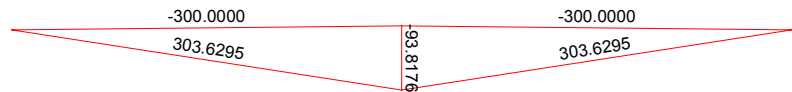


LF2' (Aktuatoren im Untergurt):
 Vertikalverformung w [mm]



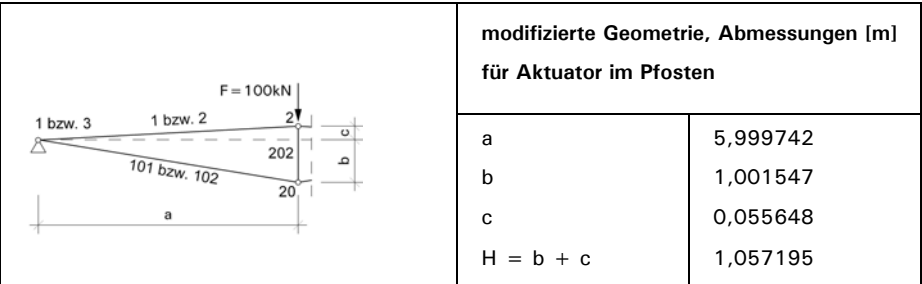
4.17: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Vertikalverformungen w [mm] für LF2 und LF2'

LF2 und LF2': Normalkräfte [kN]

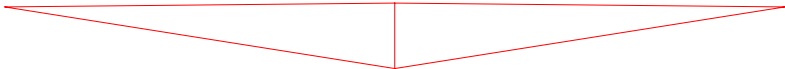


4.18: Fachwerk , Grenzfall α , Normalkräfte N [kN] für LF2 und LF2'

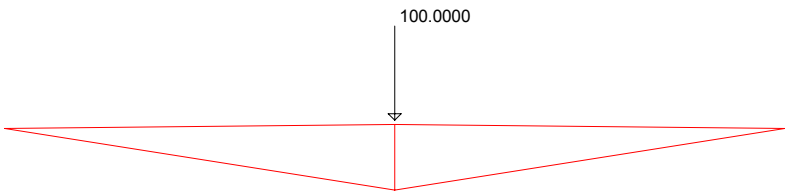
**Grenzfall α , Th. I. Ord.,
 Aktuator im Pfosten**



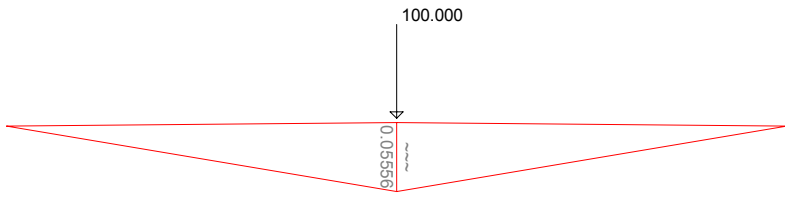
LF1: Geometriemodifikation ohne
 F = 100 kN



LF3: F = 100 kN

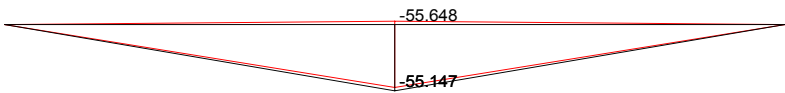


LF3': F = 100 kN und Adaption
 mit Aktuator im Pfosten
 (Stab 202)



4.19: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\epsilon_{Adaption,\alpha}$

LF3:
 Vertikalverformung w [mm]

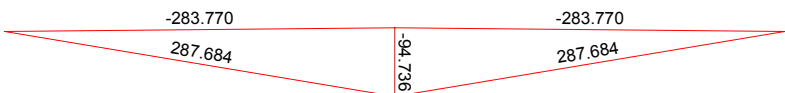


LF3' (Aktuatoren im Untergurt):
 Vertikalverformung w [mm]



4.20: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Vertikalverformung w [mm] für LF3 und LF3'

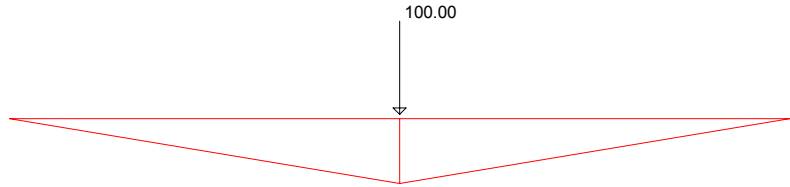
LF3 und LF3': Normalkräfte [kN]



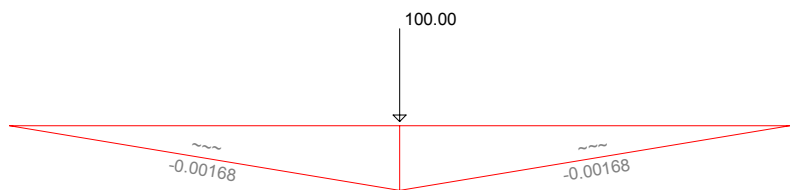
4.21: Fachwerk , Grenzfall α , Normalkräfte N [kN] für LF3 und LF3'

Grenzfall β , Th. I. Ord.

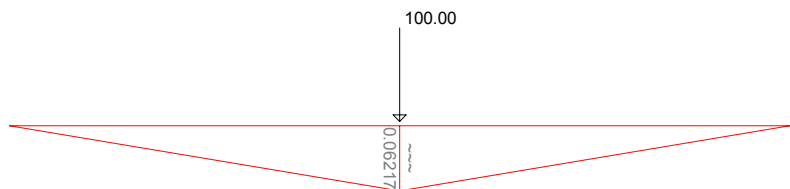
LF1: Geometriemodifikation und
 $F = 100 \text{ kN}$



LF2: $F = 100 \text{ kN}$ und Adaption mit
 Aktuatoren im Untergurt
 (Stab 101, 102)

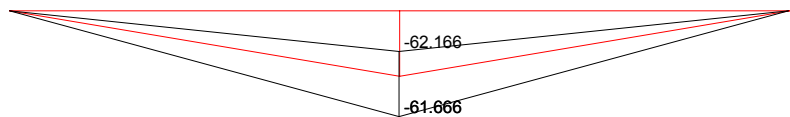


LF3: $F = 100 \text{ kN}$ und Adaption mit
 Aktuator im Pfosten
 (Stab 202)

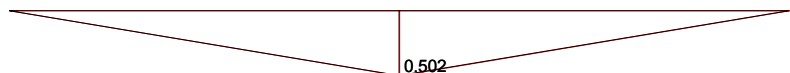


4.22: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\epsilon_{\text{Adaption},\beta}$

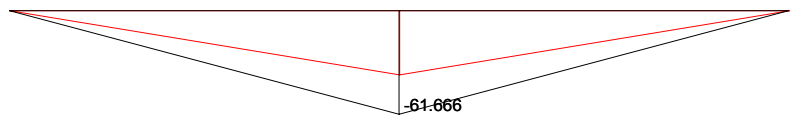
LF1 (ohne Adaption):
 Vertikalverformung w [mm]



LF2 (Aktuatoren im Untergurt):
 Vertikalverformung w [mm]

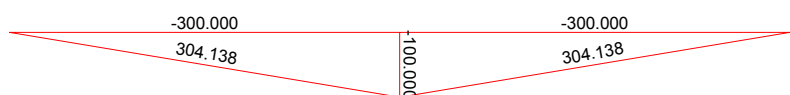


LF3 (Aktuator im Pfosten):
 Vertikalverformung w [mm]



4.23: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Vertikalverf. w [mm] für LF1, LF2, LF3

LF1, LF2, LF3: Normalkräfte [kN]



4.24: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Normalkräfte N [kN] für LF1, LF2, LF3

	Grenzfall α: Adaption vor der Lastaufbringung, Theorie I. Ordnung		Adaption unter der Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens der Adaptionselemente		Grenzfall β: Adaption nach der Lastaufbringung, Theorie I. Ordnung	
	LF 2 / LF 2'	LF 3 / LF 3'	LF 2	LF 3	LF 2 / LF 2'	LF 3 / LF 3'
Geometrie, Abmessungen [m]						
a	5,999681	5,999742	-	-	6,0000	6,0000
b	0,938176	1,001547	-	-	1,0000	1,0000
c	0,061824	0,055648	-	-	0,0000	0,0000
H = b + c	1,000000	1,057195	-	-	1,0000	1,0000
Normalkräfte [kN]:						
im Obergurt, $N_1 = N_2$	-300,0000	-283,7697	-	-	-300,0000	-300,0000
im Untergurt, $N_{101} = N_{102}$	303,6295	287,6840	-	-	304,1381	304,1381
im Pfosten, N_{202}	-93,8176	-94,7363	-	-	-100,0000	-100,0000
Verschiebungen [m]						
Knoten 2, vertikal	0,061824	0,055648	-	-	0,062166	0,062166
Knoten 20, vertikal	0,061354	0,055147	-	-	0,061666	0,061666
Knoten 2 und 20, horizontal	0,000263	0,000335	-	-	0,000900	0,000900
erf. Dehnung $\epsilon_{\text{Aktuator}}$ [-] (Th. I. O.)	-0,001677	0,055562	-0,010172	0,057195	-0,001680	0,062166
Adaptionsarbeit [kJ]						
$W_{\text{Adaption},\alpha} / W_{\text{Adaption}} / W_{\text{Adaption},\beta}$	0	0	-3,0855	ca.-2,7092	-6,2166	-6,2166
Vergleichsadaptionsarb. W'_{Adaption} (Adaption während der Belastung)	-3,0912	-2,7824	-3,0855	ca.-2,7092	-3,1083	-3,1083
Abweichung zum Grenzfall β [%]	0,55	10,48	0,73	12,84	-	-
Vergleichsadaptionsarb. W''_{Adaption} (Adaption nach der Belastung)	-6,1824	-5,5648	ca.-6,1824	-5,5648	-6,2166	-6,2166
Abweichung zum Grenzfall β [%]	0,55	10,48	0,55	10,48	-	-

4.25: Fachwerk c2_12, Grenzfälle, Ergebnisse für Last F = 100 kN

Beim Vergleich von Ergebnissen der Grenzfälle α und β für das Fachwerksystem c2_12 fällt auf, dass bei kleinen Aktuatorendehnungen während der Adaption (Lastfall LF 2, Adaptionselemente im Untergurt, Stab 101 und 102) keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Längenänderungen der Adaptionselemente auftreten.

So beträgt die Aktuatorendehnung der Untergurtsstäbe im Lastfall LF2 (Adaptionselemente im Untergurt, Stäbe 101 und 102)

$\varepsilon_{\text{Aktuator}, \alpha, \text{LF2}} = 0,001677$ [-] für den Grenzfall α und

$\varepsilon_{\text{Aktuator}, \beta, \text{LF2}} = 0,001680$ [-] für den Grenzfall β ,

was einen Unterschied von weniger als einem Prozent bedeutet.

Die zugehörigen Normalkräfte liegen bei $N_{101, \alpha, \text{LF2}} = 303,6295$ kN bzw.

$N_{101, \beta, \text{LF2}} = 304,1381$ kN.

Hingegen sind im Lastfall LF3 (Adaptionselement im Pfosten, Stab 202) deutlich größere Geometriemodifikationen erforderlich, um das Fachwerk zu adaptieren. Dazu wird im Grenzfall α eine Dehnung des Pfostens (Stab 202) von $\varepsilon_{\text{Aktuator}, \alpha, \text{LF3}} = 0,05562$ [-] benötigt. Im Grenzfall β ist eine Dehnung von $\varepsilon_{\text{Aktuator}, \beta, \text{LF3}} = 0,062166$ [-] erforderlich, um das gleiche Ziel zu erreichen. Hier liegt der Unterschied bei über zehn Prozent.

Werden die erforderlichen Adaptionsarbeiten für die Grenz betrachtung α analysiert, so ist die Arbeit gleich Null, wenn das Tragwerk als gewichtslos angenommen wird und die Geometriemodifikation (Überhöhung) vor der Lastaufbringung durchgeführt wird. Für die Vergleichsadaptionsarbeit in einem Adaptionsprozess während der Belastung ergibt sich eine Arbeit von $W'_{\text{Adaption}, \alpha, \text{LF2}'} = -3,0912$ kJ im Lastfall LF2' (Adaptionselemente im Untergurt, Stab 101 und 102) und $W'_{\text{Adaption}, \alpha, \text{LF3}'} = -2,7824$ kJ im Lastfall LF3' (Adaptionselement im Pfosten, Stab 202).

Demgegenüber betragen die Vergleichsadaptionsarbeiten für die Grenz betrachtung β sowohl für LF2' als auch LF3' jeweils

$W'_{\text{Adaption}, \beta} = -3,1083$ kJ.

Ein Vergleich der Adaptionen für die beiden Grenzfälle α und β macht deutlich, dass für die Adaption mit kleinen Aktuatorenendungen (bei großen Kräften), wie zum Beispiel im Lastfall LF2 (Adaptionselemente im Untergurt), sich nur geringfügige Unterschiede ergeben: Die Adaptionen sind nahezu gleich, die Differenz beträgt weniger als ein Prozent.

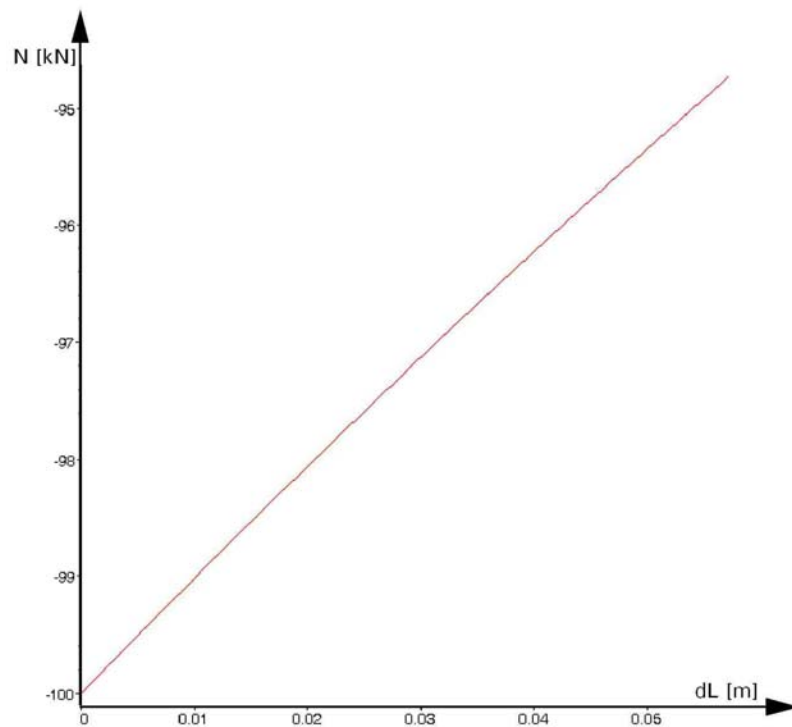
Gänzlich anders fällt eine Gegenüberstellung der Adaptionen für den Lastfall LF3' (Adaptionselement im Pfosten, Stab 202) aus. Hier sind große Geometrieänderungen (bei kleinen Kräften) notwendig, um das System zu adaptieren. Der Unterschied zwischen Grenzfall α mit $W'_{\text{Adaption}, \alpha, \text{LF3}'} = -2,7824 \text{ kJ}$ und Grenzfall β mit $W'_{\text{Adaption}, \beta, \text{LF3}'} = -3,1083 \text{ kJ}$ beträgt über zehn Prozent.

Diese Tatsache bestätigt, dass nur im Bereich kleiner Aktuatorenendungen die Annahme einer linearen Beziehung zwischen Aktuatorenkraft und Stellweg für die Aktuatoren im Entwurf ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

nichtlineares Verhalten
der Aktuatoren

Da das reale Verhalten der Adaptionselemente um so stärker nichtlinear ist, je größer die zur Adaption erforderlichen Geometriemodifikationen sind, besteht vor allem für den Lastfall LF3 (Aktuator im Pfosten, Stab 202) die Notwendigkeit einer nichtlinearen Betrachtung des Aktuatorenverhaltens.

Der Einfluss von geometrischen Nichtlinearitäten auf die Größe der Adaptionsarbeit wurde mit einem in *Maple* geschriebenen Programm überprüft. In Abbildung 4.26 wird die nichtlineare Kraft-Weg-Linie des im Pfosten, Stab 202, platzierten Adaptionselements (Lastfall LF3) dargestellt.



4.26: Fachwerkssystem c2_12, nichtlineares Kraft-Weg-Diagramm, Aktuator im Pfosten (LF3)

Aus dem Integral der Kraft über die Längenänderung wird die verrichtete Adaptionarbeit berechnet. Daraus resultieren folgende Werte für die Adaptionarbeit:

$$W_{\text{Adaption,LF2}} = -3,0855 \text{ kJ}$$

für den Lastfall LF 2 (Adaptionselemente im Untergurt) und

$$W_{\text{Adaption,LF3}} = -2,7092 \text{ kJ}$$

für den Lastfall LF 3 (Adaptionselement im Pfosten).

Auch hier ist der Unterschied zur Grenzbetrachtung β kleiner als ein Prozent für den Lastfall LF2 (Adaptionselement im Untergurt, Stab 101 und 102) und größer als zehn Prozent für den Lastfall LF3 (Adaptionselement im Pfosten, Stab 202).

4.2.1.4

Interpretation der
Berechnungsergebnisse
der Adaptionsarbeiten

Die Betrachtung der Adaptionsarbeiten für die Grenzfälle α und β zeigt, dass die Adaption prinzipiell auf zwei Arten realisiert werden kann: Entweder mit großen Kräften und kleinen Aktuatorendehnungen oder mit kleinen Kräften und großen Aktuatorendehnungen.

kleine Aktuatoren-
dehnungen

Wird ein realisierbares Adaptionsziel definiert, das grundsätzlich mit kleinen Aktuatorendehnungen erreicht werden kann, so ist die erforderliche Adaptionsarbeit für alle Grenzbetrachtungen nahezu konstant. Die Annahme eines linearen Verhaltens der Aktuatoren liefert für den Entwurf adaptiver Dachtragwerke ausreichend genaue Ergebnisse. Bei kleinen Geometrieänderungen des gesamten Tragwerks genügt eine Systembetrachtung nach der Theorie I. Ordnung. Für den Fall eines statisch bestimmten Tragwerks mit kleinen Aktuatorendehnungen und kleinen Systemverformungen kann die Änderung des Potentials $\Delta\Pi_{\text{innen}}$ der inneren Kräfte vernachlässigt werden.

große Aktuatoren-
dehnungen

Demgegenüber sind große Aktuatorendehnungen mit einem nichtlinearen Verhalten der Aktuatoren verbunden, die im Entwurf berücksichtigt werden müssen. Außerdem führen große Geometrieänderungen des Gesamtsystems zu nicht mehr vernachlässigbaren Änderungen des Tragverhaltens dieser Systeme während der Adaption. Deswegen muss die Änderung der im System gespeicherten Formänderungsenergie $\Delta\Pi_{\text{innen}}$ (= Änderung des Potentials der inneren Kräfte $\Delta\Pi_{\text{innen}}$) im Bereich großer Geometriemodifikationen sowohl für statisch bestimmte als auch statisch unbestimmte Systeme grundsätzlich berücksichtigt werden.

Sollte der methodische Aufwand einer geometrisch nichtlinearen Analyse des Aktuatorenverhaltens und einer Systemberechnung nach der Theorie II. Ordnung (oder höher) im Rahmen eines Entwurfs vermieden werden, müssen Aktuatoren so platziert werden, dass das System sowohl mit kleinen Aktuatorendehnungen (und großen Kräften) als auch mit kleinen Geometrieänderungen adaptiert werden kann.

Größe der Adaptionarbeit Die kleinste Adaptionarbeit ist für Systeme erforderlich, die bereits vor der Lastaufbringung adaptiert werden (Grenzfall α).

Die größte Adaptionarbeit ist notwendig, wenn das System erst nach der vollständigen Lastaufbringung adaptiert wird (Grenzfall β). Das entspricht zum Beispiel dem bereits erwähnten Tragwerkszustand nach einem Ausfall des Adaptionssystems unter Volllast (zum Beispiel Schnee): Hier muss die bereits aufgebrachte Last „hochgefahren“ werden.

Für den Fall der Adaption während der Lastaufbringung, welcher in der Praxis der Regelfall sein wird, befindet sich die Größe der Adaptionarbeit zwischen diesen beiden Grenzfällen, wobei eine Verringerung der maximalen Werte der Adaptionarbeit durch Systemüberhöhung bzw. Vorspannung erreicht werden kann. Außerdem ist denkbar, das System zu „überadaptieren“, d.h. die Regelung des Systems so einzustellen, dass während der Lastaufbringung (zum Beispiel Schnee) die Längenänderungen der Aktuatoren der Laststeigerung um einen bestimmten Toleranzwert „vorausseilen“, wodurch das Tragwerk für die nächste Laststeigerung bereits „überhöht“ wäre.

Darüber hinaus muss zwischen der Adaptionarbeit im normalen, störungsfreien Betrieb und der Adaption nach einem Versagensfall unterschieden werden. Daraus folgt, dass die eingesetzten Stellelemente für den normalen Betrieb überdimensioniert werden müssen, um das Tragwerk aus seiner Verformungslage ggf. unter Volllast nach einem Ausfall des Adaptionssystems wieder anzuheben.

Zuletzt soll beachtet werden, dass für die Betrachtung der Adaption während der Lastaufbringung die Annahme einer mit der Lastaufbringung zeitgleichen Reaktion der Aktuatoren getroffen wurde. Die in der Praxis auftretenden zeitlichen Verzögerungen im Aktuatorenbetrieb würden zu einer Erhöhung der rechnerisch ermittelten Adaptionarbeiten führen.

4.2.2

Maßnahmen zur
Reduzierung der
Adaptionsarbeit

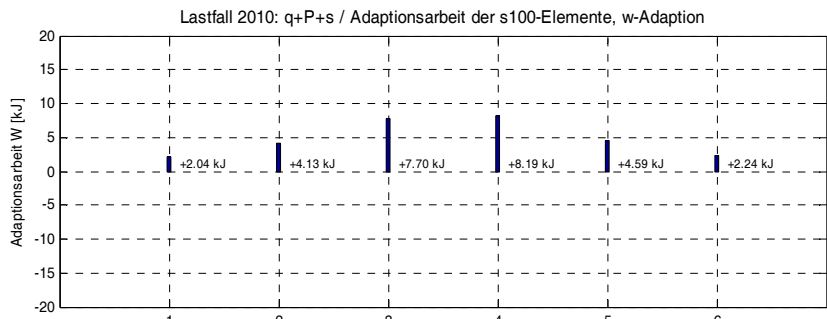
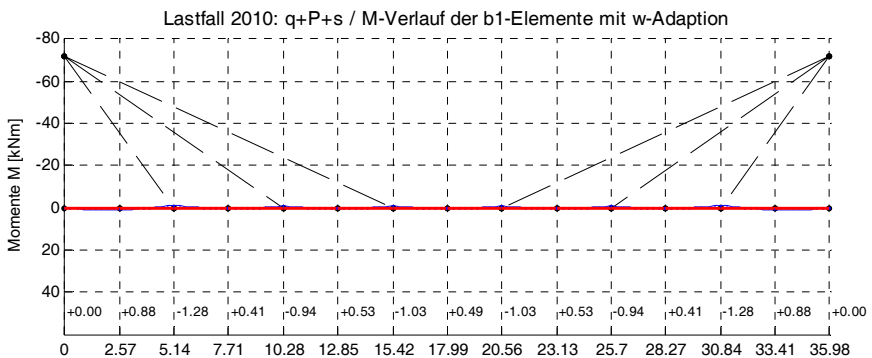
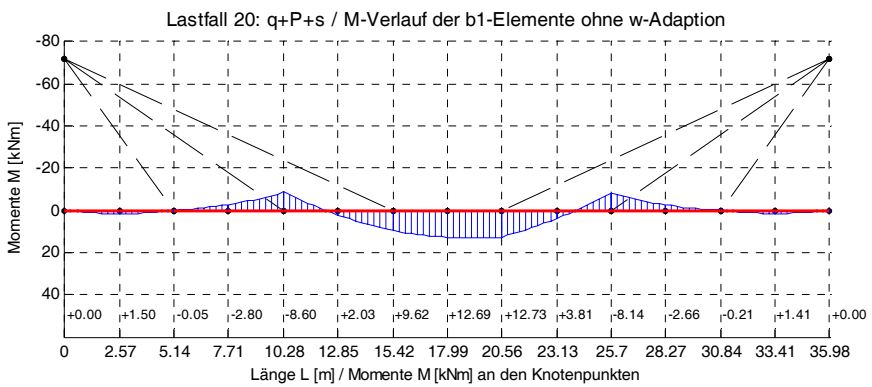
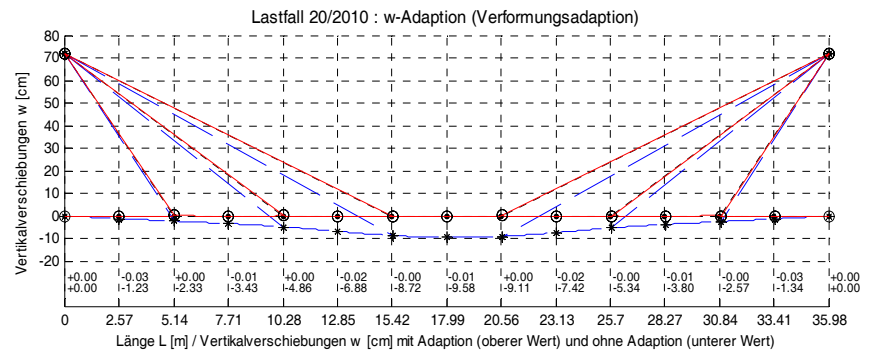
Die erforderliche Adaptionsarbeit lässt sich außer durch die Wahl der Adaptionszeitpunkte (s. Kapitel 4.2.1.1, Grenzfall α und β) durch die im Folgenden dargestellten Maßnahmen günstig beeinflussen.

4.2.2.1

Einfluss der Adaptionsziele

Eine volle Systemadaption, zum Beispiel die Reduzierung der Vertikalverformungen auf Null, ist im Zusammenhang mit der Tragsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit des Systems häufig nicht sinnvoll. Zum einen dürfen und sollen Tragwerke bestimmte Verformungen erfahren, zum anderen müssen die adaptierten und nicht adaptierten Schnittgrößen im Zusammenhang zueinander und unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Sicherheitsbetrachtungen gesehen werden. Für die meisten Systeme und Sicherheitsstrategien reicht es aus, sowohl Verformungen als auch Schnittgrößen nur teilweise zu adaptieren, wodurch die erforderlichen Adaptionsarbeiten reduziert werden können.²¹⁰ Wird zum Beispiel das System d3_36 voll adaptiert, so kommt die signifikante Verringerung der Biegemomente im Träger in der Bemessung nach der Strategie 2 (s. Kapitel 4.2.7), wegen der zu großen Unterschiede zwischen den Momentenwerten vor und nach der Adaption, nicht zum Tragen.

²¹⁰ Im Programm wird das durch die Eingabe von Adaptionstoleranzen berücksichtigt (s. Kapitel 4.1.2)



4.27: System d3_36, volle Verformungsadaption, LF 20/2010 (Grenzfall β)

4.2.2.2

Einfluss der
Vorspannung bzw.
der Systemüberhöhung

Die erforderliche Adaptionarbeit, die in einem System zum Erreichen eines Adaptionziels verrichtet werden muss, ist unter anderem von der Systemvorspannung bzw. -überhöhung abhängig.

Der Einfluss der Vorspannung auf die Adaptionarbeit wird am Beispiel des unterspannten Trägers d1_36 erläutert (s. Abbildung 4.28). Dazu wird der Träger zunächst ohne Vorspannung betrachtet und dann mit zwei verschiedenen hohen Kräften vorgespannt.

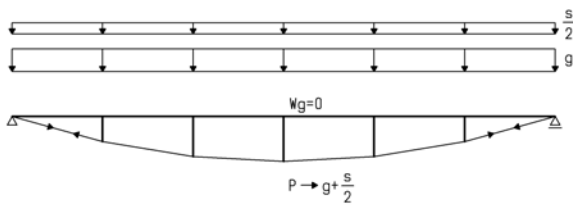
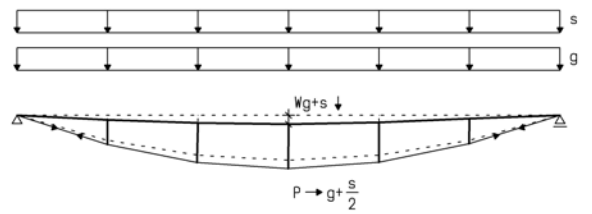
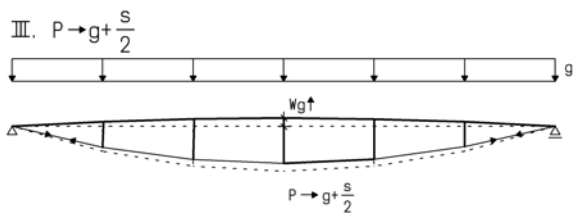
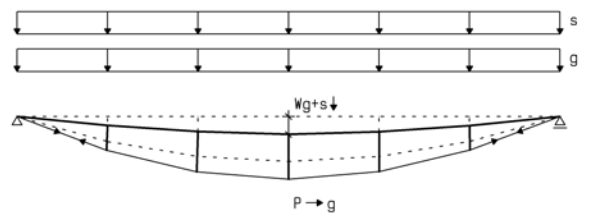
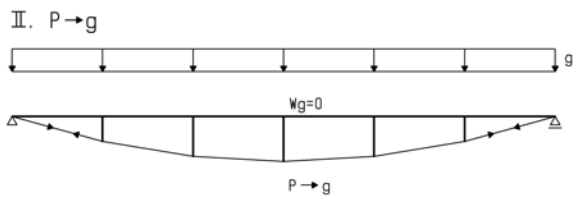
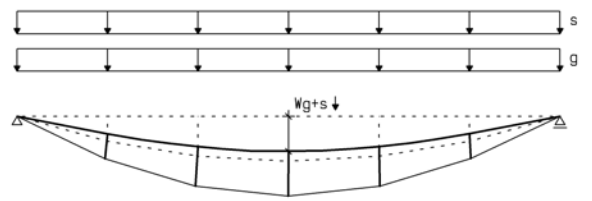
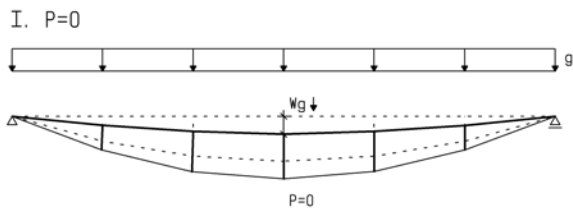
$P = 0 \text{ kN}$, das System wird nicht vorgespannt.

$P \rightarrow g$, das System wird für Eigengewicht g vorgespannt, d.h. die Vorspannung ist so gewählt, dass unter Eigenlast die vertikalen Verformungen des Tragwerks bei Null liegen. Die Gesamtdurchbiegung wird um den Anteil aus der Eigenlast g reduziert.

$P \rightarrow g + s/2$, das System wird für Eigengewicht g und die halbe Schneelast $s/2$ vorgespannt. Bei dieser Vorspannungskraft werden die maximalen Vertikalverformungen weiter reduziert. Ohne Schneelast ist der Träger nach oben gekrümmt. Dadurch dass die Erhöhung der Vorspannung keine wesentlichen Schnittgrößenveränderungen im unterspannten Träger verursacht und die Adaptionwege bei dem für $g + s/2$ vorgespannten System in etwa halbiert werden, werden auch die Adaptionarbeiten um ca. 50% reduziert.

Analog zur Vorspannung kann die Adaptionarbeit ebenfalls durch eine Systemüberhöhung günstig beeinflusst werden.

Dabei entspricht das „Vorwegnehmen“ der Tragwerksverformungen durch Vorspannung oder Systemüberhöhung dem Grenzfall α der Adaptionbetrachtungen (s. Kapitel 4.2.1.1).



4.28: Maßnahmen zur Reduzierung der Adaptionsarbeit, Systemvorspannung, System d1_36

4.2.3

Vergleich von Systemen
mit unterschiedlichen
Stützweiten, System d3

Die Systeme d3 (abgehängter Träger) mit den Stützweiten L von 36, 72, 108 und 144 m (s. Abbildungen 4.29 und 4.30) werden in Hinsicht auf ihre Verformungen adaptiert (w -Adaption) und unter Berücksichtigung der Annahmen der Grenzbetrachtung β (s. Kapitel 4.2.1.1) miteinander verglichen (s. Abbildungen 4.38 bis 4.42).

4.2.3.1

Adaptionsbedingungen und
Adaptionsberechnungen

Die Adaptionsberechnungen erfolgten für die in Kapitel 4.1.2 (Vorbemessung) dargestellten Einwirkungskombinationen mit einer für die Eigenlasten berechneten Systemvorspannung P ($P \rightarrow g$) und dem Steifigkeitsverhältnis zwischen dem Tragwerk und Aktuatoren $\lambda = 1$.

Da der Massenaufwand für die Dachkonstruktion mit der Zunahme der Stützweite steigt, werden die unterschiedlichen Eigenlasten in Abhängigkeit von der Systemgröße ermittelt und angesetzt. Die Gesamteigenlasten, $LF100 = g$, setzen sich aus den Lastfällen $LF101 = g_{HTR}$ und $LF102 = g_{DACH+NTR}$ zusammen:

g	=	5,33 kN/m	für $L = 36$ m
g	=	12,35 kN/m	für $L = 72$ m
g	=	20,44 kN/m	für $L = 108$ m
g	=	30,14 kN/m	für $L = 144$ m

Die untersuchten Systeme d3 sind in den Abbildungen 4.30 und 4.31
zusammengefasst.

d3_36



$L = 7 \times 5,14 \text{ m} = 35,98 \text{ m}$, $H = 7,20 \text{ m}$,

Träger HEAA160,

Seile VVS-1, $d = 18 - 24 \text{ mm}$

d3_72

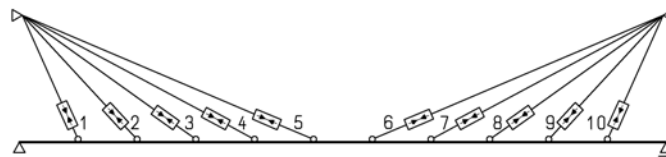


$L = 9 \times 8,00 \text{ m} = 72,00 \text{ m}$, $H = 14,40 \text{ m}$,

Träger HEAA300,

Seile VVS-2, $d = 30 - 43 \text{ mm}$

d3_108

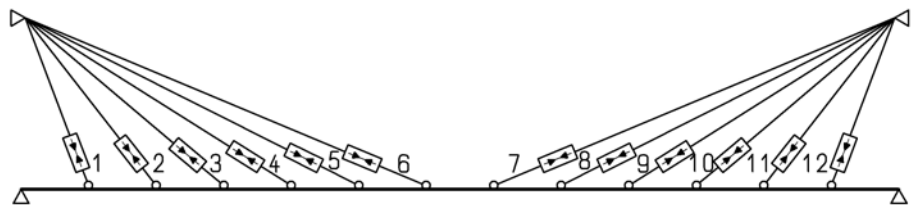


$L = 11 \times 9,82 \text{ m} = 108,02 \text{ m}$, $H = 21,60 \text{ m}$,

Träger HEB400,

Seile VVS-3, $d = 40 - 59 \text{ mm}$

d3_144



$L = 13 \times 11,08 \text{ m} = 144,04 \text{ m}$, $H = 28,80 \text{ m}$,

Träger HEM600,

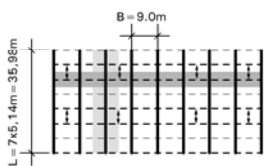
Seile VVS-3, $d = 49 - 74 \text{ mm}$

4.29: Übersicht der Systeme d3 für die Stützweiten $L = 36, 72, 108, 144 \text{ m}$

4. Entwurf adaptiver
 Dachtragwerke

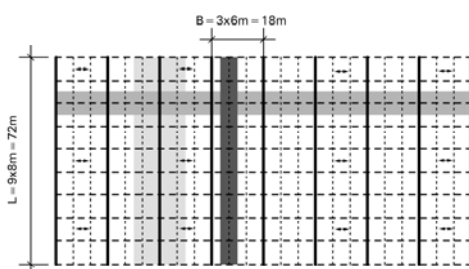
4.2 Ausgewählte Aspekte
 adaptiver Dachtragwerke

d3_36

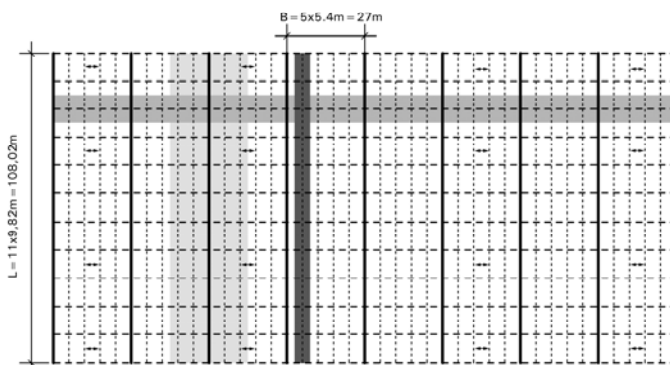


- Legende**
- Hauptträger = HTR
 - Einflußfläche HTR
 - - - 1. Nebenträger = NTR1
 - ▨ Einflußfläche NTR1
 - ⋯ 2. Nebenträger = NTR2
 - Einflußfläche NTR2
 - Spannrichtung Trapezblech

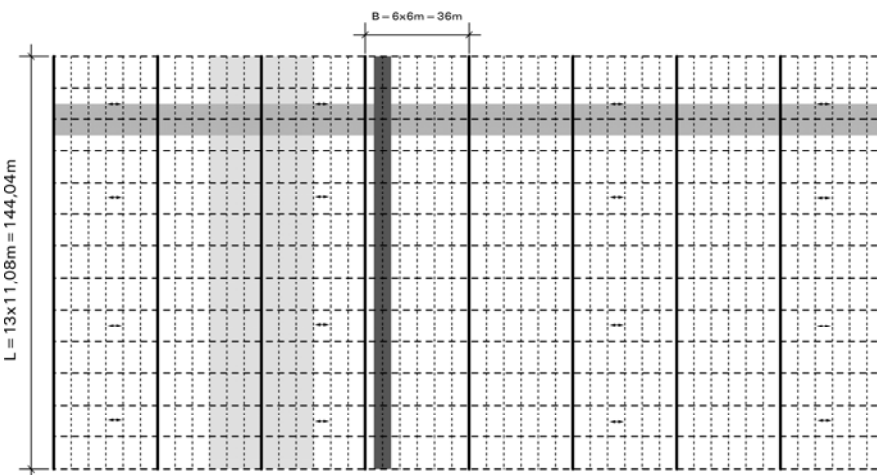
d3_72



d3_108



d3_144

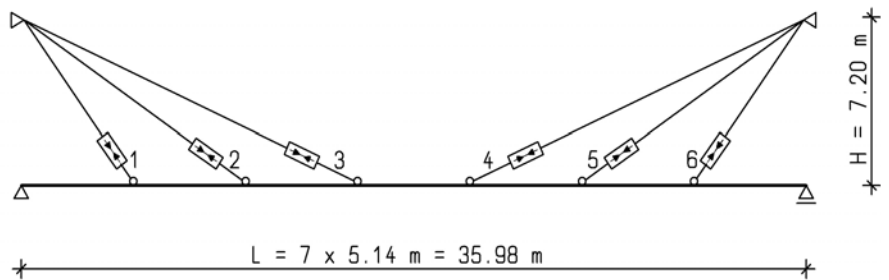


4.30: Tragwerksuntersichten der Systeme d3 für die Stützweiten L = 36, 72, 108, 144m

Die Beschreibung des Entwurfsverfahrens erfolgte bereits anhand des Systems d3_36 für die Lastfälle LF20 ($g + P + s$) und LF2010 ($g + P + s + A_w$) in Kapitel 4.1.5.

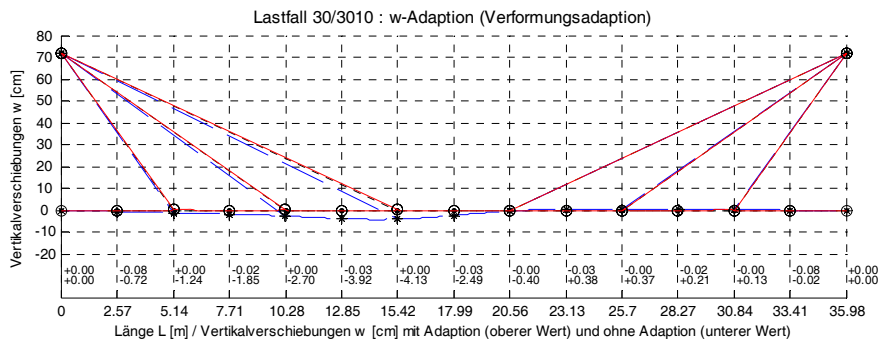
Im Folgenden werden stellvertretend für alle Einwirkungskombinationen und Stützweiten die Ergebnisse der Adaptionberechnungen, als w -Adaption, Grenzfall β , für das System d3_36 und die Lastfälle LF30 ($g + P + s/2$) und LF3010 ($g + P + s/2 + A_w$) mit jeweils einseitiger Schneelast dargestellt.

System d3_36,
 LF 30/3010



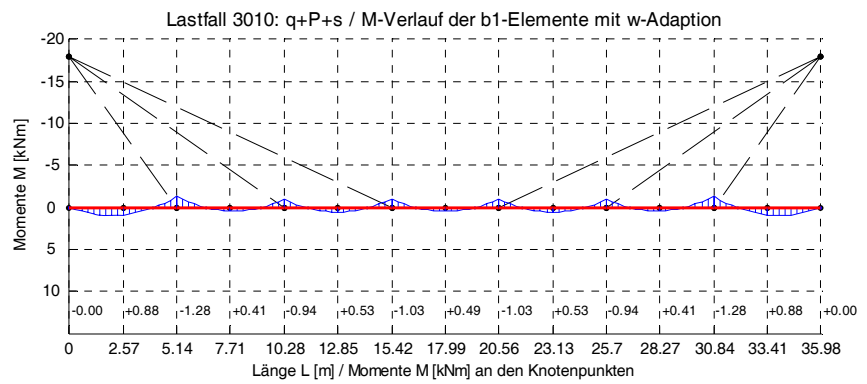
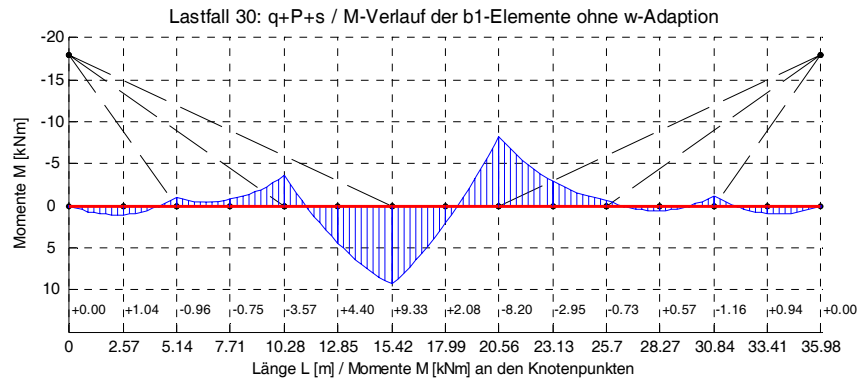
4.31: System d3_36, Lage der Aktuatoren

Vertikalverformungen
 (Grenzfall β)

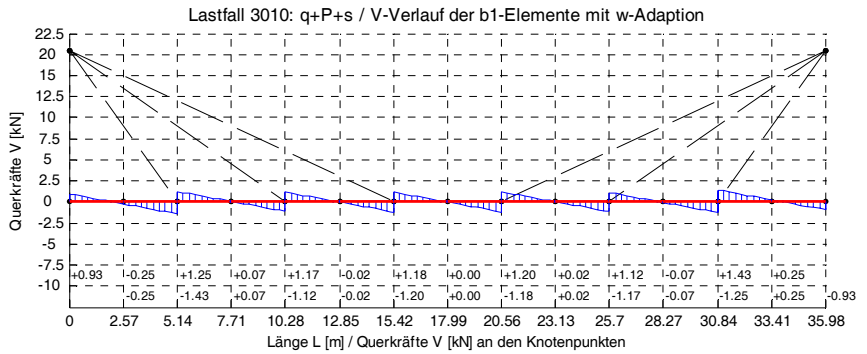
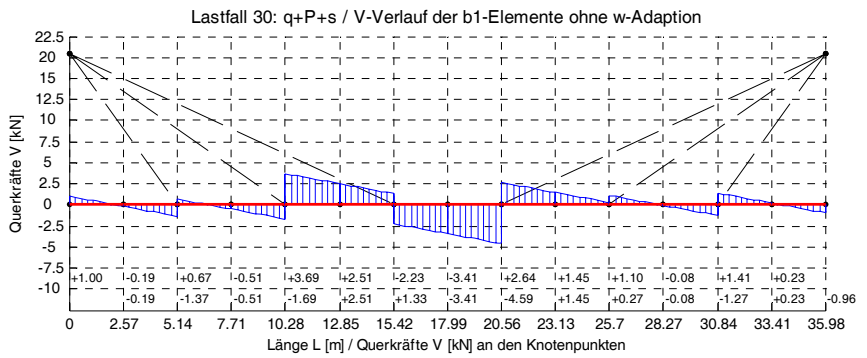


4.32: System d3_36, Vertikalverformungen, LF 30/3010

Biegemomente M
 (Grenzfall β)

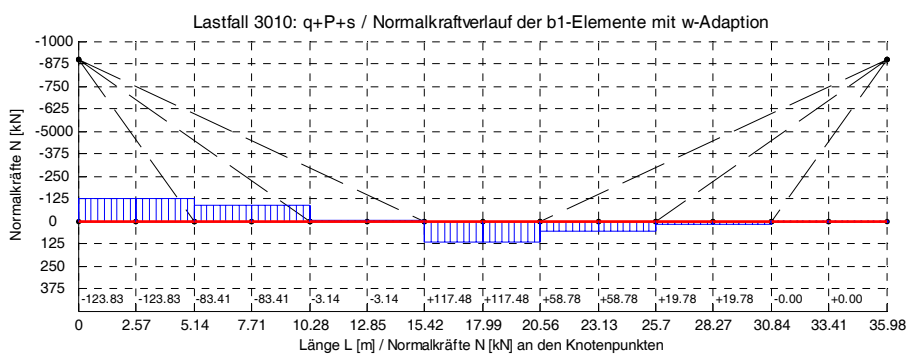
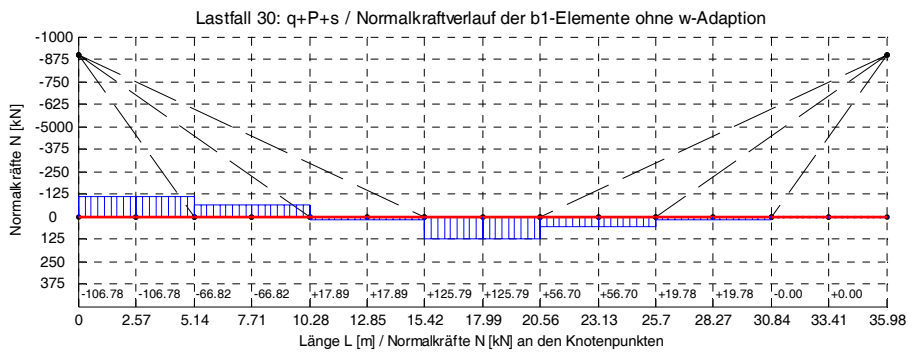


Querkräfte V
 (Grenzfall β)



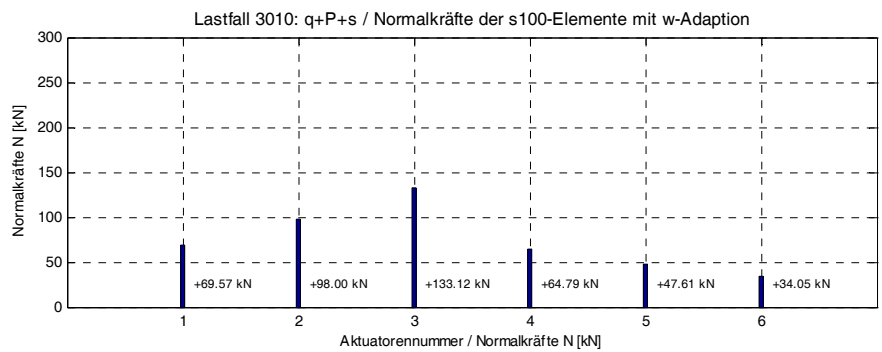
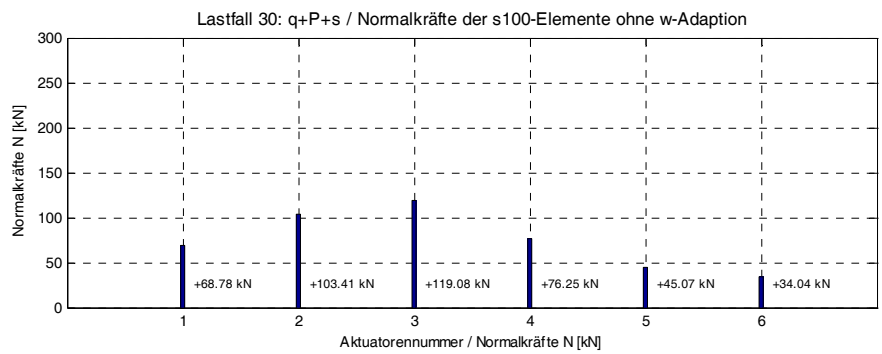
4.33: System d3_36, Biegemomente M [kNm] und Querkräfte V [kN], LF 30/3010

Normalkräfte N im Träger
 (Grenzfall β)



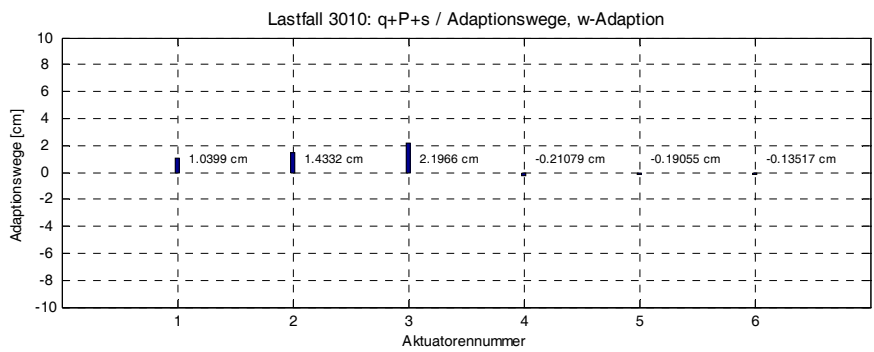
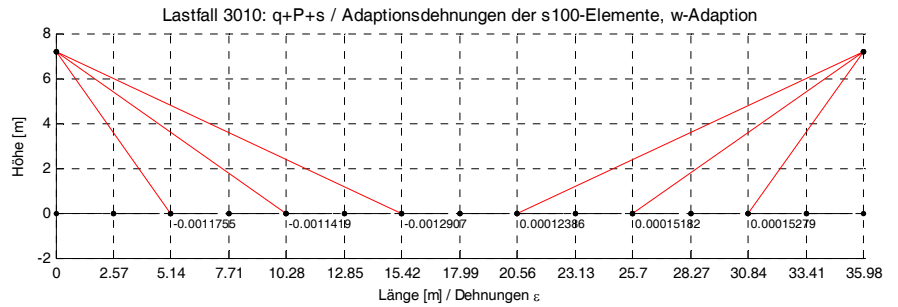
4.34: System d3_36, Normalkräfte N [kN] im Träger, LF 30/3010

Normalkräfte N in Seilen
 (Grenzfall β)



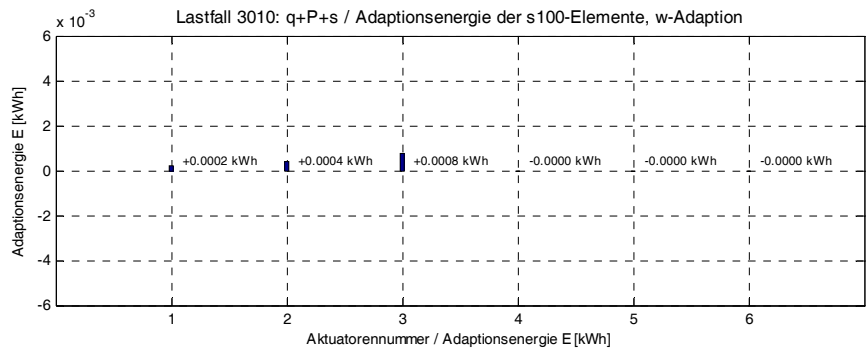
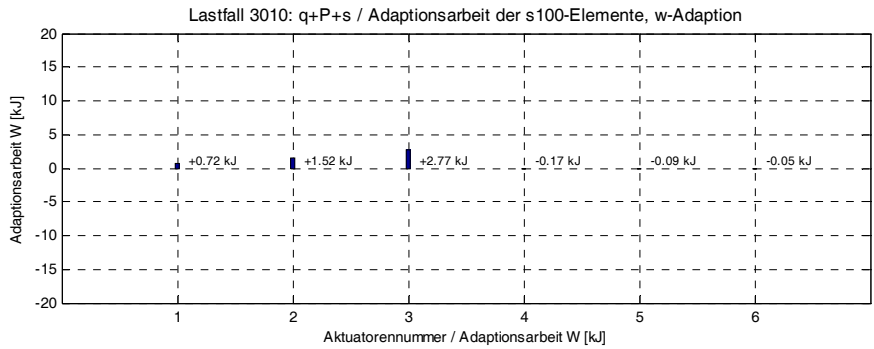
4.35: System d3_36, Normalkräfte N [kN] in den Seilen, LF 30/3010

Adaptionsdehnungen ϵ_A
 und -stellwege δ_A
 (Grenzfall β)



4.36: System d3_36, Adaptionsdehnungen ϵ [-] und Adaptionstellwege [cm], LF30/3010

Adaptionsarbeit, -energie
 (Grenzfall β)



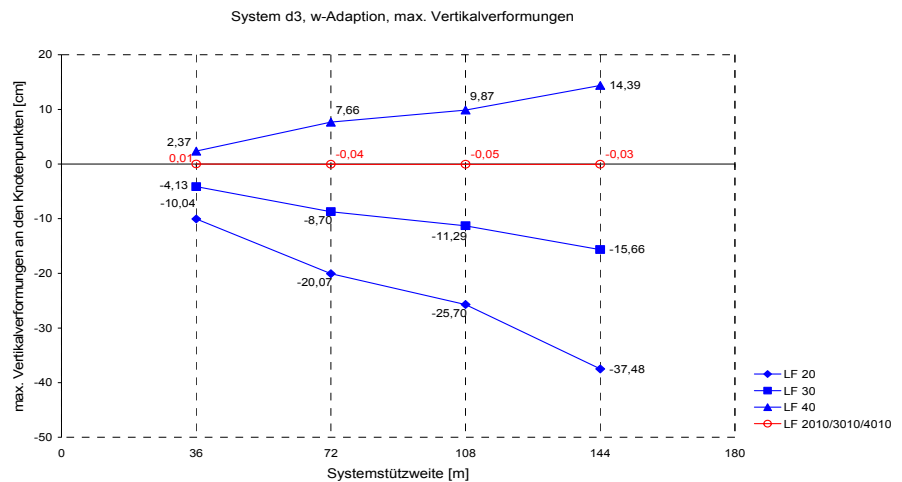
4.37: System d3_36, Adaptionsarbeit W [kJ] und Adaptionsenergie E [kWh], LF 30/3010

4.2.3.2

Zusammenfassung
 der Ergebnisse für
 verschiedene Stützweiten

Im Folgenden werden die Adaptionsergebnisse (Grenzfall β , s. Kapitel 4.2.1.1) der Systeme d3 für die Stützweiten $L = 36, 72, 108$ und 144 m und mit einer in der Höhe auf die Eigenlasten abgestimmten Systemvorspannung P ($P \rightarrow g$) zusammengefasst.²¹¹ Die Erläuterung der relevanten Lastfälle erfolgte bereits in Kapitel 4.1.2.

System d3, $L = 36 - 144$ m,
 Vertikalverformung



4.38: System d3, w-Adaption, max. Vertikalverformungen [cm] (Grenzfall β)

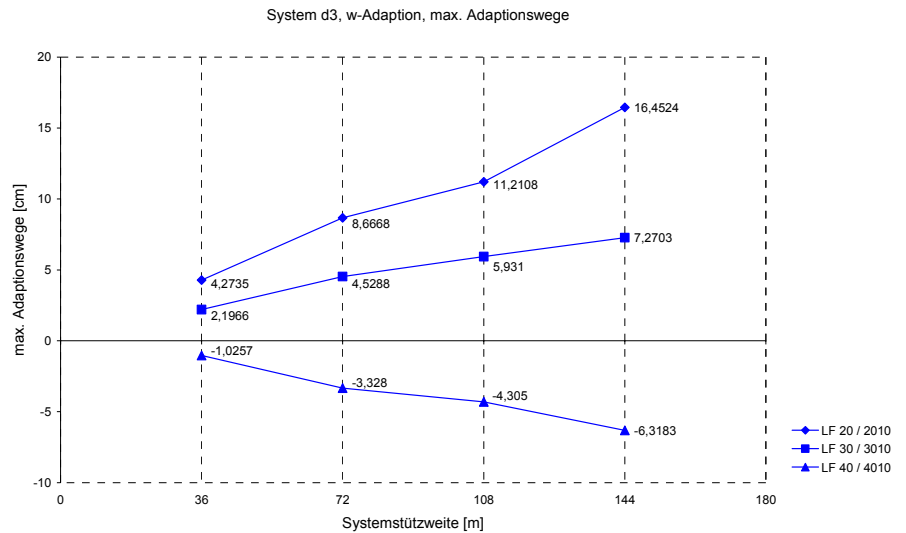
Die maximalen Adaptionsstellwege der untersuchten Systeme d3 liegen zwischen $4,27$ cm für die Stützweite $L = 36$ m und $16,45$ cm für die Stützweite $L = 144$ m. Bezogen auf die Systemstützweiten betragen die maximalen Adaptionsstellwege $L/842$ für $L = 36,0$ m, $L/831$ für $L = 72,0$ m, $L/963$ für $L = 108,0$ m und $L/875$ für $L = 144,0$ m. Die zu den in Abbildung 4.39 dargestellten maximalen Adaptionswegen zugehörigen Normalkräfte sind in Abbildung 4.40 dargestellt. Die Biegemomente folgen in der Abbildung 4.41.

Die Summen der Adaptionsarbeiten sind in der Abbildung 4.42 zusammengefasst und liegen zum Beispiel für Lastfall LF20/2010 und $P \rightarrow g$ zwischen $29,11$ und $2021,76$ kJ.

²¹¹ [Winter/Bletzinger/Pawlowski2005, S. 13]

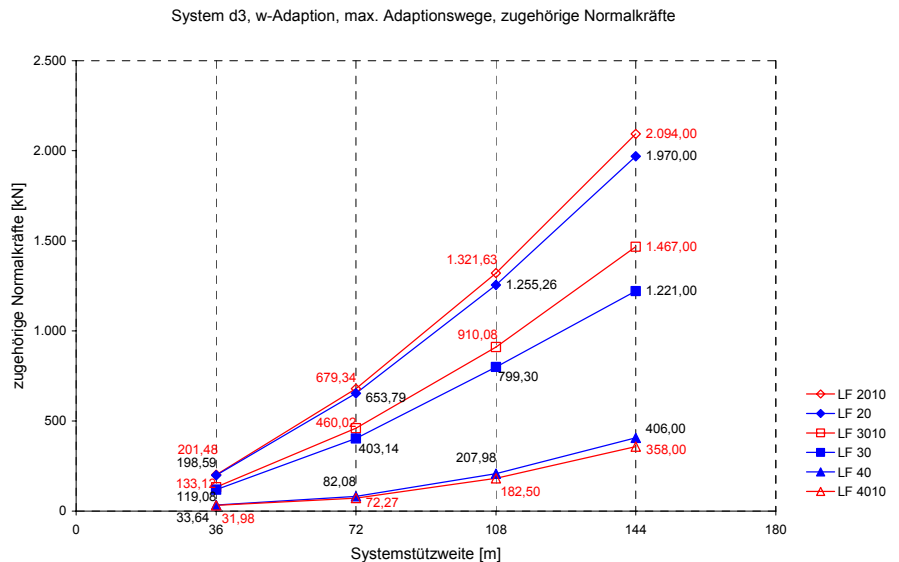
Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben kann die erforderliche Adaptionsarbeit durch die Erhöhung der Systemvorspannung und Anpassung der Adaptionsziele wesentlich verringert werden. Alleine eine Systemvorspannung von $P \rightarrow g + s/2$ führt zur Halbierung der Adaptionsarbeiten.

Adaptionsstellwege δ_A



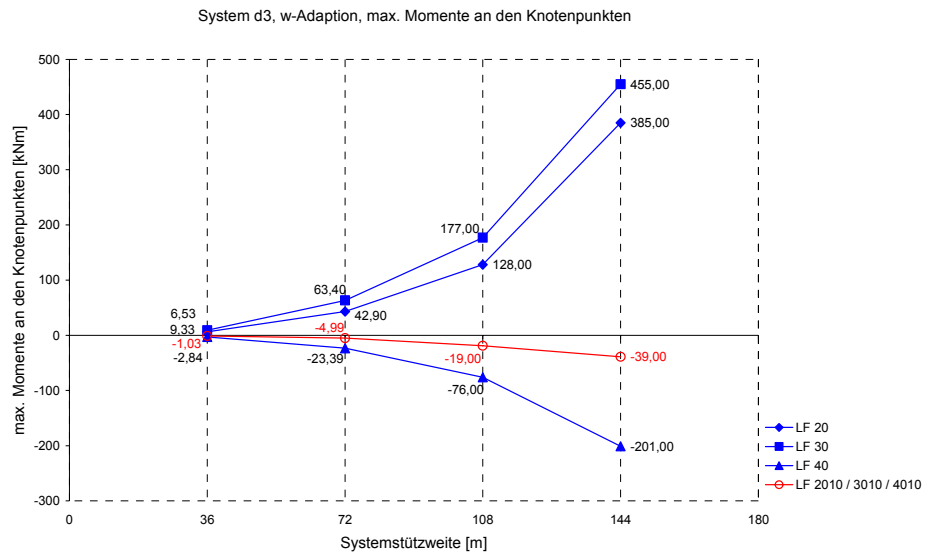
4.39: System d3, w-Adaption, max. Adaptionsstellwege [cm] (Grenzfall β)

zug. Normalkräfte



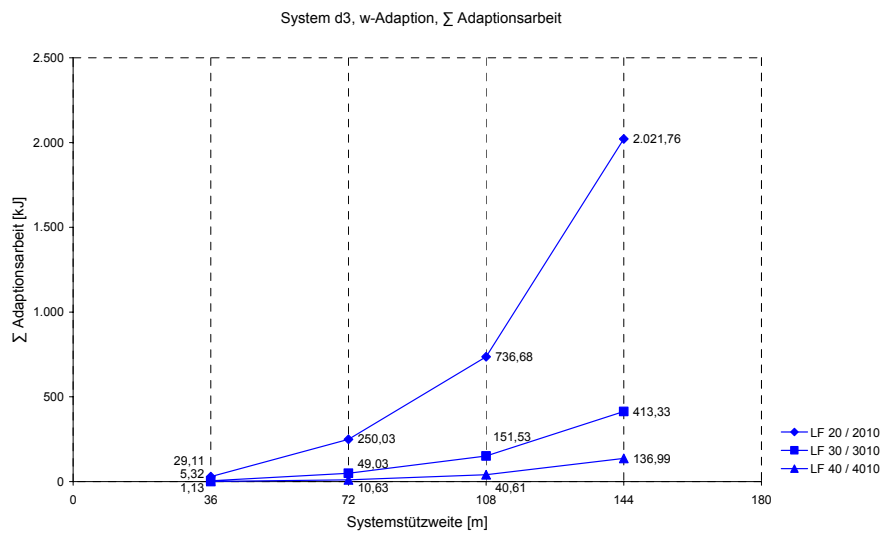
4.40: System d3, w-Adaption, zu max. Adaptionswegen zugehörige Normalkräfte

Biegemomente



4.41: System d3, w-Adaption, max. Momente an Knotenpunkten (Grenzfall β)

Σ Adaptionsarbeit



4.42: System d3, w-Adaption, Σ Adaptionsarbeit (Grenzfall β)

4.2.4

Vergleich unterschiedlicher Tragsysteme

Im Folgendem werden die Ergebnisse der Adaptionsberechnungen für weitere Systeme, Fachwerk (System c2) und unterspannter Träger (System d1), dargestellt und mit den Adaptionsresultaten des abgehängten Trägers (System d3) verglichen. Die gewählten Systeme haben die Stützweiten von 36 m. Die Berechnung erfolgt für die Bedingungen des Grenzfalls β für die Adaption (s. Kapitel 4.2.1.1) sowie für die im Kapitel 4.1.2 aufgelisteten Lastfälle. Dargestellt werden Lastfälle LF 20 ($g + P + s$) und LF 2010 ($g + P + s + A_w$).

Wie bereits in Kapitel 4.2.3.1 erläutert, sind die Eigenlasten der Dachkonstruktion von der Stützweite abhängig. Da jedoch die Hauptträger der Systeme c2 (Fachwerk) und d1 (unterspannter Träger) im Gegensatz zum System d3 (abgehängter Träger) eine gerade Anzahl von Teilflächen haben, ergeben sich andere Eigenlasten für diese Systeme:

g	=	6,23 kN/m	für $L = 36,0$ m und System d1
g	=	17,84 kN/m	für $L = 72,0$ m und System d1
g	=	6,37 kN/m	für $L = 36,0$ m und System c2
g	=	14,41 kN/m	für $L = 72,0$ m und System c2

4.2.4.1

Adaption, System d1

Das System d1_36 besteht aus folgenden Tragelementen:

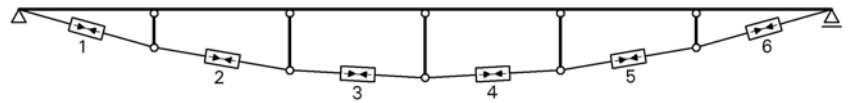
- Träger: HEA 300
- Unterspannung: VVS-3, $d = 51$ mm, $A = 1800$ mm², $E = 160000$ N/mm²
- Spreizen: RR 60.3/6.3, RR 76.1/8.0. RR 76.1/12.5

Die Adaption dieses Systems kann zunächst auf zwei Arten erfolgen:

- mit Aktuatoren in der Unterspannung und
- mit Aktuatoren in den Spreizen.

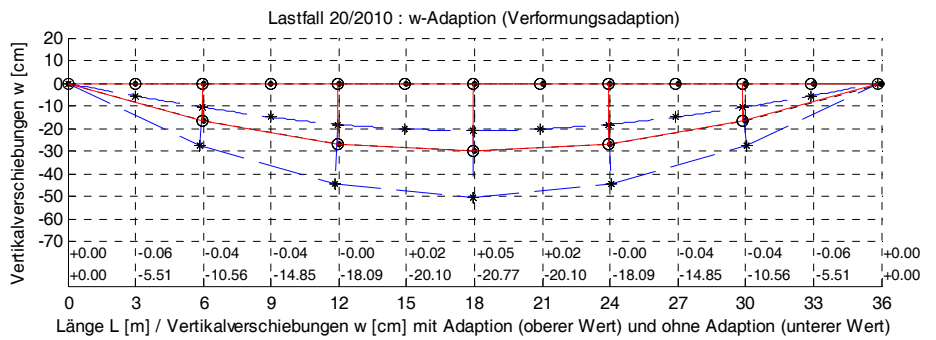
Stellvertretend für alle Systeme d1 werden die Ergebnisse der Adaptionsberechnung am Beispiel des Systems d1_36 für die Lastfälle LF20 ($g + P + s$) und LF2010 ($g + P + s + A_w$) für beide Aktuatorenanordnungen dargestellt.

System d1_36_USP



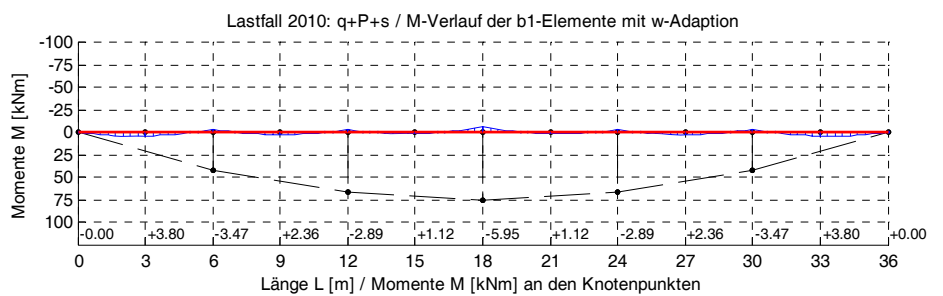
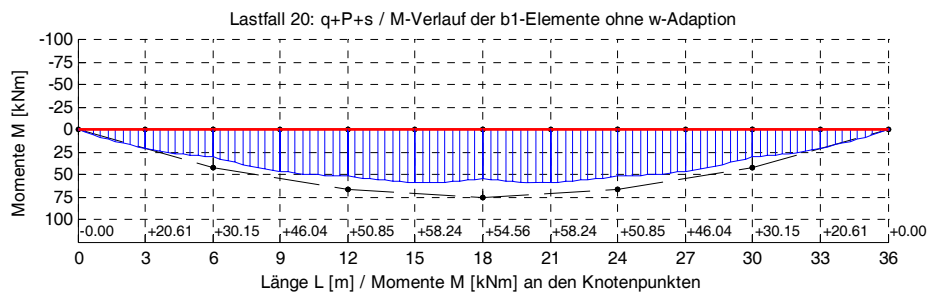
4.43: System d1_36_USP, Aktuatoren in der Unterspannung

System d1_36_USP,
 Vertikalverschiebungen
 (Grenzfall β)



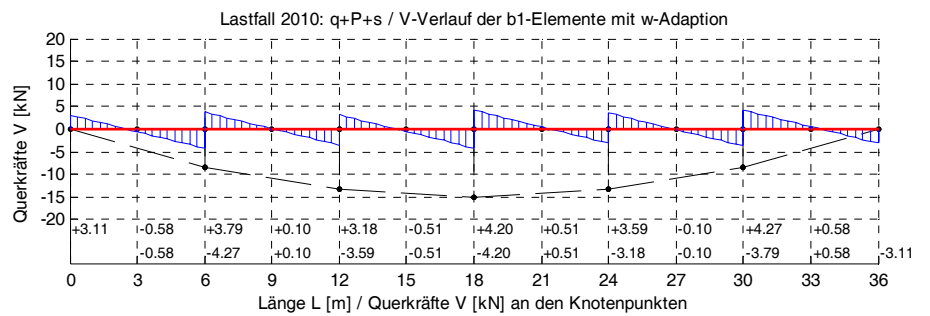
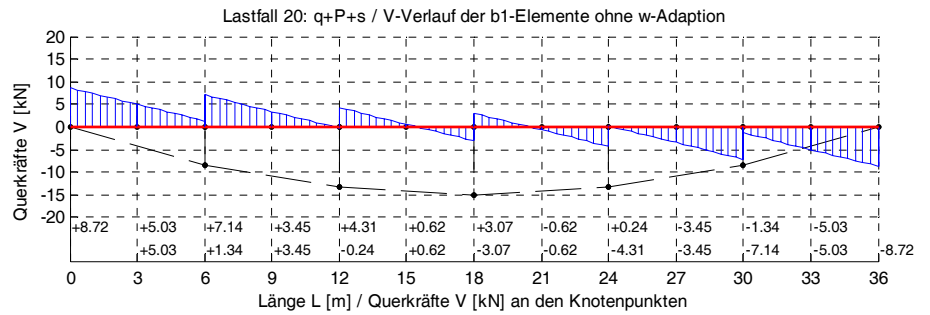
4.44: System d3_36_USP, Vertikalverformungen, LF 20/2010, Aktuatoren in Unterspan.

System d1_36_USP,
 Biegemomente M
 (Grenzfall β)



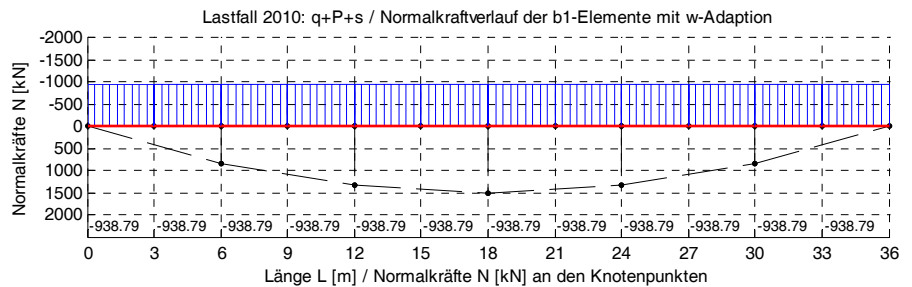
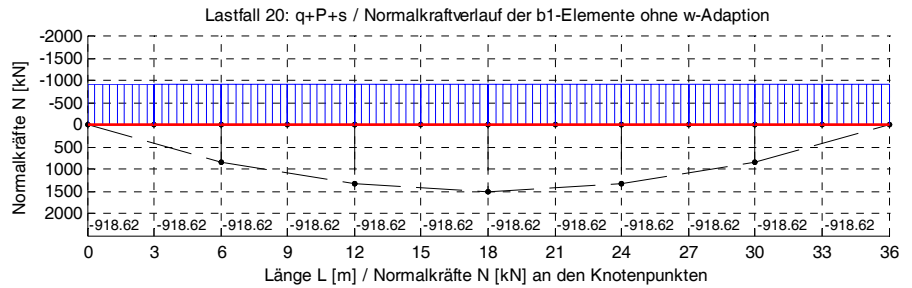
4.45: System d1_36_USP, Momentenverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in der Unterspan.

System d1_36_USP,
 Querkräfte V
 (Grenzfall β)



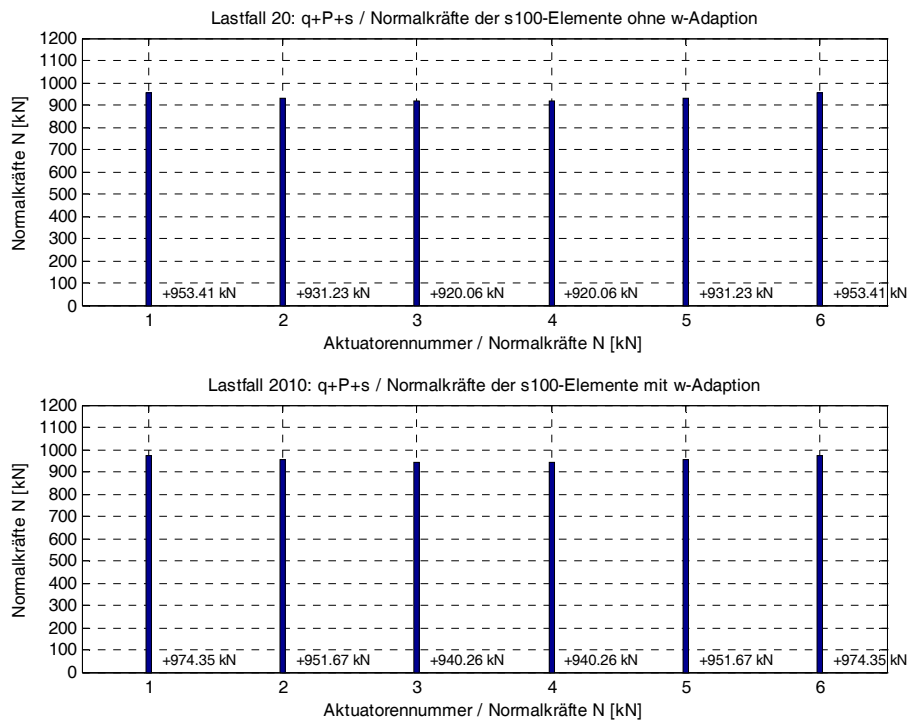
4.46: System d1_36_USP, Querkraftverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in der Unterspannung

System d1_36_USP,
 Normalkräfte N im Träger
 (Grenzfall β)



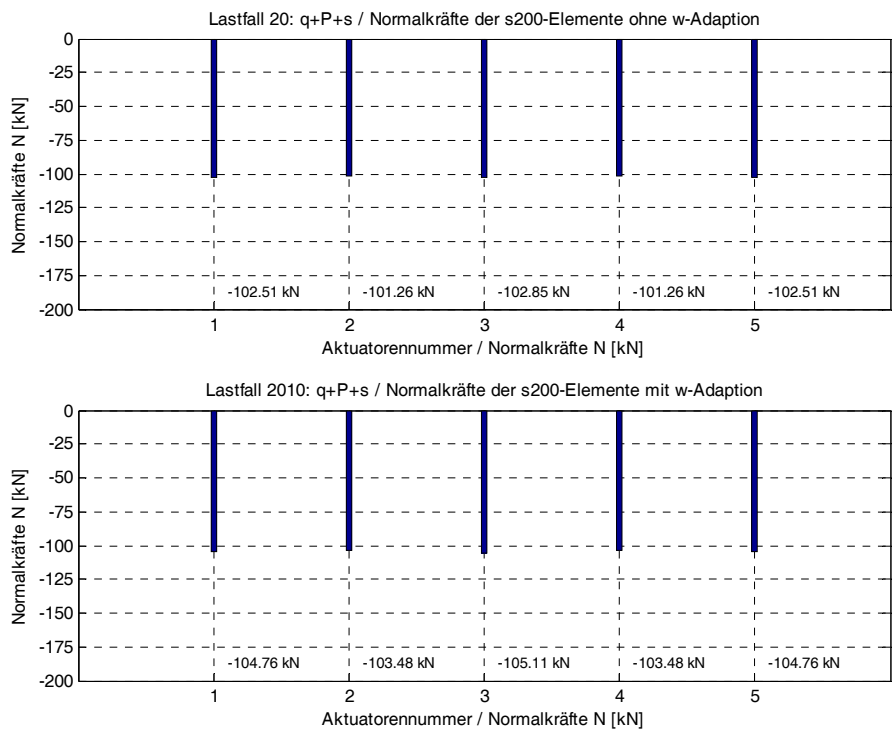
4.47: System d1_36_USP, Normalkraftverlauf im Träger, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.

System d1_36_USP,
 Normalkräfte N
 in der Unterspannung
 (Grenzfall β)



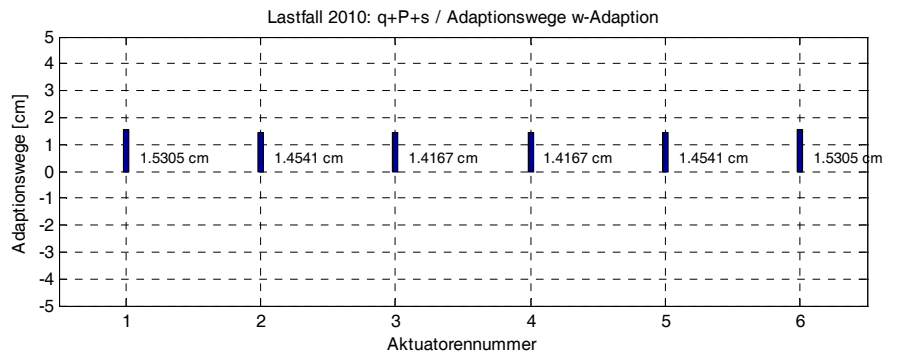
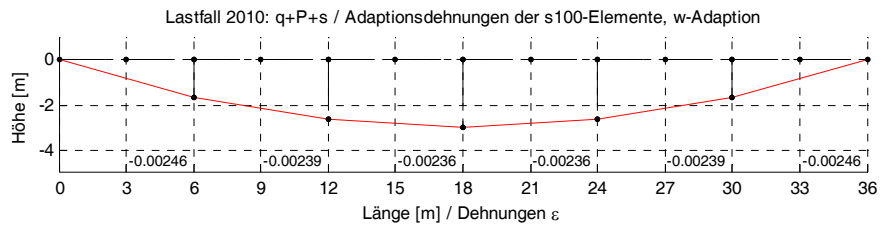
4.48: System d1_36_USP, Normalkräfte in der Unterspannung, LF 20/2010

System d1_36_USP,
 Normalkräfte N in den Spreizen
 (Grenzfall β)



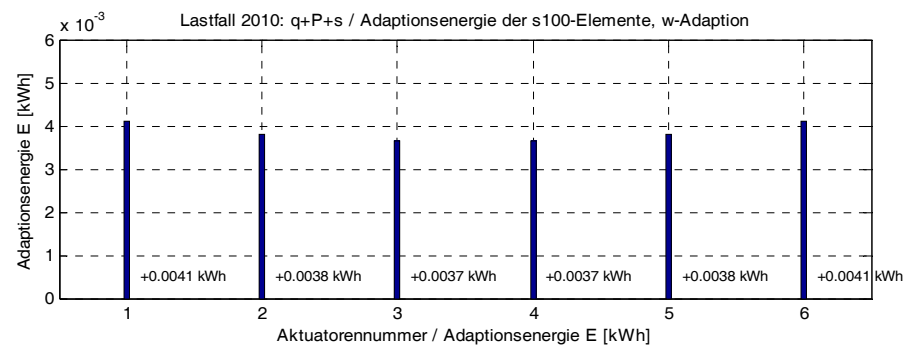
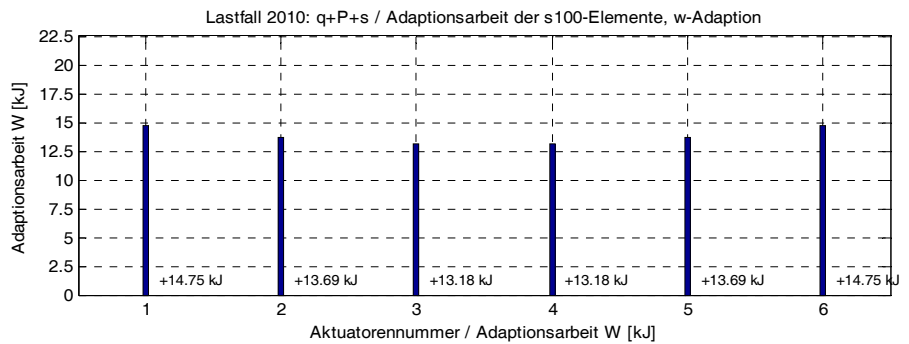
4.49: System d1_36_USP, Normalkräfte in den Spreizen, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.

System d1_36_USP,
 Adaptionsdehnungen ϵ_A
 und -stellwege δ_A ,
 (Grenzfall β)



4.50: System d1_36_USP, Adaptionsdehnungen und -stellwege, LF 20/2010

System d1_36_USP,
 Adaptionsarbeit und -energie
 (Grenzfall β)

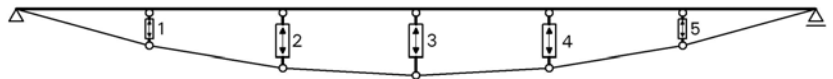


Summe der Adaptionsarbeiten W = 83,24 kJ / LF 2010

4.51: System d1_36_USP, Adaptionsarbeit und -energie, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.

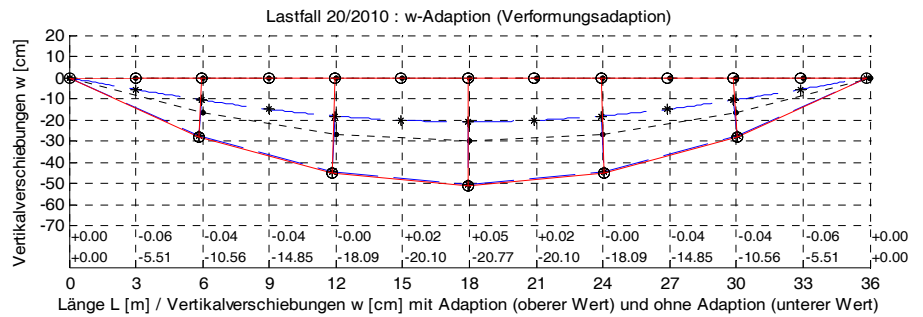
System d1_36_SPR

Analog der Adaptionsberechnung mit Aktuatoren in der Unterspannung erfolgt die Adaptionsberechnung mit Aktuatoren in den Spreizen ebenfalls für das System d1_36.



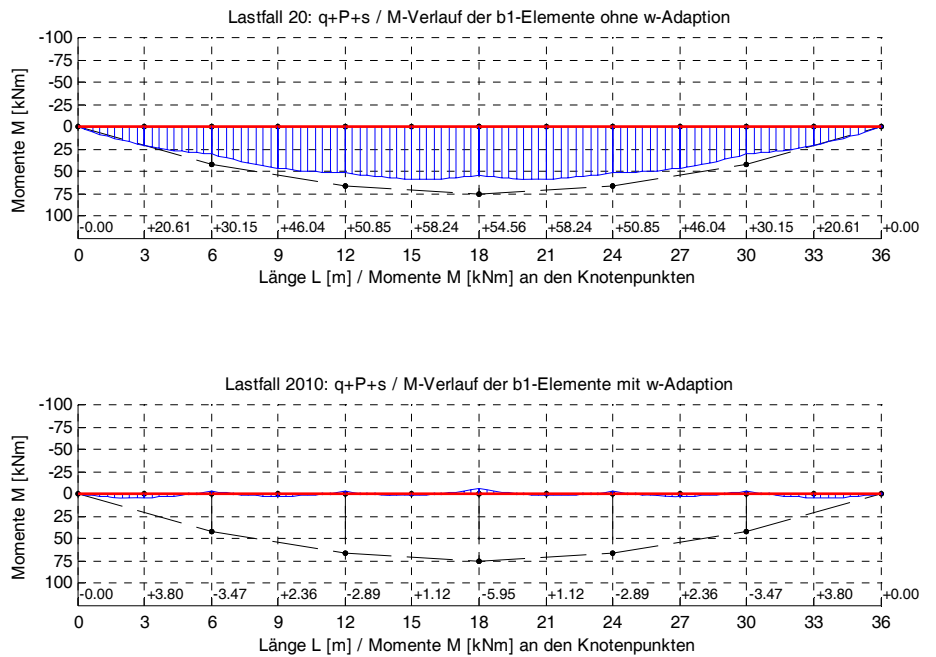
4.52: System d1_36_SPR, Aktuatoren in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Vertikalverschiebungen
 (Grenzfall β)



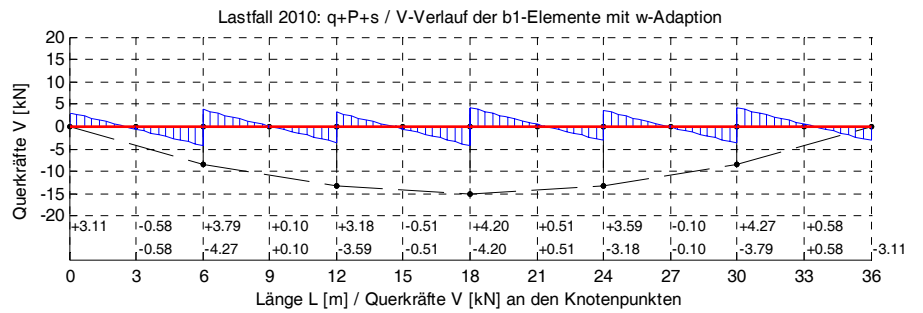
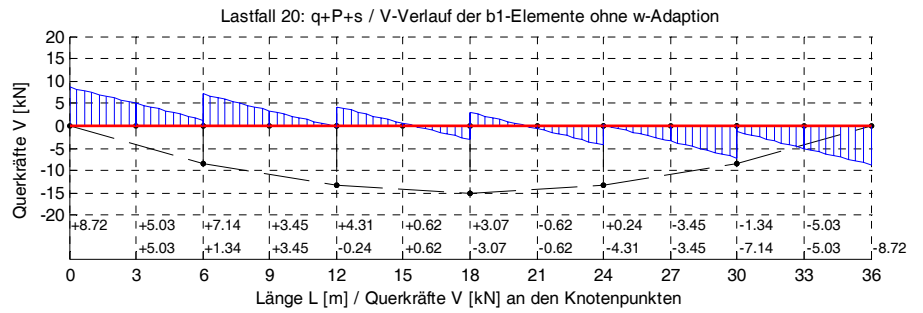
4.53: System d1_36_SPR, Vertikalverformungen, LF 20/2010

System d1_36_SPR,
 Biegemomente M
 (Grenzfall β)



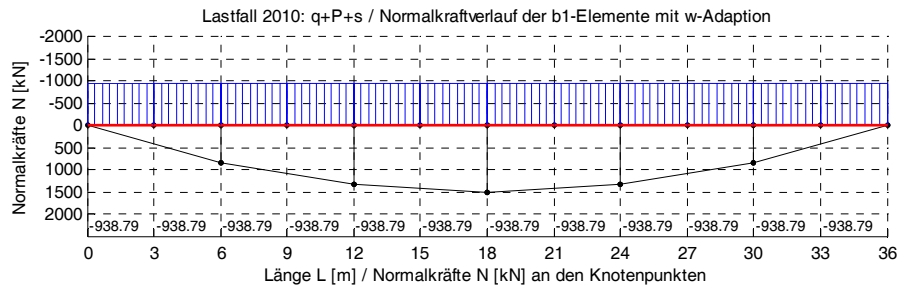
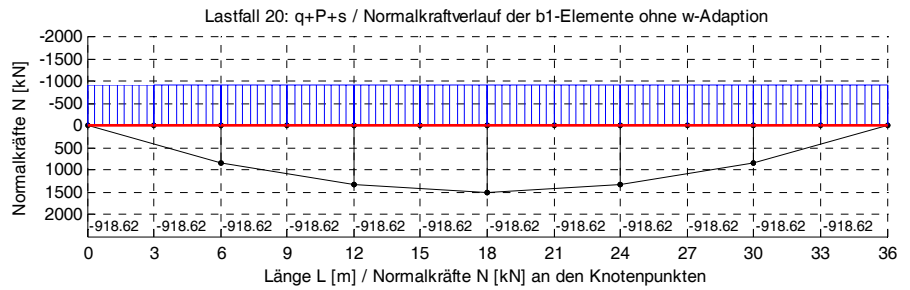
4.54: System d1_36_SPR, Momentenverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Querkräfte V
 (Grenzfall β)



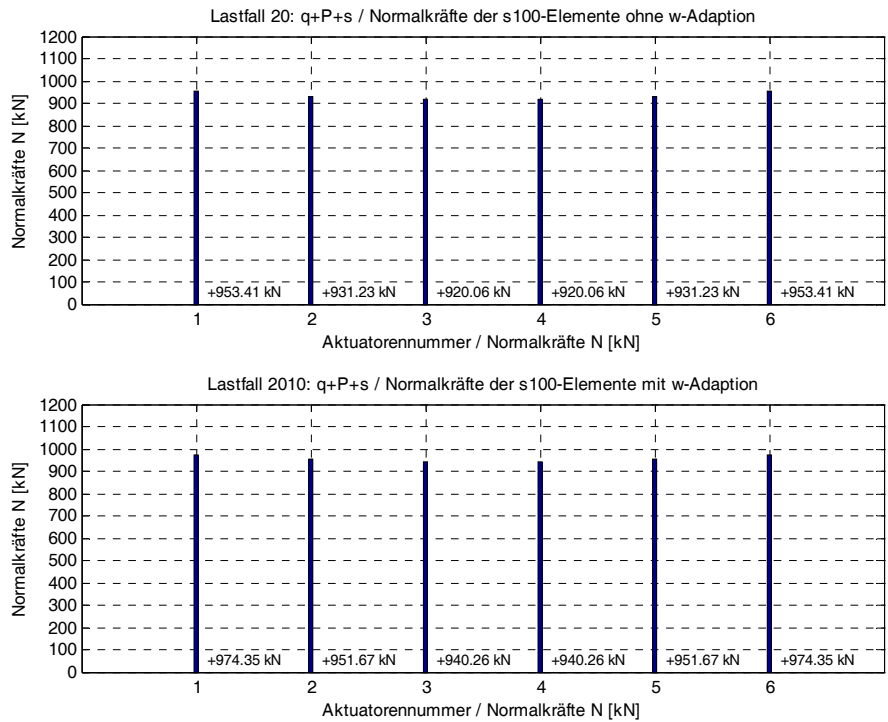
4.55: System d1_36_SPR, Querkraftverlauf, LF 20/10, Aktuatoren in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Normalkräfte N im Träger
 (Grenzfall β)



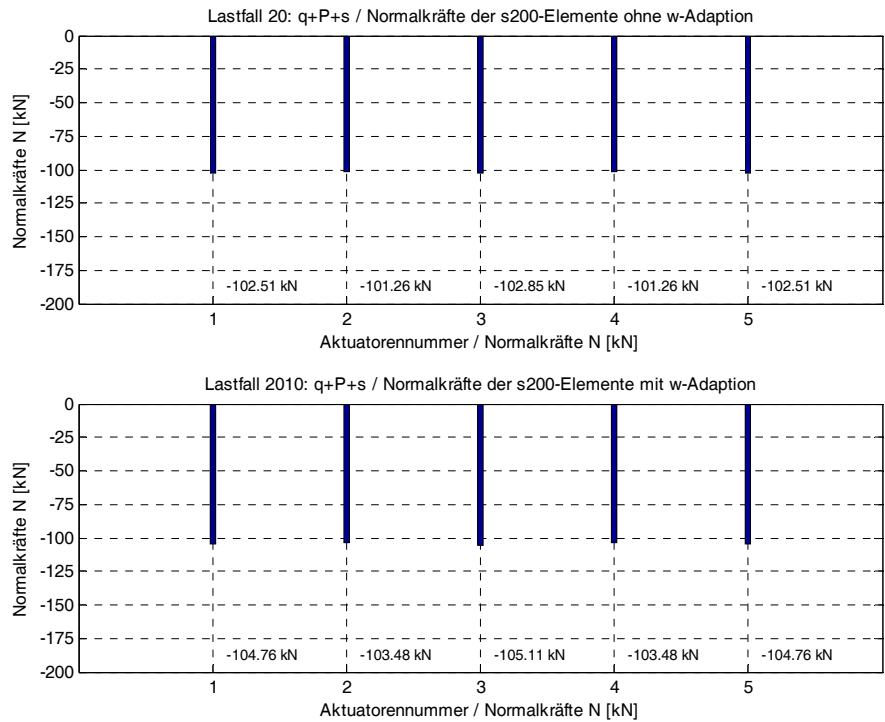
4.56: System d1_36_SPR, Normalkraftverlauf im Träger, LF 20/10, Akt. in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Normalkräfte N
 in der Unterspannung
 (Grenzfall β)



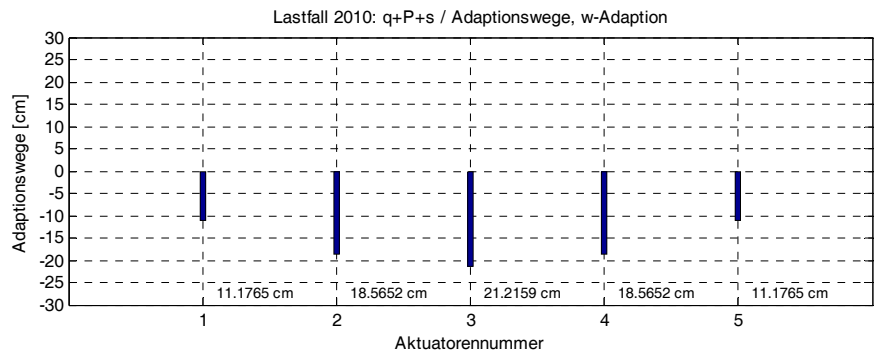
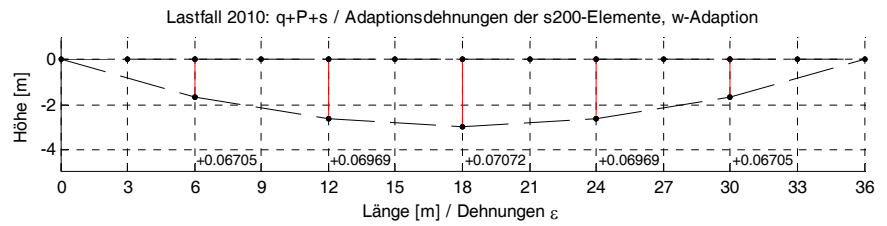
4.57: System d1_36_SPR, Normalkräfte in der Unterspannung, LF 20/1010, Akt. in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Normalkräfte N in den Spreizen
 (Grenzfall β)



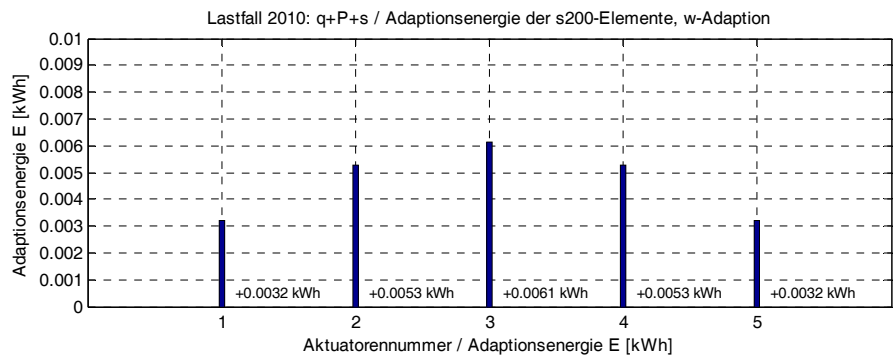
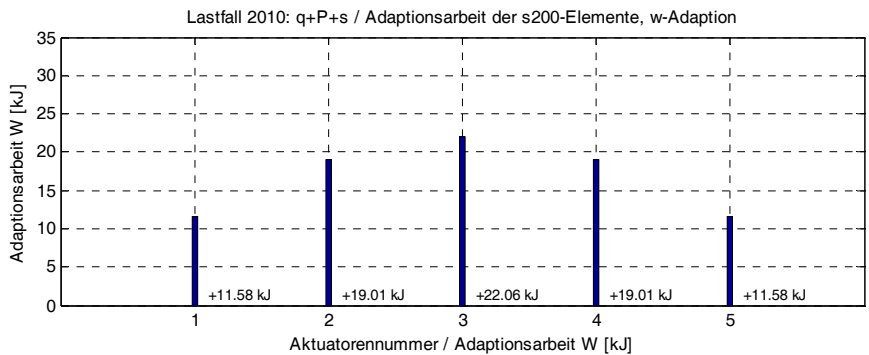
4.58: System d1_36_SPR, Normalkräfte in den Spreizen, LF 20/1010, Akt. in den Spreizen

System d1_36_SPR,
 Adaptionsdehnungen ϵ_A
 und -stellwege δ_A ,
 (Grenzfall β)



4.59: System d1_36_SPR, Adaptionsdehnungen und -stellwege, LF 20/2010

System d1_36_SPR,
 Adaptionsarbeit, -energie
 (Grenzfall β)



Summe der Adaptionsarbeiten $W = 83,24 \text{ kJ} / \text{LF 2010}$

4.60: System d1_36_SPR, Adaptionsarbeit und -energie, LF 20/2010, Akt. in den Spreizen

4.2.4.2

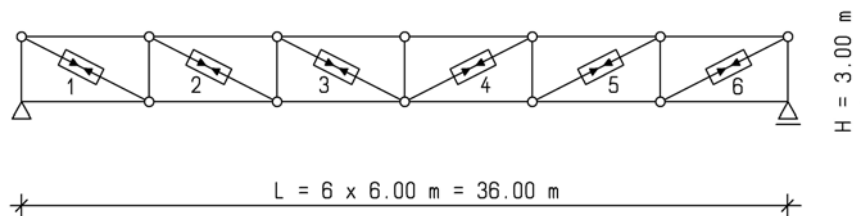
Adaption, System c2

Bei dem im Folgenden untersuchten Fachwerk handelt es sich um ein Ständerfachwerk mit 36 m Stützweite und fallenden Diagonalen. Die Systemvorspannung bzw. Überhöhung wurde für die Eigenlasten bestimmt. Die Adaptionsbetrachtungen erfolgen ebenfalls für den Grenzfall β (s. Kapitel 4.2.1.1).

Aus der Vorbemessung ergeben sich folgende Querschnitte:

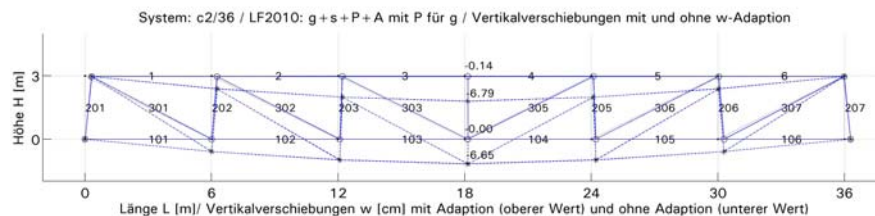
- Obergurt: RR 193.7/8.0 bis 193.7/16.0 mm
- Untergurt: RR 193.7/6.3 bis 193.7/10.0 mm
- Pfosten: RR 88.9/4.0, 88.9/6.3, 101.6/8.0 und 101.6/10.0 mm
- Diagonalen: RR 76.1/4.0, 88.9/8.0, 101.6/10.0 mm

Für dieses Tragsystem wurden Berechnungen mit verschiedenen Aktuatoranordnungen durchgeführt. Dargestellt wird der Adaptionsvorgang mit Aktuatoren in den Diagonalen für den maßgebenden Lastfall $LF20 = g + P + s$ und $LF2010 = g + P + s + A_w$.



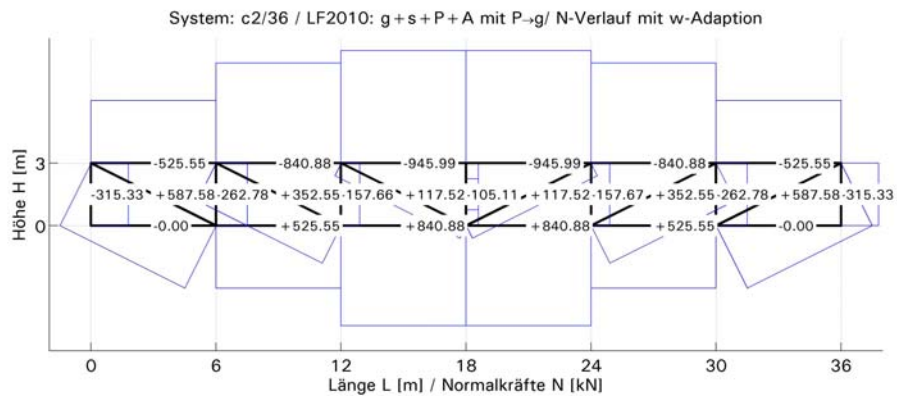
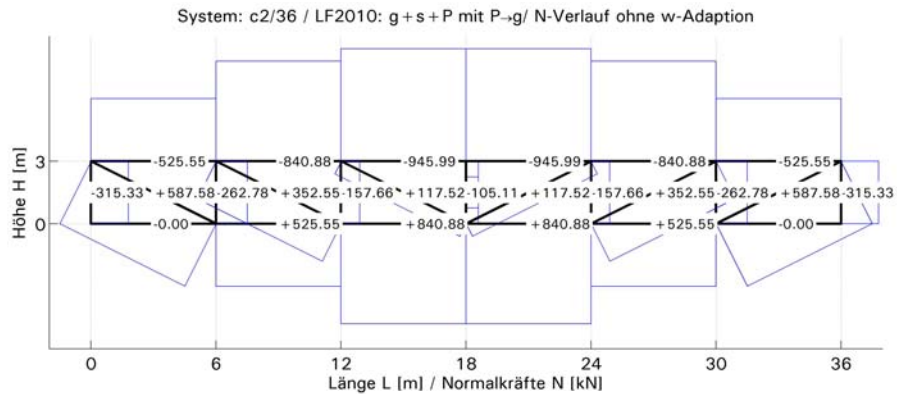
4.61: System c2_36, Aktuatoren in den Diagonalen

System c2_36_D
 Vertikalverformungen
 (Grenzfall β)



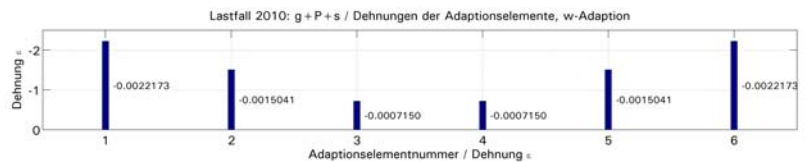
4.62: System c2_36, Vertikalverformungen, LF 20/2010

System c2_36_D,
 Normalkräfte N [kN]
 (Grenzfall β)



4.63: System c2_36_D, Normalkräfte N [kN], LF 20/2010

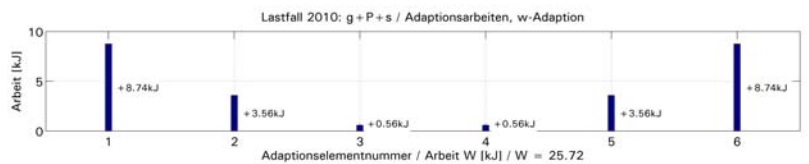
Adaptionsdehnungen ϵ_A
 (Grenzfall β)



Adaptionsstellwege δ_A
 (Grenzfall β)



Adaptionsarbeiten W [kJ]
 (Grenzfall β)



4.64: System c2_36_D, Adaptionsdehnungen, -wege, -arbeiten, LF 20/2010

4.2.4.3

Zusammenfassung der Ergebnisse für verschiedene Systeme

Da das System c2_36 statisch bestimmt ist, führen die Längenänderungen der Aktuatoren zu dehnungslosen Geometrieänderungen des Fachwerks. Dies hat zur Folge, dass die Normalkräfte in den Gurten, Pfosten und Diagonalen vor und nach der Adaption bei kleinen Geometrieänderungen unverändert bleiben und von der Aktuatorenanordnung unabhängig sind. Die Summen der Adaptionsarbeiten für unterschiedliche Aktuatorenanordnungen gleichen der durch die äußeren Lasten verrichteten Arbeit des Systems. Demgegenüber im Bereich großer Formänderungen müssen Nichtlinearitäten sowohl aus dem Stellweg der Aktuatoren als auch aus den Geometrieänderungen des Gesamtsystems (Theorie II. Ordnung) berücksichtigt werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse des Systems d1_36 (unterspannter Träger, Grenzfall β) fällt auf, dass die Schnittgrößen beider Varianten gleiche Werte aufweisen. Da in der dargestellten Betrachtung das nicht-lineare Verhalten der Aktuatoren bezüglich des Stellweges vereinfachend außer Acht gelassen wurde, ergeben sich für beide Varianten der Aktuatorenanordnung (in der Unterspannung oder in den Spreizen) gleich große Adaptionsarbeiten. Wie bereits in Kapitel 4.2.1.2 beschrieben, ist diese Vereinfachung nur im Bereich kleiner Aktuatorenstellwege zulässig. Allerdings sind die zur Adaption erforderlichen Wege und die aufzunehmenden Kräfte beider Varianten gänzlich unterschiedlich: Für die Variante mit Aktuatoren in der Unterspannung sind Adaptionswege von 1,42 bis 1,53 cm erforderlich, bei Normalkraftbeanspruchung von 940,26 bis 974,35 kN (s. Abbildungen 4.50 und 4.48). Hingegen betragen die Adaptionswege der Variante mit Aktuatoren in den Spreizen 11,18 bis 21,22 cm. Die zugehörigen Druckkräfte in den Spreizen liegen bei 103,48 bis 105,11 kN (s. Abbildungen 4.59 und 4.58). Eine vereinfachte Adaptionsberechnung unter der Annahme eines linearen Verhaltens der Aktuatoren bezüglich des Stellweges liefert hier nur für die Aktuatorenanordnung in der Unterspannung zufriedenstellende Entwurfsergebnisse.

Das System d3 (abgehängter Träger, Grenzfall β) lässt sich sehr gut für symmetrische und asymmetrische Einwirkungen adaptieren: Für den Lastfall LF20/2010 und die Vorspannung P für Eigengewicht g beträgt die erforderliche Adaptionsarbeit 29,11 kJ. Verglichen mit dem System d1 sind das nur ca. 35% der entsprechenden Adaptionsarbeit des unterspannten Trägers. Dieser signifikante Unterschied ist auf die unterschiedliche Anordnung der einzelnen Elemente in beiden Tragwerken und die daraus resultierenden Unterschiede in der Lastabtragung zurückzuführen: Der abgehängte Träger (d3) besteht aus Elementen, die in Dreiecken angeordnet sind. Dadurch werden die Einwirkungen verformungsarm, d. h. ohne dehnungslose Verschiebungen, zu den Auflagern abgetragen. Hingegen bilden die Balken und Stäbe des unterspannten Trägers (d1) größtenteils Vierecke, was zwangsläufig zu größeren Systemverformungen und höheren Biegebeanspruchungen führt.

Allerdings reagiert das System d3 deutlich empfindlicher auf die Veränderungen der Aktuatorenanordnung, die zum Beispiel durch Ausfall einzelner Aktuatoren verursacht werden können, als das System d1. Diese Eigenschaften werden im folgenden Kapitel in Zusammenhang mit den Begriffen Adaptabilität und Systemredundanz erläutert.

4.2.5

Adaptabilität und
Redundanz ausgewählter
Tragsysteme

Die untersuchten Systeme weisen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Systemadaptabilität und -redundanz auf. Dies wird im Folgenden anhand der Systeme d1 (unterspannter Träger) und d3 (abgehängter Träger) dargestellt.

Adaptabilität

Die Verteilung der Balkendiagramme in der Sensitivitätsanalyse (s. Kapitel 4.1.3) bzw. in den Ergebnissen der Adaptionberechnung (Adaptionsarbeit, -wege und -dehnungen) ermöglicht qualitative Aussagen über die Adaptabilität des Systems und die Empfindlichkeit auf Störungen während des Adaptionvorgangs.

Eine gleichmäßige Verteilung der Balkendiagramme deutet auf mehrere gleichwertige Adaptionvarianten hin. Das heißt, ein Adaptionziel kann bei solchen Systemen mit unterschiedlicher Aktuatorenanzahl und -anordnung, bei ähnlichen Adaptionarbeiten erreicht werden. Auch eine signifikante Verringerung der Aktuatorenanzahl führt bei diesen Systemen zu keiner wesentlichen Verschlechterung der Adaptionsergebnisse, vorausgesetzt die Leistungsfähigkeit der Aktuatoren ist ausreichend.

Ein unterspannter Träger (System d1) ist ein Beispiel für diese Art von Systemen. Werden die Aktuatoren in der Unterspannung angeordnet, so ist es möglich, das System mit wenigen Aktuatoren ähnlich gut wie mit Aktuatoren in allen Unterspannungselementen zu adaptieren ohne die Summen der Adaptionarbeiten wesentlich zu verändern (s. Abbildungen 4.66, 4.67 und 4.51)²¹².

²¹² Die Adaptionarbeiten sind nur im Falle einer linearen Betrachtung der Aktuatorenstellwege gleich. Infolge der grundsätzlichen Nichtlinearität des Aktuatorenverhaltens hinsichtlich ihrer Stellwege weisen die Adaptionarbeiten verschiedener Aktuatorenanordnungen in der Unterspannung voneinander abweichende Werte auf, die jedoch im einstelligen Prozentbereich liegen.

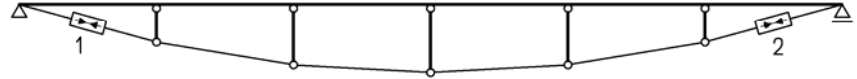
Hingegen reagiert ein abgehängter Träger viel empfindlicher auf Veränderungen der Aktuatorenanzahl bzw. -lage im Tragsystem (s. Abbildung 4.67).

Kritische Aktuatorenanzahl Wird eine systemabhängige Mindestanzahl der Aktuatoren unterschritten, können die Adaptionsziele nicht mehr erreicht werden. Diese Mindestanzahl der Aktuatoren wird als kritische Aktuatorenanzahl A_K bezeichnet.

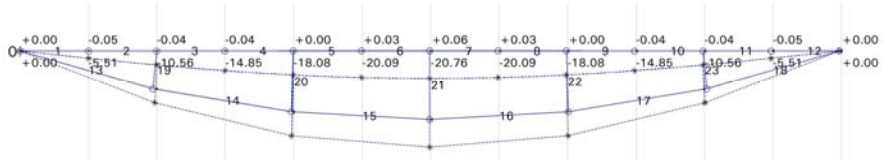
Systemredundanz Darüber hinaus weist ein gleichmäßiger Verlauf der Balkendiagramme auf potenziell vorhandene, hohe Redundanz der Aktuatorik (Aktuatoriensystem) hin. Wird eine Aktuatorenanzahl von $A_K + n$ positioniert, so können die Funktionen von bis zu n ausgefallenen Aktuatoren durch andere kompensiert werden. Erst der Ausfall von $n + 1$ Aktuatoren würde zu nicht mehr zufrieden stellenden Adaptionsergebnissen führen.

Adaptabilitätsanalyse

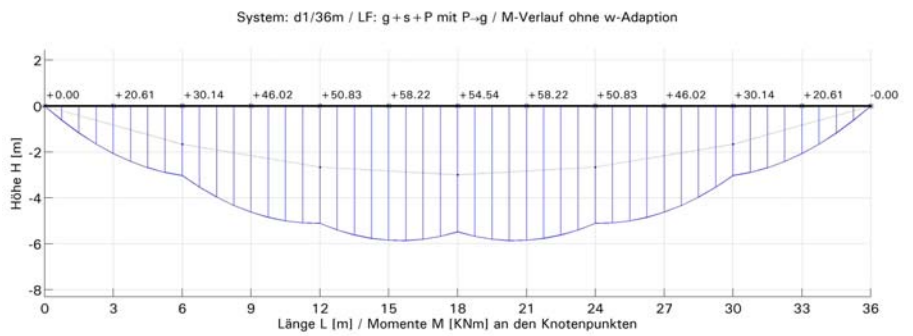
System d1_36, Variante 1
 (Grenzfall β)



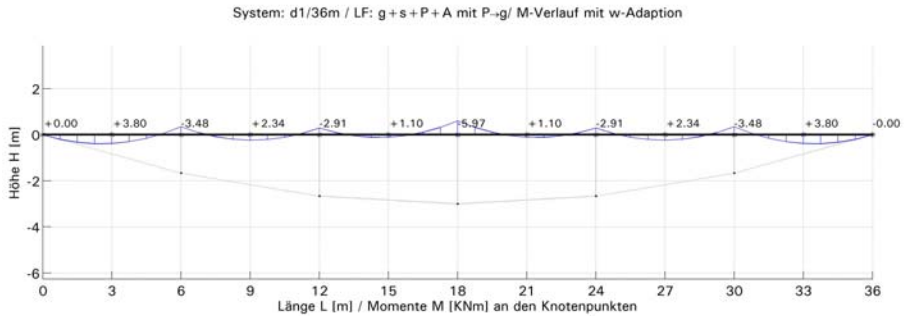
Vertikalverformungen
 unten ohne / oben mit Adaption



Momentenverlauf
 ohne Adaption



Momentenverlauf
 mit Adaption



Adaptionsstellwege δ_Δ



Adaptionsarbeit

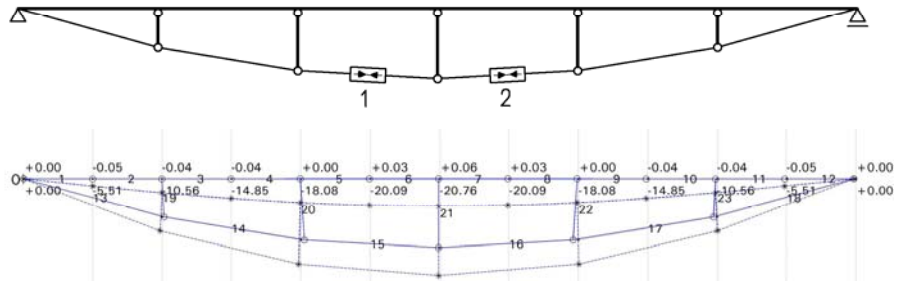


4.65: System d1_36, Variante 1, Adaptabilitätsanalyse, LF 20/2010

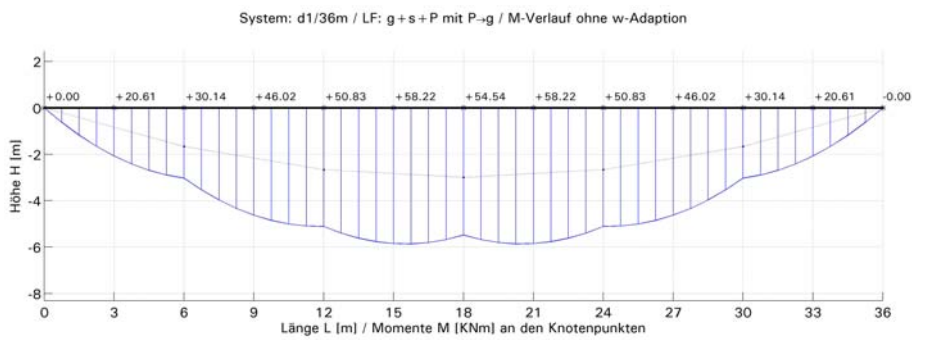
Adaptabilitätsanalyse

System d1_36, Variante 2
 (Grenzfall β)

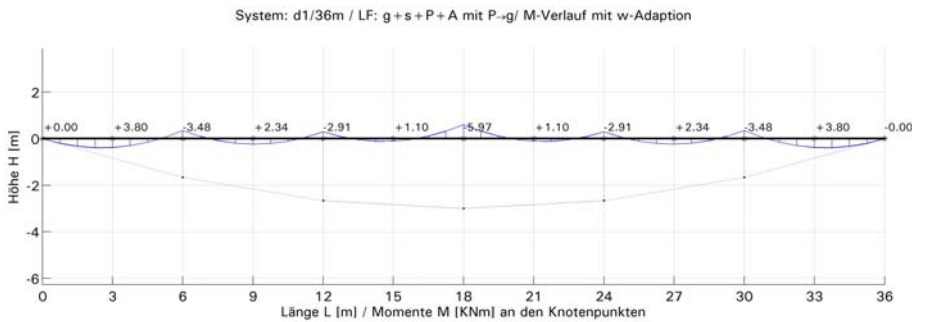
Vertikalverformungen
 unten ohne / oben mit Adaption



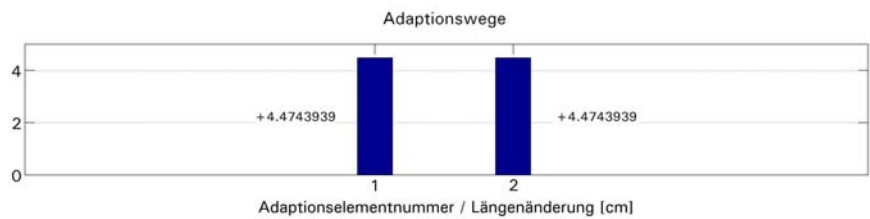
Momentenverlauf
 ohne Adaption



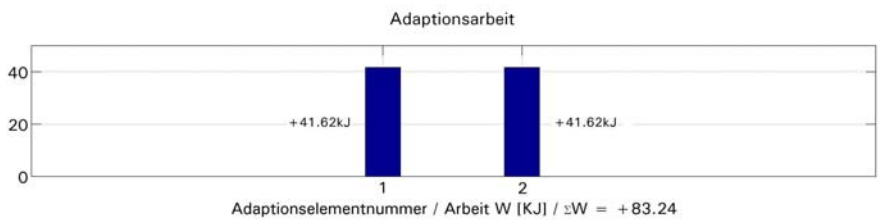
Momentenverlauf
 mit Adaption



Adaptionsstellwege δ_λ



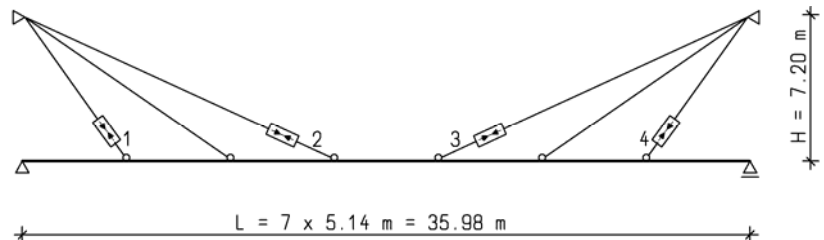
Adaptionsarbeiten



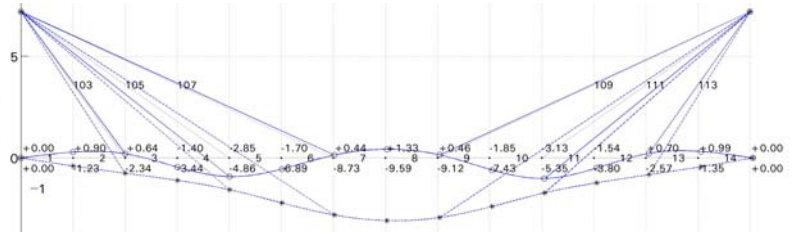
4.66: System d1_36, Variante 2, Adaptabilitätsanalyse, LF 20/2010

Adaptabilitätsanalyse,
 System d3_36
 (Grenzfall β)

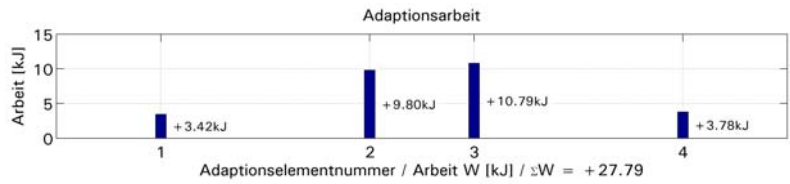
Variante 1



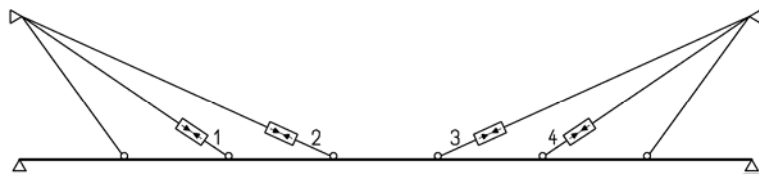
Vertikalverformungen
 unten ohne / oben mit Adaption



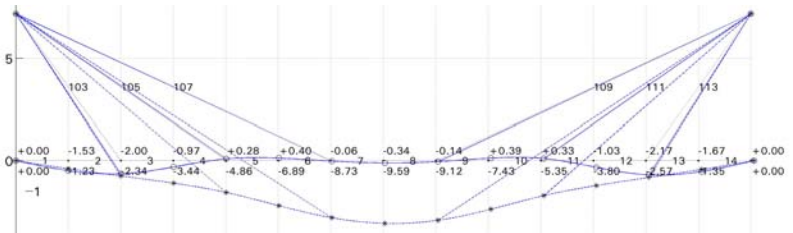
Adaptionsarbeiten



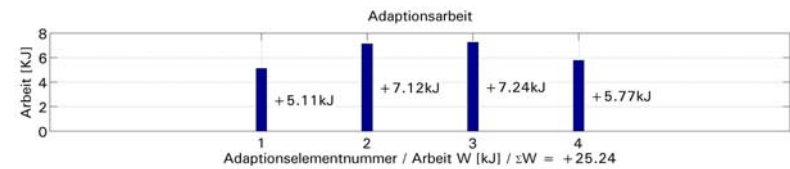
Variante 2



Vertikalverformungen
 unten ohne / oben mit Adaption



Adaptionsarbeiten

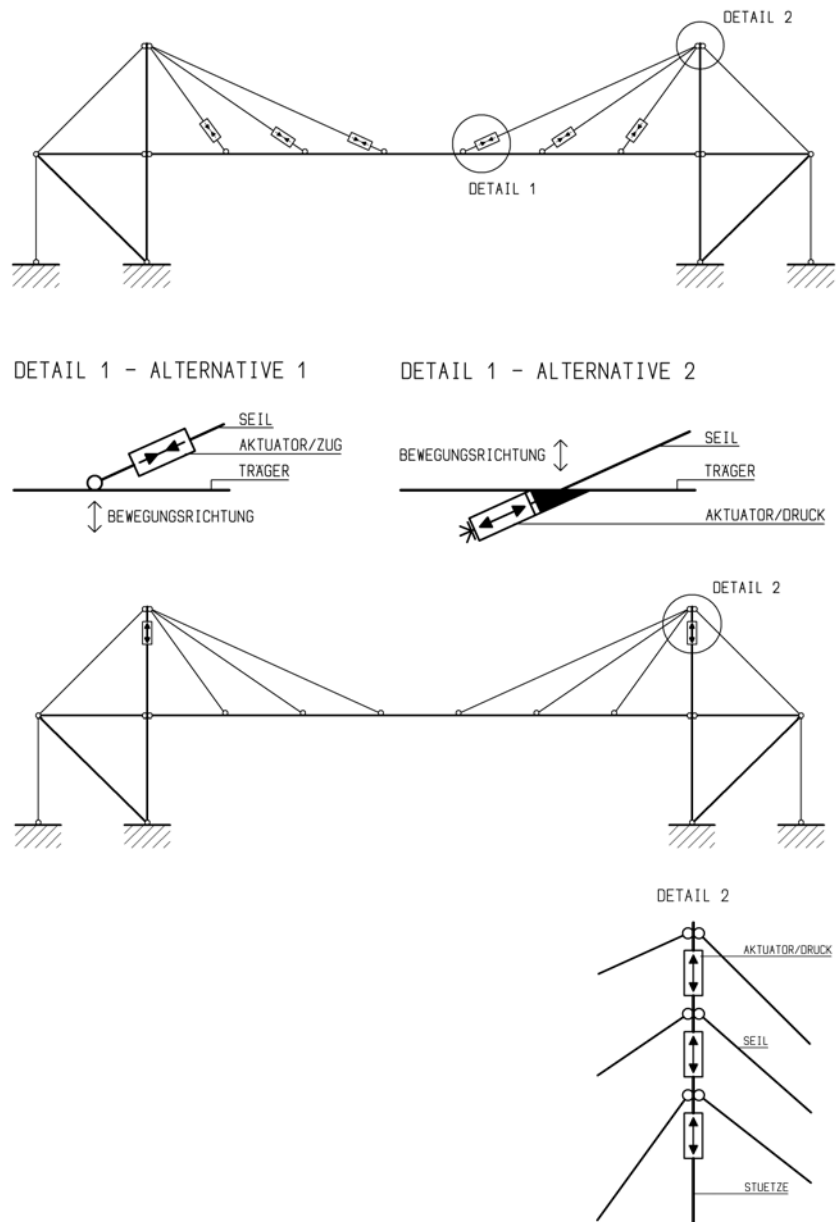


4.67: System d3_36, Adaptabilitätsanalyse, LF 20/2010

4.2.6

Konstruktive Maßnahmen
 zur Beeinflussung der
 Aktuatorenbeanspruchung

In Abhängigkeit von der Position im Tragwerk werden Aktuatoren unterschiedlich, entweder durch Zug- oder Druckkräfte, beansprucht (s. Kapitel 4.2.4, System d1). Häufig ist es möglich durch eine Änderung der Aktuatorenposition ihre Beanspruchungsart (Zug- bzw. Druckkräfte) zu verändern und an die Beanspruchbarkeit der Aktuatoren anzupassen.



4.68: System d3, konstr. Maßnahmen zur Beeinflussung der Aktuatorenbeanspruchung

4.2.7

Tragsicherheit und
 Gebrauchstauglichkeit
 adaptiver Dachtragwerke

Der Sicherheit von adaptiven Tragwerken kommt eine besondere Bedeutung zu. Durch den Einsatz von technisch aufwendigen Komponenten, wie Aktuatoren, Sensoren und Regelung bzw. Steuerung, muss entweder sichergestellt werden, dass diese Einheiten nicht ausfallen können bzw. beim Ausfall der aktiven Komponenten das Systemen trag-sicher bleibt. Hingegen kann die Gebrauchstauglichkeit adaptiver Tragwerke zunächst unberücksichtigt bleiben.

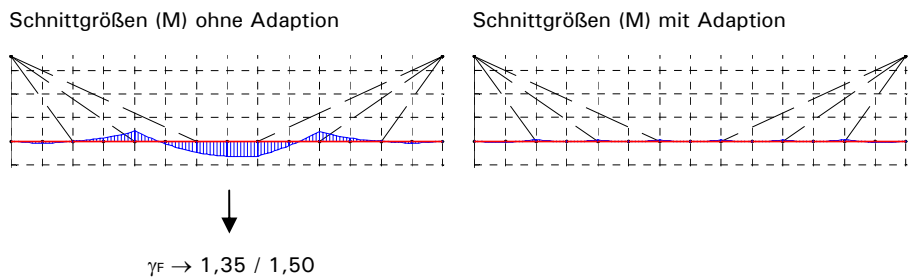
Für den Entwurf adaptiver Tragwerke werden in Anlehnung an die vereinfachten Kombinationsregeln der DIN 1055-100:2001-03, Anhang A.4, folgende Strategien zur Tragsicherheit dieser Systeme vorgeschlagen:

Strategie 1:

TSN²¹³ mit M_d , V_d , N_d
 und

$\gamma_{G,sup} = 1,35$
 $\gamma_{G,inf} = 1,00$
 $\gamma_Q = 1,50$

Die Tragsicherheit wird wie bei nicht adaptiven Tragwerken ermittelt, wobei die Einwirkungen nach der Grundkombination ermittelt werden. Für ständige Einwirkungen betragen die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{G,sup} = 1,35$ (ungünstige Auswirkung) und $\gamma_{G,inf} = 1,00$ (günstige Auswirkung). Unabhängige veränderliche Einwirkungen werden mit $\gamma_Q = 1,5$ behaftet. Die maßgebenden Schnittgrößen resultieren aus den nicht adaptierten Lastfällen.



4.69: Tragsicherheitsnachweis mit Schnittgrößen ohne Adaption und $\gamma_F \rightarrow 1,35 / 1,50$

²¹³ TSN = Tragsicherheitsnachweis, GZT = Grenzzustand der Tragsicherheit

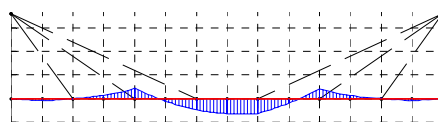
In diesem Fall ergeben sich Vorteile für die Bemessung des Tragwerks nur, wenn die Gebrauchstauglichkeit maßgebend ist. Diese konservative Betrachtung kann in Ausnahmefällen angewendet werden. Zum Beispiel bei Tragsystemen für die besonders hohen Sicherheiten erforderlich sind. Die Adaption des Tragwerks stellt dann eine zusätzliche Sicherheit dar. Dies ist unter Umständen sinnvoll für Systeme, die temporär durch hohe Einwirkungen beansprucht werden können und eine besondere Gefahr für die Allgemeinheit darstellen.

Strategie 2:

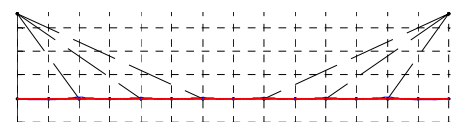
TSN mit M_d, V_d, N_d
 und $\gamma_F \approx 1,1$

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen werden für den Nachweis der Tragsicherheit in Anlehnung an die außergewöhnliche Einwirkungskombination der DIN 1055-100:2001-03, Anhang A.4, auf ca. $\gamma_F = 1,1$ herabgesetzt. Da im Falle des Versagens des Adaptionssystems, das Tragwerk aus einer Verformungslage, die ggf. deutlich die Gebrauchstauglichkeitsgrenze überschreitet, nach dem Beheben der Störung wieder angehoben werden muss, erscheint eine Abminderung der Sicherheitsbeiwerte der Einwirkungen auf $\gamma_F = 1,0$ als nicht sinnvoll. Die Bemessung erfolgt dann mit den nicht adaptierten Momenten, Quer- und Normalkräften. In diesem Fall gibt es einen wesentlichen Unterschied zur Bemessung nicht adaptiver Tragsysteme. Der daraus resultierende Vorteil für die Bemessungsschnittgrößen ergibt sich aus dem Verhältnis der Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungskombinationen von ca. $1,1/1,45$, wobei 1,45 ein ungefährender Mittelwert der ständigen und veränderlichen Einwirkungen ist.

Schnittgrößen (M) ohne Adaption



Schnittgrößen (M) mit Adaption



$\gamma_F \approx 1,10$

4.70: Tragsicherheitsnachweis mit Schnittgrößen ohne Adaption und $\gamma_F \approx 1,10$

Strategie 3:

TSN mit $M_{d,A}$, $V_{d,A}$, $N_{d,A}$

und

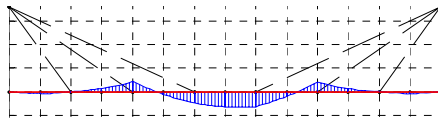
$$\gamma_{G,sup} = 1,35$$

$$\gamma_{G,inf} = 1,00$$

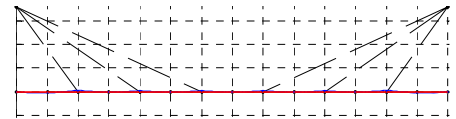
$$\gamma_Q = 1,50$$

Der Tragsicherheitsnachweis wird mit den Einwirkungen nach der Grundkombination ($\gamma_{G,sup} = 1,35$, $\gamma_{G,inf} = 1,00$, $\gamma_Q = 1,50$) und den adaptierten Schnittgrößen geführt. Dieser Ansatz setzt voraus, dass die Versagenswahrscheinlichkeit der Adaptionseinheiten sehr gering ist oder dass eine Überbeanspruchung des Tragwerks im Falle des Ausfalls der Adaptionskomponenten keine Gefahr für die Allgemeinheit darstellt.

Schnittgrößen (M) ohne Adaption



Schnittgrößen (M) mit Adaption



$$\gamma_F \rightarrow 1,35/1,5$$

4.71: Tragsicherheitsnachweis mit adaptierten Schnittgrößen und $\gamma_F \rightarrow 1,35/1,5$

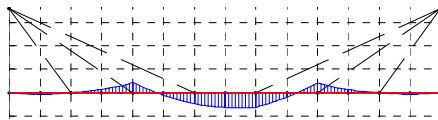
Strategie 4:

TSN mit $M_{d,A}$, $V_{d,A}$, $N_{d,A}$

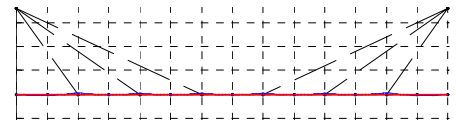
und $\gamma_F = 1,0$

Der Tragsicherheitsnachweis wird unter Berücksichtigung der außergewöhnlichen Einwirkungskombination mit auf $\gamma_F = 1,0$ abgeminderten Teilsicherheitsbeiwerten geführt. Diese Alternative setzt voraus, dass die Adaptionskomponenten nicht ausfallen werden und die Schnittgrößen immer auf das vorgeschriebene Niveau adaptiert werden können. Um eventuell höhere Wind- oder Scheelasten adaptieren zu können, müssen die Kennwerte der gewählten Aktuatoren mit Sicherheitsbeiwerten von ca. 1,5 behaftet werden.

Schnittgrößen (M) ohne Adaption



Schnittgrößen (M) mit Adaption



$$\gamma_F = 1,00$$

4.72: Tragsicherheitsnachweis mit adaptierten Schnittgrößen und $\gamma_F = 1,00$

4.3

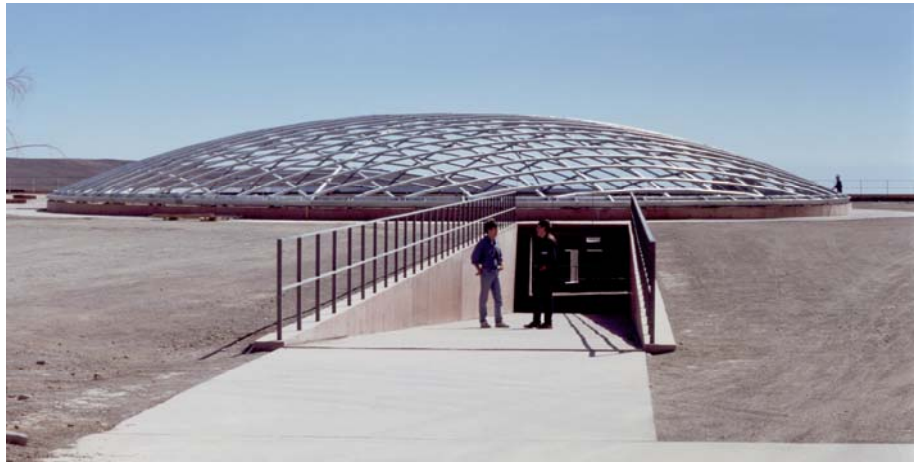
Anwendungsmöglichkeiten Die in Kapitel 4.2 durchgeführten Betrachtungen belegen, dass die Adaption der Dachtragwerke zu wesentlichen Vorteilen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit führen kann. Auf dieser Grundlage lassen sich weitere Beispiele für einen effizienten Einsatz der Adaptionstechniken aufzeigen.

Adaptive Gitterschalen Die Herstellung von Gitter- und Netzschalen erfordert ein sehr hohes Maß an Präzision. Die maximalen Toleranzen können im Zehntelmillimeterbereich liegen. Um durch Imperfektionen in der Herstellung oder im Lastansatz verursachte Ungenauigkeiten zu reduzieren, können Gitterschalentragwerke adaptiv ausgebildet werden. Die Aktuatoren könnten prinzipiell auf zwei Arten positioniert werden: Erstens in den Stäben oder den Seilen der Gitter- bzw. Netzschale, zweitens an den Auflagerpunkten der Gitterschale. Beide Varianten können bei Bedarf miteinander kombiniert werden. Die zweite Alternative bietet den Vorteil einer unauffälligen Unterbringung großer und leistungsstarker Aktuatoren.

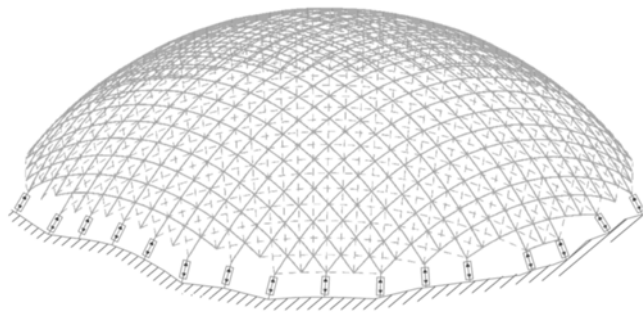
Die Suche nach Lösungen mit möglichst wenigen, diskret platzierten Aktuatoren, mit denen das Tragsystem effektiv adaptiert werden kann, ist beim Entwurf adaptiver Gitterschalen von besonderer Bedeutung. Gegenwärtig wird vom Autor eine 3-D Version des Adaptionsprogramms entwickelt, mit dem unter anderen adaptive Gitterschalen berechnet werden sollen.

Um sowohl statische bzw. quasistatische als auch dynamische Einwirkungen auf die Gitterschalen effektiv aufnehmen zu können, bietet sich an, zwei unterschiedliche Aktuatorentypen einzusetzen: Form-Gedächtnis-Aktuatoren für „langsame“ Lasten, wie zum Beispiel Schnee, und magnetorheologische Aktuatoren für „schnelle“ Lasten, wie zum Beispiel Wind.²¹⁴

²¹⁴ s. auch Kapitel 2.3.3.3



4.73: *The Paranal Residencia* der ESO, Beispiel für eine Gitterkuppel im Bauzustand²¹⁵



4.74: Adaption einer Netzkuppel mit Aktuatoren im Auflagerbereich

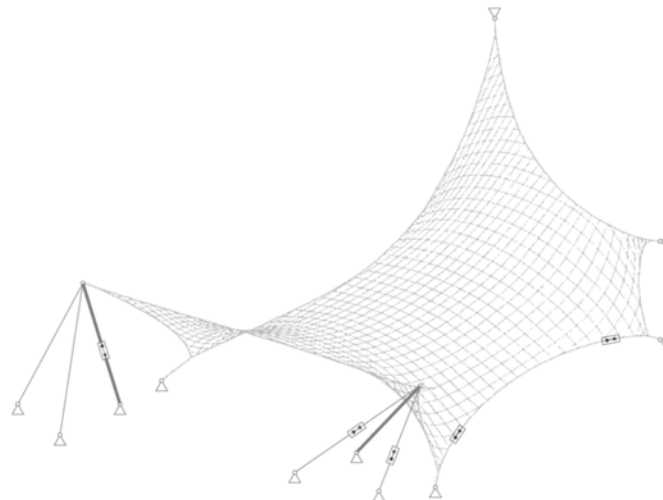
Adaptive Membranen

Für Membranbauwerke werden überwiegend textile Gewebe eingesetzt. Die Standardprodukte sind PVC-beschichtetes Polyesterfasergewebe und PTFE beschichtetes Glasfasergewebe. Die Lebensdauer von Geweben sinkt erheblich, wenn eine Membranvorspannung P gewählt wird, die größer als 10% der Kurzzeitfestigkeit (Reißkraft) des Membrangewebes ist. Für ein leichtes PVC-beschichtetes Polyestergerewebe beträgt die Kurzzeitfestigkeit in Kett- und Schussrichtung ca. 3000 N / 5 cm (60 kN/m). Die maximale Vorspannung für dieses Gewebe ergibt sich

²¹⁵ Architekten: Auer + Weber, München / Stuttgart, Tragwerksplaner: Mayr + Ludescher, München / Stuttgart

damit zu 6 kN/m. Da die Höhe der Vorspannung und die Membrangeometrie sich gegenseitig bedingen, können höher vorgespannte Membranen weiter und flacher gespannt werden. Die Flatteranfälligkeit der Membranbereiche mit geringer Krümmung wird durch eine entsprechend hoch gewählte Vorspannung reduziert. Daraus resultieren gegenläufige Entwurfsziele für Membranbauten, insbesondere für weit und flach gespannten Membranen: Einerseits darf die Vorspannung wegen der Lebensdauer der Membran nicht zu hoch gewählt werden, andererseits aber auch nicht zu niedrig wegen der Gefahr von Schnee- und Wassersackbildung sowie der Neigung zum Flattern der flachen Membranbereiche.

Durch die Adaption der Vorspannkraft, d.h. eine Anpassung der Höhe der Vorspannung an die augenblickliche Belastung, können beide Entwurfsaspekte berücksichtigt werden. Die Anpassung der Vorspannung kann dabei entweder durch die adaptive Ausbildung des primären Stütztragwerks oder der Randseile der Membranfläche realisiert werden.



4.75: Adaptives Membrandach mit Aktuatoren in Primärtragwerk und Randseilen

Tensegrity

Der Begriff *Tensegrity* geht auf Richard Buckminster Fuller zurück und ist eine Verbindung der englischen Worte *tensional* und *integrity*. Von einem echten Tensegrity-Tragwerk wird gesprochen, wenn eine Menge von diskontinuierlichen Druckgliedern mit einer Menge kontinuierlicher Zugglieder so interagiert ist, dass ein stabiles Volumen im Raum umschrieben wird.



4.76: Easy Landing, Baltimore, Kenneth Snelson, 1977, Beispiel für *Tensegrity*-Tragwerk

Trotz des enormen Potentials konnten sich *Tensegrity*-Tragwerke, bis auf wenige Ausnahmen (zum Beispiel Geiger-Kuppel oder Speichenradkonstruktionen, die von Fachleuten zu der erweiterten Gruppe der *Tensegrity*-Tragwerken gezählt werden), im Bauwesen bis jetzt nicht durchsetzen. Die Gründe dafür liegen einerseits in den großen Verformungen dieser Systeme, andererseits in der sehr hohen Genauigkeit, mit der diese Systeme gebaut werden müssen. So führen schon Längenabweichungen in den Zugelementen von wenigen Zehntelmillimetern zu wesentlichen Veränderungen der Systemkräfte und ggf. zum Ausfall einzelner Seile.

Diese Probleme könnten ebenfalls durch Adaption, zumindest zum Teil, gelöst werden. Die in *Tensegrity*-Tragwerken eingesetzten Aktuatoren sollen große Kräfte übertragen, ihre erforderlichen Längenänderungen wären relativ klein.

Bauen im Bestand

Die Tragwerksadaption ermöglicht eine veränderungsarme und diskrete Anpassung von Bestandsbauten an neue Anforderungen (Umnutzung, Aufnahme erhöhter Einwirkungen, Verbesserung des Verformungs- und Schwingungsverhaltens etc.). Von Vorteil ist dies insbesondere bei hochwertigen, technisch anspruchsvollen, ggf. denkmalgeschützten Bauwerken, zum Beispiel filigranen Stahl- oder Holzbauten. So kann die Tragfähigkeit mehrgeschossiger Rahmen, die im Hochbau seit dem neunzehnten Jahrhundert in filigranen Stahltragwerken mehrmals eingesetzt wurden, alleine durch eine aktive Lagerausbildung deutlich gesteigert werden. Dabei kann die Tragwerksadaption ggf. ohne Veränderungen der Rahmenstiele und -riegel alleine mit aktiven Zuggliedern erfolgen, die in den Geschoßdecken zwischen den Auflagern unsichtbar angeordnet werden und durch Ausführen von geringen Lagerverschiebungen die Schnittgrößen homogenisieren können.

low-tech Adaption

Die Realisierung der Adaptionsvorgänge in Tragwerken muss nicht zwangsläufig den Einsatz von hoch technisierten Systemen bedingen. So ist es zum Beispiel möglich, mit Aktuatoren auf der Basis von Form-Gedächtnis-Legierungen adaptive Tragwerke ohne elektronische Regelung auszuführen. Dies ist der Fall, wenn das Tragwerk nicht fortlaufend adaptiert werden muss und die Adaptionen auf wenige Zustände beschränkt werden können. Als Beispiel kann die Reduzierung der aus der wechselnden Umgebungstemperatur resultierenden Zwängungen in statisch unbestimmten Tragwerken genannt werden: Da Form-Gedächtnis-Materialien bei Erwärmung eine Verkürzung und beim Abkühlen eine Verlängerung erfahren, können die Temperaturzwängungen durch den Einbau einzelner Aktuatoren mit geschickt gewählten Umwandlungstemperaturen wesentlich reduziert werden, ohne auf elektrische o. ä. Energiequellen zurückgreifen zu müssen. Bedingt durch die

hohen Festigkeiten der Form-Gedächtnis-Legierungen, die in der Größenordnung derer von Stahl liegen, und den monolithischen Aufbau der Aktuatoren, können die variablen Elemente unauffällig im Tragwerk platziert werden und versprechen einen robusten und zuverlässigen Betrieb. Allerdings stellen die hohen Kosten der Form-Gedächtnis-Legierungen noch einen wesentlichen Nachteil dar.

low-energy Adaption

Des Weiteren kann die Aktivierung der Form-Gedächtnis-Aktuatoren mit der Hilfe von für die meisten Gebäude ohnehin erforderlichen gebäudetechnischen Anlagen, zum Beispiel Heizungs- oder Warmwasserleitungen, energieschonend realisiert werden. Auch hier hängt der für die Regelkreiselemente erforderliche Aufwand (Regelung, Sensorennetzwerk, Höhe der externen Energie) von den zu erfüllenden Adaptionaufgaben ab: Einerseits können Aktuatoren analog zur Adaption der Temperaturzwängungen als eine Art Schalter eingesetzt werden, wodurch das Tragwerk vor Überbeanspruchung durch sonstige Einwirkungen, wie zum Beispiel Schnee und Wind, geschützt werden kann. Andererseits kann eine stetige Tragwerksadaption verwirklicht werden, ggf. unter Zuhilfenahme von elektrischer oder magnetischer Energie als zusätzliche Aktivierungsquelle der Aktuatoren.

5

Zusammenfassung und
Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren erlaubt den Entwurf von adaptiven Dachtragwerken mit längenveränderbaren aktiven Elementen. Die Entwurfsprozedur besteht aus mehreren sich gegenseitig bedingenden und aufeinander folgenden Entwurfsschritten: Wahl des Tragsystems, Optimierung von Form, Topologie und Querschnitten (Strukturoptimierung), Berechnung der Vorspannung, Sensitivitätsanalyse, Aktuatorenpositionierung, Adaptionberechnung und Nachrechnung nach Theorie höherer Ordnung stellen die einzelnen Entwurfsphasen dar. Um das Superpositionsprinzip nutzen zu können, erfolgen die in das Berechnungsprogramm implementierten Optimierungsberechnungen nach der Theorie I. Ordnung. Für die Adaptionselemente wurde ein lineares Materialverhalten angenommen. Die Bearbeitung einzelner Entwurfsschritte erfordert eine aktive Arbeitsweise des Anwenders.

Mit Hilfe dieses Entwurfsverfahrens wurden ausgewählte Aspekte adaptiver Tragwerke untersucht: Adaptionsarbeit, Einfluss der Veränderung der Stützweite, Vergleich unterschiedlicher Tragsysteme, Adaptabilität und Redundanz ausgewählter Tragsysteme, Maßnahmen zur Beeinflussung der Aktuatorenbeanspruchung sowie Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit adaptiver Dachtragwerke.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass Adaption zu einer effizienten Aufnahme von veränderlichen Einwirkungen führen kann. Dadurch werden neue Perspektiven hinsichtlich folgender Aspekte der Dachtragwerke eröffnet:

- Erhöhung der Tragsicherheit
- Verringerung des Materialaufwands
- Erfüllung der Gebrauchtauglichkeitsanforderungen
 - Verringerung der Verformungen
 - Schwingungskontrolle
- Erhöhung des Sicherheitsniveaus neuer und bestehender Tragwerke
- Bei Bedarf Reduzierung der Herstellungstoleranzen

- Bauen im Bestand:
 - Nutzung der vorhandenen Tragreserven durch gezielte Umlagerung der Schnittgrößen
 - Beibehaltung der vorhandenen Querschnitte von bestehenden Tragwerken

Dabei können zur Adaption der Dachtragwerke sehr unterschiedliche Lösungsansätze hinsichtlich des technischen Aufwands verfolgt werden. Deren Spektrum reicht von einfachen Strukturen ohne Regelung und mit einem *smarten* Materialtyp mit sensorischen und aktuatorischen Eigenschaften, die nur eine Schaltfunktion zu erfüllen haben,²¹⁶ bis zu Tragwerken, die durch den Einsatz aller Regelkreiselemente zu hochpräzisen, ständig veränderbaren und anpassungsfähigen Maschinen werden.

Die Höhe des erforderlichen Aufwandes hängt von den aus der Nutzung resultierenden Adaptionenzielen ab. Dabei ist es bis auf wenige Ausnahmen nicht sinnvoll, eine volle Tragwerksadaption durchzuführen. In der Regel werden bestimmte Abweichungen von den optimalen Adaptionsergebnissen zugelassen. Die Höhen der Abweichungen werden durch das der Bemessung des adaptiven Tragwerks zugrunde liegende Sicherheitskonzept bestimmt. Die Adaption selbst wird gewöhnlich unter Einbeziehung einiger weniger relevanter Systempunkte durchgeführt. Deren Wahl erfolgt in Abhängigkeit von den auf das Tragwerk einwirkenden Lasten.

²¹⁶ zum Beispiel Form-Gedächtnis-Materialien zur Reduzierung der Temperaturdehnungen

Im Allgemeinen kann zwischen der Adaption der Schnitt- bzw. Verformungsgrößen und der Adaption der Einwirkungen unterschieden werden.

Um die aus den Einwirkungen (Schnee, Wind etc.) resultierenden Schnitt- und Verformungsgrößen des Tragwerks zu adaptieren, sind Stellwege im Zenti- bzw. Dezimeterbereich bei Kräften von bis zu mehreren Hundert Kilonewton erforderlich. Systemänderungen in dieser Größenordnung können mit herkömmlichen Stellelementen (zum Beispiel pneumatische oder hydraulische Stellantriebe) erreicht werden. Eine sehr interessante Alternative bieten Aktuatoren auf der Basis von *smart materials*. Hier kommen vor allem Wandler auf der Basis von Form-Gedächtnis-Legierungen und magnetorheologischen Fluiden in Frage.

Demgegenüber sind die zur Adaption der Einwirkungen erforderlichen Kräfte und Wege in der Regel mindestens um eine Größenordnung kleiner. In diesem Fall kann die Tragwerkanpassung mit vielen Aktuatoren, deren Änderungseffekte kleiner sind, realisiert werden. Hier können zum Beispiel flächenförmige piezoelektrische, elektro- oder magnetostriktive Stellelemente eingesetzt werden. Als Beispiel kann die Verringerung der Windbelastung durch Verbesserung der Gebäudeaerodynamik mit Hilfe von aktiven Spoilern und Windabweisern²¹⁷ genannt werden.

Häufig ist es sinnvoll die Adaption der Schnitt- bzw. Verformungsgrößen mit der Beeinflussung der Einwirkungen zu kombinieren.

Um alle diese Ziele realisieren zu können und das Potential adaptiver Dachtragwerke voll auszuschöpfen, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus den Bereichen des Maschinenbaus, der Luft- und Raumfahrttechnik, der Regelungstechnik, der Materialforschung, der Architektur und des Bauingenieurwesens erforderlich.

²¹⁷ zum Beispiel mit piezoelektrischen Flächenaktuatoren

6

Literaturverzeichnis

6.1

Materielle Literatur

- [Ackermann1983] Ackermann, Kurt:
Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren.
Stuttgart : Karl Krämer, 1983
- [Aicher1992] Aicher, Otl:
Die Welt als Entwurf.
Berlin : Ernst & Sohn, 1991
- [Angermann et al. 2005] Angermann, A.; Beuschel, M.; Rau, M.; Wohlfarth, U.:
Matlab - Simulink - Stateflow, Grundlagen, Toolboxes, Beispiele.
München : Oldenbourg, 2005
- [Beucher2002] Beucher, O.:
Matlab und Simulink.
München : Pearson, 2002
- [Bletzinger/Maute/
Ramm1997] Bletzinger, Kai-Uwe; Maute, Kurt; Ramm, Ekkehard:
Neue Entwicklungen und Anwendungen der Tragwerksoptimierung.
In: 6. Massivbau Seminar, Neu-Ulm : Die Bauakademie Biberach, 1997
- [Bletzinger1990] Bletzinger, Kai-Uwe:
Formoptimierung von Flächentragwerken.
Stuttgart : Institut für Baustatik der Universität Stuttgart, 1990
- [Bletzinger1996] Bletzinger, Kai-Uwe:
Strukturoptimierung.
In: [SFB230 1996], Berlin : Ernst & Sohn, 1996

- [Bletzinger1999] Bletzinger, Kai-Uwe:
Structural Optimization and Form Finding of Lightweight Structures.
In: Proceedings of the European Conference on Computational
Mechanics, München, 1999
- [Boller2000] Boller, Christian:
*Smarte Werkstoffe und Strukturen und ihre Anwendung in der Luft- und
Raumfahrt.*
In: Stahlbau 7/69, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Brignell/White1999] Brignell, J. E.; White, N. M.:
Advances in Intelligent Sensors.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Bullough1999] Bullough, W., A.:
Electrorheological Fluid Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Calfem2004] Lund University, Division of Structural Mechanics
CALFEM, A Finite Element Toolbox, Version 3.4.
Lund : KFS i Lund AB, 2004
- [Carlson1999] Carlson, J. D.:
Magnetorheological Fluid Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Claeyssen1999] Claeyssen, F.:
Magnetostrictive Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Clark/Saunders/Gary1998] Clark, Robert L.; Saunders, William; Gibbs, Gary P.:
Adaptive Structures - Dynamics and Control.
New York : Wiley, 1998

[Clephas1999]

Clephas, B.:
Piezoelectric Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999

[Cox1958]

Cox, H. L:
The theory of design.
In: Aeronautical Research Council 19791, 1958

[Culshaw1996]

Culshaw, Brian:
Smart Structures and Materials.
Boston : Artech House, 1996

[DIN1055]

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:
DIN 1055, Lastannahmen für Bauten.
DIN 1055-1, Lagerstoffe, Baustoffe und Bauteile,
Eigenlasten und Reibungswinkel.
Juli 1978
DIN 1055-3, Verkehrslasten.
Juni 1971
DIN 1055-4, Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwin-
gungsanfälligen Bauwerken.
August 1986
DIN 1055-4/A1, Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwin-
gungsanfälligen Bauwerken : Änderung 1,
Berichtigungen.
Juni 1987
DIN 1055-5, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast.
Juni 1975
DIN 1055-5/A1, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast.
April 1994
Berlin : Beuth, 1971 - 1994

- DIN 1055,* *Einwirkungen auf Tragwerke.*
DIN 1055-1, *Wichten und Flächenlasten von Baustoffen,*
Bauteilen und Lagerstoffen.
Juni 2002
- DIN 1055-3,* *Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten.*
März 2006
- DIN 1055-7,* *Temperatureinwirkungen.*
November 2002
- DIN 1055-9,* *Außergewöhnliche Einwirkungen.*
August 2003
- DIN 1055-100,* *Grundlagen der Tragwerksplanung,*
Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln.
März 2001
- Berlin : Beuth, 2001 - 2006

[DIN1080]

- Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:
- DIN 1080,* *Begriffe Formelzeichen und Einheiten.*
im Bauingenieurwesen.
- DIN 1080-1,* *Grundlagen.*
Juni 1976
- DIN 1080-2,* *Statik.*
März 1980
- Berlin : Beuth, 1976 - 1980

[DIN4114]

- Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:
- DIN 4114,* *Stahlbau, Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung,*
Beulung).
- DIN 4114-1,* *Berechnungsgrundlagen, Vorschriften.*
Juli 1952
- DIN 4114-2,* *Berechnungsgrundlagen, Richtlinien.*
Februar 1953
- Stuttgart : Teubner, 1952 - 1953

[DIN18800]

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:

DIN 18800, Stahlbauten.

DIN 18800-1, Bemessung und Konstruktion.

März 1981

DIN 18800-1, Bemessung und Konstruktion.

November 1990

DIN 18800-2, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken.

November 1990

DIN 18800-2/A1, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, Änderung A1.

Februar 1996

DIN 18800-3, Stabilitätsfälle, Plattenbeulen.

November 1990

Berlin : Beuth, 1981 - 1996

[DIN18801]

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:

DIN 18801, Stahlhochbau. Bemessung, Konstruktion, Herstellung. September 1983

Berlin : Beuth, 1983

[DIN19226]

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin:

DIN 19226, Leittechnik, Regelungstechnik und Steuerungstechnik.

DIN 19226-1, Allgemeine Grundbegriffe.

Februar 1994

DIN 19226-2, Begriffe zum Verhalten dynamischer Systeme.

Februar 1994

DIN 19226-3, Begriffe zum Verhalten von Schaltsystemen.

Februar 1994

DIN 19226-4, Begriffe für Regelungs- und Steuerungssysteme.

Februar 1994

DIN 19226-5,

Funktionelle Begriffe.

Februar 1994

DIN 19226-6,

Begriffe für Funktions- und Baueinheiten.

Februar 1994

Berlin : Beuth, 1994

[Domke et al. 1981]

Domke, H.; Backé, W.; Meyr, H.; Hirsch, G.; Goffin, H.:

Aktive Verformungskontrolle von Bauwerken.

In: Bauingenieur 56, Berlin : Springer, 1981

[Domke et al. 1984]

Domke, H.; Backé, W.; Theissen, H.; Meyr, H.; Bouten, H.; Zach, B.;
Witte, B.; Busch, W.; Goffin, H.:

*Leistungssteigerung von Biegetragwerken durch Aktive Verformungs-
kontrolle.*

In: Bauingenieur 59, Berlin : Springer, 1984

[Domke1991]

Domke, Helmut:

Aktive Kontrolle von Tragwerken.

In: Bauingenieur 66, Berlin : Springer, 1991

[Domke1992]

Domke, Helmut:

Aktive Tragwerke.

Opladen : Westdeutscher Verlag, 1992

[Domke/Streck1987]

Domke, Helmut, Streck, Dietmar:

*Laufende automatische Bauwerksanalyse durch Aktive Verformungskon-
trolle (AVK).*

In: Beton- und Stahlbetonbau, Berlin : Ernst & Sohn, 1987

[EDO2003]

EDO Electro-Ceramic Products, Herstellerunterlagen:

Piezoelectric Ceramic Electromechanical Properties.

Salt Lake City : EDO, 2003

- [Elspass/Flemming1998] Elspass, Wilfried J.; Flemming, Manfred:
Aktive Funktionsbauweisen.
Berlin : Springer, 1998
- [Etrema2002] Etrema Products, Herstellerunterlagen:
Etrema Products.
Haslett (USA) : Etrema, 2002
- [Franz/Schäfer1988] Franz, Gotthard; Schäfer, Kurt:
Konstruktionslehre des Stahlbetons, Band II, Teil A,
Typische Tragwerke.
Berlin : Springer, 1988
- [Gandhi1992] Gandhi, M. V.; Thompson, B. S.:
Smart Materials and Structures.
London : Chapman & Hall, 1992
- [Gasteiger2003] Gasteiger, Philipp:
Tensegrity-Tragwerke.
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baukonstruktion der TU München
München, 2003
- [Gaul/Albrecht/
Wirnitzer2000] Gaul, L.; Albrecht, H.; Wirnitzer, J.:
Damping of Structural Vibrations Using Adaptive Joint Connections and
Neural Control. Smart Structures: Theory and Applications.
In: CISM Courses and Lectures No. 429, Udine, 2000
- [Grupp/Grupp2004] Grupp, Frieder; Grupp, Florian:
Matlab 6.5 für Ingenieure.
München : Oldenbourg, 2004

- [Haase/Köhnlein1998] Haase, Walter; Köhnlein, Jochen:
Smart Materials, Recherche und Dokumentation.
Universität Stuttgart, Institut für Leichte Flächentragwerke,
Forschungsbericht 2/98, Stuttgart : IL, 1998
- [Hanselka2000] Hanselka, Holger:
Die Adaptronik als Schlüsseltechnologie für den intelligenten Leichtbau.
In: Magdeburger Wissenschaftsjournal 1/00,
Magdeburg : Universität Magdeburg, 2000
- [Hemp1958] Hemp, W. S.:
Theory of Structural Design.
In: College of Aeronautics Rep. 115,
Cranfield : College of Aeronautics, 1958
- [Hemp1964] Hemp, W. S.:
Studies in the theory of Michell structures.
In: Proc. Int. Congr. Appl. Mech., München, 1964
- [Hermes2002] Hermes, Mona:
Leichtbau - Adaptive Tragwerke.
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baukonstruktion der TU München,
München, 2002
- [Hesselbach1999] Hesselbach, J.:
Shape Memory Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Holgate1997] Holgate, A.:
The Art of Structural Engineering.
The Work of Jörg Schlaich and his Team.
Stuttgart : Edition Axel Menges, 1997

- [Housner et al. 1997] Housner, G. W.; Bergman, L. A.; Caughey, T. K.; Chassiakos, A. G.;
Claus, R. O.; Masari, S. F.; Skelton, R. E.; Soong, T. T.; Spencer, B. F.;
Yao, T. P.:
Structural Control: Past, Present, and Future.
In: Journal of engineering mechanics 9/97, Reston : ASCE, 1997
- [Janocha1999] Janocha, Hartmut (Hrsg.):
Adaptronics and Smart Structures.
Berlin : Springer, 1999
- [Jendritza1995] Jendritza Daniel J. (Hrsg.):
*Technischer Einsatz neuer Aktoren. Grundlagen, Werkstoffe,
Designregeln und Anwendungsbeispiele.*
Renningen-Malmsheim : Expert, 1995
- [Kaemmerle2005] Kaemmerle, Ralph:
Adaptive Dachtragwerke - Entwicklung eines FEM-Entwurfs-Programms.
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
der TU München, München, 2005
- [Kallenbach/
Bögelsack1991] Kallenbach, E.; Bögelsack, G.:
Gerätetechnische Antriebe.
Berlin : Verlag Technik, 1991
- [Kempe1995] Kempe, W.:
Elektrochemische Aktoren.
In: [Jenditza1995], Renningen-Malmsheim : Expert, 1995
- [Kiock2003] Kiock, Andrea (Hrsg.):
Auer + Weber + Architekten, Arbeiten 1980-2003.
Basel : Birkhäuser, 2003

- [Klein2001] Klein, Bernd:
Leichtbau – Konstruktion.
Wiesbaden : Vieweg, 2001
- [Köhnlein2000] Köhnlein, Jochen:
Smart materials - Intelligente Werkstoffe.
In: Stahlbau 6/69, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Korvink/Schlaich2000] Korvink, Jan G.; Schlaich, Mike:
Autonome Brücken - ein Blick in die ferne Zukunft des Brückenbaus.
In: Bauingenieur 75, Berlin : Springer, 2000
- [Liu/Tomizuka/Ulsoy2005] Liu, Shi-Chi; Tomizuka, Masayoshi; Ulsoy, A. Galip:
Challenges and opportunities in the engineering of intelligent systems.
In: Smart Structures and Systems 1/05, Taejon : Techno Press, 2005
- [Lord2002] Lord Corporation, Herstellerunterlagen:
Lord Rheonetic™ Magnetically Responsive.
Cary : Lord, 2002
- [Ludescher2005] Ludescher, Guido:
Rahmen für Windows 9x/NT/200/NT.
Stuttgart : Mayr und Ludescher, 2005
- [Mathworks2002] The MathWorks:
Matlab 6.5.
Natick : The MathWorks, 2002
- [Mathworks2002] The MathWorks:
Matlab 7.
Natick : The MathWorks, 2004

- [Mattheck1997] Mattheck, Claus:
Design in der Natur.
Freiburg : Rombach, 1997
- [Maxwell1869] Maxwell, C.:
Scientific Papers II.
Cambridge : Cambridge University Press, 1869
- [Megede1999] Megede, D. zur:
Electrochemical Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Michell1904] Michell, A. G. M.:
The limits of economy of material in frame structures.
In: Philosophical Magazine 8, 1904
- [Monner2005] Monner, H. P.:
Grundlagen zu den multifunktionalen Materialien.
Braunschweig : DLR, 2005
- [Motro2003] Motro, René:
Tensegrity - Structural Systems for the Future.
London : Kogan Page Science, 2003
- [Musolff2001] Musolff, A.:
Adaptiver Tragflügel mit Formgedächtnisaktuatoren.
In: Konstruktion 5/2001, Berlin : Springer, 2001
- [Neumann1995] Neumann, Dieter:
Bausteine „intelligenter“ Technik von Morgen, Funktionswerkstoffe in der Adaptronik.
Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1995

- [Otto/Rasch1995] Otto, Frei; Rasch, Bodo:
Gestalt finden.
Stuttgart : Edition Axel Menges, 1995
- [Paradies1997] Paradies, Rolf, Helmut:
Statische Verformungsbeeinflussung hochgenauer Faserverbundreflektorschalen mit Hilfe applizierter oder integrierter aktiver Elemente.
Zürich : ETH, 1997
- [Pech2005] Pech, Wolfgang:
Adaptive Dachtragwerke - Entwicklung eines FE-Berechnungsprogramms
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München, München, 2005
- [Pfeifer2004] Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH:
Produktkatalog.
Memmingen : Pfeifer, 2004
- [PI2002] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.:
MicroPositioning, NanoPositioning, NanoAutomation, Solution for Cutting-Edge Technologies.
Karlsruhe : PI, 2002
- [piezोजना2002] Piezosystem Jena GmbH,
Produktkatalog.
Jena : Piezosystem, 2002
- [Ramm/Maute1998] Ramm, Ekkehard; Maute, Kurt:
Tragwerksoptimierung als Entwurfshilfe - Erste Ansätze.
In: Finite Elemente in der Baupraxis, Beiträge zur Tagung an der TU Darmstadt, Darmstadt : TU Darmstadt, 1998

- [Ramm1966] Ramm, E.:
„Force Follows Form“ oder „Form Follows Force“? Die Wechselwirkung von Form und Kraft bei Flächentragwerken.
In: [SFB230 1996], Berlin : Ernst & Sohn, 1996
- [Rech/Bölter/
Kormann1995] Rech, B.; Bölter, C.; Kormann, C.:
Aktoren mit magnetorheologischen Flüssigkeiten.
In: [Jenditza1995], Renningen-Malmsheim : Expert, 1995
- [Ritzkova2005] Ritzkova, Hrisa:
Adaptive Dachtragwerke - FEM-Entwurfs-Programm, Schnittstellenentwicklung und Berechnung ausgewählter Systeme.
Diplomarbeit in Bearbeitung, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München, München, 2005
- [Sakamoto/Koshika/
Kobori2000] Sakamoto, Mitsuo; Koshika, Norihide; Kobori, Takuji:
Development and applications of structural control systems. Active-passive composite tuned mass damper.
In: Stahlbau 6/69, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Schlaich2002] Schlaich, Jörg:
Leichtbau - wieso und wie?.
In: [Schunck2002],
München : Lehrstuhl für Baukonstruktion der TU München, 2002
- [Schmidt-Mende1995] Schmidt-Mende, P.:
Aktoren mit Formgedächtnislegierungen.
In: [Jendritza1995], Renningen-Malmsheim : Expert, 1995
- [Schulitz/Sobek/
Habermann1999] Schulitz, Helmut C.; Sobek, Werner; Habermann, Karl J.:
Stahlbauatlas.
Köln : Müller, 1999

- [Schunck et al. 2002] Schunck, Eberhard; Oster, Hans-Jochen, Barthel, Rainer; Kiessl, Kurt:
Dach Atlas. Geneigte Dächer.
München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2002
- [Schunck2002] Schunck, Eberhard (Hrsg.):
Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 12, Ingenieurarbeit.
München : Lehrstuhl für Baukonstruktion der TU München, 2002
- [Schünemann/
Wurmus1995] Schünemann, M.; Wurmus, H.:
Chemomechanische Aktuatoren.
In: [Jendritza1995], Renningen-Malmsheim : Expert, 1995
- [SFB230 1985] Universitäten Stuttgart und Tübingen, Sonderforschungsbereich 230:
Natürliche Konstruktionen, Leichtbau in Architektur und Natur.
Heft 8, Leicht.
Stuttgart : Universität Stuttgart und Tübingen, 1985
- [SFB230 1996] Teichmann, Klaus (Hrsg.); Wilke, Joachim (Hrsg.):
Prozess und Form „Natürlicher Konstruktionen“.
Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin : Ernst & Sohn, 1996
- [Sigmund2000] Sigmund, Ole:
*Topology Optimization Methods with Applications in Mechanism, MEMS
and Material Design.*
Lyngby : Technical University of Denmark, 2000
- [Sigmund2001] Sigmund, O.:
A 99 line topology optimization code written in Matlab.
In: Struct Multidisc Optim 21, Berlin : Springer, 2001
- [Sobek1995] Sobek, Werner:
Entwerfen im Leichtbau.
In: Bauingenieur 70, Berlin : Springer, 1995

- [Sobek2000] Sobek, Werner:
Leichtbau und selbstanpassende Systeme – Ansätze zu einer Bautechnik des 21. Jahrhunderts.
In: Deutscher Stahlbautag 2000, Vortragsreihe III, Dokumentation 656, Architekten und Bauingenieure bauen mit Stahl, Düsseldorf, 2000
- [Sobek/Haase/Teuffel2000] Sobek, Werner; Haase, Walter; Teuffel, Patrick:
Adaptive Systeme.
In: Stahlbau 7/69, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Sobek/Haase1998] Sobek, Werner; Haase, Walter:
Selbstanpassende Systeme in der Gebäudehülle.
In: Bauzentrum 5/98, Darmstadt : Das Beispiel, 1998
- [Sobek/Teuffel2002] Sobek, Werner; Teuffel, Patrick:
Adaptive lightweight structures.
In: Proceedings of the International IASS Symposium on "Lightweight Structures in Civil Engineering" (Ed. J. B. Obrebski), Warschau : Micro-Publisher, 2002
- [Spencer/Nagarajaiah2003] Spencer, B. F. Jr.; Nagarajaiah, S.:
State of the Art of Structural Control.
In: Journal of Structural Engineering 7/03, Reston : ASCE, 2003
- [Stoll1999] Stoll, Kurt:
Pneumatische Steuerungen. Einführung und Grundlagen.
Würzburg : Vogel, 1999
- [Streck1989] Streck, Dietmar:
Instabilitäten des geregelten Verhaltens aktiver unterspannter Biegetragwerke bei wachsenden Lastüberfahrtgeschwindigkeiten.
Aachen : RWTH Aachen, 1989

- [Tcherniak/Sigmund2001] Tcherniak, D.; Sigmund, O.:
A web-based topology optimization program.
In: Struct Multidisc Optim 22, Berlin : Springer, 2001
- [Teuffel2004] Teuffel, Patrick:
Entwerfen adaptiver Strukturen. Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen.
Stuttgart : ILEK, 2004
- [Thallemer2000] Thallemer, Axel:
Fluid Muscle als adaptives Spannglied.
In: Stahlbau 7/69, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Weber/Distl/Nützel2005] Weber, Felix; Distl, Hans; Nützel, Oswald:
Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke.
In: Beton- und Stahlbetonbau 7/100, Berlin : Ernst & Sohn, 2000
- [Weber1998] Weber, Christian-Toralf:
Ein Beitrag zur optimalen Positionierung von Aktoren in adaptiven mechanischen Strukturen.
Düsseldorf : VDI, 1998
- [Werkle2001] Werkle, Horst:
Finite Elemente in der Baustatik, Statik und Dynamik der Stab- und Flächentragwerk.
Braunschweig : Vieweg, 2001
- [Wiedemann1996-1] Wiedemann, Johannes:
Leichtbau 1: Elemente.
Berlin : Springer, 1996

- [Wiedemann1996-2] Wiedemann, Johannes:
Leichtbau 2: Konstruktion.
Berlin : Springer, 1996
- [Winter/Bletzinger/
Pawlowski2005] Winter, S.; Bletzinger, K.-U.; Pawlowski, R.:
*Adaptive lightweight roof structures in civil engineering,
development of a method for structural design.*
In: II ECCOMAS Thematic Conference on smart structures
and materials, Lissabon : Instituto Superior Técnico , 2005
- [Wurmus/Kallenbach1999] Wurmus, H.; Kallenbach, M.:
Chemomechanical Actuators.
In: [Janocha1999], Berlin : Springer, 1999
- [Zell1994] Zell, Andreas:
Simulation Neuronaler Netze.
München : Oldenbourg, 1994
- [Ziesel1992] Ziesel, Wolfdietrich:
Bau, Kunst, Ingenieur, The Art of Civil Engineering.
Wien : Edition Seitenberg, 1989
- [Zuk/Clark1970] Zuk, William; Clark, Robert H.:
Kinetic Architecture.
New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1970

6.2

Immaterielle Literatur

[adaptamat.com]

AdaptaMat Ltd. Helsinki, Finnland,
Magnetische Form-Gedächtnis-Technologie

[argillon.com]

Argillon GmbH, Redwitz
Piezoelektrische Technologien

[byggmek.lth.se/calfem]

Lund University, Division of Structural Mechanics,
CALFEM, A Finite Element Toolbox, Version 3.4

[ceramtec.de]

CeramTec AG, Plochingen
Piezoelektrische Technologien

[dlr.de/fa]

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig

[edoceramic.com]

EDO Electro-Ceramic Products,
Piezoelektrische Technologien

[eso.org]

The European Southern Observatory

[etrema-usa.com]

Etrema Products, INC,
Magnetostriktive Aktuatoren

[ferroperm-piezo.com]

Ferroperm Piezoceramics,
Piezoelektrische Technologien

[innovationsreport.de]

Forum für Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft

[llb.mw.tum.de]

Technische Universität München,
Fakultät für Maschinenwesen,
Lehrstuhl für Leichtbau

[lord.com/mr]

Lord Corporation, Cary, USA
Magnetorheologische Technologien

[marco.de]

marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, Dachau
Piezoelektrische Technologien

[math.uni-muenster.de]

Westfälische Wilhelms Universität Münster,
Fachbereich 10, Mathematik und Informatik

[mecha.uni-stuttgart.de]

Universität Stuttgart, Institut A für Mechanik

[memory-metalle.de]

Memory Metalle GmbH, Weil am Rhein,
Form-Gedächtnis-Legierungen

[morganelectroceramics.com]

Morgan Technical Ceramics, Waldkraiburg
Piezoelektrische Technologien

[nickelmagazine.org]

Fachzeitschrift für Nickel und seine Anwendungen

[pfeifer.de]

Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH, Memmingen

[pi.ws]

Physik Instrumente GmbH & Co., Karlsruhe,
Piezoelektrische Technologien

[piezोजना.com]

Piezosystem Jena GmbH, Jena,
Piezoelektrische Technologien

[topopt.dtu.dk]

TOPOPT (TOPology OPTimization),
Forschungsgruppe geleitet von Ole Sigmund.

[www.uni-bielefeld.de]

Universität Bielefeld

7

Abbildungsverzeichnis

1.1: Vogelflügel als Beispiel für adaptive Systeme in der Natur	2
1.2: Hauptspannungslinien in einem Oberschenkelknochen	3
1.3: Adaptives Fachwerk für die Raumfahrt	5
1.4: VLT Teleskope der ESO und Prinzipskizze der aktiven Optik	6
1.5: Adaptiver Tragflügel mit piezoelektrischen Stellelementen	7
1.6: <i>The Dongting Lake Bridge, MR</i> Dämpfer an den Schrägseilen	10
1.7: <i>The Nihon-Kagaku-Miraikan, MR</i> Dämpfer	11
1.8: <i>The Kajima Technical Research Institute (KaTRI)</i> in Tokyo	12
2.1: Übersicht adaptiver und sensorischer Systeme	14
2.2: Passiv adaptierbarer unterspannter Träger	16
2.3: Systematik der <i>smart materials</i>	23
2.4: Einwegeffekt (links) und Zweiwegeseffekt (rechts) von Form-Gedächtnis-Legierungen	26
2.5: Kennwerte von Form-Gedächtnis-Legierungen	28
2.6: Kennwerte thermostriktiver Keramiken	29
2.7: Biopolymer bei niedriger (oben) und hoher Temperatur	31
2.8: PZT Fasern und verschiedene Formen der Piezokeramiken	32
2.9: Kennwerte ausgewählter Piezokeramiken	34
2.10: Kennwerte von Terfenol-D	38
2.11: Eigenschaften von chemomechanischen Materialien	41
2.12: Wechselwirkung zwischen zwei polarisierten Feststoffteilchen	43
2.13: Magnetorheologischer Effekt	45
2.14: Aufbau eines Regelsystems	47
2.15: Ausgabearten für Punktsensoren, integrierte Sensoren und verteilte Sensoren	51
2.16: Ansichtsaunometrie des Middlehoek'schen Sensorenwürfels	52
2.17: Einteilung der Aktuatoren nach der Aktivierungsenergie und ihrem Wirkungsprinzip	55
2.18: Einteilung nach Aktivierungs- und Verformungsart von Form-Gedächtnis-Aktuatoren	59
2.19: Bauformen der Form-Gedächtnis-Aktuatoren	60
2.20: Bauformen piezoelektrischer Aktuatoren: Stapel- und Biegeaktuator	62
2.21: Bauformen piezoelektrischer Aktuatoren: Laminaraktuator und Moonie	63
2.22: Piezoelektrische Stapelaktuatoren mit und ohne Vorspannung	65
2.23: Magnetostriktive Aktuatoren	67

2.24: Einteilung von Aktuatoren auf der Basis rheologischer Fluide	69
2.25: MR-Dämpfer, <i>LORD Rheonetic™ Magnetically Responsive Technology</i>	70
2.26: Kennwerte der Aktuatoren auf der Basis formveränderbarer <i>smart materials</i>	72
2.27: Kennwerte der Aktuatoren auf der Basis steifigkeitsveränderbarer <i>smart materials</i>	73
3.1: Leichtbauten in der Natur und in der Bautechnik, Spinnennetz und Seilnetz	75
3.2: Kombination von Material-, System- und Strukturleichtbau, <i>Eden-Projekt</i>	77
3.3: Beispiele für Maxwellstrukturen	78
3.4: Optimalstabwerk nach Michell für eine Einzellast und zwei punktförmige Auflager	79
3.5: Systematik der Formen geneigter Dächer	81
3.6: Systematik der Dachtragwerke	83
4.1: Ablauf des Entwurfsverfahrens	84
4.2: Beispiel für Strukturoptimierung von Fachwerken	86
4.3: System d3_36	86
4.4: Vereinfachte Lastfallübersicht für LF10, LF20/2010, LF 30/3010, LF 40/4010	89
4.5: System d3_36, Sensitivitätsanalyse Variante 1 für eine Einzelkraft am RP II	93
4.6: System d3_36, Aktuatorenpositionierung	95
4.7: System d3_36, Vertikalverformungen, LF 20/2010	97
4.8: System d3_36, Biegemomente M [kNm] und Querkräfte V [kN], LF 20/2010	98
4.9: System d3_36, Normalkraft im Träger und in den Abspannungen, LF 20/2010	99
4.10: System d3_36, Adaptiondehnungen und -stellwege, LF 20/2010,	100
4.11: System d3_36, Adaptionsarbeit und -energie, LF 20/2010	100
4.12: Übersicht der untersuchten Aspekte adaptiver Dachtragwerke und zugehörige Tragsysteme	103
4.13: Adaptionsarten am Beispiel eines Fachwerksystems	108
4.14: Statisch bestimmtes System c2_12, Geometrie, Stab- und Knotenübersicht	112
4.15: Fachwerkssystem c2_12, Grenzbetrachtung A, Geometrie	113
4.16: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\varepsilon_{\text{Adaption},\alpha}$	116
4.17: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Vertikalverformungen w [mm] für LF2 und LF2'	116
4.18: Fachwerk , Grenzfall α , Normalkräfte N [kN] für LF2 und LF2'	116
4.19: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\varepsilon_{\text{Adaption},\alpha}$	117
4.20: Fachwerk c2_12, Grenzfall α , Vertikalverformung w [mm] für LF3 und LF3'	117
4.21: Fachwerk , Grenzfall α , Normalkräfte N [kN] für LF3 und LF3'	117
4.22: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Lastfallübersicht, Aktuatorendehnungen $\varepsilon_{\text{Adaption},\beta}$	118
4.23: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Vertikalverf. w [mm] für LF1, LF2, LF3	118
4.24: Fachwerk c2_12, Grenzfall β , Normalkräfte N [kN] für LF1, LF2, LF3	118

4.25: Fachwerk c2_12, Grenzfälle, Ergebnisse für Last $F = 100$ kN	119
4.26: Fachwerksystem c2_12, nichtlineares Kraft-Weg-Diagramm, Aktuator im Pfosten (LF3)	122
4.27: System d3_36, volle Verformungsadaption, LF 20/2010 (Grenzfall β)	126
4.28: Maßnahmen zur Reduzierung der Adaptionenarbeit, Systemvorspannung, System d1_36	128
4.29: Übersicht der Systeme d3 für die Stützweiten $L = 36, 72, 108, 144$ m	130
4.30: Tragwerksuntersichten der Systeme d3 für die Stützweiten $L = 36, 72, 108, 144$ m	131
4.31: System d3_36, Lage der Aktuatoren	132
4.32: System d3_36, Vertikalverformungen, LF 30/3010	132
4.33: System d3_36, Biegemomente M [kNm] und Querkräfte V [kN], LF 30/3010	133
4.34: System d3_36, Normalkräfte N [kN] im Träger, LF 30/3010	134
4.35: System d3_36, Normalkräfte N [kN] in den Seilen, LF 30/3010	134
4.36: System d3_36, Adaptionenstretzungen ε [-] und Adaptionenstellwege [cm], LF30/3010	135
4.37: System d3_36, Adaptionenarbeit W [kJ] und Adaptionenenergie E [kWh], LF 30/3010	135
4.38: System d3, w-Adaption, max. Vertikalverformungen [cm] (Grenzfall β)	136
4.39: System d3, w-Adaption, max. Adaptionenstellwege [cm] (Grenzfall β)	137
4.40: System d3, w-Adaption, zu max. Adaptionenwegen zugehörige Normalkräfte	137
4.41: System d3, w-Adaption, max. Momente an Knotenpunkten (Grenzfall β)	138
4.42: System d3, w-Adaption, Σ Adaptionenarbeit (Grenzfall β)	138
4.43: System d1_36_USP, Aktuatoren in der Unterspannung	140
4.44: System d3_36_USP, Vertikalverformungen, LF 20/2010, Aktuatoren in Unterspan.	140
4.45: System d1_36_USP, Momentenverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in der Unterspan.	140
4.46: System d1_36_USP, Querkraftverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in der Unterspannung	141
4.47: System d1_36_USP, Normalkraftverlauf im Träger, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.	141
4.48: System d1_36_USP, Normalkräfte in der Unterspannung, LF 20/2010	142
4.49: System d1_36_USP, Normalkräfte in den Spreizen, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.	142
4.50: System d1_36_USP, Adaptionenstretzungen und -stellwege, LF 20/2010	143
4.51: System d1_36_USP, Adaptionenarbeit und -energie, LF 20/2010, Akt. in der Untersp.	143
4.52: System d1_36_SPR, Aktuatoren in den Spreizen	144
4.53: System d1_36_SPR, Vertikalverformungen, LF 20/2010	144
4.54: System d1_36_SPR, Momentenverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in den Spreizen	144
4.55: System d1_36_SPR, Querkraftverlauf, LF 20/2010, Aktuatoren in den Spreizen	145
4.56: System d1_36_SPR, Normalkraftverlauf im Träger, LF 20/2010, Akt. in den Spreizen	145
4.57: System d1_36_SPR, Normalkräfte in der Untersp., LF 20/2010, Akt. in den Spreizen	146
4.58: System d1_36_SPR, Normalkräfte in den Spreizen, LF 20/2010, Akt. in den Spreizen	146

4.59: System d1_36_SPR, Adaptionsdehnungen und -stellwege, LF 20/2010	147
4.60: System d1_36_SPR, Adaptionsarbeit und -energie, LF 20/2010, Akt. in den Spreizen	147
4.61: System c2_36, Aktuatoren in den Diagonalen	148
4.62: System c2_36, Vertikalverformungen, LF 20/2010	148
4.63: System c2_36_D, Normalkräfte N [kN], LF 20/2010	149
4.64: System c2_36_D, Adaptionsdehnungen, -wege, -arbeiten, LF 20/2010	149
4.65: System d1_36, Variante 1, Adaptibilitätsanalyse, LF 20/2010	154
4.66: System d1_36, Variante 2, Adaptibilitätsanalyse, LF 20/2010	155
4.67: System d3_36, Adaptibilitätsanalyse, LF 20/2010	156
4.68: System d3, konstr. Maßnahmen zur Beeinflussung der Aktuatorenbeanspruchung	157
4.69: Tragsicherheitsnachweis mit Schnittgrößen ohne Adaption und $\gamma_F \rightarrow 1,35 / 1,50$	158
4.70: Tragsicherheitsnachweis mit Schnittgrößen ohne Adaption und $\gamma_F \approx 1,10$	159
4.71: Tragsicherheitsnachweis mit adaptierten Schnittgrößen und $\gamma_F \rightarrow 1,35/1,5$	160
4.72: Tragsicherheitsnachweis mit adaptierten Schnittgrößen und $\gamma_F = 1,00$	160
4.73: <i>The Paranal Residencia</i> der ESO, Beispiel für eine Gitterkuppel im Bauzustand	162
4.74: Adaption einer Netzkuppel mit Aktuatoren im Auflagerbereich	162
4.75: Adaptives Membrandach mit Aktuatoren in Primärtragwerk und Randseilen	163
4.76: Easy Landing, Baltimore, Kenneth Snelson, 1977, Beispiel für <i>Tensegrity</i> -Tragwerk	164
9.1: Barelement	196
9.2: Lokale Elementsteifigkeitsmatrix, Barelement	196
9.3: Beamelement	197
9.4: Lokale Elementsteifigkeitsmatrix, Beamelement	197
9.5: Transformationsmatrix	198
9.6: Aufbauschema des Programms zur Adaptionsberechnung	205

8

Bezeichnungen

lateinisch, klein

d [mm]	Durchmesser
d [mm]	Durchmesser
d_{33} [10^{-12} m/V]	Piezomodul
g [kN/m], [kN/m ²]	ständige Einwirkungen
k, k_A , k_S [kN/m]	Federsteifigkeit, Federsteifigkeit des Aktuators, Federsteifigkeit der Struktur
s [kN/m], [kN/m ²]	Schneelast
u [mm], [cm]	Verschiebung, Horizontalverschiebung
v [mm], [cm]	globale Elementverschiebungen
x [mm], [cm]	Knotenkoordinate
y [mm], [cm]	Knotenkoordinate
w [kN/m], [kN/m ²]	Windlast
w [mm], [cm]	Verschiebung, Vertikalverschiebung

lateinisch, groß

A [cm ²], [mm ²]	Querschnittsfläche
A_{Aktuator} [cm ²], [mm ²]	Querschnittsfläche des Aktuators
A_K	kritische Aktuatorenanzahl
A_M	Momentenadaption
A_w	Verformungsadaption
E [N/mm ²]	Elastizitätsmodul, E-Modul
EA [kN]	Dehnsteifigkeit
E_A [kWh]	Adaptionenergie
$E_{A_{\text{Aktuator}}}$ [kN]	Dehnsteifigkeit des Aktuators
$E_{I_{\text{Aktuator}}}$ [kNm ²]	Biegesteifigkeit des Aktuators
E_{max} [10^6 V/m]	maximale elektrische Feldstärke
F [kN]	Kraft, äußere Einwirkung
F	Lastvektor
G	Transformationsmatrix

H [m]	Höhe
I [cm ⁴]	Flächenmoment 2. Grades, Flächenträgheitsmoment
I _{Aktuator} [cm ⁴]	Flächenmoment 2. Grades bzw. Flächenträgheitsmoment des Aktuators
K	Systemsteifigkeitsmatrix
K _e	globale Elementsteifigkeitsmatrix
<u>K_e</u>	lokale Elementsteifigkeitsmatrix
L [m]	Stützweite
L _{Aktuator} [cm], [mm]	Aktuatorenlänge
M [kNm]	Biegemoment
M _d , V _d , N _d	Bemessungsschnittgrößen
N [kN]	Normalkraft
P [kN]	Vorspannung
T _c [°C]	Curie-Temperatur
V [kN]	Querkraft
W [cm ³]	Widerstandsmoment
W [kJ]	Arbeit
W _A , W _{Adaption} [kJ]	Adaptionsarbeit
W _{außen,a} [kJ]	Arbeit allmählich aufgebrachtten äußerer Lasten (Einwirkungen)
W _{außen,b} [kJ]	Arbeit bereits aufgebrachtten äußerer Lasten (Einwirkungen)
W _{innen} [kJ]	innere Arbeit
griechisch, klein	
γ _{G,inf}	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (günstige Auswirkung)
γ _{G,sup}	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (ungünstige Auswirkung)
γ _M	Teilsicherheitsbeiwert des Materials
γ _Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
δ _A [cm], [mm]	Adaptionsstellweg
δ _{A,0} [cm], [mm]	freie Aktuatorenlängenänderung
λ [-]	Federsteifigkeitsverhältnis zwischen der Struktur und dem Aktuator
φ [mm], [cm]	Verdrehung

griechisch, groß

Π_{innen} [kJ]

Formänderungsenergie, Potenzial der inneren Kräfte

$\Delta\Pi_{\text{innen}}, \Delta W_{\text{innen}}$ [kJ]

Änderung des Potentials der inneren Kräfte bzw. der inneren Arbeit

ΔL [cm], [mm]

Längenänderung

9

Beschreibung des
Adaptionsprogramms

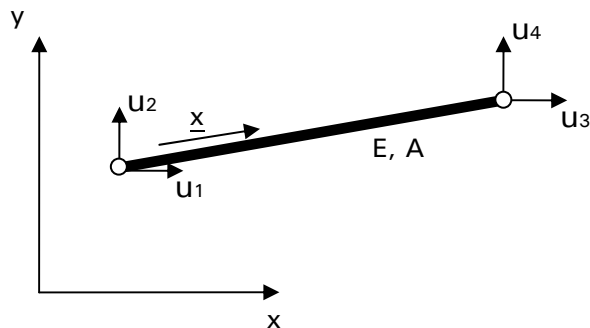
Für das auf dem Verschiebungsgrößen-Verfahren²¹⁸ basierenden Programm zur Adaptionsberechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- ein linear elastisches und isotropes Material (Hooke) mit $EA \neq \infty$
- Querschnitte bleiben eben (Bernoulli-Hypothese)
- Berechnung nach Theorie erster Ordnung (Superposition)
- ebene Systeme (2-D)

Es werden zwei Elementarten (Bar- und Beamelemente) mit über die Länge konstanten Querschnittsfläche $A[\text{cm}^2]$ und Flächenträgheitsmoment $I[\text{cm}^4]$ eingesetzt.

Beamelemente

Beamelemente sind beidseitig gelenkig gelagerte Stäbe mit der Dehnsteifigkeit EA , die durch Zug- und Druckkräfte beansprucht werden können.



9.1: Beamelement²¹⁹

$$\underline{\mathbf{K}}_e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

9.2: Lokale Elementsteifigkeitsmatrix, Beamelement²²⁰

²¹⁸ Weggrößenverfahren

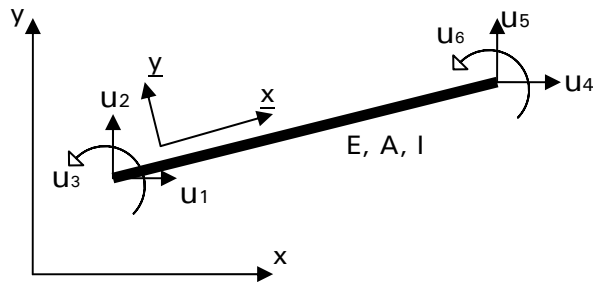
²¹⁹ [Calfem2004, S. 5.3-2], [Kaemmerle2005, S. 5]

²²⁰ [Calfem2004, S. 5.3-2]



Beamelemente

Beam- oder Balkenelemente können neben Zug- und Druckkräften Biegemomente übertragen. Sie werden charakterisiert durch die Dehnsteifigkeit EA sowie die Biegesteifigkeit EI.



9.3: Beamelement²²¹

$$\underline{K_e} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

9.4: Lokale Elementsteifigkeitsmatrix, Beamelement²²²

²²¹ [Calfem2004, S. 5.6-2], [Kaemmerle2005, S. 6]

²²² [Calfem2004, S. 5.6-3]

Transformationsmatrix G

Die Umrechnung der lokalen Stabsteifigkeitsmatrizen erfolgt mittels der Transformationsmatrix G:

$$G = \begin{pmatrix} n_{xx} & n_{yx} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_{xy} & n_{yy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{xx} & n_{yx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{xy} & n_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

mit

$$n_{xx} = n_{yy} = \frac{x_2 - x_1}{L}$$

$$n_{yx} = -n_{xy} = \frac{y_2 - y_1}{L}$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

9.5: Transformationsmatrix

Systemmatrix K und Lösungsgleichung

Die Erzeugung der globalen Elementmatrizen erfolgt aus den lokalen Daten nach der Gleichung $\mathbf{K}e = \mathbf{G}^T \mathbf{K}eG$.

Anschließend wird aus den globalen Elementmatrizen die Systemmatrix \mathbf{K} gebildet und die Stabendverschiebungen mit Hilfe der Gleichung $\mathbf{K} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{F}$ ermittelt. Dabei steht \mathbf{v} für globale Elementverschiebungen und \mathbf{F} für den Lastvektor.

Schnittgrößen

Werden wiederum die globalen Verschiebungen der Elementendknoten in lokale Daten umgerechnet und in die lokalen Stabsteifigkeitsmatrizen eingesetzt, so können die Endknotenschnittgrößen der Elemente direkt ausgelesen werden. Die Schnittgrößen innerhalb der Elemente werden in Abhängigkeit von der Belastung an beliebig vielen Stellen berechnet.

Eingabe

Adaptionsberechnung

System

Systemname.dat
Knoten.dat
Lager.dat
Lager_bar.dat (relevant für Knoten mit ausschließlich Barelementen)
beam.dat (Balkenelement)
bar_PO.dat (passive Stabelemente relevant für Vorspannung P)
bar_P1 (aktive Stabelemente relevant für Vorspannung P)
bar_AO.dat (passive Stabelemente relevant für Adaption A)
bar_A1.dat (aktive Stabelemente relevant für Adaption A)

Vorspannung P

Last_gll.dat (Eigengewicht g, Linienlast ll, für P)
Last_gkl.dat (Eigengewicht g, Knotenlast kl, für P)
Last_sll_P.dat (Schnee s für Vorspannung, Linienlast ll, für P)
Last_skl_P.dat (Schnee s für Vorspannung, Knotenlast kl, für P)
Kombi_P.dat (Wahl der für die Vorspannung P relevanten Lasten)
Start_P.dat (Startwerte für Optimierungsberechnung der Vorspannung P)
RK_P.dat (Referenzknoten für die Vorspannung P)

Adaption A

Last_skl_A (Schnee für Adaption, Knotenlast)
Last_sll_A (Schnee für Adaption, Linienlast)
Last_wkl (Windlast, Knotenlast)
Last_wll (Windlast, Linienlast)
Last_qkl (veränderliche Lasten, Knotenlast)
Last_qll (veränderliche Lasten, Linienlast)
Kombi_A.dat (Wahl der für die Adaption A relevanten Lasten)
Start_A.dat (Startwerte für Optimierungsberechnung der Adaption A)
RK_A.dat (Referenzknoten und Toleranzen für die Adaption A)

Ausgabe

Die Ausgabe der Vorspannungs- und Adaptionsberechnung beinhaltet für die Berechnung der Vorspannung P:

- Systembilder
- Verschiebungen mit und ohne Vorspannung
- Momentverläufe mit und ohne Vorspannung
- Querkraftverläufe mit und ohne Vorspannung
- Normalkräfte mit und ohne Vorspannung
- Normalkräfte der Spannglieder als Balkendiagramm mit und ohne Vorspannung
- Balkendiagramme der Dehnungen, Längenänderungen und Arbeitsanteile der Spannglieder

und für die Berechnung der Adaption A:

- Ein Systembild, wobei die Adaptionsglieder gestrichelt sind
- Verschiebungen mit und ohne Adaption
- Momentverläufe mit und ohne Adaption
- Querkraftverläufe mit und ohne Adaption
- Normalkräfte mit und ohne Adaption
- Normalkräfte der Spannglieder als Balkendiagramm mit und ohne Adaption
- Balkendiagramme der Dehnungen, Längenänderungen und Arbeitsanteile der Adaptionsglieder

Eingabe

Sensitivitätsanalyse

Systemname.dat

Knoten.dat

Lager.dat

Lager_bar.dat (relevant für Knoten mit ausschließlich Barelementen)

beam.dat (Balkenelemente)

bar_sens.dat (Barelemente)

RK.dat (Referenzknoten)

RK_graph.dat (Darstellungsparameter)

Ausgabe

Sensitivitätsanalyse

Die Ausgabe der Sensitivitätsanalyse beinhaltet Systemgraphiken mit Längenänderungen, Dehnungen und Arbeiten der einzelnen Elemente des Tragsystems

weitere
Programmentwicklung

In der Zukunft sollen zu den zuvor beschriebenen Leistungsmerkmalen folgende Programmfunktionen hinzukommen:

- Eingabe von Regulierungsparametern für die Adaptionsberechnung
- Erweiterung der verfügbaren finiten Elemente (Seil, ausgefallener Zugstab etc.)
- FE-Berechnung von räumlichen Stabwerken
- Implementierung einer Vordimensionierungseinheit
- Programmoberfläche
- Generierung virtueller Kräfte zur Formoptimierung
- Adaption mit variablen Steifigkeiten der Tragwerkselemente

Diese neuen Funktionen erweitern das Leistungsspektrum des Programms sowohl hinsichtlich der Adaptionsberechnungen als auch der Optimierung der Systemgeometrie bzw. Form der Tragwerke. Im Folgenden werden einige Beispiele beschrieben:

- **Homogenisierung der Schnittkräfte** durch Adaption der Steifigkeiten. Die Schnittgrößen können nicht nur durch die Optimierung der Systemgeometrie positiv beeinflusst werden, sondern auch durch eine gezielte Verteilung der Steifigkeiten im System. Für die Homogenisierung der Kraftzustände im Tragwerk eignet sich insbesondere die Methode der variablen Steifigkeiten. Die Beschreibung dieser Methode erfolgt am Beispiel eines statisch unbestimmten Rahmensystems: Für die Grenzbeurteilung der Biegesteifigkeitsverteilung in einem Zweigelenrahmen ergibt sich das maximale Rieglmoment für ein Steifigkeitsverhältnis des Riegels zu den Stielen von $EI_{\text{Riegel}} / EI_{\text{Stiel}} \rightarrow \infty$ zu $M_{\text{Riegel}} \approx rL^2/8$ ²²³. Analog resultiert aus $EI_{\text{Riegel}} / EI_{\text{Stiel}} \rightarrow 0$ das maximale Eckmoment mit $M_{\text{Ecke}} \approx -rL^2/12$ ²²⁴. Werden der Riegel und die Stiele hinsichtlich ihrer Biegesteifigkeiten veränderbar ausgebildet, zum Beispiel durch den Ein-

²²³ zum Beispiel für einen Rahmen mit $h/L = 1/2$ und $EI_{\text{Riegel}} / EI_{\text{Stiel}} = 8$ ist $M_{\text{Riegel}} = rL^2/9,77$

²²⁴ zum Beispiel für einen Rahmen mit $h/L = 1/2$ und $EI_{\text{Riegel}} / EI_{\text{Stiel}} = 1/8$ ist $M_{\text{Ecke}} = -rL^2/12,5$

satz von magnetorheologischen Aktuatoren, so können die System-schnittgrößen, in Abhängigkeit von der Steifigkeitsverteilung im System, für unterschiedliche Einwirkungskombinationen homogenisiert werden. Darüber hinaus kann das Programm mit variablen Steifigkeiten zur Suche nach der optimalen Steifigkeitsverteilung in herkömmlichen Tragwerken eingesetzt werden.

- Optimierung der Systemgeometrie von Stabwerken

Analog zur Berechnung der Systemvorspannung (s. Kapitel 4.1 und 4.1.2) kann auch die Systemgeometrie von Stabwerken optimiert werden. Als Beispiel kann die Berechnung der Überhöhung für ein ebenes bzw. räumliches Fachwerk genannt werden. Die für die Herstellung des überhöhten Fachwerks erforderlichen Stablängen können direkt aus der Vorspannungsberechnung ermittelt werden. Dies geschieht durch die Umrechnung der Vorspannkkräfte in Längenänderungen der einzelnen Stäbe. Wird das Tragwerk aus den verkürzten (= vorgespannten) Elementen „zusammengebaut“, so erhält man eine Überhöhung für das System, die in ihrer Größe der zuvor gewählten Vorspannung (zum Beispiel $P \rightarrow g$) entspricht.

Darüber hinaus kann auf der Grundlage des Verfahrens zur Adaptionsberechnung ein Programm zur Ermittlung optimaler Bogen bzw. Gitterschalen-geometrie entwickelt werden. Für einfache Belastungen lässt sich aus dem von Robert Hooke (1680) erkannten Zusammenhang zwischen der Seil- und der Stützlinie („*Sic pendet continuum flexile, sic stabit inversum rigidum*“)²²⁵ eine momentenfreie Bogengeometrie ermitteln. Sollten mehrere Einwirkungsarten miteinander kombiniert werden, so stößt man schnell an die Grenzen der unkomplizierten Geometriefindung. Um für maßgebende Lastkombinationen die Geometrie mit einer minimalen Momentenbeanspruchung zu finden, können, wie bei der Vorspannungsermittlung oder Adaptionsberechnung, Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden.

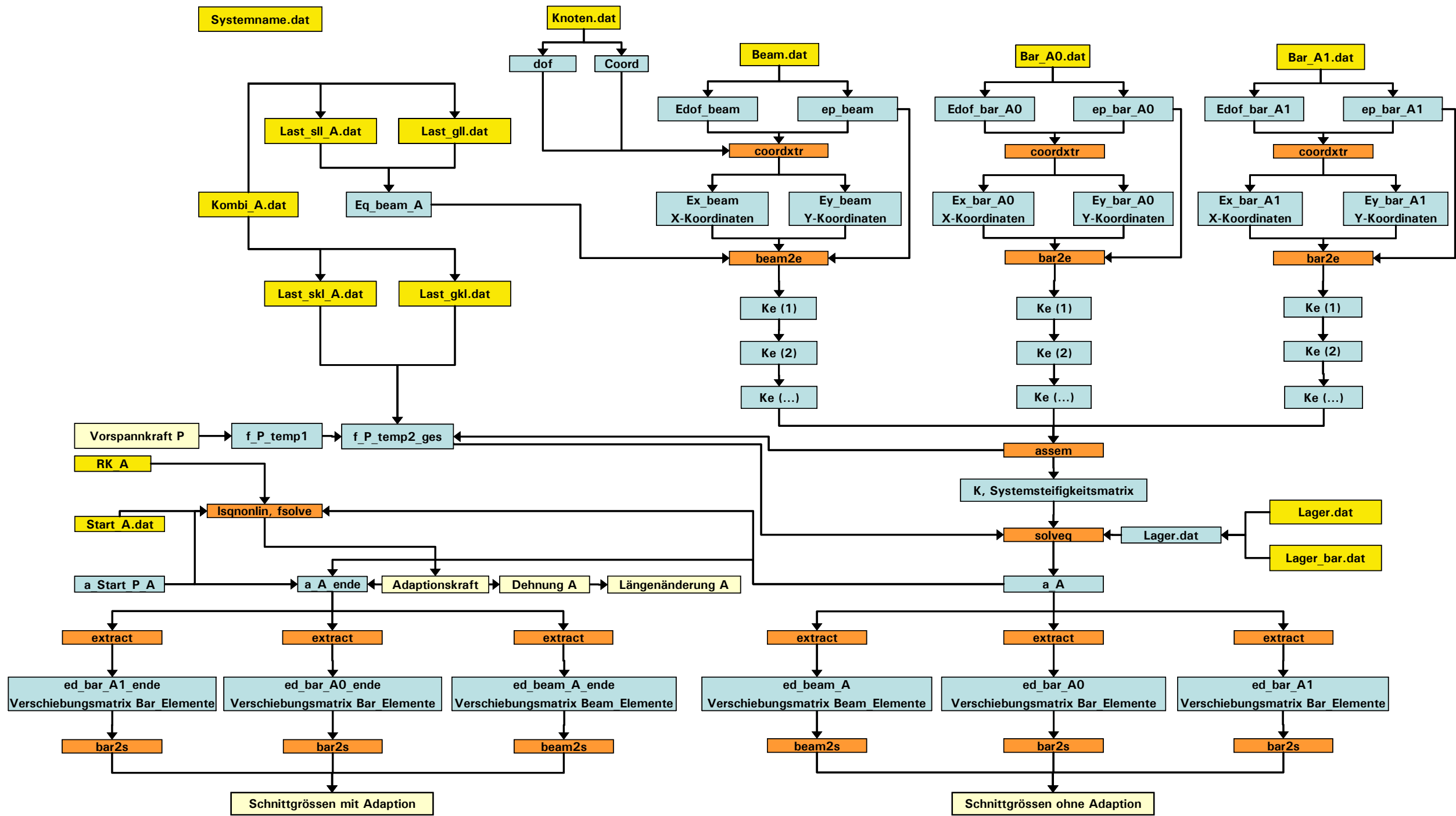
²²⁵ [Schunck2002, S.90]

Darüber hinaus können die Optimierungsberechnung durch Nebenbedingungen ergänzt werden, mit denen tragwerksfreie Bereiche, zum Beispiel Lichtraumprofile, für den Entwurf definiert werden können. Die oben beschriebene Vorgehensweise kann ebenfalls bei Rahmentragwerken angewandt werden.

Analog zur Geometrieoptimierung für zweidimensionale Bogentragwerke kann die Geometrie von dreidimensionalen Systemen, wie zum Beispiel Gitterschalen, hinsichtlich ihrer Beanspruchung optimiert werden. Dabei können neben dem Ziel der primären Beanspruchung durch Normalkräfte weitere Bedingungen berücksichtigt werden, beispielsweise möglichst viele gleich lange Gitterschalenstäbe.

- Entwurf wandelbarer Tragwerke:

Die Veränderungen in den adaptiven Tragwerken, zum Beispiel die Längenänderungen einzelner Tragwerkselemente, entsprechen in ihrer Wirkungsweise den Bewegungen wandelbarer Tragwerke. Diese Ähnlichkeit kann dazu genutzt werden, das Adaptionsprogramm für den Entwurf wandelbarer Tragwerke einzusetzen, wobei eine Abstimmung auf die Charakteristika dieser Tragwerke (zum Beispiel große Verschiebungen, wechselnde Lage der Elemente) erforderlich wäre.



9.6: Aufbauschema des Programms zur Adaptionberechnung²²⁶

²²⁶ s. auch [Kaemmerle2005]

Funktionenübersicht

assem:	Fügt die Elementsteifigkeitsmatrizen in die Systemmatrix ein. (Calfem Funktion)
axis:	Gibt die Länge der Achsen einer Graphik an. (Matlab Funktion)
bar:	Gibt ein Balkendiagramm aus. (Matlab Funktion)
bar2e:	Stellt die Elementsteifigkeitsmatrix eines Stabes zusammen. (Calfem Funktion)
bar2s:	Berechnet die Normalkräfte eines Stabes. (Calfem Funktion)
beam2e:	Stellt die Elementsteifigkeitsmatrix eines Balkens zusammen. (Calfem Funktion)
beam2s:	Berechnet die Schnittgrößen eines Balkens. (Calfem Funktion)
char:	Formatiert eine Variable in ein Char-Format. (Matlab Funktion)
clc:	Löscht das Command Window. (Matlab Funktion)
clear:	Löscht Variablen und Funktionen. (Matlab Funktion)
clf:	Löscht Graphikfenster. (Matlab Funktion)
coordxtr:	Ordnet den Stäben und Balken Endknotenkoordinaten zu. (Calfem Funktion)
eldia2:	Stellt die Schnittgrößen eines Balkens in Graphiken dar. (Calfem Funktion)
eldisp2:	Stellt die Verformungen von Balken dar. (Calfem Funktion)
eldraw2:	Stellt Balken und Stäbe unverformt dar. (Calfem Funktion)

end:	Markiert das Ende von For- und Switch-Schleifen. Als Indizes springt end zum letzten Element von Vektoren bzw. Matrizen. (Matlab Funktion)
extract:	Ordnet den Stäben und Balken Verschiebungen aus dem globalen Verschiebungsvektor zu. (Calfem Funktion)
figure:	Eröffnet ein neues Graphikfenster. (Matlab Funktion)
for	Markiert den Anfang einer For-Schleife. (Matlab Funktion)
format:	Gibt die Art der Zahlenausgabe an. (Matlab Funktion)
fsolve:	Ist ein Algorithmus um Gleichungssysteme zu lösen. (Matlab / Toolbox Funktion)
grid on / off:	Gibt ein Gitternetz bei Graphiken aus. (Matlab Funktion)
If	Markiert den Anfang einer If-Schleife. (Matlab Funktion)
load:	Lädt externe Dateien und speichert sie im Workspace. (Matlab Funktion)
lsqnonlin:	Ist ein Algorithmus um Gleichungssysteme zu lösen. (Matlab / Toolbox Funktion)
max:	Sucht die größten Elemente eines Vektors bzw. einer Matrix. (Matlab Funktion)
min:	Sucht die kleinsten Elemente eines Vektors bzw. einer Matrix. (Matlab Funktion)
num2str:	Formatiert eine Zahl in ein Stringformat. (Matlab Funktion)
ones:	Erzeugt eine Matrix, die mit Einsen besetzt ist. (Matlab Funktion)
optimset	Stellt die Optionen für Optimierungsalgorithmen ein. (Matlab / Toolbox Funktion)
pltscalb2:	Gibt einen Vergleichsbalken in den Verschiebungsgraphiken aus. (Calfem Funktion)

save:	Speichert eine Variable in einer Datei. (Matlab Funktion)
scalfact2:	Berechnet einen Skalierungsfaktor für die übersichtliche Darstellung von Verschiebungs- und Schnittgrößen. (Calfem Funktion)
set	Stellt die Eigenschaften von Objekten (zum Beispiel graphischen) ein. (Matlab Funktion)
size:	Ermittelt die Größe (Zeilen- / Spaltenanzahl) von Vektoren und Matrizen. (Matlab Funktion)
solveq:	Berechnet den Verschiebungsvektor mittels einer Lösungsgleichung. (Calfem Funktion)
sort	Sortiert den Inhalt einer Datei in aufsteigender Reihenfolge. (Matlab Funktion)
sqrt:	Berechnet die Wurzel. (Matlab Funktion)
subplot:	Gibt mehrere Graphiken in einem Graphikfenster aus. (Matlab Funktion)
sum:	Ermittelt die Summe von Vektor- und Matrizenelementen. (Matlab Funktion)
switch:	Markiert den Anfang einer Switch-Anweisung. (Matlab Funktion)
text:	Ermöglicht die Ausgabe von Text in Graphiken. (Matlab Funktion)
textread:	Lädt und speichert Daten aus Dateien. (Matlab Funktion)
title:	Gibt eine Überschrift über einer Graphik aus. (Matlab Funktion)
xlabel:	Beschriftet die X-Achse einer Graphik. (Matlab Funktion)
ylabel:	Beschriftet die Y-Achse einer Graphik. (Matlab Funktion)
zeros:	Erzeugt eine Matrix, die mit Nullen besetzt ist. (Matlab Funktion)

... = @(...) ...	Erzeugt eine Funktion als Inline Objekt. (Matlab Funktion)
\delta: \leftrightharpoon:	Ermöglicht die Darstellung von Sonderzeichen (δ \square). (Matlab Funktion)
%	Markiert den Anfang von Kommentaren. (Matlab Funktion)
&& == ~=:	Sind logische Begriffe: und ist gleich ungleich
+ - * /	Mathematische Standardfunktionen. (Matlab Funktion)
. * ./	Elementweises Ausführen der Standardfunktionen bei Matrizen und Vektoren. (Matlab Funktion)
'	Invertiert eine Matrix. (Matlab Funktion)
:	von... bis (...:...) von...in...Schritten...bis... (...:.....) (mit Schrittweite) (Matlab Funktion)
;	Markiert den Zeilenwechsel einer Matrix Gibt das Ergebnis einer Zeile nicht im Command Window aus. (Matlab Funktion)
,	Trennt einzelne Elemente einer Matrix. (Matlab Funktion)

10

Glossar

active mass damper (AMD) Aktiver Schwingungstilger, meistens hydraulisch oder elektrisch bewegte Masse.

active variable stiffness system (AVS) System mit aktiv veränderbarer Steifigkeit.

Adaptabilität Anpassungsvermögen

Adaption, Adaptation Anpassung eines Systems an seine Umgebung.

Adaptive cable damper (ACD) Adaptiver Seildämpfer

Aktuator Als Aktuatoren werden Wandlerelemente bezeichnet, die unter dem Einfluss physikalischer oder chemischer Einwirkungen ihre physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Geometrie und Steifigkeit, verändern. Mit Hilfe von Aktuatoren können beispielsweise das Verformungs- und Schwingungsverhalten von Tragwerken oder ihre Beanspruchungszustände beeinflusst werden.

Austenit, austenitische Atomgitterstruktur²²⁷ Kristallographische Bezeichnung der Hochtemperaturphase eines Memorymetalls mit kubisch flächenzentriertem Kristallgitter. Benannt nach dem englischen Metallurgen W. C. *Roberts-Austen* (* 1843, † 1902).

Bragg-Gitter-Sensor Optische Dehnmesssensoren. Sie wirken als schmalbandige, spektraloptische Filter, die Licht in einer bestimmten Wellenlänge reflektieren.

²²⁷ Austenitische Phase ist bei höheren Temperaturen stabil. Siehe auch Glossar.

CMOS - Technik

"*Complementary Metal Oxide Semiconductor*" – Technik (Komplementärer Metalloxid – Halbleiter). Die CMOS-Technik ist ein Fertigungsverfahren, durch das die Logichips (CPU) besonders stromsparend arbeiten und weniger Hitze erzeugt wird. Diese Technik kommt auch bei der batteriebetriebenen Echtzeit-Uhr des PCs zum Einsatz.

Curie-Temperatur T_c

Als Curie-Temperatur T_c , benannt nach Pierre Curie, wird die Temperatur bezeichnet, ab der die ferromagnetische bzw. ferroelektrische Ordnung in den betreffenden Materialien nicht mehr vorhanden ist.

Deformationskonstante

(Piezoelektrische Materialien) Deformationskonstante wird auch als piezoelektrische Ladungskonstante bezeichnet und ist ein Maß für die induzierte mechanische Spannung bzw. erzielbare mechanische Dehnung bei Wirkung eines elektrischen Feldes.

Dielektrikum

Elektrisch nicht leitendes Material, in dem ein elektrisches Feld aufrechterhalten werden kann (Gegensatz: Leiter, in dem sich elektrische Spannungen sofort ausgleichen).

Dissipation

Der Übergang einer Energieform in Wärme (zum Beispiel Reibung).

Durchschlagfestigkeit

Die Durchschlagfestigkeit (angegeben in kV/mm oder V/mm) ist diejenige elektrische Feldstärke, welche in dem Material (Isolator) höchstens herrschen darf ohne dass es zu einem Spannungsdurchschlag (Funke) kommt.

Elektrorheologisches Fluid

Ein elektrorheologisches Fluid ist eine Suspension, deren Viskosität durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes in weiten Bereichen reversibel verändert werden kann.
Die Hauptbestandteile elektrorheologischer Fluide sind eine Trägerflüssigkeit mit hoher Durchschlagfestigkeit (zum Beispiel Silikonöl, Paraffinöl, Hydrokarbonate, chlorierte Kohlenwasserstoffe) und hochpolarisierbare Feststoffteilchen (Eisenoxide, Gelatine, Gips, Kohlenstoff, Aluminiumsilikat) mit einem Durchmesser von ca. einem bis zu hundert

Nanometern. Außerdem werden unterschiedliche Aktivatorsubstanzen und Dispersionsmittel hinzugefügt.

Elektrostriktion

Die Elektrostriktion ist mit dem piezoelektrischen Effekt verwandt und beschreibt eine Volumenänderung unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Dieser Effekt ist bei allen dielektrischen Stoffen zu beobachten. Allerdings sind die erzielbaren Dehnungen mit 10^{-5} bis 10^{-7} Prozent meistens zu klein, um sie praktisch zu nutzen.

Elektrostriktives Material

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung tritt bei elektrostriktiven Materialien, unabhängig vom Vorzeichen, immer eine Verlängerung auf. Diese ist proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke. Dadurch sind die Längenänderungen der elektrostriktiven Materialien, bei einer gegebenen Feldstärke, deutlich geringer als bei Piezokeramiken, bei denen die Längenänderung direkt proportional zur elektrischen Feldstärke ist. Im Gegensatz zu piezoelektrischen Materialien sind elektrostriktive Materialien nicht polarisiert. Als Material mit ausgeprägten elektrostriktiven Eigenschaften kann vor allem Blei-Magnesium-Niobat (PMN) genannt werden.

Entropie

Entropie hat verschiedene Bedeutungen. In dieser Arbeit wird Entropie im Zusammenhang mit Ordnung in einem abgeschlossenen System (Gas oder Flüssigkeit) verwendet. Je größer die Ordnung in einem System ist, desto kleiner ist seine Entropie.

Ferroelektrika

Ferroelektrika sind Stoffe, die auch ohne äußeres angelegtes Feld ein permanentes Dipolmoment und damit eine spontane elektrische Polarisation besitzen.

Ferromagnetische Form-Gedächtnis-Legierung

Magnetostruktive Eigenschaften sind vor über zehn Jahren bei einer Mangan-Gallium-Nickellegierung (Ni_2MnGa), die bereits als thermostrik-

tive Formgedächtnislegierung bekannt war, entdeckt worden.²²⁸

Im Gegensatz zum klassischen temperaturinduzierten oder thermoelastischen Effekt, bei dem eine Transformation von der Martensitphase zur Austenitphase erforderlich ist, vollzieht sich der magnetische Formgedächtniseffekt gänzlich innerhalb der Martensitphase: Die Form ändert sich, wenn relativ zum Magnetfeld günstig ausgerichtete Zwillingstrukturen auf Kosten anderer Zwillingstrukturen im Werkstoff wachsen.²²⁹

Form-Gedächtnis-Legierung Form-Gedächtnis-Legierungen sind Materialien, die in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder von einer äußeren Spannung die martensitische²³⁰ oder die austenitische²³¹ Atomgitterstruktur annehmen und folglich ihre Form bzw. Gestalt verändern können.²³²

Formveränderbares Material Die Formänderung dieser Materialien erfolgt durch Änderungen äußerer Einflussgrößen wie Temperatur, magnetisches bzw. elektrisches Feld oder chemische Umgebung.²³³ Bei allen formveränderbaren Materialien wird der äußere Einfluss in eine Spannung umgewandelt, die dann zur Formänderung führt.²³⁴

Funktionsbaustein Zu Funktionsbausteinen werden Regelkreiselemente sowie sonstige interessante (außergewöhnliche) Material- oder Werkstoffeigenschaften gezählt.²³⁵

²²⁸ [www.nickelmagazine.org]

²²⁹ [www.nickelmagazine.org], [www.adaptamat.com]

²³⁰ Martensitische Phase ist bei tieferen Temperaturen stabil. Benannt nach dem deutschen Ingenieur Adolf Martens (1850 - 1914).

²³¹ Austenitische Phase ist bei höheren Temperaturen stabil.

²³² [Köhnlein2000, S. 430]

²³³ [Köhnlein2000, S. 430]

²³⁴ [www.intellimat.com]

²³⁵ [Neumann1995, S. 11 f.]

Genetische Algorithmen	Genetische Algorithmen (GA) sind Algorithmen, die eine Lösung zu einem nicht analytisch lösbaren Problem finden, indem sie "Lösungsvorschläge" solange verändern und miteinander kombinieren, bis einer dieser Vorschläge den gestellten Anforderungen entspricht.
Gesetz von Rubner (1885)	„Nach dem Gesetz von Rubner ist die Vergrößerungsmöglichkeit für alle ruhenden, auch sich bewegenden organischen und anorganischen Raumgebilde durch die gegebenen Festigkeiten der zur Verfügung stehenden Stoffe für Tragen und antreiben begrenzt. Vergrößert man nämlich einen Körper linear um den Faktor n , so wächst seine Masse mit n^3 , die Querschnitte seiner stützenden (Knochen) oder antreibenden Glieder (Muskeln) jedoch nur mit n^2 .“ ²³⁶
<i>hybrid base isolation</i>	aktive Entkopplung des Bauwerks gegenüber horizontalen Beanspruchungen (Schwingungen) des Baugrundes, zum Beispiel Erdbeben.
<i>hybrid mass damper</i>	Hybrider Schwingungstilger, meistens hydraulisch oder elektrisch semi-aktiv bewegte Masse.
Hysterese	<p>Als magnetische Hysterese wird bei ferromagnetischen Stoffen das Zurückbleiben der Magnetisierung gegenüber der erregenden magnetischen Feldstärke bezeichnet. Eine graphische Darstellung der magnetischen Induktion in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke wird als Hysteresekurve bzw. Hystereseschleife genannt.</p> <p>Analog wird bei mechanischer Beanspruchung von elastischer Hysterese gesprochen. Bei periodisch wechselnden Zug- und Druckkräften entsteht eine ähnliche Hystereseschleife wie bei der magnetischen Beanspruchung. Dabei wird statt der Feldstärke die Kraft und statt der Magnetisierung die Dehnung eingetragen.</p>

²³⁶ [Franz/Schäfer1988, S. 4]

Mach-Zehnder-Verfahren	Sensorenteknik, integriert-optische Interferometer (Wellenleiter-Interferometer). Wellenleiter-Interferometer basieren auf der Änderung des effektiven Brechungsindex und damit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts bei Beeinflussung des äußeren Brechungsindex. Bei Mach-Zehnder-Interferometer wird die Änderung des effektiven Brechungsindex durch Überlagerung des Lichts eines Referenzleiterarms mit dem des sensitiven Arms gemessen.
Magnetorheologisches Fluid	Ein magnetorheologisches Fluid ist eine Suspension, deren Viskosität durch die Einwirkung eines magnetischen Feldes in weiten Bereichen reversibel verändert werden kann.
Magnetostriktives Material	Magnetostriktive Materialien zeigen eine Formänderung unter Einwirkung eines magnetischen Feldes. Der zugrunde liegende physikalische Effekt ist der Wirkungsweise der Piezomaterialien sehr ähnlich: Die zunächst ungeordneten Elementarmagnete werden durch die Einwirkung eines Magnetfeldes in Richtung des Feldes gedreht. Je höher die Intensität des Magnetfeldes ist, desto mehr Elementarmagnete richten sich nach dem Feld aus. Wenn am Ende dieses Prozesses die Hauptachse der Anisotropie des magnetostriktiven Materials entlang der Richtung des Magnetfeldes liegt, ist der Sättigungszustand erreicht und die Volumenänderung am größten. ²³⁷
Makro- und Mikroschlupf	Von Makroschlupf wird gesprochen, wenn sich die gesamte Kontaktfläche im Gleitzustand befindet. Beim Mikroschlupf treten sowohl lokal verteilte Haft- als auch Gleitbereiche in der Kontaktfläche auf.

²³⁷ [Gandhi/Thompson1992, S. 77]

Martensit,
martensitische
Atomgitterstruktur²³⁸

Kristallographische Bezeichnung der Tieftemperaturphase eines Memorymetalls. Außer durch Temperatur kann der Martensit durch eine äußere mechanische Spannung aus dem Austenit gebildet werden, was mit einer hohen Dehnung, der Superelastizität verbunden ist.

Maxwellstruktur

Strukturen mit optimalen Kräftepfaden. Voraussetzung für Maxwellstrukturen ist, dass sich die Wirkungslinien der äußeren Kräfte innerhalb des kleinsten durch die Lastangriffspunkte der äußeren Kräfte bildbaren konvexen Polyeders schneiden.²³⁹

MEMS

(englisch: *Micro-Electro-Mechanical System*)

MEMS ist die Kombination aus mechanischen Elementen, Sensoren, Aktoren und elektronischen Schaltungen auf einem Substrat bzw Chip. *MEMS* basieren auf der Halbleiter-Elektronik. Grundmaterial (Substrat) ist in der Regel ebenfalls Silizium. Die Mikroelektronik beschränkt sich auf elektrische Komponenten wie Transistoren (CPU) und Kondensatoren (RAM). Die Mikrosystemtechnik erweitert diese Palette um mechanische, optische, chemische und/oder biologische Komponenten.²⁴⁰

Mooney

Eine der Bauformen der piezoelektrischen Aktuatoren. Mit dem Mooney werden bei einer Kontraktion der Piezokeramikschichten die halbmondförmigen elastischen Begrenzungsplatten aufgebogen, wodurch die erreichbaren Stellwege um Faktor Zehn vergrößert werden können.²⁴¹

²³⁸ Martensitische Phase ist bei tieferen Temperaturen stabil. Benannt nach dem deutschen Ingenieur Adolf Martens (1850 - 1914).

²³⁹ [Sobek1995, S. 328]

²⁴⁰ <http://www.computerbase.de/lexikon/MEMS>

²⁴¹ [Neumann1995, S. 66]

Neuronales Netz

Die besondere Eigenschaft neuronaler Netze, besteht in ihrer Fähigkeit komplexe Muster zu erlernen, ohne dass die diesen Mustern zugrunde liegenden Regeln zuvor abstrahiert und definiert werden müssen. Basierend auf diesem Arbeitsprinzip sind neuronale Netze imstande auch sehr komplexe Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Verschiebungen mathematisch zu erfassen und für Adaptionberechnungen zur Verfügung zu stellen, ohne dass die Reaktionen des Systems programmiert werden müssen.²⁴²

Piezoelektrischer Effekt

Beim piezoelektrischen Effekt wird infolge einer mechanischen Verformung (Kraft) eine Verschiebung elektrischer Ladungen erzeugt und somit eine elektrische Spannung in einem piezoelektrischen Material induziert. Diese Eigenschaft bildet die Grundlage der Wirkungsweise piezoelektrischer Sensoren. Ein umgekehrtes Phänomen wird beim inversen piezoelektrischen Effekt hervorgerufen: Das Anlegen eines elektrischen Feldes führt zur Deformation des piezoelektrischen Materials. Je nach Richtung der elektrischen Spannung kontrahiert oder expandiert das Material. Dieser Effekt wird für die piezoelektrischen Aktuatoren genutzt.²⁴³

Piezoelektrische Materialien

Die Piezoelektrizität beschreibt die Wechselwirkung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Zustand eines ferroelektrischen Kristalls, dessen Gitter kein Symmetriezentrum bezüglich der positiven und negativen Kristallionen besitzt. Zu diesen Materialien zählen ausschließlich Feststoffe, zum Beispiel Keramiken, Metallsalze oder bestimmte Kunststoffe. Zu den typischen Vertretern der piezoelektrischen Materialien gehören Blei-Zirkonium-Titanat ($\text{Pb}[\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x]\text{O}_3$), kurz PZT, und Barium-Titanat (BaTiO_3).

²⁴² [www.math.uni-muenster.de], [www.uni-bielefeld.de]

²⁴³ [Elspass/Flemming1998, S. 14 ff.]

Polymere	Polymere sind Verbindungen, deren Moleküle aus einer großen Anzahl von Struktureinheiten, den so genannten Monomeren, aufgebaut sind. Biopolymere sind natürlich vorkommende Polymere, die am Aufbau der belebten Natur, wie zum Beispiel an Cellulose, Stärke oder Nukleinsäuren beteiligt sind. Synthetische Polymere werden künstlich durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition hergestellt. ²⁴⁴
Redoxreaktion	„Eine Redoxreaktion ist eine chemische Reaktion bestehend aus den Teilreaktionen Oxidation und Reduktion. Viele Reaktionen in der Chemie sind Redoxreaktionen, dazu gehören Reaktionen zur Gewinnung von Metallen und chemische Reaktionen bei elektrochemischen Abläufen wie in Batterien.“
Regelung	„Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“ ²⁴⁵ In dem Zusammenhang spricht man von <i>closed loop control</i> .
Reißlänge	Verhältnis der Zugfestigkeit zur Rohdichte eines Materials.
Rheologie	(griechisch: <i>rheos</i> = fließen) Die Rheologie ist die Fließkunde von Stoffen und beschreibt den Zusammenhang von Kraft, Zeit und Deformation.
Schwingungsdämpfer	Schwingungsdämpfer wandeln die äußere Energie in Reibungswärme um bzw. dissipieren sie über plastische Verformungen.

²⁴⁴ [Brockhaus1997, Bd. 11, S. 129]

²⁴⁵ [DIN 19226-1:1994-02, S. 7]

Schwingungstilger

Schwingungstilger (*tuned mass damper*) wandeln die äußere Energie in kinetische Energie um.

Seltene Erden

(englisch: *rare earth elements, RR.EE*)

Zu den Metallen der Seltenen Erden gehören die chemischen Elemente der 3. Nebengruppe des Periodensystems und die Lanthanoide.

Die wichtigsten Vertreter sind Allanit, Bastnäsit, Betafit, Gadolinit, Monazit, Pyrochlor und Thorit.

Sensor

Ein Sensor ist ein Funktions- oder Bauelement²⁴⁶, das mit Hilfe physikalischer oder chemischer Effekte der qualitativen oder quantitativen Erfassung physikalischer, chemischer oder elektrochemischer Größen und deren Umwandlung bevorzugt in elektrische Signale dient.

shape memory alloys
(SMA)

s. Form-Gedächtnis-Legierung

Steifigkeitsveränderbares
Material

Steifigkeitsveränderbare oder auch phasenveränderbare Materialien sind Suspensionen, deren Viskosität (Steifigkeit) durch die Einwirkung eines elektrischen oder magnetischen Feldes, seltener durch Temperaturänderung, verändert wird. Die Viskosität der Suspension kann, in Abhängigkeit von der Stärke des äußeren Einflusses, vom flüssigen bis zum erstarrten Zustand variiert werden. Je nach Art der Einflussgröße, spricht man von elektro-, magneto- oder thermorheologischen Materialien. Die elektro- und magnetorheologischen Fluide werden bereits in der Praxis zur Lösung technischer Aufgabenstellungen adaptiver Systeme eingesetzt, beispielsweise zur Dämpfung der durch Wind oder Erdbeben erregter Schwingungen von Bauwerken.

²⁴⁶ s. Glossar

Steuerung

In der Regelungstechnik werden Systeme mit negativer Rückkopplung gebaut. Am Beispiel eines Tragwerkstabes, dessen Normalkraft auf eine zuvor berechnete Größe gesteigert werden soll, bedeutet das, dass die Krafteinleitung durch Aktuatoren um so stärker kontinuierlich zurück geht, je geringer der Abstand der vom Sensor gemessenen Kraft zum angestrebten Wert ist. Eine solche Rückkopplung stellt die Bedingung dar, dass von einer Regelung (*closed loop control*) gesprochen werden kann. Ist das nicht der Fall, so spricht man von einer Steuerung (*open loop control*).²⁴⁷

Struktur

„Struktur ist die Darstellung von Teilen eines Ganzen und deren Beziehung zueinander (gegliederter Aufbau, Gefüge, Verknüpfungen, Anordnungen).“²⁴⁸ Die Elemente und deren Relation bilden die Struktur²⁴⁹ und beschreiben das technische Gebilde in seinem inneren Aufbau.²⁵⁰

In den Fachbereichen des Maschinenbaus oder der Luft- und Raumfahrt-technik wird eine Struktur durch eine tragende, formgebende Funktion sowie weitere Eigenschaften physikalischer, chemischer oder biologischer Natur charakterisiert. Als Beispiele solcher Eigenschaften können die elektrische Leitfähigkeit, die Lichtdurchlässigkeit, die Materialfestigkeit oder die Dehn- und Biegesteifigkeit genannt werden. Dabei wird die Struktur als eine funktionelle Einheit angesehen.

Struktur, gemischt

Eine gemischte Struktur besteht aus Zug- und Druckstäben. Die optimalen Kräftepfade, d. h. die Anzahl der Knoten und Stäbe sowie ihre Zuordnung, werden mit den Mitteln der Strukturtopologie definiert.²⁵¹

²⁴⁷ [DIN 19226-4:1994-02, S. 5]

²⁴⁸ [VDI 2221, S. 41]

²⁴⁹ [Hansen1974, S. 21]

²⁵⁰ [Hansen1974, S. 48], [Bauer2000, S. 144]

²⁵¹ [Wiedemann1996-2, S. 245]

Struktur, ungemischt	Eine ungemischte Struktur besteht nur aus einer Stabart (Zug- oder Druckstäbe). Kennzeichnend für sie ist die theoretische Unabhängigkeit des Massenaufwands von der Wahl des Stabs- oder Netzsystems. ²⁵²
System	<p>Ein System ist „die Gesamtheit der zur selbstständigen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes erforderlichen technischen und/oder organisatorischen und/oder anderen Mitteln der obersten Betrachtungsebene“.²⁵³</p> <p>„Es hat seine Beziehung zu seiner Umwelt (U), es hat eine Struktur (S) und es hat eine Funktion (F).“²⁵⁴</p> <p>„Ein technisches System ist die Gesamtheit von der Umgebung abgrenzbarer (Systemgrenzen), geordneter und verknüpfter Elemente, die mit dieser durch technische Eingangs- und Ausgangsgrößen in Verbindung stehen.“²⁵⁵</p>
Thermostriktives Material	Die Formänderung dieser Materialien erfolgt durch Änderungen äußerer Einflussgrößen wie Temperatur, magnetisches bzw. elektrisches Feld oder chemische Umgebung. ²⁵⁶ Bei allen formveränderbaren Materialien wird der äußere Einfluss in eine Spannung umgewandelt, die dann zur Formänderung führt. ²⁵⁷
Tragsystem	<p>Tragsystem bezeichnet die „tragenden Teile eines Bauwerks und die Art und Weise, in der diese Teile zusammenwirken.“²⁵⁸</p> <p>In Anlehnung an diese Definition wird in dieser Arbeit das Tragsystem als ein mit statischen Symbolen dargestelltes Tragwerk und seine Tragwirkung (als Stab, Seil, Träger, Platte, Scheibe, Schale, Membrane etc. und Kombination derselben) bezeichnet.</p>

²⁵² [Wiedemann1996-2, S. 245]

²⁵³ [DIN 6779-1: 1995-07, S. 3]

²⁵⁴ [Hansen1974, S. 21]

²⁵⁵ [VDI 2221, S. 41]

²⁵⁶ [Köhnlein2000, S. 430]

²⁵⁷ [www.intellimat.com]

²⁵⁸ [DIN EN 1990:2002, S. 10]

Tragwerk

Das Tragwerk ist eine „planmäßige Anordnung miteinander verbundener Bauteile, die so entworfen sind, dass sie ein bestimmtes Maß an Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen.“²⁵⁹

Dies bedeutet, dass das Tragwerk alle planmäßig angeordneten und miteinander verbundenen Elemente umfasst, die Einwirkungen aufnehmen und in den Baugrund ableiten (zum Beispiel Eigenlast, Nutzlast, Wind, Schnee, Temperatur, Anprall).

tuned mass damper (TMD) s. Schwingungstilger

Viskoelastisches Material Werden viskoelastische Materialien durch eine mechanische Einwirkung langsam beansprucht, so reagieren sie zäh wie eine hochviskose Flüssigkeit. Wird dagegen die Einwirkung schnell aufgebracht, so ist das Verhalten viskoelastischer Materialien elastisch.

Wavelet

Mit dem Begriff Wavelet werden die einer kontinuierlichen oder diskreten Wavelet-Transformation zugrunde liegenden Funktionen bezeichnet. Das Wort ist eine Neuschöpfung aus dem französischen „*ondelette*“, was „kleine Welle“ bedeutet, und welches teils wörtlich, „*onde*“ → „*wave*“, teils phonetisch „*-lette*“ → „*-let*“ ins Englische übertragen wurde.

Wavelet-Transformation

Die Wavelet-Transformation (englisch: *wavelet transform*) ist eine Form der Frequenz-Transformation. Als Basisfunktionen verwendet man Wavelets. Der große Vorteil gegenüber der Fourier-Transformation ist die zeitliche Lokalität der Basisfunktionen und die geringe Komplexität.

²⁵⁹ [DIN EN 1990:2002, S. 9]