

The background is an abstract, textured composition of vibrant colors. It features a large, irregular shape in shades of blue and cyan, which overlaps with a broad, diagonal band of pink and magenta. Below these, there are sections of bright red and orange, and at the bottom, a curved area of green and yellow. The overall effect is that of a layered, organic structure, possibly representing a cross-section of a material or a dynamic architectural form. The colors are saturated and the textures appear grainy and layered.

axel ritter

smart und
kinetisch!

Entwerfen und
Konstruieren von energie- und
materieautarken kinetischen
architektonischen Räumen
und hydroaktiven Polymer-Aktoren
unter Einsatz von Smart Materials,
adaptiven und gewichtsreagiblen
Konstruktionen

Berichte aus der Architektur

Axel Ritter

smart und kinetisch!

Entwerfen und Konstruieren von energie- und materieautarken
kinetischen architektonischen Räumen und hydroaktiven
Polymer-Aktoren unter Einsatz von Smart Materials,
adaptiven und gewichtsreagiblen Konstruktionen

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2013

Umschlaggestaltung: Axel Ritter

Das Buch ist auch als PDF-Download unter www.shaker.de/shop/978-3-8440-2890-4 verfügbar.

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2890-4
ISSN 0945-0661

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

smart und kinetisch!

Entwerfen und Konstruieren von energie- und materieautarken kinetischen architektonischen Räumen und hydroaktiven Polymer-Aktoren unter Einsatz von Smart Materials, adaptiven und gewichtsreagiblen Konstruktionen

Design and construction of energy and matter self-sufficient kinetic architectural spaces and hydro-active polymer actuators under the use of smart materials, adaptive and weight-sensitive constructions

Teil I – theoretischer Teil/*Part I – theoretical part*

Ansätze zur Realisierung geometrischer Veränderungen von architektonischen Räumen unter Einsatz von energie- und materieautarken passiven und aktiven (aktivierbaren) Materialien und Konstruktionen – hier insbesondere von Smart Materials und adaptiven, gewichtsreagiblen Konstruktionen

Teil II – praktischer Teil/*Part II – practical part*

Beispielhafte Entwicklungen zu linearen Antriebssystemen auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren) und zu damit ausgestatteten geometrisch veränderbaren/verändernden (kinetischen) raumbildenden architektonischen Konstruktionen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften
Universität Duisburg-Essen genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grads
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Vorgelegt von Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Axel Ritter aus Wiesweiler

Tag der mündlichen Prüfung: 13.02.2013

(KURZFASSUNG)

Meinen Eltern Erwin und Lotte Ritter gewidmet

Vorworte

Diese wissenschaftliche Arbeit wurde 1998 am *Institut für leichte Flächentragwerke (IL)* der *Universität Stuttgart* – heute als *Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)* firmierend – begonnen und 2011 an der *Abteilung Bauwissenschaften, Fachgebiet Baustatik und Baukonstruktion* der *Universität Duisburg-Essen/Campus Essen* – ehemals *Fachgebiet Konstruktive Gestaltung, Leichtbau* – zum Abschluss gebracht und im darauf folgenden Jahr (2012) an der *Universität Duisburg-Essen/Campus Essen* – nach kleineren Änderungen, Ergänzungen und Korrekturen – eingereicht.

Das *Institut für Luft- und Raumfahrt, Lehrstuhl für Leichtbau (LLB)* der *Technischen Universität München (TUM)* war seit 2008 bis zum Abschluss der Arbeit involviert.

Während des Bearbeitungszeitraums wurden neben den vorgeschlagenen Sachverständigen und genannten Instituten weitere Personen und Institute sowie mehrere Firmen im In- und Ausland kontaktiert, von denen einige mit involviert wurden (s. Hinweise im fortlaufenden Text und im Quellenverzeichnis).

Vor Offenlegung der Arbeit am *Campus Essen* wurden zwei Patentanmeldungen von mir beim Deutschen Patent- und Markenamt in München eingereicht (s. Hinweise [P 2, P3]).

Bad Neuenahr-Ahrweiler, im August 2012

Axel Ritter

Vorliegende Abhandlung wurde gegenüber der ursprünglichen, am 11.09.2012 an der *Universität Duisburg-Essen/Campus Essen* eingereichten Fassung im Zuge von durch die Prüfungskommission nach Abschluss der mündlichen Prüfung am 13.02.2013 an mich gestellten Auflagen wunschgemäß überarbeitet.

So wurden im Zuge einer besseren Lesbarkeit im zweiten Teil (*Teil II – praktischer Teil*) die Langtexte bei allen durchgeführten Untersuchungen (*Versuchs- und Testreihen 01 bis 09*) entfernt, womit die Auflage nach einer Kürzung der Abhandlung um etwa 100 Seiten erfüllt wurde. Als Teil dieser Auflagen wurden weiter die Berechnungen im Anhang um ein Kap. zur Ermittlung der vorhandenen und erforderlichen Energien bei Varianten der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf) sowie der Energiedichten von hydroaktiven Polymer-Aktoren erweitert, das aus insgesamt 22 Seiten besteht.

Auch wurden in diesem Zusammenhang der ursprünglich vorgesehene Haupttitel *smart and kinetic!* ins Deutsche übersetzt und der deutsche Untertitel um das Wort „architektonischen“, der englische um das Wort „architectural“ ergänzt. (S. auch Hinweise im fortlaufenden Text.)

Neben dieser gekürzten Fassung ist eine Langfassung der Abhandlung mit dem Titel *smart and kinetic!* erhältlich, bei der u. a. alle hier entfernten Langtexte zu den durchgeführten Untersuchungen, das vorgenannte zusätzliche Kap. sowie weiteres Material enthalten sind. – Beide Fassungen (Kurzfassung und Langfassung) sind zunächst in Deutsch erhältlich.

Bad Neuenahr-Ahrweiler, im April 2014

Axel Ritter

Kurzzusammenfassung/Short abstract

Im Rahmen dieser Dissertation werden unterschiedliche Ansätze zur Realisierung geometrischer Veränderungen von architektonischen Räumen unter Einsatz von energie- und materieautarken passiven und aktiven (aktivierbaren) Materialien und Konstruktionen – hier insbesondere von Smart Materials und adaptiven, gewichtsreagiblen Konstruktionen – (*Teil I – theoretischer Teil*),

sowie lineare Antriebssysteme auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren) und damit ausgestattete geometrisch veränderbare/verändernde (kinetische) raumbildende architektonische Konstruktionen (*Teil II – praktischer Teil*) entwickelt und aufgezeigt.

Dazu werden u. a. die als wesentlich scheinenden Grundlagen erarbeitet, entsprechend geeignete, bereits bekannte passive und aktive (aktivierbare) Materialien und Konstruktionen analysiert, sowie neue Konstruktionen unter Einsatz von Smart Materials und adaptiven, gewichtsreagiblen Konstruktionen bzw. Komponenten entwickelt und aufgezeigt, wobei u. a. auf die sinnvolle Verwendung und Positionierung von Smart Materials und anderen Komponenten in diesen und anderen Materialien und Konstruktionen, sowie auf einen vorzugsweise stromlosen Betrieb dieser geachtet wird (*Teil I – theoretischer Teil*).

Anschließend wird mit dem Bau von insgesamt drei Varianten eines linearen Antriebssystems auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (Aktor I, II und III) ein Ansatz aus *Teil I* praktisch umgesetzt, von denen eines in einer gleichfalls neu entwickelten und realisierten kinetischen Konstruktionen (Kinetische Konstruktion II) eingesetzt, auf seine Eignung hin untersucht und unter praktischen Bedingungen getestet wird.

Zum Nachweis der Funktionen und der Eignung von Aktor II werden u. a. zwei auch durch Personenlasten geometrisch veränderbare (kinetische) raumbildende architektonische Konstruktionen entwickelt, von denen eine (Kinetische Konstruktion II) realisiert wird (*Teil II – praktischer Teil*).

In this dissertation there will be developed and shown different basic ideas to realise geometric transformations of architectural spaces through the use of energy and matter self-sufficient passive and active (activatable) materials and constructions – here especially of smart materials and adaptive, weight-sensitive constructions – (Part I – theoretical part) and linear drive systems based on hydro-active swellable polymer bands (waterstops – hydro-active polymer actuators) and thus equipped geometric transformable/changing (kinetic) space-forming architectural constructions – (Part II – practical part).

For this, including the translucent as essential basis will be developed, the suited, already known passive and active (activatable) materials and constructions will be analyzed, and new constructions through the use of smart materials and adaptive, weight-sensitive constructions respectively components developed and shown, where attention is paid to the proper use and positioning of smart materials and other components in this and other materials and constructions, and a preferably currentless operation of this (Part I – theoretical part).

Then, with the construction of three variants of a linear drive system based on hydro-active swellable polymer bands (Aktor I, II and III) an approach from part I will come into practice, one of which is used in a design (Kinetische Konstruktion II) and tested.

To prove the functions and suitability of Aktor II, two for person loads and other influences sensitive geometric transformable (kinetic) space-forming architectural constructions will be developed, one of which will be realized (Part II – practical part).

Inhaltsverzeichnis/*Contents*

	Kurzzusammenfassung/<i>Short abstract</i>	II
	Abkürzungs- und Zeichenverzeichnis	IX
0	Einleitung	1
0.1	Zielsetzung und Definitionen	1
0.2	Motivation	3
0.3	Planung und Ablauf	6
0.4	Gliederung	7
0.5	Historie	8
0.6	Ausstattung und Zusammenarbeit	9
	Teil I – theoretischer Teil/<i>Part I – theoretical part</i>	
1	Ansätze zur Realisierung geometrischer Veränderungen von architektonischen Räumen unter Einsatz von energie- und materieautarken passiven und aktiven (aktivierbaren) Materialien und Konstruktionen – hier insbesondere von Smart Materials und adaptiven, gewichtsreagiblen Konstruktionen	10
1.1	Zielsetzung (Teil I – theoretischer Teil)	10
1.2	Stand der Forschung (Teil I – theoretischer Teil)	11
1.3	Grundlagen allgemein	12
1.3.1	Adaption und Veränderung	12
1.3.2	Architektonischer Raum	14
1.3.2.1	Anforderungen	14
1.3.2.2	Kenngößen	14
1.4	Geometrisch veränderbare/verändernde (kinetische) architektonische Räume, Einflussgrößen, energie- und materieautarke passive und aktive (aktivierbare) Materialien und Konstruktionen, und Steuerung und Regelung	15
1.4.1	Grundlagen geometrisch veränderbarer/verändernder (kinetischer) architektonischer Räume	15
1.4.1.1	Grundlagen, Analysen und Anwendungen	15
1.4.1.1.1	Prinzipien geometrischer Veränderungen	15
1.4.1.1.2	Erscheinungsformen geometrischer Veränderungen	18
1.4.1.1.3	Anordnungs-Prinzipien und Verlagerungs-Mechanismen	20

1.4.2	Einflussgrößen	21
1.4.2.1	Grundlagen, Analysen und Anwendungen	21
1.4.2.1.1	Physikalische und chemische Einflussgrößen und ihre Stellung	21
1.4.2.1.2	Räumliche Einflussgrößen	29
1.4.3	Energie- und materieautarke passive und aktive (aktivierbare) Materialien	31
1.4.3.1	Grundlagen, Analysen und Anwendungen	31
1.4.3.1.1	Energie- und materieautarke passive Materialien	31
1.4.3.1.2	Energie- und materieautarke aktive (aktivierbare) Materialien	33
1.4.3.1.3	Smart Materials	34
1.4.4	Energie- und materieautarke passive und aktive (aktivierbare) Konstruktionen	38
1.4.4.1	Grundlagen, Analysen, Anwendungen und Entwicklungen	38
1.4.4.1.1	Strom-Generatoren	38
1.4.4.1.2	Aufnehmer/Verstärker	39
1.4.4.1.3	Speicher	41
1.4.4.1.4	Überträger/Leiter	42
1.4.4.1.5	Antriebe (Aktoren)	42
1.4.4.1.6	Getriebe	53
1.4.4.1.7	Tragwerke	55
1.4.4.1.8	Verbindungen und Übergänge	57
1.4.4.1.8.1	Lager	57
1.4.4.1.8.2	Gelenke	61
1.4.4.1.8.3	Knoten	69
1.4.4.1.8.4	Lösbare/lösende Verbindungen	71
1.4.4.1.8.5	Kanten und Ecken	74
1.4.4.1.9	Stäbe	75
1.4.4.1.9.1	Universelle Stäbe	75
1.4.4.1.9.2	Angewandte Stäbe	76
1.4.4.1.10	Flächen	87
1.4.4.1.10.1	Universelle Flächen	87
1.4.4.1.10.2	Angewandte Flächen	97
1.4.4.1.11	Räume und Gebäude	108
1.4.4.1.12	Ergänzungen	125
1.4.4.1.12.1	Flächen- und Körperergänzungen	125
1.4.4.1.12.2	Öffnungen	130
1.4.4.1.12.3	Treppen und Rampen	136
1.4.4.1.12.4	Bauphysikalische und -chemische Ergänzungen	139
1.4.5	Steuerung und Regelung	142
1.4.5.1	Grundlagen und Anwendungen	142
1.4.5.1.1	Steuer- und Regelgrößen	142
1.4.5.1.2	Steuer- und Regelungsarten	143
1.4.5.1.3	Steuerungsnetze	147
1.4.5.1.3.1	Angewandte Steuerungsnetze	147
1.5	Zusammenfassung (Teil I – theoretischer Teil)	148

Teil II – praktischer Teil/Part II – practical part

2	Beispielhafte Entwicklungen zu linearen Antriebssystemen auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren) und zu damit ausgestatteten geometrisch veränderbaren/verändernden (kinetischen) raumbildenden architektonischen Konstruktionen	150
2.1	Zielsetzung (Teil II – praktischer Teil)	150
2.2	Stand der Forschung (Teil II – praktischer Teil)	152
2.3	Beispielhafte Entwicklungen zu linearen Antriebssystemen auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren)	153
2.3.1	Theoretische Vorarbeiten	153
2.3.2	Hydroaktive polymere Quellbänder	154
2.3.2.1	Untersuchte Quellbänder	154
2.3.2.1.1	Untersuchungen (<i>Versuchs- und Testreihe 01</i>)	159
2.3.2.1.1.1	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung, des Quell- und Schrumpfverhaltens und des Quell- und Schrumpfvermögens von Quellbändern vom Typ <i>Hydrotite, Contaseal, Duxpa-Dichtband, Aquaprene, Supercast, Aquaquell</i> (<i>Versuchs- und Testreihe 01 – Versuche und Tests 01 bis 09</i> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zugversuche und Tests)	159
2.3.2.2	Vorauswahl der Quellband-Typen	168
2.3.3	Hydroaktive polymere Antriebsstränge	169
2.3.3.1	Arbeits-Prinzipien und Antriebsstrang-Typen	169
2.3.3.2	Möglichkeiten der Anordnung und Kombination mit passiven Komponenten	171
2.3.3.3	Besondere Strang-Geometrien	173
2.3.3.4	Vorauswahl der Antriebsstrang-Typen	173
2.3.3.5	Antriebsstränge Typ I, Typ II (Prototypen) und innere Kraftabgriffsbereiche	174
2.3.3.5.1	Entwicklungen und deren Realisierung	174
2.3.3.5.1.1	Antriebsstränge Typ I (Prototypen) und innere Kraftabgriffsbereiche	174
2.3.3.5.1.2	Antriebsstränge Typ II (Prototypen)	177
2.3.3.5.2	Untersuchungen (<i>Versuchs- und Testreihen 02 und 03</i>)	181
2.3.3.5.2.1	Untersuchungen zur Optimierung der inneren Kraftabgriffsbereiche und von Antriebssträngen vom Typ I: <i>Hydrotite, Duxpa-Dichtband, Aquaprene, Supercast</i> (<i>Versuchs- und Testreihe 02 – Versuche und Tests 01 bis 09</i> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zug-, Zugfederversuche und Tests)	181
2.3.3.5.2.2	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und der Funktionen von Antriebsstrang Typ II: <i>Supercast</i> (<i>Versuchs- und Testreihe 03 – Versuche und Tests 01 und 02</i> : Quell-, Schrumpf-, Zugfederversuche und Tests)	187

2.3.4	Lineare Antriebssysteme auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren)	190
2.3.4.1	Aktor I (Versuchsträger I/Demonstrator I)	190
2.3.4.1.1	Entwicklungen und deren Realisierung	191
2.3.4.1.1.1	Aktiver (aktivierbarer) Antrieb/Arbeitszylinder	192
2.3.4.1.1.2	Passive Zug-Einheit	193
2.3.4.1.1.3	Wassertank	194
2.3.4.1.1.4	Gewichtsaufnahme-Plattform	195
2.3.4.1.1.5	Mögliche Bauformen von Aktor I und anderen hydroaktiven Polymer-Aktoren	195
2.3.4.1.2	Untersuchungen (<i>Versuchs- und Testreihe 04</i>)	195
2.3.4.1.2.1	Untersuchungen zur Feststellung der Funktionen und des Arbeitsvermögens von Aktor I: <i>Hydrotite – Antriebsstrang Typ I (Versuchs- und Testreihe 04 – Versuche und Tests 01 und 02: Quell-, Schrumpf-, Ballastierungsversuche und Tests)</i>	196
2.3.4.1.3	Möglichkeiten der Optimierung von Aktor I	199
2.3.4.2	Aktor II (primärer Aktor, Versuchsträger II/Demonstrator II)	201
2.3.4.2.1	Entwicklungen und deren Realisierung	201
2.3.4.2.1.1	Aktive (aktivierbare) Antriebs-Einheit	208
2.3.4.2.1.2	Arbeitszylinder/Wassertank	212
2.3.4.2.1.3	Passive Zug-Einheit	218
2.3.4.2.2	Untersuchungen	219
2.3.4.2.3	Möglichkeiten der Optimierung von Aktor II	219
2.3.4.3	Versuchsstand I/Aktor III (Versuchsträger III/Demonstrator III)	220
2.3.4.3.1	Entwicklungen und deren Realisierung	220
2.3.4.3.1.1	Rahmen	224
2.3.4.3.1.2	Aktive (aktivierbare) Antriebe/aktive (aktivierbare) Antriebs-Einheit	224
2.3.4.3.1.3	Arbeitszylinder/Wassertanks	225
2.3.4.3.1.4	Passive Zug-Einheiten	227
2.3.4.3.1.5	Leitungssystem	229
2.3.4.3.1.6	Möglichkeiten der Anwendung als Aktor III	230
2.3.4.3.2	Untersuchungen (<i>Versuchs- und Testreihen 05 und 06</i>)	231
2.3.4.3.2.1	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und des Arbeitsvermögens von Antriebssträngen vom Typ I in Versuchsstand I: <i>Hydrotite, Aquaprene, Supercast (Versuchs- und Testreihe 05 – Versuche und Tests 01 bis 04: Quell-, Schrumpf-, Ballastierungsversuche und Tests)</i>	231
2.3.4.3.2.2	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und des Arbeitsvermögens von Antriebsstrang-Einheit vom Typ I in Versuchsstand I: <i>Hydrotite (Versuchs- und Testreihe 06 – Versuche und Tests 01 bis 07: Quell-, Schrumpf-, manuelle Zug-, Druckversuche, Versuche und Tests mit hydraulischen Systemen)</i>	239
2.4	Beispielhafte Entwicklungen zu mit linearen Antriebssystemen auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren) ausgestatteten geometrisch veränderbaren/verändernden (kinetischen) raumbildenden architektonischen Konstruktionen	249
2.4.1	Theoretische und praktische Vorarbeiten	249

2.4.2	Kinetische Konstruktion I (Entwurf)	265
2.4.2.1	Entwicklungen	266
2.4.2.1.1	Zentrale Stand-, Trag- und Anschluss-Konstruktion	278
2.4.2.1.2	Scheren-Konstruktionen (Scherenpaar-Batterien)	280
2.4.2.1.3	Gewichtsaufnahme-Plattform, Treppe und Regenwasser-Sammler	283
2.4.2.1.4	Raumbildende Hüll-Konstruktionen	286
2.4.2.1.5	Antriebs- und Steuerungselemente/-Einheiten (primäre, sekundäre und tertiäre Aktoren)	288
2.4.2.1.6	Erweiterte primäre und sekundäre Energie- und Materiestellung	299
2.4.3	Kinetische Konstruktion II (Versuchsstand II/Demonstrator IV)	299
2.4.3.1	Entwicklungen und deren Realisierung	299
2.4.3.1.1	Zentrale Stand-, Trag- und Anschluss-Konstruktion	300
2.4.3.1.2	Scheren-Konstruktionen (Scherenpaar-Batterien)	301
2.4.3.2	Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 07 bis 09</u>)	304
2.4.3.2.1	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und des Arbeitsvermögens von Aktor II in der Kinetischen Konstruktion II: <i>Hydrotite</i> – Antriebsstrang Typ I (<u>Versuchs- und Testreihe 07 – Versuche und Tests 01 bis 08</u> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zug-, Druckversuche, Versuche und Tests mit seilgebundenen Systemen)	305
2.4.3.2.2	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und des Arbeitsvermögens von Aktor II in der Kinetischen Konstruktion II: <i>Hydrotite</i> – Antriebsstrang Typ I (<u>Versuchs- und Testreihe 08 – Versuche und Tests 01 bis 10</u> : Quell-, Schrumpf-, Druckfeder-, manuelle Zugversuche, Versuche und Tests mit hydraulischen Systemen)	317
2.4.3.2.3	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und des Arbeitsvermögens von Aktor II in der Kinetischen Konstruktion II: <i>Hydrotite</i> – Antriebsstrang Typ I (<u>Versuchs- und Testreihe 09 – Versuche und Tests 01 bis 07</u> : Quell-, Schrumpf-, Druckfeder-, Druckluft-, Auftriebs-, Ballastierungs-, manuelle Zugversuche, Versuche und Tests mit einem hybriden System)	331
2.4.3.3	Möglichkeiten der Optimierung der Kinetischen Konstruktion II	344
2.5	Zusammenfassung (Teil II – praktischer Teil)	346
3	Zusammenfassung und Ausblick	347
3.1	Zusammenfassung	347
3.2	Ausblick	349

	Anhang	354
A	Kernproblematik, Frage- und Aufgabenstellungen	354
B	Übersichten, technische Daten und Besonderheiten zu energie- und materieautark(en) (betreibbaren) passiven und aktiven (aktivierbaren) Antrieben (Aktoren)	356
C	Berechnungen (<u>Berechnungen 01 bis 06</u>)	360
C.1	Berechnungen zum Design von Thermobimetall-Stellelementen und Möglichkeiten ihrer Verstärkung (<u>Berechnungen 01</u>)	360
C.2	Berechnungen zum Design eines personengewichtsgesteuerten, hydraulischen Stellelements/Stellkraftvergrößerers (hydraulische Pumpe) (<u>Berechnungen 02</u>)	361
C.3	Berechnungen insbesondere zur Ermittlung der vorhandenen und erforderlichen Energien bei Varianten der personengewichtsgesteuerten geometrisch veränderbaren/verändernden raumbildenden architektonischen Konstruktion des Typs Kinetische Konstruktion I (Entwurf) und der Energiedichten von hydroaktiven Polymer-Aktoren (<u>Berechnungen 03 bis 06</u>) (Nachtrag 2013)	363
	Quellenverzeichnis	385
	Sachregister	396
	Lebenslauf	409