

The background is an abstract, textured composition of vibrant colors. It features a large, dark, almost black shape in the upper left corner that transitions into a bright, fiery orange and red. Below this, a deep teal or cyan color dominates the middle section, with a bright, glowing white and light blue area on the left side. The bottom edge is a dark, almost black, wavy line that separates the main colorful area from a white text block at the bottom right. The overall effect is dynamic and energetic, suggesting movement and transformation.

axel ritter

smart and
kinetic!

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

smart and kinetic!

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 nicht genehmigte 2. Fassung der

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

(LANGFASSUNG)

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.

Umschlaggestaltung: Axel Ritter

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.

DOI 10.2370/OND000000000169

OND-00000-0000169

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

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 (vorläufigen) 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. auch Hinweise im Text).

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 entspricht bis auf ein zusätzliches Kap. mit weiteren Berechnungen (s. unten) und dem neuen Kap. *D* im Wesentlichen der ursprünglichen, am 11.09.2012 an der *Universität Duisburg-Essen/Campus Essen* eingereichten Fassung der Dissertation.

Im Zuge von durch die Prüfungskommission nach Abschluss der mündlichen Prüfung am 13.02.2013 an mich gestellten Auflagen, wurde diese dann 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 wurde in diesem Zusammenhang u. a. der ursprünglich vorgesehene englische Haupttitel ins Deutsche übersetzt.

Die gekürzte, entsprechend überarbeitete und genehmigte Fassung der Abhandlung ist unter dem Titel *smart und kinetisch!* erhältlich (Kurzfassung).

Die hier vorliegende, von der Prüfungskommission nicht genehmigte Fassung (Langfassung) der Dissertation enthält neben dem vorgenannten zusätzlichen Kap. sämtliche Langtexte zu den durchgeführten Untersuchungen sowie weiteres, ergänzendes Material (s. Anhang, Kap. *D*). Einige Textstellen in der genehmigten Fassung nehmen Bezug auf diese Langfassung.

Beide Fassungen (Kurzfassung und Langfassung) sind zunächst in Deutsch erhältlich.

Bad Neuenahr-Ahrweiler, im April/Juni 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/Short abstract	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/Part I – theoretical part	
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	Kenngrößen	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 (<u>Versuchs- und Testreihe 01</u>)	159
2.3.2.1.1.1	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung, des Quell- und Schrumpfverhaltens und des Quell- und Schrumpfvormögens von Quellbändern vom Typ <i>Hydrotite, Contaseal, Duxpa-Dichtband, Aquaprene, Supercast, Aquaquell</i> (<u>Versuchs- und Testreihe 01 – Versuche und Tests 01 bis 09</u> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zugversuche und Tests)	159
2.3.2.1.1.2	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihe 01</u>)	180
2.3.2.2	Vorauswahl der Quellband-Typen	184
2.3.3	Hydroaktive polymere Antriebsstränge	185
2.3.3.1	Arbeits-Prinzipien und Antriebsstrang-Typen	185
2.3.3.2	Möglichkeiten der Anordnung und Kombination mit passiven Komponenten	187
2.3.3.3	Besondere Strang-Geometrien	188
2.3.3.4	Vorauswahl der Antriebsstrang-Typen	189
2.3.3.5	Antriebsstränge Typ I, Typ II (Prototypen) und innere Kraftabgriffsbereiche	190
2.3.3.5.1	Entwicklungen und deren Realisierung	190
2.3.3.5.1.1	Antriebsstränge Typ I (Prototypen) und innere Kraftabgriffsbereiche	190
2.3.3.5.1.2	Antriebsstränge Typ II (Prototypen)	193
2.3.3.5.2	Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 02 und 03</u>)	197
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> (<u>Versuchs- und Testreihe 02 – Versuche und Tests 01 bis 09</u> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zug-, Zugfederversuche und Tests)	197
2.3.3.5.2.2	Untersuchungen zur Feststellung der Eignung und der Funktionen von Antriebsstrang Typ II: <i>Supercast</i> (<u>Versuchs- und Testreihe 03 – Versuche und Tests 01 und 02</u> : Quell-, Schrumpf-, Zugfederversuche und Tests)	214

2.3.3.5.2.3	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 02 und 03</u>)	218
2.3.4	Lineare Antriebssysteme auf Basis von hydroaktiven polymeren Quellbändern (hydroaktiven Polymer-Aktoren)	221
2.3.4.1	Aktor I (Versuchsträger I/Demonstrator I)	221
2.3.4.1.1	Entwicklungen und deren Realisierung	222
2.3.4.1.1.1	Aktiver (aktivierbarer) Antrieb/Arbeitszylinder	223
2.3.4.1.1.2	Passive Zug-Einheit	224
2.3.4.1.1.3	Wassertank	225
2.3.4.1.1.4	Gewichtsaufnahme-Plattform	225
2.3.4.1.1.5	Mögliche Bauformen von Aktor I und anderen hydroaktiven Polymer-Aktoren	225
2.3.4.1.2	Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihe 04</u>)	226
2.3.4.1.2.1	Untersuchungen zur Feststellung der Funktionen und des Arbeitsvermögens von Aktor I: <i>Hydrotite</i> – Antriebsstrang Typ I (<u>Versuchs- und Testreihe 04 – Versuche und Tests 01 und 02</u> : Quell-, Schrumpf-, Ballastierungsversuche und Tests)	226
2.3.4.1.2.2	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihe 04</u>)	233
2.3.4.1.3	Möglichkeiten der Optimierung von Aktor I	234
2.3.4.2	Aktor II (primärer Aktor, Versuchsträger II/Demonstrator II)	236
2.3.4.2.1	Entwicklungen und deren Realisierung	236
2.3.4.2.1.1	Aktive (aktivierbare) Antriebs-Einheit	243
2.3.4.2.1.2	Arbeitszylinder/Wassertank	247
2.3.4.2.1.3	Passive Zug-Einheit	253
2.3.4.2.2	Untersuchungen	254
2.3.4.2.3	Möglichkeiten der Optimierung von Aktor II	254
2.3.4.3	Versuchsstand I/Aktor III (Versuchsträger III/Demonstrator III)	255
2.3.4.3.1	Entwicklungen und deren Realisierung	255
2.3.4.3.1.1	Rahmen	259
2.3.4.3.1.2	Aktive (aktivierbare) Antriebe/aktive (aktivierbare) Antriebs-Einheit	259
2.3.4.3.1.3	Arbeitszylinder/Wassertanks	260
2.3.4.3.1.4	Passive Zug-Einheiten	262
2.3.4.3.1.5	Leitungssystem	264
2.3.4.3.1.6	Möglichkeiten der Anwendung als Aktor III	265
2.3.4.3.2	Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 05 und 06</u>)	266
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</i> (<u>Versuchs- und Testreihe 05 – Versuche und Tests 01 bis 04</u> : Quell-, Schrumpf-, Ballastierungsversuche und Tests)	266
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</i> (<u>Versuchs- und Testreihe 06 – Versuche und Tests 01 bis 07</u> : Quell-, Schrumpf-, manuelle Zug-, Druckversuche, Versuche und Tests mit hydraulischen Systemen)	286
2.3.4.3.2.3	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 05 und 06</u>)	308

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	314
2.4.1	Theoretische und praktische Vorarbeiten	314
2.4.2	Kinetische Konstruktion I (Entwurf)	330
2.4.2.1	Entwicklungen	331
2.4.2.1.1	Zentrale Stand-, Trag- und Anschluss-Konstruktion	343
2.4.2.1.2	Scheren-Konstruktionen (Scherenpaar-Batterien)	345
2.4.2.1.3	Gewichtsaufnahme-Plattform, Treppe und Regenwasser-Sammler	348
2.4.2.1.4	Raumbildende Hüll-Konstruktionen	351
2.4.2.1.5	Antriebs- und Steuerungselemente/-Einheiten (primäre, sekundäre und tertiäre Aktoren)	353
2.4.2.1.6	Erweiterte primäre und sekundäre Energie- und Materiellstellung	364
2.4.3	Kinetische Konstruktion II (Versuchsstand II/Demonstrator IV)	364
2.4.3.1	Entwicklungen und deren Realisierung	364
2.4.3.1.1	Zentrale Stand-, Trag- und Anschluss-Konstruktion	365
2.4.3.1.2	Scheren-Konstruktionen (Scherenpaar-Batterien)	366
2.4.3.2	Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 07 bis 09</u>)	369
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)	370
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)	402
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)	428
2.4.3.2.4	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungen (<u>Versuchs- und Testreihen 07 bis 09</u>)	450
2.4.3.3	Möglichkeiten der Optimierung der Kinetischen Konstruktion II	464
2.5	Zusammenfassung (Teil II – praktischer Teil)	466
3	Zusammenfassung und Ausblick	467
3.1	Zusammenfassung	467
3.2	Ausblick	469

	Anhang	474
A	Kernproblematik, Frage- und Aufgabenstellungen	474
B	Übersichten, technische Daten und Besonderheiten zu energie- und materieautark(en) (betreibbaren) passiven und aktiven (aktivierbaren) Antrieben (Aktoren)	476
C	Berechnungen (<u>Berechnungen 01 bis 06</u>)	480
C.1	Berechnungen zum Design von Thermobimetall-Stellelementen und Möglichkeiten ihrer Verstärkung (<u>Berechnungen 01</u>)	480
C.2	Berechnungen zum Design eines personengewichtsgesteuerten, hydraulischen Stellelements/Stellkraftvergrößerers (hydraulische Pumpe) (<u>Berechnungen 02</u>)	481
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)	483
D	Textergänzungen	505
D.1	Textergänzungen 06/2014	505
D.1.1	Möglichkeiten der Kombination von mehreren Kinetischen Konstruktionen vom Typ I/II	505
D.1.2	Auszüge aus der Patentschrift <i>Verfahren zur Herstellung von deformierbaren/deformierenden Scherenkonstruktionen</i>	506
	Quellenverzeichnis	512
	Sachregister	523
	Lebenslauf	537

Abkürzungs- und Zeichenverzeichnis

verwendete, nicht allgemein bekannte Abkürzungen (Einleitung, Teil I, Teil II)

A.	Architektur
EE	Eigenentwicklung/-entwicklungen
FE	Fremdentwicklung/-entwicklungen
N.	Nahrungsmittel
var.	variable/variiierende
Veg.	Vegetation

verwendete physikalische und chemische Zeichen (Einleitung, Teil I, Teil II)

d [mm]	Drahtdurchmesser
D_e [mm]	äußerer Windungsdurchmesser
E [N/m ²]	Elastizitätsmodul
F [N]	Kraft
F_n [N]	Höchstkraft bei statischer Belastung
G [N]	Gravitationskraft (Schwerkraft)
L_0 [mm]	Länge der unbelasteten Feder
m [kg]	Masse
P [W]	Leistung
s_K [mm]	Knicklänge/Federweg bis zum Ausknicken
U [mV]	Spannung
W [Nm]	Arbeit
λ_K [-] Lambda	Knickschlankheit
ρ [kg/m ³] Rho	Dichte
CR	Chloropren
PUR	Polyurethan

verwendete physikalische Zeichen und nicht allgemein bekannte Abkürzungen (Anhang)

(Berechnungen 01)

A [mm]	Ausbiegung
a [K ⁻¹]	spezifische thermische Ausbiegung
b [mm]	Breite
l [mm]	freie Länge
P [N]	Kraft
P_u [N]	Kraft bei völlig unterdrückter Ausbiegung
P_{zul} [N]	zulässige Kraft
s [mm]	Dicke
V [mm ³]	Volumen
w [N/mm ² K ²]	spezifisches Arbeitsvermögen
W_{max} [Nmm]	maximales Arbeitsvermögen

(Berechnungen 02)

a_l [-]	Anzahl erforderlicher Lastwechsel
A_1 [cm]	Kolbenfläche 1
A_2 [cm]	Kolbenfläche 2
D_1 [cm]	Kolbendurchmesser 1
D_2 [cm]	Kolbendurchmesser 2
F_1 [N]	Kraft aus Personenlasten
F_2 [N]	anzuhebende Last
s_1 [cm]	Kolbenhubweg
s_2 [cm]	Kolbengesamt-Hubweg

V_{\min} [cm ³]	von Pumpe insgesamt mindestens zu beförderndes Öl-Volumen
V_1 [cm ³]	von Pumpe je Betätigung befördertes Öl-Volumen
<i>(Berechnungen 03, einschließlich einleitender Abschnitt (Berechnungen 03 bis 04) (Auszug an verwendeten Zeichen und nicht allgemein bekannten Abkürzungen))</i>	
E_{pot} [Nm]	potenzielle Energie/Energien
$E_{\text{pot ST}}$ [Nm]	potenzielle Energie/Energien während dem Start/am Anfang einer Verlagerung/von Verlagerungen – hier ist nur die ständige Last, die durch das Eigengewicht der Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf)) gebildet wird, wirksam
$E_{\text{pot ST p1}}$ [Nm]	potenzielle Energie/Energien während dem Start/am Anfang einer Verlagerung/von Verlagerungen – hier sind die ständige Last, die durch das Eigengewicht der Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf)) gebildet wird, plus die nichtständige Last 1 (Verkehrslast 1), die durch das Gewicht eines Singles gebildet wird, wirksam
$E_{\text{pot ZW p1g4/2}}$ [Nm]	potenzielle Energie/Energien zwischen dem Start/Anfang und dem Ende einer Verlagerung/von Verlagerungen – hier sind die ständige Last, die durch das Eigengewicht der Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf)) gebildet wird, plus die nichtständige Last 1 (Verkehrslast 1), die durch das Gewicht eines Singles gebildet wird, plus die ständige Last, die durch das halbe Gewicht an später insgesamt eingelagerten Gütern gebildet wird, wirksam
$F_{\text{Br max}}$ [N]	maximal erforderliche Bremskraft/-kräfte, z. B. von Bremsselementen – hier die von hydraulischen Zylindern
$F_{\text{Br max ein}}$ [N]	maximal erforderliche Bremskraft/-kräfte, z. B. von einzelnen Bremsselementen – hier die von einzelnen hydraulischen Zylindern
$F_{\text{Br max ges}}$ [N]	maximal erforderliche Gesamtbremskraft/-kräfte, z. B. von Bremsselementen – hier die von hydraulischen Zylindern
$F_{\text{Br pa}}$ [N]	vorhandene/maximal erforderliche passive Bremskräfte, z. B. von Bremsselementen – hier die von hydraulischen Zylindern
$F_{\text{G ges EN}}$ [N]	Gesamtgewichtskraft am Ende einer Verlagerung/von Verlagerungen
$F_{\text{G ges EN p1}}$ [N]	Gesamtgewichtskraft am Ende einer Verlagerung/von Verlagerungen und dem Einfluss einer nichtständigen Last 1(Verkehrslast 1)
$F_{\text{G ges ST}}$ [N]	Gesamtgewichtskraft während dem Start/am Anfang einer Verlagerung/von Verlagerungen
$F_{\text{G1 g1}}$ [N]	Gewichtskraft 1, die durch eine ständige Last 1 gebildet wird – hier durch die der höhenvariablen Trag-Konstruktion 1 (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{\text{G2 g2}}$ [N]	Gewichtskraft 2, die durch eine ständige Last 2 gebildet wird – hier durch die der höhen- und breitenvariablen Trag-Konstruktion 2 (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{\text{G3 g3}}$ [N]	Gewichtskraft 3, die durch eine ständige Last 3 gebildet wird – hier durch die der geometrievervariablen Hüll-Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{\text{G4 p1}}$ [N]	Gewichtskraft 4, die durch eine nichtständige Last 1 (Verkehrslast 1) gebildet wird – hier durch die eines Singles
$F_{\text{G5 g4}}$ [N]	Gewichtskraft 5, die durch eine ständige Last 4 gebildet wird – hier durch in die Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf)) eingelagerte Güter, etwa Möbel
h. Zyl.	hydraulischer/hydraulische Zylinder

$s_{PI \max}$ [m]	maximale mögliche Verlagerung einer Plattform-Konstruktion – hier vertikal nach unten
v_K	verlagerbarer Konstruktionsanteil/verlagerbare Konstruktion/Konstruktionen
η_{Mech} [%] Eta	Wirkungsgrad eines Mechanismus' – hier bestehend aus der Trag-Konstruktion 1 und der Trag-Konstruktion 2
<i>(Berechnungen 04 (Auszug an verwendeten Zeichen und nicht allgemein bekannten Abkürzungen – weitere Zeichen und Erläuterungen dazu s. Berechnungen 03 bis 04, S. 483 ff.))</i>	
$A_{hPB \text{ eff ST}}$ [cm ²]	effektive Querschnitts-Fläche eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands zu Beginn einer Schrumpfung – hier vom Typ <i>Hydrotite 3,5/5 x 20 / Rechteckhöckerprofil</i>
$A_{hPB \text{ ges erf ST}}$ [cm ²]	erforderlicher Gesamtbandquerschnitt zu Beginn des Starts eines Aktors – hier von Aktor II
$A_{hPB \text{ max ST}}$ [cm ²]	maximale Querschnitts-Fläche eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands zu Beginn einer Schrumpfung – hier vom Typ <i>Hydrotite 3,5/5 x 20 / Rechteckhöckerprofil</i>
E_{pot} [Nm]	potenzielle Energie/Energien
$F_{A \text{ erf}}$ [N]	erforderliche Kraft, die ein Aktor leisten muss – hier die Aktor II leisten muss, um eine Plattform nach einer vollständigen Absenkung wieder auf das Ausgangsniveau anzuheben
$F_{F \text{ pa}}$ [N]	passive Federkraft/-kräfte – hier von Gummi-Seilen und/oder Zugfedern
$F_{G1 \text{ g1}}$ [N]	Gewichtskraft 1, die durch eine ständige Last 1 gebildet wird – hier durch die der höhenvariablen Trag-Konstruktion 1 (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{G2 \text{ g2}}$ [N]	Gewichtskraft 2, die durch eine ständige Last 2 gebildet wird – hier durch die der höhen- und breitenvariablen Trag-Konstruktion 2 (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{G3 \text{ g3}}$ [N]	Gewichtskraft 3, die durch eine ständige Last 3 gebildet wird – hier durch die der geometrievervariablen Hüll-Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf))
$F_{G4 \text{ g4}}$ [N]	Gewichtskraft 4, die durch eine ständige Last 4 gebildet wird – hier durch in die Konstruktion (Variante 1 der Kinetischen Konstruktion I (Entwurf)) integrierte Möbel
$F_{G5 \text{ p1}}$ [N]	Gewichtskraft 4, die durch eine nichtständige Last 1 (Verkehrslast 1) gebildet wird – hier durch die eines Singles
$F_{hPB \text{ ist}}$ [N]	vorhandene Kraft eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands – hier vorhandene Zugkraft eines schrumpfenden hydroaktiven Polymer-Bands
F_{mechA} [N]	Kraft eines mechanischen Aktors/von mechanischen Aktoren
i_{Mech} [-]	Übersetzungsverhältnis der eingesetzten/wirkenden Getriebe
$n_{hPB \text{ erf}}$ [St]	Anzahl der erforderlichen hydroaktiven Polymer-Bänder (Antriebsstränge)
$s_A \text{ erf}$ [m]	Aktorweg erforderlich – hier der von Aktor II
$s_{PI \max}$ [m]	maximale mögliche Verlagerung einer Plattform-Konstruktion – hier vertikal nach unten
$V_{hPB \text{ ein erf ST}}$ [cm ³]	erforderliches Bandvolumen (einzeln) zu Beginn des Starts eines Aktors – hier von Aktor II
$V_{hPB \text{ ges erf ST}}$ [cm ³]	erforderliches Gesamtbandvolumen zu Beginn des Starts eines Aktors – hier von Aktor II

$\epsilon_{\text{hPB ak}}$ [%] Epsilon	aktive Dehnung eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands – hier die eines schrumpfenden hydroaktiven Polymer-Bands vom Typ <i>Hydrotite 3,5/5 x 20 / Rechteckhöckerprofil</i>
$\epsilon_{\text{hPB ges}}$ [%] Epsilon	Gesamtdehnung eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands – hier die eines schrumpfenden hydroaktiven Polymer-Bands vom Typ <i>Hydrotite 3,5/5 x 20 / Rechteckhöckerprofil</i>
$\epsilon_{\text{hPB pa}}$ [%] Epsilon	passive Dehnung eines aktivierten hydroaktiven Polymer-Bands – hier die eines schrumpfenden hydroaktiven Polymer-Bands vom Typ <i>Hydrotite 3,5/5 x 20 / Rechteckhöckerprofil</i>
η_{Mech} [%] Eta	Wirkungsgrad eines Mechanismus' – hier bestehend aus der Trag-Konstruktion 1 und der Trag-Konstruktion 2
$\omega_{\text{A ist}}$ [J/cm ³] Omega	vorhandene Energiedichte eines Aktors – hier die von Aktor II (<u>Berechnungen 05 bis 06</u> (s. Erläuterungen im Text der <u>Berechnungen 05 bis 06</u> , S. 491 ff.))