

Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 101

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem

von

Martina Schnellenbach-Held
Abdalla Fakhouri
Daniel Steiner
Oliver Kühn

Universität Duisburg-Essen,
Institut für Massivbau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 101

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv [ELBA](http://elba.bast.opus.hbz-nrw.de) zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 88.0107/2010:
Entwicklung einer adaptiven Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem

Fachbetreuung:
Heinz Friedrich

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-084-7

Bergisch Gladbach, Mai 2014

Kurzfassung – Abstract

Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovationsprogramm Straße“ wurden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die folgenden drei Projekte zum Thema „Adaptive und intelligente Brücken der Zukunft“ gefördert:

- „Adaptive Tube-in-Tube Brücken“,
- „Roadtraffic Management System“,
- „Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem“.

Im Rahmen des Projektes „Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem“ wurde ein adaptiv vorgespanntes System zur Erzielung eines sich an Beanspruchungsänderungen selbstanpassenden Betontragwerks entwickelt. Durch die Adaptivität werden kritische Beanspruchungszustände vermieden und Verformungen reduziert. Bei der entwickelten adaptiven Spannbetonstruktur werden relevante Tragwerksreaktionen mit einem Sensorsystem erfasst und als Eingangsgrößen an ein lernfähiges Regelungssystem übergeben. Das Regelungssystem ermittelt Stellsignale entsprechend der je nach Beanspruchungszustand erforderlichen Vorspannkraft. Die erforderliche Änderung der Vorspannkraft wird von einem Stelltrieb vorgenommen. Die Funktionsfähigkeit der adaptiven Spannbetonstruktur wurde anhand von Versuchen an zwei Prototypen – einer Aluminiumtraverse und einem Spannbetonbalken – unter Beweis gestellt. Die Verformungsminimierung bzw. Spannungshomogenisierung als Zielsetzung der Regelung wurde dabei effektiv erreicht. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen das Potenzial der adaptiven Vorspannung für die Anwendung im Brückenbau.

Adaptive pre-stressed concrete structure with trainable fuzzy control system

Within the research program „innovation program roads“ the federal ministry of transport, building and urban development has financed the following three projects on the topic of „Adaptive and intelligent bridges for the future“:

- „Adaptive Tube-in-Tube Bridges“,
- „Roadtraffic Management System“,
- „Adaptive Fuzzy Controlled Prestressed Concrete Structure“.

In the project „Adaptive Fuzzy Controlled Prestressed Concrete Structure“, an adaptive pre-stressed system that enables concrete bridges to adapt to short- as well as long-term increases of loads was developed. Through adaptability critical stresses can be avoided and deformations reduced. In the developed adaptive concrete structure the reactions are measured by means of sensors and sent as inputs to an adaptive control system. The control system calculates the necessary change in the prestressing force according to the stress condition. The required change of the prestressing force in the tendons is carried out by a hydraulic actuation system. The functionality of the developed adaptive control system is demonstrated by means of two prototypes, a pre-stressed aluminum truss and an externally pre-stressed concrete T-beam. Due to the adaptability of the prestressing force, deformations could be effectively decreased and tensile stresses were reduced to a minimum. The obtained results confirm the potential of the use of adaptive prestressing in concrete bridges.

Inhalt

1	Einleitung	7	3.2.1	Hydraulische Stellglieder	21
1.1	Forschungsanlass	7	3.2.2	Hydraulische Aktuatoren	23
1.2	Beispiele bereits realisierter adaptiver Tragwerke	8	3.2.3	Evaluierung und Auswahl des Stellgliedsystems	24
1.2.1	Berliner Brücke in Duisburg-Meiderich (1970er Jahre)	8	4	Entwicklung einer adaptiven Regelung	25
1.2.2	Aktive Verformungskontrolle (1980-1990er Jahre)	8	4.1	Einführung in die Fuzzy-Logic	26
1.2.3	Fußgängerbrücke am Duisburger Innenhafen (1999)	8	4.1.1	Fuzzy-Set-Theorie (Fuzzy-Mengen)	26
1.2.4	Stuttgarter Träger (2002)	8	4.1.2	Fuzzy-Variablen	27
1.2.5	Organic Prestressing (2002-2008)	8	4.1.3	Wissensbasis	27
1.2.6	Konzept zur Entwicklung adaptiv geregelter Spannbetontragwerke mit externer Vorspannung (2006)	10	4.1.4	Das MA-Modell	27
1.2.7	Adaptive Prestressing of Concrete Beams (2010)	11	4.1.5	Das TSK-Modell	28
1.2.8	„Stuttgart SmartShell“ (2012)	11	4.2	Adaptive Fuzzy-Regelungssysteme	29
1.3	Ziel des Projektes	11	4.3	Zur Regelung von Systemen mit adaptiver Vorspannung	29
1.4	Gliederung des Berichts	11	5	Experimentelle Untersuchungen	32
2	Entwicklung eines Sensorsystems	12	5.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	33
2.1	Einleitung	12	5.1.1	Regelungsaufbau (Kaskadenregelung)	33
2.2	Übersicht über faseroptische Sensoren und Stand der Technik	13	5.1.2	Anbindung der Regelung	33
2.2.1	Prinzip und Vorteile faseroptischer Messung	13	5.1.3	Analoger PID-Regler	34
2.2.2	Sensoren des Microbend-Prinzips	13	5.1.4	Servogeregelte Hydraulikanlage	34
2.2.3	Interferometrische faseroptische Sensoren	14	5.1.5	Aktuatoren	36
2.2.4	Evaluierung und Auswahl	17	5.1.6	Prüfstand	37
2.2.5	Komponenten und Funktionsweise des Sensorsystems	17	5.2	Versuchsträger 1: Aluminium-Traversal	38
3	Entwicklung eines Stellglied-systems	19	5.2.1	Vorteile der Traverse als Versuchsträger mit adaptiver Vorspannung	38
3.1	Elektromechanische Stalleinrichtungen	20	5.2.2	Systemdaten	38
3.2	Hydraulische Stalleinrichtungen	21	5.2.3	Spannlitzen	40
			5.2.4	Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannlitzen	40
			5.2.5	Messstellen und Sensoren	42
			5.2.6	Zielsetzung der Regelung	42

5.2.7	Aufbau des Fuzzy-Reglers	43	7	Vorschlag zur Umsetzung bei einer Bestandsbrücke	96
5.2.8	Simulationen in Matlab®	47	7.1	Vorgehen bei einer Beispielbrücke . . .	96
5.2.9	Versuchsdurchführung	47	7.2	Bestandteile des adaptiven Vorspannsystems	98
5.2.10	Ergebnisse	49	7.2.1	Spannglieder	98
5.2.11	Zwischenbilanz	58	7.2.2	Nachträglich angebrachte Umlenk- und Verankerungskonstruktionen	98
5.3	Versuchsträger 2: Spannbetonplattenbalken	59	7.2.3	Sensorsystem und Messtechnik	99
5.3.1	Systemdaten	61	7.2.4	Hydraulisches Aktuatorensystem	100
5.3.2	Spannlitzen	62	7.2.5	Hardware und Software	100
5.3.3	Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannlitzen	63	8	Zusammenfassung und Ausblick	101
5.3.4	Messstellen und Sensoren	65	Literatur	102	
5.3.5	Zielsetzung der Regelung	66	Internet-Quellen	104	
5.3.6	Aufbau des Fuzzy-Reglers	68			
5.3.7	Versuchsdurchführung	74			
5.3.8	Ergebnisse der Versuche am Plattenbalken im ungerissenen Zustand	76			
5.3.9	Ergebnisse der Versuche am vorgeschädigten Plattenbalken	85			
5.3.10	Zwischenbilanz	87			
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	90			
6	Auslegung und Anwendungsgebiete	90			
6.1	Fail-Safe-Konzepte	90			
6.1.1	Sensorsystem	90			
6.1.2	Stellgliedsystem und Spanngliedausfälle	90			
6.1.3	Stromausfälle	91			
6.2	Anwendungsbeispiele	91			
6.2.1	Neubau	92			
6.2.2	Verstärkung	95			

1 Einleitung

1.1 Forschungsanlass

Die Leistungsfähigkeit des Straßennetzes wird durch die Sicherheit und Dauerhaftigkeit der erhaltenen Brückenbauwerke wesentlich beeinflusst. Diese stehen somit in direktem Zusammenhang zur Gewährleistung der Mobilität für Wirtschaft und Gesellschaft [Nau02]. Als hoch beanspruchte Bauwerke im Freien sind Straßenbrücken ständig wechselnden Umweltbedingungen ausgesetzt [SaB05]. Den größten Anteil an den insgesamt ca. 37.000 Brückenbauwerken des Bundesfernstraßennetzes stellen Betonbrücken (ca. 18 % aus Stahlbeton und ca. 70 % in Spannbetonbauweise) dar [Met04].

Das Problem des zunehmenden Schwerlastverkehrs gewinnt speziell bei Brücken zunehmend an Bedeutung. Im aktuellen Masterplan „Güterverkehr und Logistik“ des Bundesministeriums für Verkehr wird bis zum Jahr 2025 ein Zuwachs der Güterverkehrsleistung im Straßengüterfernverkehr von 84 % prognostiziert [BSVI08]. Derzeit wird seitens der Industrie und des Transportgewerbes dafür plädiert, modulare Fahrzeuge (Giga-Liner) mit einem Gesamtgewicht bis zu 60 t einzusetzen [BSVI08]. Zudem ist eine Erhöhung des aktuell erlaubten Gesamtgewichtes für Kompaktfahrzeuge (40/44 t) auf 50 t in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) bereits geplant [MBV06, TÜV06]. Diese Szenarien werden in Zukunft gravierende Einflüsse auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bestehender sowie nach neuesten technischen Vorschriften zu errichtender Brückenbauwerke zur Folge haben. Mit den üblichen „passiven“ Entwurfs- und Verstärkungsmaßnahmen können diese Anforderungen nur schwer oder mit unverhältnismäßig großem Aufwand erfüllt werden.

Der Entwurf „passiver“ Spannbetonbrücken ist geprägt von Kompromisslösungen bezüglich der Erfüllung zahlreicher Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit einerseits sowie der Beachtung gestalterischer und wirtschaftlicher Aspekte andererseits. Dabei können insbesondere Lasterhöhungen, unplanmäßige Beanspruchungszustände, außergewöhnliche Einwirkungen oder besondere Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit zu einem Konflikt zwischen Wirtschaftlichkeit und gestalterischen Ansprüchen führen.

Adaptive Tragwerke nutzen geeignete Regelungsvorgänge, um sich auf Einwirkungen einzustellen

und somit kritische Zustände zu reduzieren oder zu vermeiden. Adaptivität ist die Fähigkeit eines Systems, sich anzupassen. Die Übertragung dieses natürlichen Prinzips biologischer Strukturen auf Bauwerke führt zu einer Anpassungsfähigkeit des Tragwerkes an darauf wirkende Einflüsse, indem die Tragwerksantwort reaktiv gesteuert oder geregelt wird. Nach [D60050] werden Steuerung (open-loop control) und Regelung (closed-loop control) wie folgt definiert:

- Das Steuern, die Steuerung: „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Anmerkung: Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen aus sich selbst wirken.“
- Das Regeln, die Regelung: „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Anmerkung: Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungslauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

Bei der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten adaptiven Spannbetonstruktur werden ausgewählte Tragwerksreaktionen von einem Sensorsystem erfasst und als Eingangsgrößen an ein lernfähiges Regelungssystem übergeben. Das Regelungssystem ermittelt Stellsignale entsprechend der je nach Beanspruchungszustand erforderlichen Vorspannkraft. Die erforderliche Änderung der Vorspannkraft in den Spanngliedern wird von einem Stellantrieb – einer Kombination aus Stellgliedern und Aktuatoren – vorgenommen.

Die Anpassungsfähigkeit eines Tragwerkes an sich ändernde und auch unvorhergesehene Beanspruchungen stellt ein großes Potenzial im Brückenbau – sowohl beim Neubau als auch bei der Verstärkung bestehender Brückenbauwerke – dar. Zeit- und belastungsabhängige Spannkraftverluste werden durch die Anpassungen der Vorspannkraft kompensiert. Mittels der Adaptivität können Span-

nungsmaxima vermieden, Verformungen minimiert, die Querschnittsausnutzung homogenisiert und schließlich die Nutzungs- sowie Lebensdauer deutlich verlängert werden [Bar06, Beh95].

1.2 Beispiele bereits realisierter adaptiver Tragwerke

1.2.1 Berliner Brücke in Duisburg-Meiderich (1970er Jahre)

Ein frühes Beispiel eines adaptiven Bauwerks ist die Berliner Brücke der A 59 in Duisburg Meiderich, bei der an den einzelnen Stützen hydraulische Pressen zur Kompensation ungleicher Stützensenkungen angeordnet wurden (s. Bild 1). Durch die manuelle Nachjustierung des Pressenhubes konnten somit Stützensenkungen von bis zu einem Meter ausgeglichen werden. Durch diese Vorgehensweise wurde das Bauwerk im Gegensatz zu herkömmlichen Bauweisen wesentlich setzungsunempfindlicher und günstiger ausgeführt [Dom81, Küh11].



Bild 1: Berliner Brücke [Küh11]

1.2.2 Aktive Verformungskontrolle (1980-1990er Jahre)

In den 1980er Jahren untersuchten DOMKE et al. [Dom84] den Einsatz der aktiven Verformungskontrolle (AVK) zur Steigerung der Biegetragfähigkeit eines Versuchsträgers (s. Bild 2). Die Adaption erfolgte durch die Änderung des Luftdruckes pneumatischer Druckkissen, die zwischen dem Träger und den Spannritzen angeordnet waren. Das Ziel war eine Verformungsoptimierung auf Basis der gemessenen Durchbiegungen (in Bild 2 links ohne Adaption, rechts mit Adaption). Durch die Anpassung der Luftdrücke und somit der Stichhöhen werden an die Belastung abgestimmte Umlenkkräfte erzeugt und somit die Durchbiegungen wesentlich verringert [Dom84].

1.2.3 Fußgängerbrücke am Duisburger Innenhafen (1999)

Eine mit adaptiven Eigenschaften hinsichtlich ihrer Funktionalität ausgestattete Fußgängerbrücke wurde Ende der 1990er Jahre von SCHLAICH, BERGERMANN und Partner entwickelt, geplant und errichtet (s. Bild 3). Die Anpassung der Bauwerkskrümmung (links Normalzustand) ermöglicht bei Bedarf eine für Schiffe notwendige Durchfahrts Höhe von ca. 10 m (rechts mit maximaler Durchfahrts Höhe). Hierzu werden die Pylonenpaare der 70 m langen Hängebrücke mittels Hydraulikzylindern landwärts gekippt, wodurch der Durchhang der Tragseile verringert und somit die Durchfahrts Höhe um bis zu acht Meter erhöht wird [sbp11].

1.2.4 Stuttgarter Träger (2002)

TEUFFEL und SOBEK stellten auf der „swissbau 2002“ den Stuttgarter Träger vor (s. Bild 4). Das System wurde als Einfeldträger mit einem drei Millimeter starken Aluminiumblech und V-förmigen Stützen ausgeführt, wobei als regelbarer Parameter die Lage des verschieblichen Auflagers vorgesehen ist. Die auf Basis des Lastpfadmanagements erstellte Regelung nutzt dabei die gemessenen Auflagerreaktionen als Eingangswerte. Ziel der Adaptivität dieses Tragwerkes ist die weitestgehende Minimierung der Durchbiegung an der Einleitungsstelle einer Wanderlast [Sob02].

1.2.5 Organic Prestressing (2002-2008)

PACHECO et al. entwickelten eine mit so genannter „organischer Vorspannung“ (OPS) ausgestat-

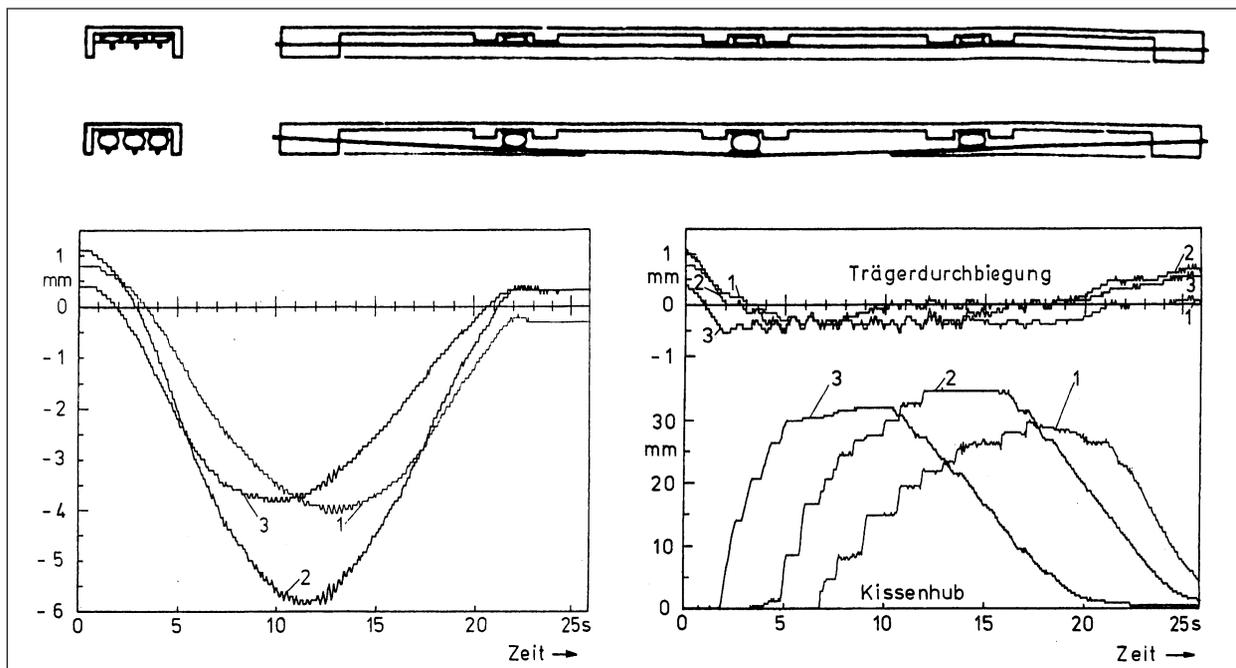


Bild 2: Prinzip der aktiven Verformungskontrolle [Dom84]

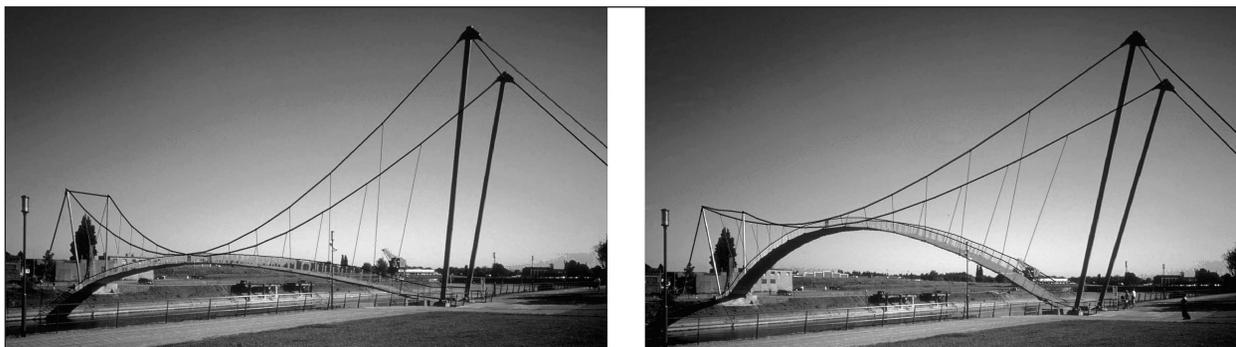


Bild 3: Fußgängerbrücke Duisburg, Innenhafen [sbp11]

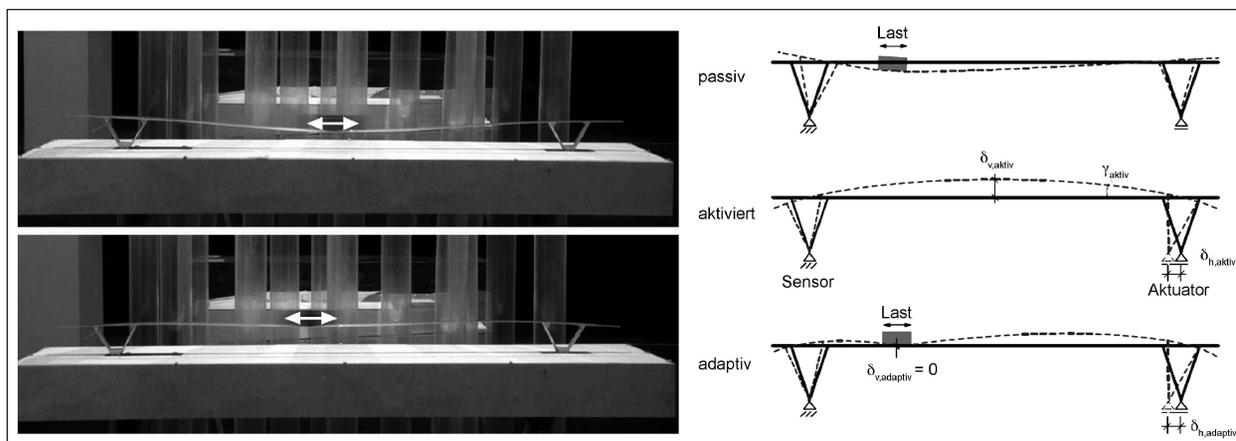


Bild 4: Modell und Prinzip des Stuttgarter Trägers [Teuf04, Wei08]

tete Vorschubrüstung für die Anwendung im Brückenbau (s. Bild 5). Basierend auf der Funktionsweise eines Muskels sollen durch Adaptionen sowohl Verformungen als auch Zugspannungen

minimiert werden (s. Bild 6). Hierzu wird die aufgebraachte Vorspannkraft angepasst, sobald die gemessenen Durchbiegungen einen Schwellenwert überschreiten. Die Anpassung erfolgt so lange,

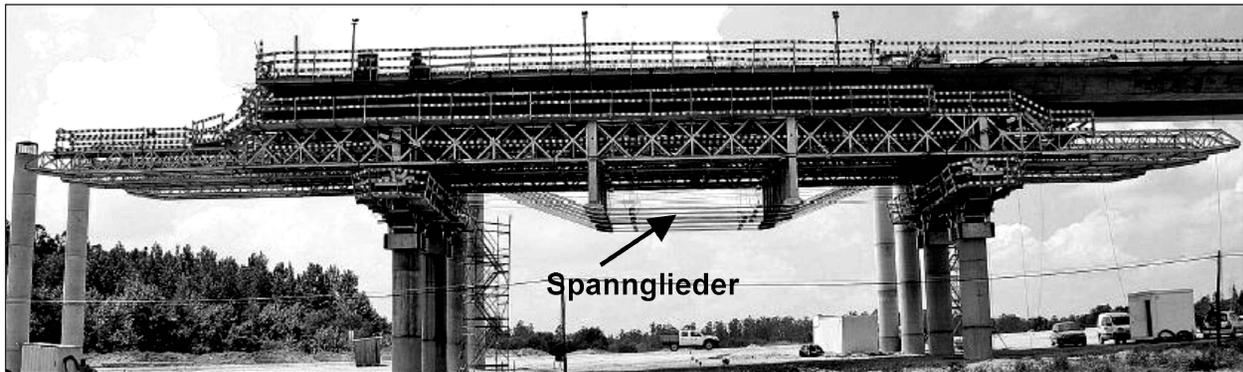


Bild 5: Vorschubrüstung mit organischer Vorspannung [PCG06]

	Simplified Structural Schemes	Bending moments	Shear force
Dead load (G)			
Live load (Q)			
Prestressing (P)			
Load combination (G+Q+P)			

Bild 6: Optimierung der Schnittgrößenverläufe mittels organischer Vorspannung [PCG06]

bis ein vorgegebener Grenzwert als Ziel erreicht wird [PCG06].

1.2.6 Konzept zur Entwicklung adaptiv geregelter Spannbetontragwerke mit externer Vorspannung (2006)

Ein auf Brückenbauten spezialisiertes Konzept zur adaptiven lernfähigen Regelung der Vorspannkraft auf Basis der Fuzzy-Logic wurde 2006 von BARIN im Rahmen seiner Dissertation am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen entwickelt (s. Bild 7). Die Strategie sieht vor, kurzzeitige sowie langzeitige Einflüsse zu prognostizieren, eine automatisierte Anpassung der Vorspannkraft bei festgestelltem Bedarf durchzuführen, die Qualität der Anpassung zu überprüfen und bei unzureichender Regelungsqualität die Adaptioneigenschaften zu optimieren [Bar06, Stei11].

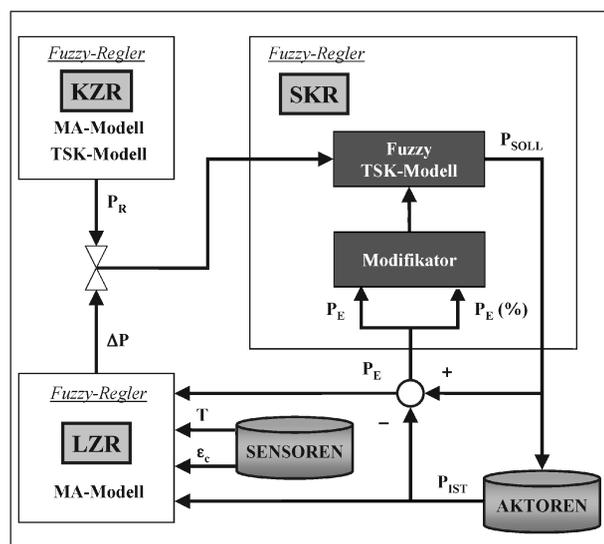


Bild 7: Schema des Fuzzy-basierten Regelungskonzeptes [Bar06]

1.2.7 Adaptive Prestressing of Concrete Beams (2010)

Das Konzept der adaptiven Vorspannung bei vorgespannten Betonbauteilen wurde von McNUTT [Mcn10] im Rahmen praktischer Versuche untersucht. Dabei wurde die Vorspannkraft der Versuchskörper manuell an die auf sie wirkenden Belastungen angepasst. Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass im Vergleich zu herkömmlichen unveränderlich vorgespannten Konstruktionen die Traglasten erhöht, Querschnitte reduziert und die Vorspannkraft verdreifacht werden konnte. Des Weiteren können typische Verluste der Vorspannkraft aufgrund der Spannbetonbauweise, insbesondere Kriechen, Schwinden und Relaxation, reduziert oder gar eliminiert werden [Mcn10].

1.2.8 „Stuttgart SmartShell“ (2012)

Das adaptive Schalentragwerk wurde am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) sowie am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit Bosch Rexroth entwickelt. Die filigrane 1,4 t schwere Holzschale weist eine Dicke von 4,0 cm auf und überspannt eine Fläche von ca. 100 m² (s. Bild 8). Das Tragwerk ist punktgelagert, wobei drei der vier Auflager durch Hydraulikzylinder gezielt bewegt werden können. Dadurch können aus Wind- oder Schneebelastungen auftretende Spannungszustände in der Schale optimiert werden. Die Tragwerksreaktionen werden mittels Dehnungsmessstreifen an mehreren Stellen innerhalb der Schale erfasst. Als Grundlage für das Regelungskonzept wurden Simulationsmodelle entwickelt, die eine Vorhersage des Verhaltens des Tragwerks ermöglichen [ilek12].



Bild 8: Stuttgart SmartShell [Bosch Rexroth]

1.3 Ziel des Projektes

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird ein System zur adaptiven Vorspannung ohne Verbund (Adaptive Prestressing System: APS) zur Erzielung eines sich an kurz- sowie langfristig eintretende Beanspruchungsänderungen selbstanpassenden Betonbauwerks entwickelt. Schwerpunkte des wissenschaftlichen Programms dieser grundsätzlichen Machbarkeitsstudie sind der Entwurf eines Systems zur adaptiven Regelung auf der Basis von Fuzzy-Logic. Diese gilt als gut adaptionsfähig bei zugleich hoher Stabilität und Zuverlässigkeit. Zusätzlich werden eine Evaluation und Auswahl geeigneter Sensoren sowie Stellglieder bzw. Aktuatoren und deren Anbindung an den Regelungsalgorithmus für die praktische Anwendung vorgenommen. Die Funktionsfähigkeit der adaptiven Spannbetonstruktur wird im Rahmen von Laborversuchen geprüft und evaluiert und somit die grundsätzliche Machbarkeit festgestellt. Eine darüber hinausführende Prüfung, etwa unter Einsatz moderner Technologien oder in maßstabgerechten Großversuchen, ist in Anbetracht der Gesamtdauer des Vorhabens nicht vorgesehen. Anhand theoretischer Analysen wird eine mögliche Auslegung einer adaptiven Vorspannung für den Neubau sowie für die globale Verstärkung eines Brückenüberbaus untersucht.

1.4 Gliederung des Berichts

Die Gliederung des Berichts orientiert sich an den nachfolgend aufgeführten Arbeitspaketen des Forschungsprojektes:

- Entwicklung eines Sensorsystems

Im Hinblick auf das Forschungsziel werden geeignete Sensortechnologien untersucht und evaluiert. Dabei werden der Stand der Technik, Vorteile und Besonderheiten der favorisierten Sensoren sowie ihre Anordnung innerhalb des Sensorsystems behandelt.

- Entwicklung eines Stellgliedersystems

Die Hauptkomponenten des Stellgliedersystems in einer adaptiven Struktur werden erläutert und geeignete Komponenten im Hinblick auf die Anwendung bei Spannbetonbrücken empfohlen.

- Entwicklung einer adaptiven Regelung

Der Aufbau der entwickelten Fuzzy-Regelung(en) wird präsentiert und die zu berücksichtigenden Einflüsse bei Spannbetonbrücken werden aufgezeigt.

- Experimentelle Untersuchungen

Die Funktionsfähigkeit von zwei Prototypen mit adaptiver externer Vorspannung wird unter Beweis gestellt.

- Auslegung und Anwendungsgebiete

Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden Fail-Safe-Konzepte sowie Sicherheitsmaßnahmen zur Sicherstellung einer langzeitigen Funktionsfähigkeit der adaptiven Struktur vorgeschlagen.

2 Entwicklung eines Sensorsystems

2.1 Einleitung

Das Sensorsystem dient dazu, die Tragwerksreaktionen zu erfassen und die Messdaten an das Regelungssystem zu übergeben. Die für eine Regelung einsetzbaren Messgrößen der adaptiven Vorspannung sind:

- Dehnungen an definierten Stellen (Beanspruchungsmaxima und Umlenkstellen),
- Temperaturen an den definierten Stellen (Beanspruchungsmaxima und Umlenkstellen),

- ggf. Durchbiegungen an definierten Stellen (Beanspruchungsmaxima und Umlenkstellen),

- Spannkkräfte in den Spanngliedern.

Die wichtigsten Anforderungen an das Sensorsystem bei einer adaptiv vorgespannten Brücke können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ausreichend lange Zuleitungen ohne Erfordernis einer Verstärkung des transportierenden Signals [Bar06].
- Ausreichende und dauerhafte Genauigkeit der Messungen.
- Kein Verlust des Nullpunktes und der Messgenauigkeit bei Unterbrechungen und Wiederherstellungen der Verbindung [Bar06].
- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Einflüssen.
- Abtastrate und Messintervall der Messdatenerfassung für ausreichende Genauigkeit realisierbar [Bar06].
- Automatische Datenerfassung und Archivierung in Echtzeit. Weiterhin ist eine Datenübertragung per UMTS bzw. GSM in definierten regelmäßigen Zeitabständen an einen zentralen Überwachungscomputer sinnvoll. Die Daten können an-

Eigenschaften	DMS	PZS	FOS
Dehnungsermittlung	direkt	direkt	direkt
Spannungsermittlung	indirekt	indirekt	indirekt
Temperaturermittlung	-	-	indirekt
Messgenauigkeit	+	+	+
Kontinuierliche Messung langsamer Prozesse	+	-	+
Kontinuierliche Messung dynamischer Prozesse	+	+	+
Verteilte Messungen	-	-	+
Hohe Lebensdauer	-	-	+
Unempfindlichkeit gegenüber			
• Temperatur	+	-	+
• elektromagnetischen Feldern	-	-	+
• Korrosion	+	+	+
Störungsfreie Kopplung an Auswertungssystem	-	+	+
Flexibilität bei der Anwendung	-	+	+
Einfache Installation	+	+	+
Geringe Wartung	+	+	+

Tab. 1: Evaluierung von Sensoren [Bar06]

schließlich aufbereitet und für Überwachungszwecke zur Verfügung gestellt werden [MoCa12].

- Bei Überschreitung vordefinierter Grenzwerte soll eine Alarmierung des Überwachungspersonals via SMS bzw. E-Mail erfolgen.
- Wirtschaftliche Energieversorgung. Dabei kann der Einsatz einer Photovoltaikanlage zur Stromerzeugung und -speicherung sinnvoll sein. Weiterhin können „Power-on-Measurement“-Verfahren verwendet werden, wodurch die Datenübertragung auch drahtlos in definierten Zeitabständen erfolgt und das Modem in den Zwischenphasen zur Reduzierung des Energieverbrauchs abgeschaltet wird [MoCa12].
- Schutz gegen Witterungseinflüsse (z. B. Wind und Nässe), Vandalismus und Diebstahl.
- Besondere Anforderungen sind Zuverlässigkeit, Robustheit und Lebensdauer der einzelnen Komponenten des Sensorsystems.

Die ausgewählten Sensortechnologien Dehnmessstreifen (DMS), piezoelektrische (PZS) sowie faseroptische (FOS) Sensoren wurden in [Bar06] bezüglich ausschlaggebender Aspekte verglichen (Tabelle 1). In diesem Vergleich weisen FOS die höchste Qualifikation auf und werden somit in diesem Kapitel näher betrachtet. Anschließend wird eine Ausführungsvariante dieser Technologie zur Realisierung adaptiv vorgespannter Brückenbauwerke vorgeschlagen.

2.2 Übersicht über faseroptische Sensoren und Stand der Technik

2.2.1 Prinzip und Vorteile faseroptischer Messung

Die lichtwellenleitende Sensorik findet zunehmend Anwendung im Bauwesen, insbesondere aufgrund ihrer erhöhten Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit im Vergleich zu konventionellen Sensoren. Die deutlich höhere Messempfindlichkeit erlaubt die frühzeitige Detektion entstehender Schäden (wie beispielsweise Risse mit geringer Rissbreite). Prinzipiell basiert die faseroptische Sensorik auf der Messung der Verformung einer optischen Faser aus Quarzglas SiO_2 mit einem Durchmesser von ca. 0,1 mm bzw. auf der Verformung von in den Strahlengang eingebauten Komponenten, die auf die Strahlungseigenschaften des übertragenden

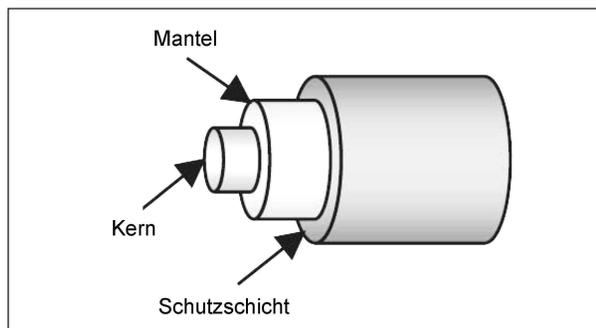


Bild 9: Querschnitt eines typischen Glasfaserkabels [elne11]

Lichtes wirken. Die Messtechnik mit faseroptischen Sensoren ist mittlerweile ausgereift und wird heute erfolgreich in vielen Bereichen eingesetzt. Die Sensoren können sowohl außen am Bauteil angebracht werden als auch in das Bauteil eingebettet werden [Bar06].

Die optische Faser dient entweder als Bindeglied zwischen Messelement und Erfassungssystem oder selbst als Sensor (bei Long-Gauge und Sensoren mit verteilter Messung). Die optische Glasfaser wird in der Regel mechanisch durch einen Polymer-Mantel bzw. einen Metall-Mantel bei Messungen in Extremfällen und zusätzlich durch eine mehrschichtige Kabel-Struktur geschützt (s. Bild 9).

Da es zwischen dem im Kern der optischen Fasern geleiteten Licht und ggf. umgebenden elektromagnetischen Feldern keine Wechselwirkung gibt, sind FOS unempfindlich gegenüber elektromagnetischen (EM) Einflüssen. Mit diesem eindeutigen Vorteil gegenüber konventionellen elektrischen Sensoren sind FOS offenbar die ideale Lösung bei Messungen in Gegenwart von EM oder Radiofrequenzen, die bei Brücken durchaus auftreten können. Der wesentliche Vorteil faseroptischer Sensoren ist allerdings die Möglichkeit verteilter Messungen.

Im Weiteren wird auf die zwei wichtigsten Prinzipien der faseroptischen Messtechnik eingegangen: das Microbend-Prinzip und das Prinzip der Interferometrie.

2.2.2 Sensoren des Microbend-Prinzips

Microbending-Sensoren sind intensitätsmodulierte Fasersensoren. Dabei werden Intensitätsverluste des Lichtsignals messtechnisch genutzt. Krümmungen einer optischen Faser führen dazu, dass das injizierte Licht durch Abstrahlung abgeschwächt

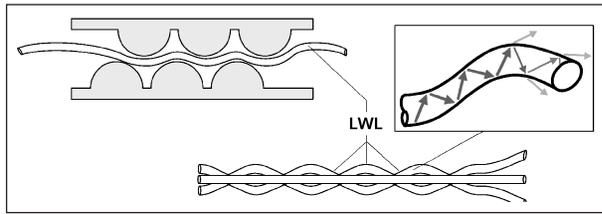


Bild 10: Microbending-Prinzip [INCA99]

wird. Mit Hilfe einer Licht-Dämpfungsmessung ist es möglich, diese mit der Längenänderung der optischen Faser in Zusammenhang stehenden Verluste zu erfassen und somit Dehnungen zu ermitteln.

Microbending-Sensoren bestehen grundsätzlich aus ineinander verschlungenen Lichtwellenleitern (s. Bild 10) mit einer Länge von 0,1 bis zu 10 m. Dabei beträgt der aktive Messbereich ca. 0,5 % der Sensorlänge [Bar06].

Die Messgenauigkeit und Messauflösung betragen einige μm . Messungen können in einem Temperaturbereich zwischen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfolgen. Typische Signalverarbeitungseinheiten arbeiten mit Messfrequenzen von bis zu 100 Hz [Bar06, Berg09].

Die Vorteile von Microbend-Sensoren sind wie folgt zusammenzufassen [Bar06]:

- hohe Auflösung und Genauigkeit,
- Möglichkeit verteilter Messungen,
- einfache Konzeption und Installation,
- hohe Lebensdauer (> 20 Jahre).

Es bestehen folgende Nachteile:

- keine direkte Temperaturkompensation,
- Intensitätsabweichungen, die die Verformungsmessungen beeinflussen,
- nichtlineares Verhältnis zwischen Lichtintensität und Längenänderung, was die Messungen beeinflusst.

2.2.3 Interferometrische faseroptische Sensoren

Insgesamt wird zwischen vier Arten von interferometrischen faseroptischen Sensoren unterschieden [INGR08, DLMG08] (s. Bild 11):

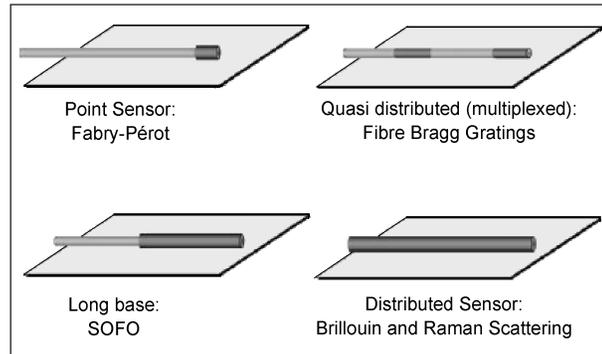


Bild 11: Einteilung der interferometrischen faseroptischen Sensoren nach Messbasis [INGR08]

- Punkt-Sensoren (engl. point sensors/site specific) haben einen einzigen Messpunkt am Ende der optischen Faser.
- Multiplex-Sensoren: Mit diesen Sensoren ist die Messung an mehreren Punkten entlang einer einzelnen optischen Faser möglich.
- Long-Gage bzw. Long-Base-Sensoren: Die Messung erfolgt über eine im Vergleich zu den Punkt-Sensoren größere Länge.
- Verteilte (engl. truly distributed) Sensoren sind in der Lage, Messungen an jedem Punkt entlang einer einzelnen optischen Faser durchzuführen.

Die interferometrischen faseroptischen Sensortechnologien werden heute weitgehend zur Anwendung für statische sowie dynamische Monitoring-Aufgaben bei Brücken, Gebäuden, Denkmälern, Tunneln, Dämmen, Deichen, Pipelines u. a. eingesetzt.

Für einen Einsatz bei einer adaptiven Konstruktion bieten Multiplex-Sensoren große Vorteile, da Dehnungen und Temperaturen punktuell an mehreren Stellen mit minimaler Verdrahtung gemessen werden können. Unter Verwendung konventioneller Messtechnik oder faseroptischer Punkt-Sensoren würde bei größeren Brückenbauwerken ein deutlich höherer Verdrahtungsaufwand bestehen. Da für das Forschungsvorhaben quasi-verteilte Messungen die höchste Relevanz aufweisen, werden faseroptische Faser-Bragg-Gitter im Folgenden näher dargestellt.

Multiplex-Sensoren (Fiber-Bragg-Gitter-Sensoren)

Mit dem Bragg-Gitter-Verfahren, einer weit verbreiteten und ausgereiften Sensortechnologie, ist es möglich, Messungen an verschiedenen Messpunk-

ten entlang einer optischen Faser durchzuführen. Herstellungstechnisch werden an bestimmten Stellen des Kerns der optischen Faser durch einmaliges Einstrahlen von überlagerten UV-Laserstrahlen Beugungsgitter erzeugt, so genannte Bragg-Gitter (s. Bild 12). Diese weisen üblicherweise Längen von 10 mm auf.

Bragg-Gitter besitzen die Eigenschaft, Licht einer bestimmten Wellenlänge, der Bragg-Wellenlänge λ_{BRAGG} , zu reflektieren und andere Wellenlängen des Spektralbereichs durchzulassen (s. Bild 13). Die reflektierte Wellenlänge des eingekoppelten Lichtes ist von der Brechzahl n_m und der Periodenlänge Λ des Gitters abhängig:

$$\lambda_{\text{BRAGG}} = 2 \cdot n_m \cdot \Lambda$$

Die Periodenlänge Λ und somit die Wellenlänge des Gitters verändern sich durch Dehnung oder Stauchung der optischen Faser, was zu einer Verzerrung der Gitter führt. Die Brechzahl n_m wird hingegen hauptsächlich durch die Temperatur und zu einem kleinen Teil durch die thermische Ausdehnung des Materials beeinflusst. Bei Änderung der beiden genannten Größen verschiebt sich die Bragg-Wellenlänge im zu messenden Reflexions- bzw. Transmissionspektrum. Des Weiteren bewirkt die Änderung der Temperatur auch eine Reduktion der Reflektivität (s. Bild 15).

Die Messauflösung der FBGs liegt bei $1 \mu\epsilon$ (Dehnung) und $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (Temperatur) mit einer Messbasis von 2-20 mm. Der Messbereich für die Dehnung liegt hierbei zwischen $-1.000 \mu\epsilon$ und $+10.000 \mu\epsilon$ [Berg09, Fise11]. Bei den FBG-Sensoren ist ein Wellenlängenmultiplexverfahren (engl. WDM: Wavelength Division Multiplexing) möglich, was das Einschreiben von mehreren FBG-Sensoren unterschiedlicher Bragg-Wellenlängen (FBG-Arrays) in einer einzigen optischen Faser ermöglicht (s. Bild 14). Der von der Lichtquelle erzeugte Impuls wird von den FBGs mit unterschiedlichen Bragg-Wellenlängen reflektiert und wird im Reflexionsspektrum dem jeweiligen FBG genau zugeordnet, sodass sich eine Kodierung der Position entlang der Faser und somit eine örtliche Zuordnungsmöglichkeit der erfassten Messdaten ergeben [Vo11].

Wenn Dehnungen und Temperaturschwankungen gleichzeitig erwartet werden, ist es nötig, zusätzlich eine freie Referenzfaser zur Temperaturkompensation zu verwenden. Die neueste Entwicklung auf diesem Gebiet (2011) sind FBG-Sensoren mit inte-

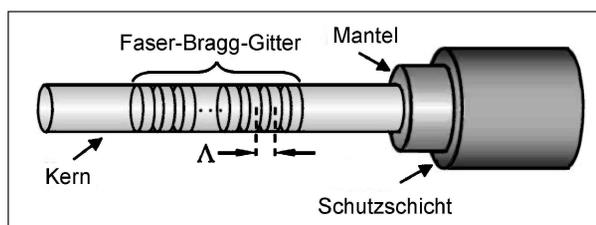


Bild 12: Optische Faser mit einem Bragg-Gitter [elne11]

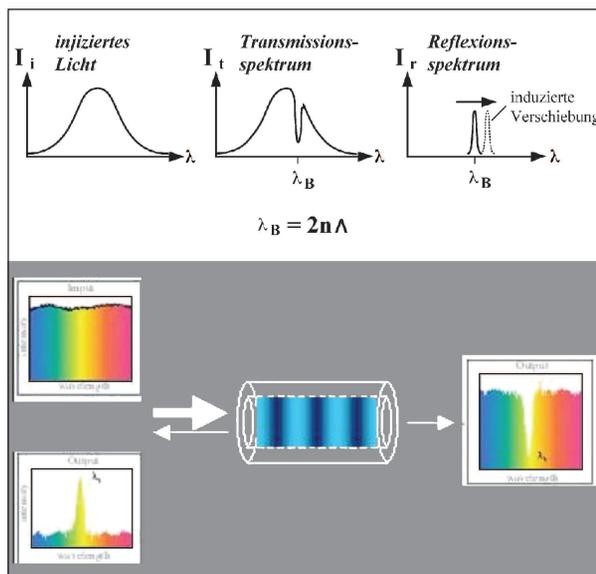


Bild 13: Prinzip der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren [LIV199]

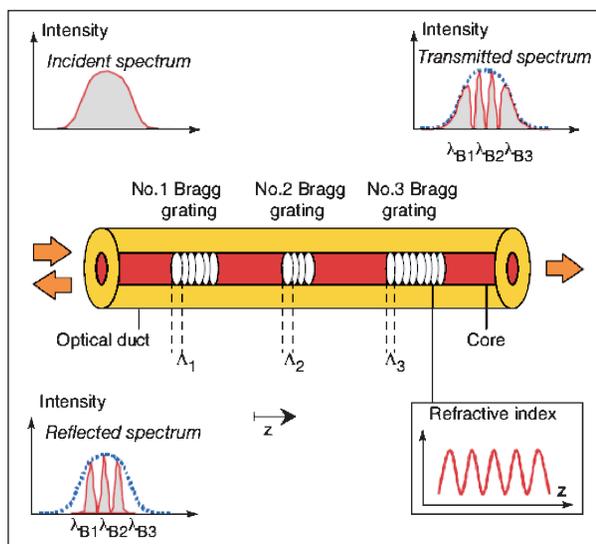


Bild 14: WDM bei FBG-Sensoren [DLMG08]

grierter Temperaturkompensation [fise11, mic12]. Eine Übersicht bzw. Strukturierung der aufgeführten Sensoren zeigt Bild 16.

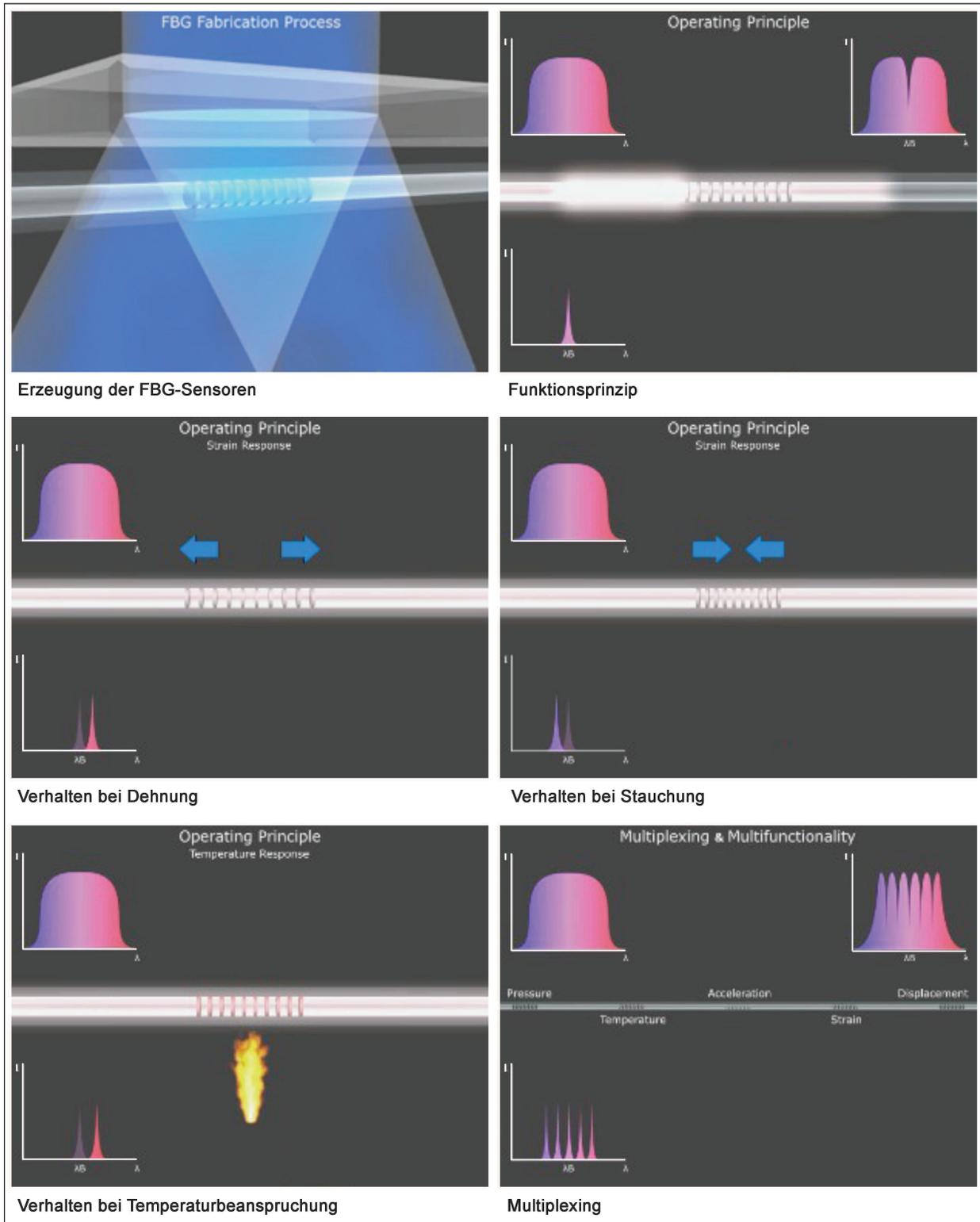


Bild 15: Periodenänderung der Bragg-Gitter bei Dehnungs- und Temperatureinflüssen [fise11]

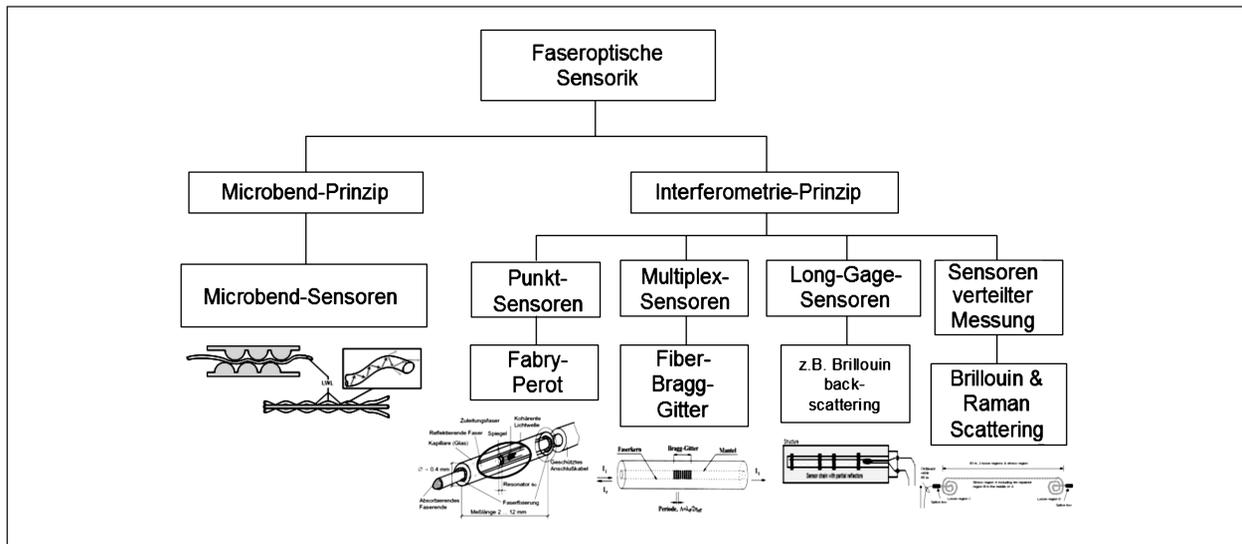


Bild 16: Übersicht faseroptischer Sensoren

2.2.4 Evaluierung und Auswahl

In den letzten Jahren haben unter den faseroptischen Sensoren vor allem die FBG-Sensoren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Komplexe Messsysteme mit Fiber-Bragg-Gitter-Sensoren für Anwendungen im Bereich des Bauwesens werden mittlerweile von zahlreichen Herstellern angeboten, u. a. von SMARTEC (Schweiz), FOS&S (Belgien), Insensys (UK), Advoptics (Frankreich) und Fiber-Sensing (Portugal).

Microbend-Sensoren kommen bei Messungen an Bauwerken selten zum Einsatz. Obwohl diese Sensoren auf einem einfachen Prinzip beruhen und verhältnismäßig preiswerte mechanische und elektrische Komponenten benötigen, stellen die instabilen Intensitätsabweichungen, die Notwendigkeit einer wiederholten Systemkalibrierung sowie das nichtlineare Verhältnis zwischen Lichtintensität und Verlängerung nicht zu vernachlässigende Nachteile dar. Lichtintensitätsverluste an den Messstellen können kaum von Intensitätsverlusten unterschieden werden, die entlang der optischen Faser selbst auftreten. Microbend-Sensoren sind daher für Langzeitüberwachungsaufgaben weniger geeignet [BOGE07]. Aus diesen Gründen werden heute überwiegend faseroptische Sensoren des interferometrischen Prinzips verwendet [DLMG08].

Für adaptive Spannbetonstrukturen werden aus den oben genannten Gründen faseroptische Fiber-Bragg-Gitter-Sensoren zur Erfassung von Dehnungen, Temperaturen und ggf. Durchbiegungen empfohlen.

2.2.5 Komponenten und Funktionsweise des Sensorsystems

Zur Vervollständigung der Messkette ist für die Datenerfassung und -digitalisierung neben den faseroptischen Sensoren auch ein entsprechendes Messsystem erforderlich. Die Datenübertragung erfolgt durch ein Lichtwellenleiterkabel (optische Faser), das die Sensoren mit Erfassungssystemen, so genannten Interrogatoren, verbindet.

Messdatenerfassung bei FBG-Sensoren (Interrogation)

Bei der Methode des Wavelength Division Multiplexing (WDM) wird jedem FBG in der optischen Faser ein eigener Wellenlängenbereich innerhalb des Lichtspektrums zugeordnet. Die aus den Sensormessungen gewonnenen Ergebnisse bleiben aufgrund der Wellenlängenbeschaffenheit von FBGs auch bei geringen Lichtintensitätsverlusten bzw. -dämpfungen durch Biegung oder Signalübertragung genau, sodass eine quasi verlustfreie Übertragung des Signals bis zu 100 km erfolgen kann [elne11, ni11, berg09].

Die maximale Anzahl der FBGs in einer einzelnen Faser ist vom Wellenlängenbereich jedes Sensors und vom gesamten Wellenlängenbereich des Interrogators abhängig. Dieser Bereich liegt für FBG-Dehnungssensoren oft bei ca. 5 nm und für FBG-Temperatursensoren bei ca. 1 nm. Da Interrogatoren meist Messungen über einen Wellenlängenbereich von 60-80 nm ermöglichen, kann ein „Array“ faseroptischer Sensoren aus mehr als 80 Sensoren

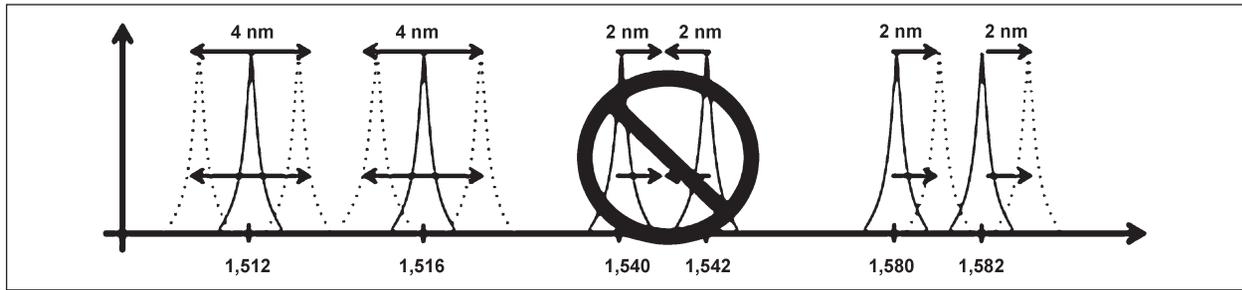


Bild 17: Beispiel-Array faseroptischer FBG-Sensoren mit teilweise nicht geeigneten sich überschneidenden Wellenlängenbereichen [ni11]

bestehen. Zu beachten ist, dass sich die reflektierten Wellenlängen der FBGs nicht überschneiden (s. Bild 17) [elne11, ni11].

Da die typischen FBG-Sensorwellenlängen im Bereich von wenigen Nanometern liegen, müssen die Interrogationssysteme in der Lage sein, Messungen mit einer Auflösung im Pikometerbereich (10^{-12} m bzw. 0,001 nm) auszuführen. Für diesen Zweck wurden mehrere Methoden für das Erfassen optischer FBGs entwickelt:

- Interferometer

Für Laboranlagen werden häufig Interferometer bevorzugt, die optische Spektralmessungen mit hoher Auflösung durchführen können. Jedoch sind diese Geräte groß, kostenintensiv und nicht ausreichend robust, weshalb sie für die Anwendung bei Brücken- bzw. Konstruktionsüberwachungsaufgaben vor Ort nicht gut geeignet sind [elne11, ni11].

- Interrogatoren mit CCD-Spektrometern

Bei auf CCD-Spektrometern basierenden Interrogatoren kommen ein CCD-Zeilenspektrometer (Sensor) und ein festes dispersives Element, z. B. ein Polychromator, zum Einsatz (s. Bild 18). Hierbei werden die Wellenlängen in Positionswerte umgewandelt, indem eine breitbandige Lichtquelle die FBGs eines Arrays beleuchtet. Das dispersive Element erhält die reflektierte Lichtwelle über den Koppler und verteilt die Bestandteile der Wellenlänge während der Reflexion an unterschiedliche Stellen eines linearen CCD-Sensors [elne11, ni11].

Diese Methode ermöglicht zwar die gleichzeitige Durchführung hoch frequenter Messungen an allen FBGs eines Arrays, liefert aber begrenzte Auflösungs- und Signal-Rausch-Abstandswerte [elne11, ni11].

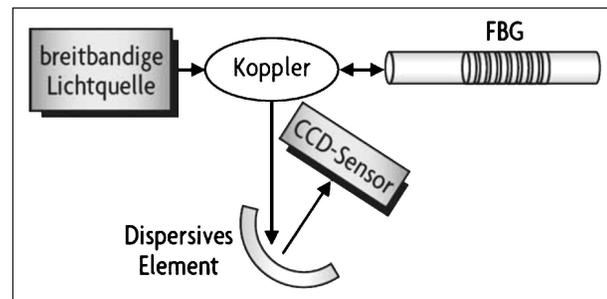


Bild 18: Interrogation von FBG-Sensoren mittels eines dispersiven Elements und eines CCD-Sensors [elne11]

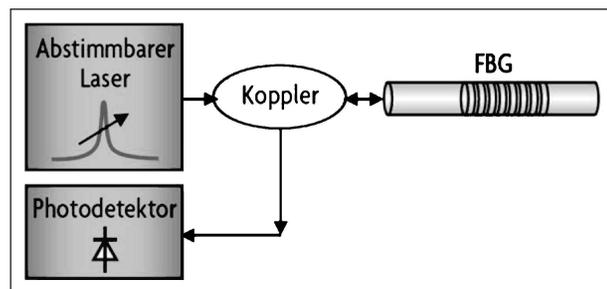


Bild 19: Interrogation von FBG-Sensoren durch einen abstimmbaren Laser [elne11]

- Interrogatoren mit abstimmbaren, schmalbandigen Laserlichtquellen

Interrogationssysteme, die mit Hilfe eines abstimmbaren Fabry-Perot-Filters einen leistungsstarken Laser (s. Bild 19) erzeugen, werden häufig verwendet. Im Gegensatz zur vergleichsweise leistungsschwachen breitbandigen Lichtquelle konzentriert der Laser Energie in einem schmalen Band (schmalbandige Lichtquelle), das einen begrenzten Wellenlängenbereich enthält. Ein Fotodetektor misst synchron die Reflexionen der vorhandenen FBGs. Bei Übereinstimmung der Wellenlänge des abstimmbaren Lasers mit der Bragg-Wellenlänge eines FBG wird die entsprechende Reflexion vom Fotodetektor erkannt. Die Dehnung und/oder Temperatur des Sensors korrespondiert mit der Wel-

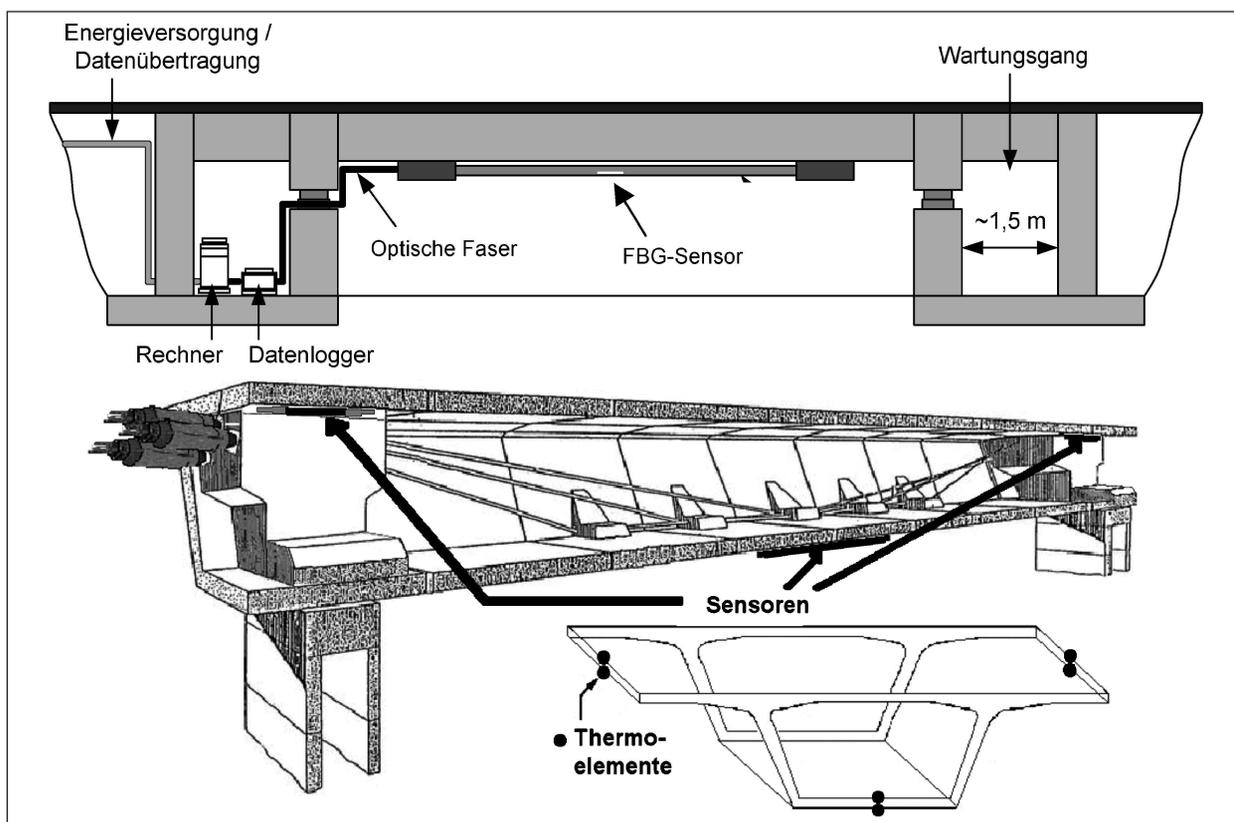


Bild 20: Beispielanordnung für Dehnungs- und Temperatursensoren bei einer einfeldrigen Hohlkastenbrücke [nach Bar06]

lenlänge, bei der diese Reflexion auftritt [elne11, ni11].

Mit dem schmalbandigen Laser wird eine Lichtquelle mit einer hohen optischen Energie und einem optimierten Signal-Rausch-Abstand erzielt. Dies ermöglicht sogar den Anschluss mehrerer aus FBG-Arrays bestehender Messkanäle an eine einzelne schmalbandige Laser-Lichtquelle sowie Messungen über Faserstrecken mit einer Länge von mehr als 10 km [elne11, ni11].

- Mögliche Anordnungsstellen der Sensoren

Zur Dehnungsmessung werden FBG-Dehnungssensoren verwendet. Bei mehrfeldrigen Brücken kann die Multiplexing-Fähigkeit der FBG-Sensoren ausgenutzt werden, dabei ist je Messstrecke eine optische Faser erforderlich, die an den Feldmitten und Umlenkstellen mit Bragg-Gittern versehen ist. Eine weitere, nicht gespannte Referenzfaser ist zur Temperaturkompensation bzw. der Temperaturmessung in unmittelbarer Nähe zu installieren. Eine ähnliche Vorgehensweise gilt für die Messungen in den Stützbereichen. In Bild 20 ist eine mögliche Anordnung von FBG-Dehnungssensoren in Verbindung mit konventionellen Thermoelementen bei

einer einfeldrigen Hohlkastenbrücke dargestellt. Computer sowie die Messhardware können in einem Wartungsgang (soweit dieser ausreichend groß ist) innerhalb des Brückenquerschnitts angeordnet werden. Ansonsten kann die Hardware außerhalb der Brücke in einer Einhausung installiert werden.

- Stromversorgung des Sensorsystems

Sollte keine konventionelle direkte Stromversorgung zur Verfügung stehen, bietet sich der Einsatz lokal gewonnener regenerativer Energie (Sonne, Wind) an. Für eine autarke Energieversorgung sind zukünftig Methoden des Energy Harvesting zu untersuchen.

3 Entwicklung eines Stellgliedersystems

Da das Angebot an Stelleinrichtungen für den Einsatz in Regelkreisen sehr vielfältig ist, wird in diesem Bericht nur auf diejenigen Stelleinrichtungen eingegangen, die aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und ihres Entwicklungsstandes für den Einsatz bei adaptiven Spannbetonstrukturen infrage kommen.

Angesichts der hohen erforderlichen Kräfte und Stellwege für die Vorspannung von Betonbauteilen, insbesondere von Brückenquerschnitten, bleibt die Auswahl zurzeit auf elektromechanische und hydraulische Antriebe beschränkt. In Zukunft sind Konstruktionen unter Einsatz von „smart materials“, wie zum Beispiel piezoelektrische Materialien oder Formgedächtnislegierungen zur Bereitstellung der Antriebsenergie, denkbar. Momentan ist diese Technik, die sich jedoch in ständiger Entwicklung befindet, noch auf den Einsatz im kleineren Maßstab beschränkt.

3.1 Elektromechanische Stelleinrichtungen

Bei der Nutzung von elektromechanischen Systemen ergibt sich die Notwendigkeit, aus verfügbaren Stelleinrichtungen, wie z. B. Spindelhubantrieben kombiniert mit Elektromotoren und weiteren benötigten Komponenten wie Kupplungen oder Getriebe, eine Vorrichtung zu konstruieren, mit der die Vorspannkraft an einem Spannglied in gewünschter Weise und mit einer ausreichenden Zuverlässigkeit gehalten und beeinflusst werden kann. Als Stellglieder für entsprechende Elektromotoren kommen heutzutage Frequenzumrichter zum Einsatz. Eigene Recherchen haben ergeben, dass der Leistungsbereich der oben erwähnten Spindeltriebe in der Regel bei Stellkräften von 1,5 MN endet. Folglich können Stellvorgänge an Spanngliedern mit Vorspannkräften von ca. 3 MN, wie sie in der Regel für die externe Vorspannung eingesetzt werden, nicht von einem einzelnen, sondern nur in Kombination mehrerer dieser Antriebe vorgenommen werden. Dadurch ergeben sich weitere Anforderungen bezüglich der synchronen Ansteuerung der Elektromotoren, der Stabilität der Hubvorrich-

tung gegen Kippen oder Verkanten und der Baugröße. Die Verschleißbeanspruchung von elektromechanischen Antrieben in Abhängigkeit von der Anfahrhäufigkeit sollte bei sicherheitsrelevanten Anwendungen überwacht werden. Weitere wichtige Aspekte stellen der Wirkungsgrad und die Leistungsaufnahme dar. Demnach wäre aufgrund der großen benötigten Anlaufleistung bei einem Spindeltrieb für die adaptive Vorspannung eines üblichen externen Spanngliedes überschlüssig eine elektrische Nennantriebsleistung von ca. 40 kW (Drehstrommotoren) notwendig [Küh11]. Bild 21 zeigt beispielsweise eine Ausführung von Spindeltrieben mit Laufmutter. Da es sich bei diesen Antrieben um standardisierte Baugruppen handelt, können Elektromotoren (s. Bild 21, rechts) mit entsprechenden Anschlussmaßen und ausreichender Leistung verwendet werden [ben11]. Der Einsatz einer elektromechanischen Stelleinrichtung hat aufgrund der genormten Komponenten einer solchen Konstruktion den Vorteil, dass diese gut verfügbar, günstig und von angemessener Qualität sind. Wegen der geringen Komplexität einer solchen An-



Bild 22: Frequenzumrichter als elektrisches Stellglied [elek11]

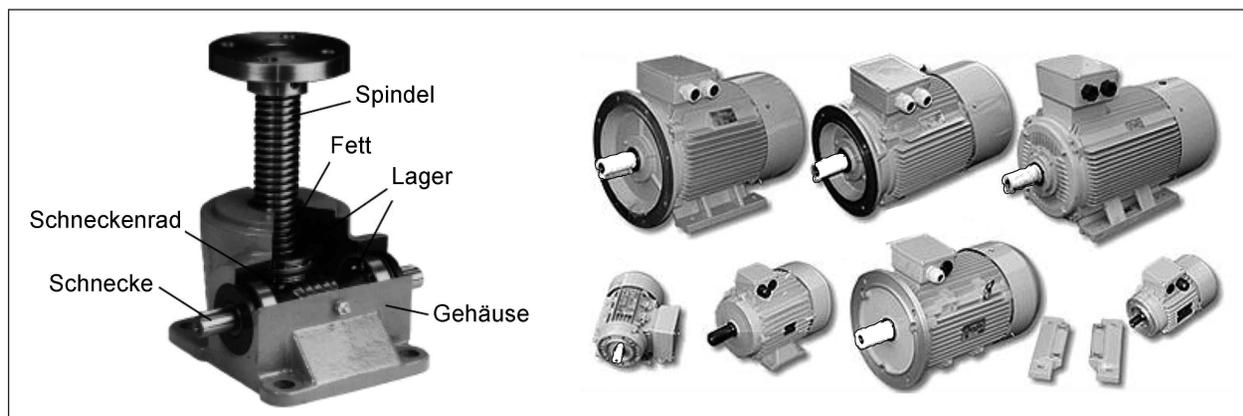


Bild 21: Spindelgetriebe (links) und Standard Elektromotoren [ben11, elek11]

lage können Wartungsarbeiten und Reparaturen auch von lokalen Anbietern durchgeführt werden. Dennoch sollten die Robustheit und die Zuverlässigkeit derartiger Anlagen beachtet werden. Vor allem bezüglich der Einsatzumgebung mit allen damit verbundenen Einflüssen müssen alle Anforderungen an die einzuhaltenden Schutzklassen beim Betrieb elektrischer Anlagen erfüllt werden [Küh11].

Als elektrische Stellglieder werden Frequenzumrichter eingesetzt. Bild 22 stellt einen Frequenzumrichter für Motorleistungen bis 75 kW dar. Das Modell verfügt über einen integrierten PID-Regler sowie Schnittstellen für die Integration in Regelungsnetzwerke und mehrere Sicherheits- bzw. Überwachungsfunktionen [elek11, Küh11].

3.2 Hydraulische Stelleinrichtungen

Hydraulische Antriebe verfügen über zahlreiche positive Eigenschaften [Küh11]:

- einfacher Aufbau aus Normbauteilen und Zulieferkomponenten,
- konstruktiv einfache Erzeugung großer Kräfte mit hoher Leistungsdichte,
- gutes Zeitverhalten,
- einfache Bewegungskehr,
- einfacher Überlastungsschutz durch Druckbegrenzungsventile,
- Überwachung der Belastung über Manometer (Drucksensor),
- gute Möglichkeit zur Automatisierung von Prozessen.

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber: Hydraulische Antriebe haben einen geringeren Wirkungsgrad als mechanische Antriebe. Zudem bestehen hohe Anforderungen an die Filterung der Hydraulikflüssigkeit und die Viskosität der Hydrauliköle ist temperaturabhängig. Sie steigt bei sinkenden Temperaturen, was zu einem erhöhten Kraftaufwand führt. Durch den Einsatz von Spezialhydraulikölen können diese Probleme weitgehend relativiert werden.

3.2.1 Hydraulische Stellglieder

Um einen hydraulischen Antrieb in einem Regelkreis einsetzen zu können, werden stetige proportional

wirkende Stellglieder benötigt, die in gewünschter Weise eine Stellgröße beeinflussen, d. h. regeln können. Die nachfolgend aufgeführten elektrisch betätigten Ventiltypen kommen prinzipiell infrage.

Servoventile

Servoventile sind in der Lage, mit kleinsten Eingangsleistungen große Ausgangsleistungen zu steuern. Ursprünglich wurden Servoventile für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt und dabei hauptsächlich in lagegeregelten Präzisionsantrieben eingesetzt. Diese Antriebe müssen in der Lage sein, ständig wechselnde Positionen schnellstmöglich gegen unterschiedliche Kräfte bei großen zu bewegenden Massen anzufahren. Diese Eigenschaften erfordern sehr präzise und damit kostenintensive Fertigung aller Elemente dieser Ventile und zudem eine hohe Güte bei der Filterung des Drucköls.

Servoventile sind zwei- und bei sehr großen zu steuernden Volumenströmen dreistufig aufgebaut. Dabei bewirkt jede Stufe eine hydraulische Verstärkung. Eingangsgröße für die erste Ventilstufe, die Vorsteuerstufe, ist dabei ein Stromsignal aus der Ansteuerungselektronik (Regelung), das über ein Magnetsystem eine Beeinflussung der hydraulischen Widerstände und damit eine Betätigung des Steuerkolbens in der folgenden Hauptstufe zur Folge hat. Ein Rückführmechanismus, der elektrisch oder mechanisch ausgeführt sein kann, meldet der Vorsteuerstufe die genaue Lage des Hauptsteuerkolbens. So wird sichergestellt, dass seine Lage genau dem Eingangssignal entspricht. Bild 23 zeigt den Aufbau eines 2-stufigen Servoventils (Moog) mit Torque-Motor und mechanischer Rückführung [Mat08, Wil04, mo11].

Proportionalventile

Diese Ventile wurden auf der Basis von schaltenden Wegeventilen als „entfeinerte“ Alternative zu den Servoventilen entwickelt. Bei dieser Bauweise wird der federzentrierte Hauptsteuerkolben direkt durch zwei gegeneinander wirkende Proportionalmagnete elektrisch verstellt. Dabei kann zur Kompensation von Positionsfehlern durch Reibung und Federermüdung eine Lageregelung durch Erfassen der Kolbenposition realisiert werden (s. Bild 24). Grundsätzlich sind mit diesen Ventilen heutzutage auch Regelungsaufgaben mit gewissen bauartbedingten Einschränkungen möglich. Die erreichbare Dynamik bzw. Schalalthäufigkeit ist nicht so hoch wie

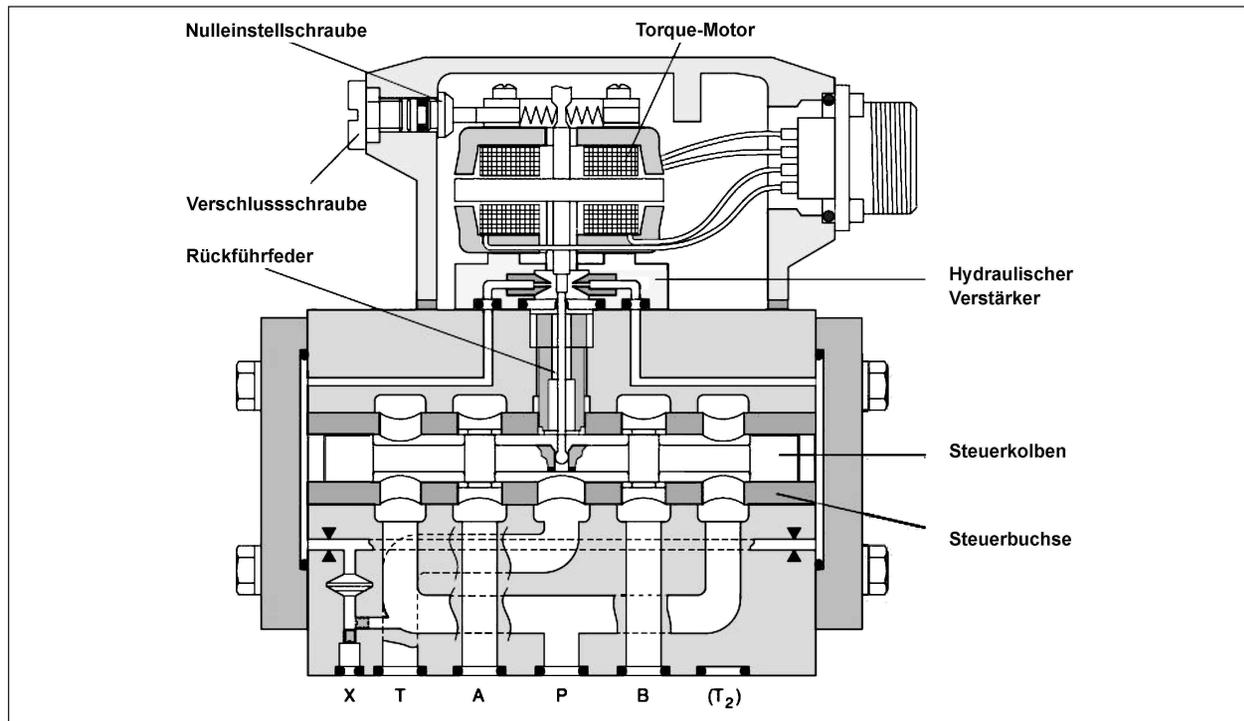


Bild 23: Aufbau Servoventil [mo11]

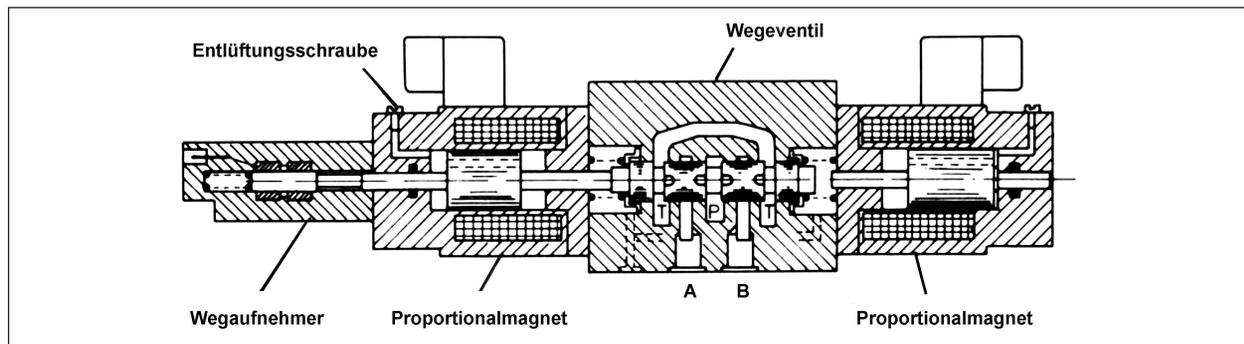


Bild 24: Proportional-Wegeventil [bos11]

bei den Servoventilen. Dennoch finden diese Ventile aufgrund ihrer robusteren Bauweise, die weniger hohe Ansprüche an die Filterung des Drucköls stellt, und des geringeren Anschaffungspreises gegenüber den Servoventilen häufig Anwendung. Ein weiteres Argument für die Anwendung von Proportionalventilen liegt in den prinzipbedingt geringeren Drosselverlusten gegenüber der Servotechnik [bos11, Küh11].

Regelventile: der aktuelle Entwicklungsstand

Den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet der elektrisch betätigten Stetigventile stellen die Regelventile dar. Sie können sowohl auf der Servo- als auch auf der Proportionaltechnik basieren. Regelventile verfügen über eingebaute Treiber- und

Regel-Elektronik. Bestandteil der Ventilelektronik ist ein Mikroprozessorsystem, das über die enthaltene Ventilsoftware alle wesentlichen Funktionen ausführt. Die digitale Elektronik ermöglicht eine nahezu temperaturunabhängige und drifffreie Regelung des Ventils über den gesamten Arbeitsbereich. Die Parametrierung, Ansteuerung und Überwachung der Ventile erfolgen meist über eine integrierte Feldbus-Schnittstelle. Diese Schnittstelle ermöglicht die Kommunikation und den Datenaustausch zwischen der Feldebene, der beispielsweise Messeinrichtungen und Antriebe angehören, und der übergeordneten Prozessebene, von der aus Prozesse geregelt, gesteuert und überwacht werden [Küh11].

In Bild 25 ist der Aufbau eines modernen direkt betätigten Servoventils der Firma Moog dargestellt

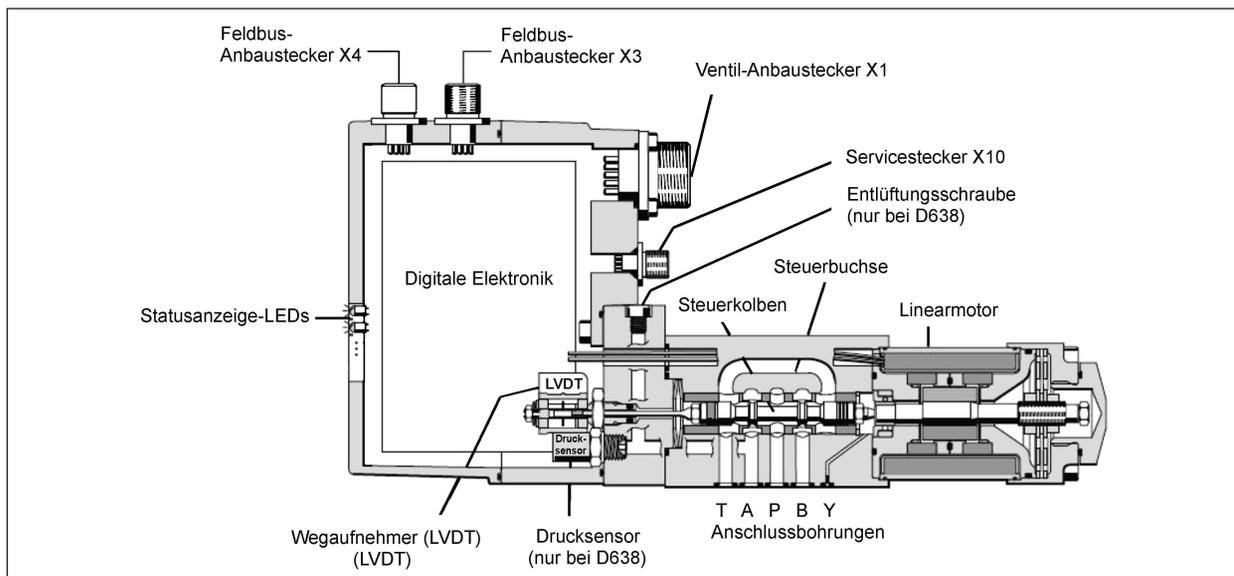


Bild 25: Direkt betätigtes digitales Servoventil [mo11]

[mo11]. Die Ventile dieser Baureihe sind Drosselventile für 2- bis 4-Wegeanwendungen. Sie eignen sich für elektrohydraulische Lage-, Geschwindigkeits- und Druckregelungen auch bei hohen dynamischen Anforderungen. Als Antrieb des Hauptsteuerkolbens wird ein Permanentmagnet-Linear-motor eingesetzt, der im Gegensatz zu Proportionalmagnetantrieben den Steuerkolben aus der federzentrierten Mittelposition in beide Arbeitsrichtungen verstellt. Dadurch ist dieser Ventiltyp für alle Bereiche der Maschinenanwendungen geeignet, die eine hohe Stellkraft des Steuerkolbens und gleichzeitig hohe statische und dynamische Eigenschaften fordern. Diese Ventile besitzen volle Q-, p- oder auch pQ-Funktionalität und sind umschaltbar auf Volumenstromfunktion und/oder Arbeitsdruckregelung. Die Umschaltung erfolgt entsprechend der Parametrisierung über die Feldbuschnittstelle. Weiterhin besteht die Möglichkeit, neben internen Größen, wie Druck und Volumenstrom, auch externe Signale wie Position, Geschwindigkeit, Kraft u. a. zu regeln [mo11, Küh11].

3.2.2 Hydraulische Aktuatoren

Da es sich bei der adaptiven Vorspannung um eine neuartige Vorspanntechnik handelt, stehen derzeit keine speziell für diesen Zweck entwickelten hydraulischen Antriebe zur Verfügung, die als Aktuatoren einer Stelleinrichtung einsetzbar sind. Die gängigen hydraulischen Antriebe bzw. Spannpressen zum Vorspannen von Spanngliedern werden eher als Werkzeuge eingesetzt. Für den Einsatz als Aktuator zum Aufbringen einer adaptiven Vor-

spannkraft sind zusätzliche Eigenschaften gefordert. Eine geeignete Baugröße, ein angemessenes Gewicht und die Zuverlässigkeit sind wichtige zu berücksichtigende Kriterien. Außerdem sind die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit gegen Druckölverluste wesentliche Faktoren für einen langfristigen Einsatz der Pressen als Aktuatoren.

Es ist deshalb naheliegend, ausgehend von den erwähnten konventionellen hydraulischen Antrieben geeignete Aktuatoren weiterzuentwickeln.

Grundsätzlich können folgende Arten von hydraulischen Antrieben verwendet werden:

- Hubzylinder: können über Hilfskonstruktionen eingesetzt werden (s. Bild 26).
- Hohlkolbenzylinder: Bei Spannverfahren mit Drahtspanngliedern zur externen Vorspannung (z. B. SUSPA-Draht EX) ist es durch die Ausführung der Spanngliedverankerung mit einem Außengewinde möglich, einen Hohlkolbenzylinder über eine Zughülse als Aktuator anzusetzen. Eine mögliche Ausführung für externe Spannglieder ist in Kapitel 3.2.3 dargestellt.

Die Wahl geeigneter Zylinder gehört zur Dimensionierung des hydraulischen Stellgliedersystems bei jedem adaptiven Bauwerk. Dabei müssen neben den anfangs erwähnten Aspekten der Arbeitsdruck sowie der erforderliche maximale Kolbenweg beachtet werden. Herkömmliche Pressen werden mit Drücken von bis zu 700 bar betrieben. Der maximale Kolbenweg setzt sich zusammen aus dem An-

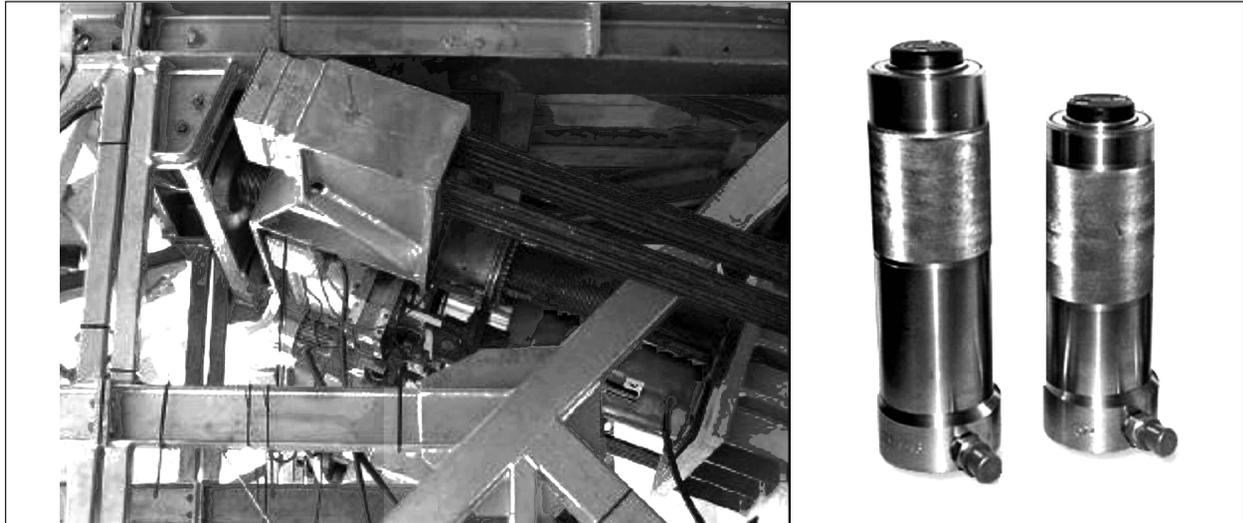


Bild 26: Spannzylinder beim Organic-Prestressing-System [PCG06, PAA04, sch12]

teil des Spannglied-Dehnwegs bei maximaler Vorspannkraft, dem erforderlichen Anteil zur Kompensation der initialen Spannkraftverluste beim Anspannen der Spannglieder sowie der Spannkraftverluste aufgrund Kriechens, Schwindens und Relaxation plus einem zusätzlichem Sicherheitsweg.

3.2.3 Evaluierung und Auswahl des Stellgliedersystems

Bei der Auswahl eines Stellgliedersystems zum Aufbringen einer adaptiven Vorspannung bei Spannbetonstrukturen ist es sinnvoll, auf ölhydraulische Antriebssysteme zurückzugreifen. Durch den Einsatz hydraulischer Zylinder können im Vergleich zu elektromechanischen Aktuatoren sehr große Kräfte mit vergleichsweise geringen Hubgrößen und geringer Reaktionszeit erreicht werden.

Nachfolgend wird bezüglich der Verankerung ein Vorschlag zur Umsetzung der adaptiven Vorspannung bei der Verwendung des Spanngliedtyps SUSPA-Draht EX der Firma SUSPA-DSI gezeigt. Das SUSPA-Draht EX-Spannglied wird werksmäßig hergestellt und verfügt über einen Grundkörper, in dem die einzelnen Drähte verankert sind. Beim Vorspannen auf konventionelle Weise wird über das Außengewinde des Grundkörpers eine Zughülse geschraubt, die ebenfalls über ein Außengewinde verfügt. Eine auf dieses Gewinde geschraubte Stützmutter überträgt die Spannkraft auf die einbetonierte Ankerplatte (s. Bild 27). Beim Vorspannvorgang wird mit Hilfe einer Konstruktion („Spannstuhl“), auf welcher sich die Spannpresse abstützt, das Spannglied gezogen. Nach Erreichen der erforderlichen Vorspannkraft wird die Stützmutter ar-

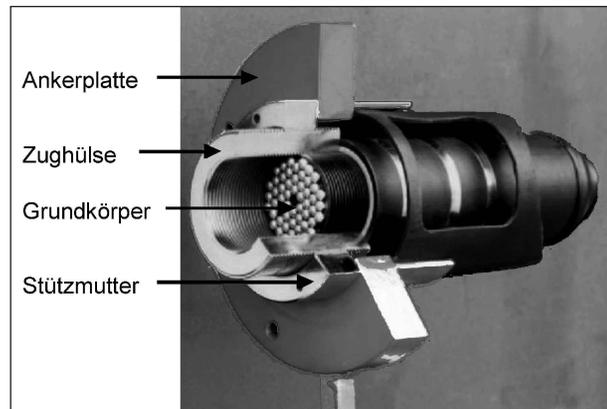


Bild 27: Spannanverankerung SUSPA-Draht EX [Hei04, Küh11]



Bild 28: Blockzylinder [ger11]

retiert und überträgt nach Entfernen der Presse die Vorspannkraft auf das Bauteil.

Als Aktuatoren können beispielsweise eine Anordnung von Blockzylindern (doppeltwirkende Hydraulikzylinder mit Längs- und/oder Querbohrungen (s. Bild 28 und Bild 29)) oder entsprechend modi-

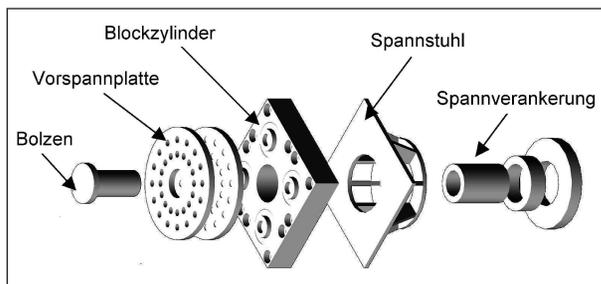


Bild 29: Möglicher Aufbau des Aktuators für ein externes Drahtspannglied [Küh11]



Bild 30: CFK-Spannpressen [sp11]

fizierte Spannpressen aus CFK (s. Bild 30) eingesetzt werden. Diese zeichnen sich durch ihr äußerst geringes Gewicht sowie ihre hohe Robustheit aus.

4 Entwicklung einer adaptiven Regelung

Geregelte Systeme nutzen die tatsächliche Systemantwort für die nächste Adaption (closed-loop). Dabei sind insbesondere zwei Klassen für den Einsatz zur Erzeugung einer Adaptivität zu unterscheiden: Das Modellreferenzverfahren (MRAS) basiert auf dem Vergleich gemessener Größen mit einem explizit vorgegebenen Referenzmodell, wodurch die notwendige Anpassung ermittelt wird. Selbst-einstellende Regler (STR) nutzen bekannte Regelstreckenparameter zur Online-Identifikation von Strecken- (indirekt) oder Reglerparametern (direkt) und ermitteln auf diese Weise die durchzuführende Adaption [Bar06, Beh95].

Des Weiteren kann durch die Möglichkeit, Kontrollparameter einer Regelung zu ändern, eine Synchronisation des idealen auf das vorliegende Reglerverhalten erreicht werden. Somit ist die Regelung eines adaptiven Systems selbst adaptiv oder

lernfähig, wodurch während der Laufzeit anhand des Vergleiches der erbrachten Leistung mit dem gewünschten Verhalten eine Optimierung stattfindet. Dabei werden zwei grundsätzliche Methoden unterschieden: Direkte adaptive Regelungen basieren auf dem Vergleich der Soll- und Ist-Werte, durch welchen die notwendige Anpassung ermittelt wird. Indirekte Verfahren beinhalten ein Modell der Regelstrecke, welches zur Ermittlung der durchzuführenden Änderung herangezogen wird. Durch den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz können lernfähige adaptive oder intelligente Regelungen erstellt werden, welche fähig sind, auch hoch komplexe Problemstellungen durch Anwendung einer bereitgestellten Wissensbasis selbstständig zu lösen [Bar06, Stei11].

Im Hinblick auf den Einsatz einer adaptiven Vorspannung an Brückenbauwerken sind Zuverlässigkeit und Redundanz des eingesetzten Algorithmus von ausschlaggebender Bedeutung. Insbesondere bestehen aufgrund hoher Sicherheitsanforderungen, der unterschiedlichen auch in Kombination auftretenden Einwirkungen und des Anstiegs der Verkehrslasten hohe Ansprüche an die Regelung. Sie muss auf einem Prinzip aufbauen, welches in der Lage ist, zuvor unberücksichtigte und auch unvorhersehbare Zustände des statischen Systems zu erfassen und eine entsprechende angemessene Reaktion zu ermitteln. Des Weiteren ist der Einsatz eines modellunabhängigen Algorithmus äußerst vorteilhaft, da zum einen ein geringerer Aufwand für Berechnungen notwendig ist und zum anderen im Gegensatz zu einem modellbasierten Verfahren eine Betrachtung aller Belastungsmöglichkeiten nicht erforderlich ist [Stei11].

Für eine ausreichende Genauigkeit und eine zusätzlich hohe Transparenz sind regelbasierte Ansätze geeignet. Der Einsatz „scharfer“ Regelbasen, welche auf der Booleschen Logik beruhen, benötigt oft sehr viele Regeln, um komplexe Sachverhalte erfassen zu können, wodurch die Transparenz und das Laufzeitverhalten der Systeme beeinträchtigt werden. Im Gegensatz dazu benötigen „unscharfe“ Regelbasen regelbasierter Fuzzy-Modelle eine wesentlich geringere Anzahl einzelner Regeln zum Erzielen der gleichen Approximationsgüte [SchA03].

Durch die Verwendung „unscharfer“ Zuordnungen wird zudem eine hohe Generalisierungsfähigkeit etabliert, wodurch eine hohe Stabilität des Algorithmus auch bei unvorhergesehenen Zustän-

den erreicht wird. Außerdem bietet der Einsatz der Fuzzy-Logic die Möglichkeit, eine modellfreie Grundlage zur Regelung zu nutzen, wodurch ein analytisches mathematisches Modell der Regelstrecke nicht erforderlich ist. Die dafür eingesetzte Regelbasis ist durch den Einsatz von Wenn-Dann-Beziehungen sehr gut nachvollziehbar und vergleichsweise einfach zu erstellen. Zusammenfassend ergeben sich die nachfolgend aufgeführten wesentlichen Aspekte für den Einsatz der Fuzzy-Logic [Ste11]:

- Möglichkeit des Einsatzes von Expertenwissen,
- Unabhängigkeit von einem mathematischen Modell der Regelstrecke,
- hohe Stabilität und Redundanz,
- vergleichsweise einfach zu erstellende Regelungsbasis,
- einfach nachvollziehbare Regelungsbasis.

4.1 Einführung in die Fuzzy-Logic

Die Nachahmung von Fähigkeiten des menschlichen Gehirns ist im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) von besonderer Bedeutung. Durch die unscharfe Kategorisierung können hoch komplexe Sachverhalte beschrieben werden, indem ähnliche Phänomene zusammengefasst werden. Die auf diese Weise erreichte Komplexitätsreduktion ermöglicht sogar die Erfassung nicht modellierbarer Systeme zur computertechnischen Verarbeitung. Der Umgang mit der menschlichen Sprache ist eine weitere Thematik der KI. Dabei sollen die Interpretation sowie die Extraktion und Verarbeitung enthaltenen Wissens der natürlichen und verständlichen Ausdrucksweise computertechnisch umgesetzt werden.

Nach diesen Voraussetzungen entwickelte Professor Lotfi Asker ZADEH die Fuzzy-Logic, durch

welche die mathematische Beschreibung eines Systems durch eine linguistische Ausdrucksweise durchgeführt und darauf aufbauend das menschliche Entscheidungsverhalten nachgeahmt werden kann. Im Gegensatz zur klassischen zweiwertigen Mengenlehre (0 oder 1) basiert sie auf der unscharfen Mengenlehre (0 bis 1), die von der mehrwertigen Logik, wie sie 1920 der polnische Logiker Jan LUKASIEWICZ beschrieb (z. B.: 0 oder 0,5 oder 1), zu unterscheiden ist [Ste11].

4.1.1 Fuzzy-Set-Theorie (Fuzzy-Mengen)

Ausgehend von der klassischen Mengenlehre führt die Erweiterung der Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge zur Fuzzy-Set-Theorie. In der herkömmlichen Mengenlehre kann die Zugehörigkeit eines Elementes die Werte „wahr“ oder „falsch“ beziehungsweise 0 oder 1 annehmen (Boolesche Logik, charakteristische Funktion X). Die Theorie der unscharfen (engl.: fuzzy) Mengen basiert dagegen auf einer stetigen Zugehörigkeitsfunktion μ , durch welche die Zugehörigkeit auf das Intervall der reellen Zahlen $[0; 1]$ ausgedehnt wird. Der Funktionswert gibt somit das Maß der Mitgliedschaft eines Elementes zu einer (Fuzzy-)Menge an. Folglich können Fuzzy-Mengen Elemente beinhalten, welche Zugehörigkeiten zwischen 0 (nicht zugehörig) und 1 (vollkommen zugehörig) aufweisen, wofür kontinuierliche Übergänge gewählt werden. Das menschliche Verständnis für komplexe Sachverhalte kann auf diese Weise besser wiedergegeben werden. Zur Imitation des menschlichen Entscheidungsverhaltens beziehungsweise zur Verknüpfung verschiedener unscharfer Aussagen wurden ausgehend von den logischen Operatoren UND, ODER und NICHT zahlreiche Funktionen zur Durchführung von Operationen mit Fuzzy-Mengen entwickelt (s. Tabelle 2 und Bild 31) [SchA00, Har08, Ste11].

Operation	Logischer Ausdruck	Logisches Symbol	Norm	Definition nach ZADEH
Durchschnitt	A UND B	$A \cap B$	t-Norm	$\mu_{A \cap B} = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$
Vereinigung	A ODER B	$A \cup B$	s-Norm	$\mu_{A \cup B} = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$
Komplement	NICHT A	$\neg A$		$\mu_{\neg A} = 1 - \mu_A(x)$

Tab. 2: Mengenoperationen [Ste11]

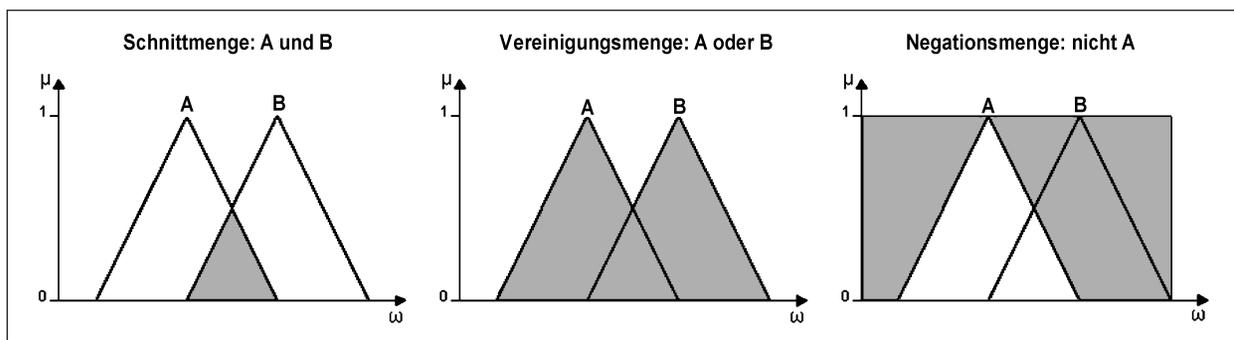


Bild 31: Mengenoperationen mit Fuzzy-Mengen [Steil11]

4.1.2 Fuzzy-Variablen

Zur Erstellung einer Fuzzy-Variablen wird ein Intervall der reellen Zahlen (Grundmenge Ω) als Obermenge in Fuzzy-Mengen unterteilt. Hierbei kann ein Element ω aus Ω mehreren Mengen angehören, da sich die Zugehörigkeitsfunktionen überschneiden. Üblicherweise ist die Summe der Zugehörigkeiten jedes Elementes in normierter Darstellung gleich eins. Aufgrund der Zuordnung linguistischer Werte zu den Fuzzy-Mengen wird die Kenngröße auch „linguistische Variable“ genannt. Eine mögliche Definition der Fuzzy-Variablen „Vorspannung“ ist in Bild 32 dargestellt [Steil11, Har08, SchA00].

4.1.3 Wissensbasis

Die verwendeten Regeln zur Abbildung der Mengen werden in der linguistischen Form „WENN, DANN“ aufgestellt. Da das in einer Regelbasis verwendete Wissen von Experten, also sachkundigen Spezialisten, stammt, wird dieses auch „Expertenwissen“ genannt. Eine (Fuzzy-)Regel könnte beispielsweise lauten: „Wenn die Spannung an der Umlenkstelle am oberen Querschnittsrand zu groß ist, dann muss die Vorspannkraft verringert werden.“ Die Fuzzy-Regeln bilden in ihrer Summe die Wissensbasis, durch welche das Entscheidungsverhalten aufgrund des beinhalteten Expertenwissens definiert ist. Dabei hat der Einsatz der linguistischen Regeln („WENN, DANN“) eine hohe Transparenz, eine intuitive Verständlichkeit und einfache Formulierungsmöglichkeiten zur Folge. Durch den Einsatz funktionaler Regeln (Fuzzy-Mapping-Regeln) werden Mengenzuordnungen vollzogen, welche eine Funktionscharakteristik aufweisen beziehungsweise sich aus einem funktionalen Zusammenhang ergeben [SchA00, Har08, Steil11].

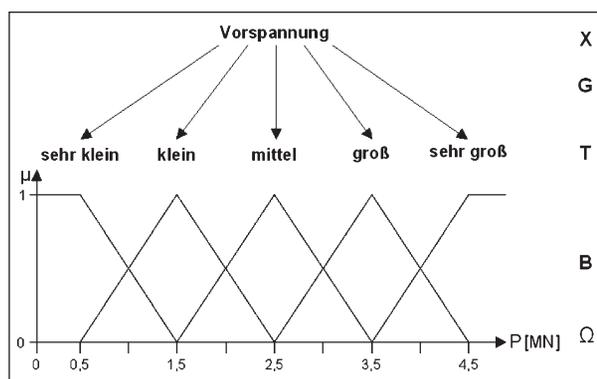


Bild 32: Linguistische Variable [Steil11]

4.1.4 Das MA-Modell

Das für die Aluminium-Traverse verwendete funktionale Fuzzy-Modell nach MAMDANI und ASSILIAN (MA-Modell, s. Bild 33) beinhaltet die folgenden fünf wesentlichen Einzelschritte zur Durchführung des Algorithmus [Steil11]:

	<p>1. Fuzzifikation Ermittlung der Zugehörigkeitsgrade μ_i der scharfen Input-Werte durch Auswertung der Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Mengen</p>
Inferenz	<p>2. Aggregation Ermittlung der aus den sprachlichen Regeln resultierenden Akzeptanzgrade μ_{res} entsprechend der Aggregations-Operatoren (UND, ODER)</p> <p>3. Implikation Anpassung der Fuzzy-Mengen der Output-Variablen durch die resultierenden Akzeptanzgrade entsprechend des Implikations-Operators (WENN, DANN)</p>
	<p>4. Akkumulation Zusammenfassung der angepassten Fuzzy-Mengen zu einer Gesamtmenge entsprechend des Akkumulations-Operators</p>
	<p>5. Defuzzifikation Ermittlung des scharfen Wertes der Output-Variablen durch Auswertung der Gesamtmenge entsprechend der Defuzzifikations-Methode</p>

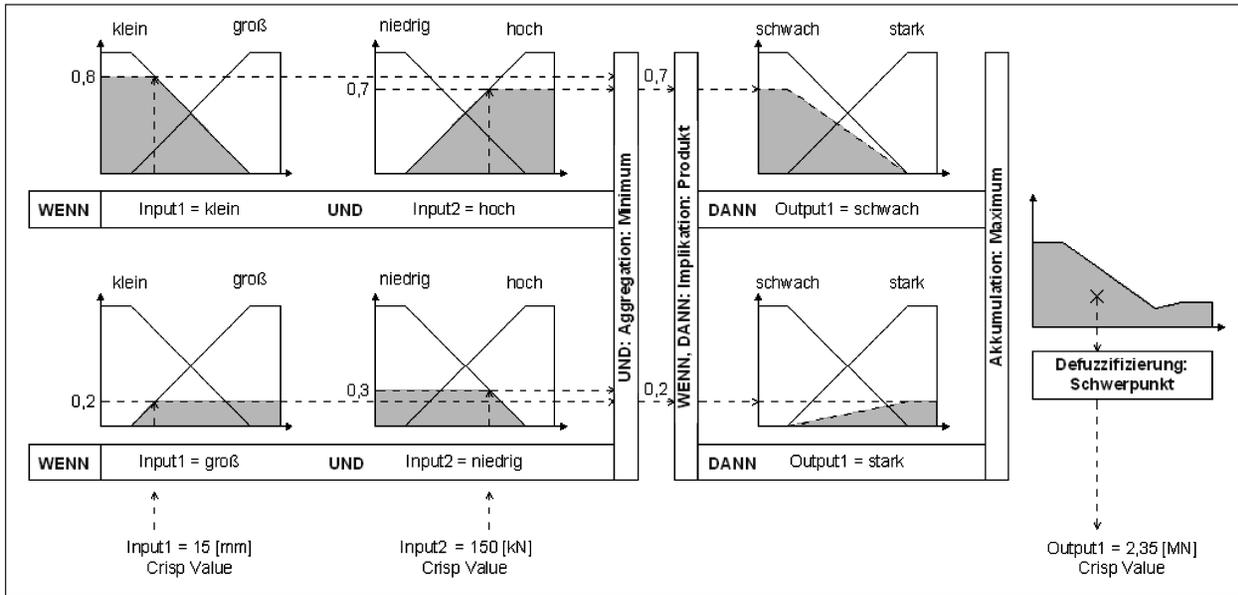


Bild 33: Ablaufschema MA-Modell [Steil11]

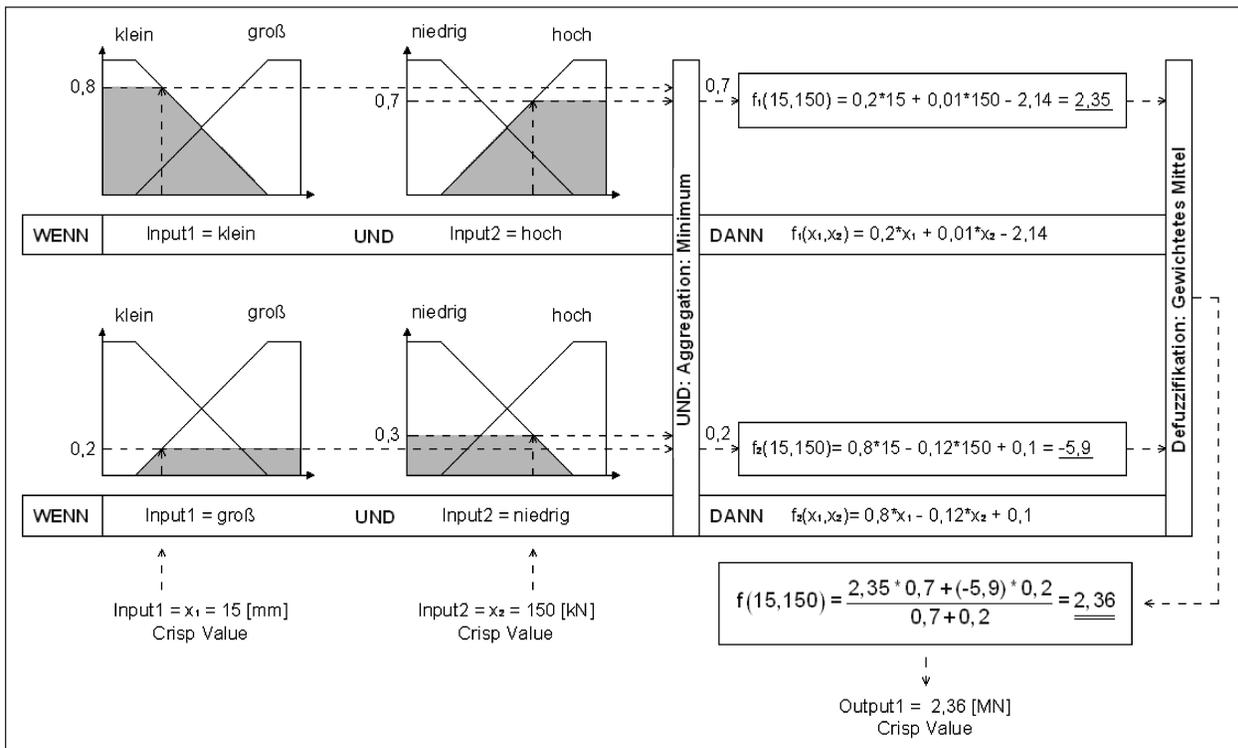


Bild 34: Ablaufschema TSK-Modell [Steil11]

4.1.5 Das TSK-Modell

Zur Vereinfachung der automatischen Erzeugung einer Regelbasis aus Trainingsdatensätzen wurde das funktionale Takagi-Sugeno-Kang-Modell (TSK-Modell, s. Bild 34) entwickelt. Es wurde in der Regel für den Plattenbalken eingesetzt (s. Kapitel 5.3.6). Im Gegensatz zum MA-Modell besteht die

Inferenz nicht aus Mengenoperationen, sondern, neben der Aggregation, aus polynomischen Funktionen, welche im Allgemeinen den nullten oder ersten Grad aufweisen. Zur Defuzzifikation wird das gewichtete Mittel aller Regelergebnisse gebildet [Steil11].

4.2 Adaptive Fuzzy-Regelungssysteme

Die aufgeführten Fuzzy-Modelle sind zwar in der Lage, die Stellgröße eines adaptiven Systems basierend auf den Eingangsgrößen zu bestimmen, können jedoch nicht ihre eigenen Parameter anpassen. Dies ist jedoch eine Voraussetzung für adaptive oder lernfähige Fuzzy-Systeme.

Die einfachste Möglichkeit, einen Controller zu adaptieren ist, den Output anhand eines modifizierbaren Parameters zu ändern. Hierzu wird das Ergebnis des Fuzzy-Systems durch einen Korrekturfaktor angepasst, der je nach Situation und Prognose eingestellt wird, um eine möglichst optimale Adaption zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz zusätzlicher Variablen, die eine Änderung des Controller-Verhaltens, beispielsweise durch die Abfrage eines Entscheidungswertes, nach sich ziehen. Die Methode des Fallbasierten Schließens ist in der Lage, die hierdurch gewonnene Anpassung weiter zu verfeinern. Das Fuzzy-System selbst wird dabei jedoch nicht verändert.

Um die Adaptivität eines Fuzzy-Systems zu etablieren, muss demnach die Fähigkeit geschaffen werden, dessen Eigenschaften anpassen zu können. Hierzu besteht die Möglichkeit, einen oder mehrere zusätzliche Parameter in Funktionen oder Operatoren zu integrieren, die dessen Resultat abändern. Durch parametrisierte Zugehörigkeitsfunktionen können die Possibilitätsverteilungen innerhalb einer linguistischen Variable geändert werden. Zur Einstellung des Entscheidungsverhaltens stehen para-

metrisierte Operatoren zur Aggregation, für MA-Modelle gewichtete oder parametrisierte Akkumulationsoperatoren und gewichtete Defuzzifikationsoperatoren und für TSK-Modelle die Variabilität der Faktoren der polynomischen Funktionen zur Verfügung.

Um ein gewünschtes Verhalten eines Fuzzy-Controllers zu erhalten, kann der Einsatz „Künstlicher Neuronaler Netze“ (KNNs) dazu verhelfen, eine Lernfähigkeit zu etablieren. Durch die „Fuzzy Assoziative Maps“ (FAM) der „Neuro-Fuzzy-Technologie“ lassen sich KNNs auf ein Fuzzy-System abbilden. Auf diese Weise ist es möglich, ein dem Fuzzy-System entsprechendes neuronales Netz überwacht zu trainieren und dieses anschließend wieder in ein Fuzzy-System zu konvertieren. Somit wird die Lernfähigkeit der KNNs genutzt, um ein gemäß den Trainingsdaten reagierendes Fuzzy-System zu erhalten. Auf diese Weise optimierte Systeme werden „Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems“ (ANFIS) genannt [Ste11].

4.3 Zur Regelung von Systemen mit adaptiver Vorspannung

Aufbau der adaptiven Fuzzy-Regelungen

Der sich aus den Versuchsaufbauten (s. Kapitel 5) ergebende Regelungskreislauf ist in Bild 35 dargestellt. Die Hauptkomponenten sind die Messwertaufnahme (Rot), das Regelungsprogramm (Grün), die Stellgröße Vorspannung (Blau) und der Versuchskörper (Schwarz). In Abhängigkeit von gemessenen Tragwerksreaktionen wird durch die Re-

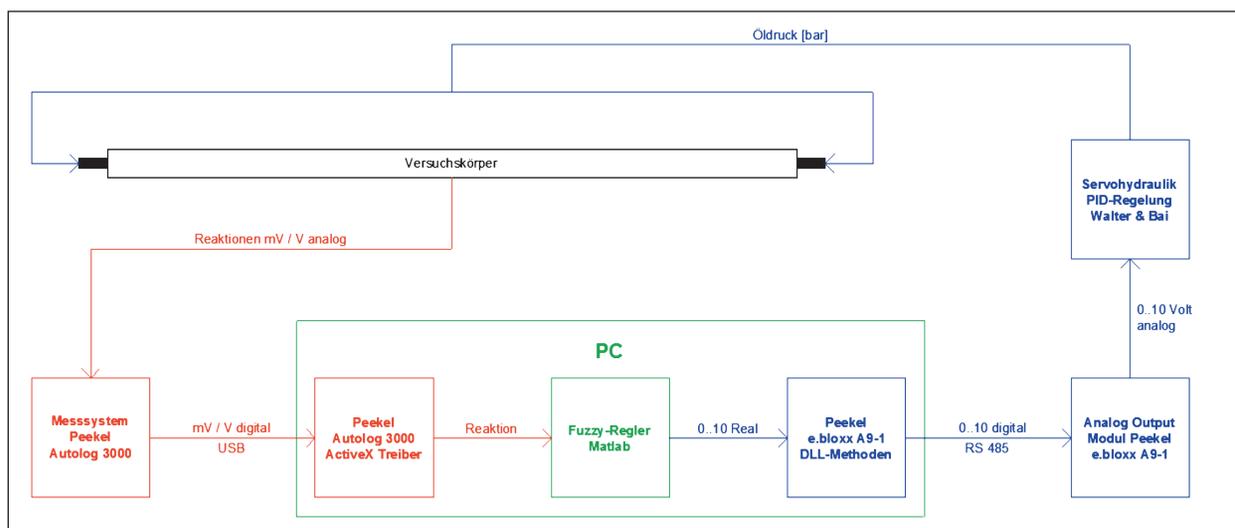


Bild 35: Allgemeiner Regelkreis [Ste11]

gelung eine optimale Vorspannkraft ermittelt, welche mittels eines hydraulischen Stellsystems auf den Versuchskörper aufgebracht wird. Die Adaption der Vorspannkraft hat wiederum eine Änderung der gemessenen Tragwerksreaktionen zur Folge und geht somit in die weiteren Adaptionsschritte ein, wodurch der geschlossene Regelkreis entsteht.

Die je nach Zielsetzung optimale Vorspannkraft wird durch den in Bild 36 schematisierten Programmablauf ermittelt. Hierbei sind die Bestandteile der Notwendigkeit einer Adaption in Grün und Bereiche der regelbaren Vorspannkraft in Blau dargestellt. Die in Rot hervorgehobenen Input- und Outputkomponenten liefern die Anbindung des Programms an den Versuchsaufbau.

Innerhalb der Regelung werden die gemessenen Reaktionen durch das eingesetzte Fuzzy-System evaluiert und somit eine Vorspannkraftänderung (ΔP) sowie die Notwendigkeit einer Anpassung der Vorspannkraft als numerischer Wert ermittelt. Sobald die evaluierte Notwendigkeit einen Grenzwert ($Grenze$) übersteigt, wird eine Adaption ausgelöst, sodass die berechnete neue Vorspannkraft auf das statische System aufgebracht wird.

Die entwickelte adaptive Regelung weist zwei variable Parameter auf. Zur Steuerung der Intensität und Häufigkeit der einzelnen Anpassungen und des einzuhaltenden Intervalls der gemessenen Tragwerksreaktionen wird die Grenze der Notwendigkeit

($Grenze_{(i+1)}$) in Abhängigkeit von der aktuellen Höhe der Vorspannkraft ($P_{(i+1)}$) angepasst. Eine Optimierung der Regelungsgüte wird mittels eines lernfähigen Faktors ($Faktor_{(i)}$) erreicht, welcher je nach Qualität der einzelnen Adaptionsschritte eine Anpassung erfährt, um die Zielsetzung der Regelung mit möglichst hoher Qualität zu verfolgen.

Zielsetzungen der Fuzzy-Regelung

- Verformungsminimierung

Ausgehend von gemessenen Durchbiegungen an diskreten Stellen soll durch die Anpassung der Vorspannkraft eine Minimierung der Verformungen des statischen Systems während der Lasterhöhung und -verringerng erreicht werden. Als modellbasiertes Verfahren stützt sich der Regelungsalgorithmus auf die numerische Analyse des idealisierten Tragwerkes, durch welche die Regelbasis zur exakten funktionalen Abbildung der gemessenen Durchbiegungen auf die zugehörige Vorspannkraftänderung erzeugt wird [Ste11].

- Spannungsregulierung

Die Einhaltung von Spannungskriterien, beispielsweise um während der Belastung die Dekompression eines vorgespannten Querschnittes zu gewährleisten, wird anhand gemessener Dehnungen an diskreten Messstellen vollzogen.

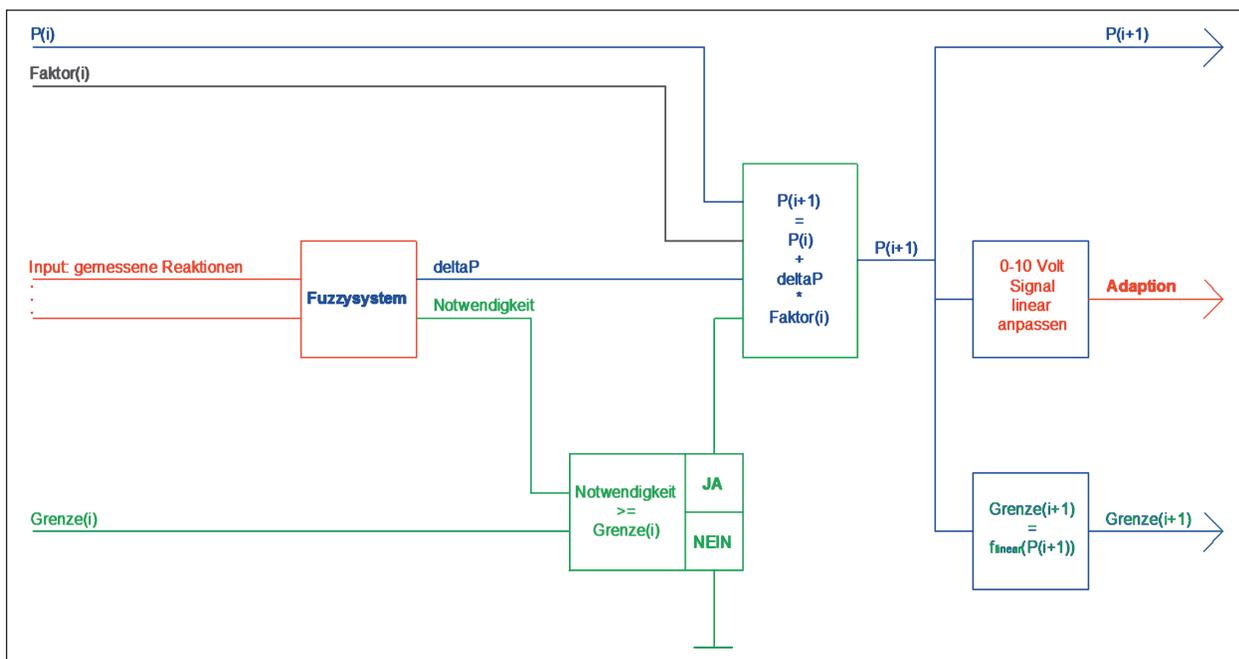


Bild 36: Allgemeines Programmschema [Ste11]

Dabei sollen vorgegebene Dehnungsgrenzen eingehalten und eine optimierte Ausnutzung des Querschnittes durch angepasste Schnittgrößen erreicht werden. Zur Anwendung kommt ein modellfreies Verfahren, welches im Sinne der Fuzzy-Logic allgemeines Expertenwissen nutzt, um die Wissensbasis aufzustellen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (s. Kapitel 5) wurden beide Regelungsgrundlagen an den jeweiligen Versuchskörpern erfolgreich eingesetzt.

Besonderheiten und Anforderungen beim Einsatz an extern vorgespannten Brückenbauwerken

Im Hinblick auf den Einsatz adaptiver Vorspannung bei Brückenbauwerken aus Beton sind besondere Einflüsse, wie Verkehrslasterhöhungen oder Änderungen der Baustoffeigenschaften, zu beachten, welche die Tragfähigkeit des Tragwerkes herabsetzen. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über wichtige zu beachtende Einflüsse bei Spannbetonbrücken.

Bei der Verformungsminimierung als Adaptionziel werden sämtliche Einflüsse berücksichtigt, welche Verformungsänderungen nach sich ziehen. Eine Ausnahme bilden Temperaturen und die ungleichmäßige Stützensenkung, welche eine Verrückung der Systemlinie in Bezug auf den Ursprungspunkt der Messung zur Folge hat. Hierdurch wird den Messwerten und somit dem Regelungsverhalten ein entsprechender Fehler zugeführt, der die Qualität der Anpassungen beeinträchtigt. Einflüsse aus Kriechen, Schwinden und Relaxation werden unter Einsatz einer Kaskadenregelung kompensiert. Der

Aufbau besteht aus zwei Reglern, dem Fuzzy-Regler als Hauptregler und einem sekundären (untergeordneten) PID-Regler (PID = Proportional Integral Differential), der als Spannkraftregler im geschlossenen Kreis Abweichungen des Ist-Werts vom Soll-Wert des Fuzzy-Reglers kontinuierlich kompensiert (s. auch Kapitel 5.1.1).

Bei einem System mit statischer Unbestimmtheit müssen zusätzlich die sich ergebenden Schnittgrößenverläufe und auch die Möglichkeit des Entstehens von Zwangsbeanspruchungen in der Regelungsgrundlage berücksichtigt werden. Zur Abbildung eines nichtlinearen Materialverhaltens können die Fuzzy-Mengen entsprechend angeordnet werden, sodass aus den Verknüpfungen der Fuzzy-Variablen der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie ähnlich einer Kraft-Verformungs-Kurve resultiert. Zusammenhänge, welche aus einer statischen Unbestimmtheit resultieren, können innerhalb der Regelbasis berücksichtigt werden. Die auf das Verhalten des statischen Systems angepasste Regelungsreaktion benötigt gemäß der zu erfüllenden Zielsetzung die Analyse des Tragwerkes, die geeignete Auswahl von Sensoren sowie deren Anordnung und schließlich die Bildung einer spezialisierten Regelbasis.

Denkbar sind zum Beispiel Fuzzy-Systeme, deren Input-Variablen sowohl aus Dehnungen als auch aus Verformungen bestehen. Zur Ermittlung der notwendigen Vorspannkraftänderung könnte die Regelbasis eine grobe Orientierung anhand der Dehnungen und eine Feinabstimmung aufgrund der Durchbiegungen beinhalten. Dies wäre gleichbedeutend mit dem Primärziel der Einhaltung der Dekompression und einem Sekundärziel der Verformungsminimierung.

Langzeitige Einflüsse	Schwinden des Betons Kriechen des Betons Relaxation des Spannstahls Langfristige Verkehrsentwicklung Langfristige Entwicklung der Temperatureinwirkung Ungleichmäßige Stützensenkung Reibungsverluste der Vorspannung
Semi-temporäre Einflüsse	Jahresverlauf der Verkehrsdichte Jahresverlauf der Temperatureinwirkung
Kurzzeitige Einflüsse	Tagesverlauf der Verkehrsdichte Tagesverlauf der Temperatureinwirkung Windeinwirkung Lastfall „Stau“
Sonstige Einflüsse	Nichtlinearität des Betons Statische Unbestimmtheit

Tab. 3: Auswahl zu beachtender Einflüsse bei Spannbetonbrücken [nach Stei11]

Eine weitere Optimierung kann durch den Einsatz eines ANFIS vorgenommen werden, wobei die Trainingsdaten auf Finite-Element-Berechnungen des modellierten Systems beruhen. Die Notwendigkeit einer Vielzahl von Trainingsdatensätzen, denen das gewünschte Verhalten zu Grunde liegt, setzt jedoch einen entsprechenden numerischen Aufwand zur Datengenerierung voraus.

Ein Ansatz, der von [Bar06] im Rahmen seiner Dissertation über adaptiv geregelte Spannbetontragwerke erarbeitet wurde, sieht als Bestandteil des Regelungssystems eine Kurzzeitregelung vor, die auf einer Früherkennung der Tendenz von Verkehrslasten aufbaut. Dabei sollen Fuzzy-Regeln aus „Expertenwissen“ hergeleitet werden. Diese können beispielsweise lauten:

- An Wochentagen steigt der Verkehr morgens sehr schnell und stark (Hauptverkehrszeit). Danach hält der Verkehr mehr oder weniger bis zur nächsten Hauptverkehrszeit am Nachmittag an und nimmt anschließend langsam ab.
- An Wochenenden ist viel weniger Verkehr zu registrieren.
- Im Sommer erwärmt sich die Brückenoberfläche viel mehr als die Unterseite.

Eine kurzfristige Identifikation kritischer bevorstehender Fahrzeuglasten kann ermöglicht werden, indem WTS-Sensoren (Wireless Traffic Sensor) im Rahmen eines Systems zur Achslastermittlung von Fahrzeugen in den Fahrbahnbelag mit einem ausreichenden Abstand vor der Brücke eingebettet werden. Durch die Übermittlung entsprechender Daten an das Fuzzy-Regelungssystem kann bei Bedarf rechtzeitig und mit angemessener Geschwindigkeit reagiert werden. Dabei ist auch bei der anschließenden Entlastung des Bauwerks zu beachten, dass durch die möglichen Regelungsvorgänge die lastinduzierten Spannungen innerhalb des zulässigen Bereichs verbleiben.

Die Stabilität des Reglers muss ebenfalls gewährleistet werden. Stabilitätsprobleme adaptiver Regelungen sind meist auf nichtmodellerte Dynamik oder äußere Störfaktoren zurückzuführen [Bar06]. Wenn die Regelung aufgrund verhältnismäßig langsamer Belastungsaufbringung auch langsam erfolgt, wie dies aus praktischen und anlagebedingten Gründen in den in Kapitel 5 beschriebenen Versuchen der Fall ist, treten keine nennenswerten dynamischen Vergrößerungseinflüsse auf. Bei Brü-

cken sollte die Regelung mit ausreichender Geschwindigkeit den Einflüssen besonders schwerer und schnell fahrender Fahrzeuge entgegenwirken können. Die maximale Kolben- bzw. Reaktionsgeschwindigkeit der Aktuatoren muss allerdings so begrenzt werden, dass das Zeitintervall jeder Adaption das Mehrfache der Eigenfrequenz-Periodendauer des Brückenüberbaus beträgt [PaUS08]. Bei adaptiven Systemen sind im Allgemeinen keine Richtlinien für die genaue Bestimmung der Adaptiongeschwindigkeit vorhanden, sodass dies durch Erfahrungen und Optimierungen erfolgt [Bar06].

5 Experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung des Verhaltens adaptiv geregelter Strukturen wurden Versuche an zwei Trägern mit unterschiedlichem Aufbau und Material durchgeführt. Beim ersten Versuchskörper handelt es sich um eine vorgespannte Aluminium- Traverse, beim zweiten um einen extern vorgespannten Betonplattenbalken. Für jeden Versuchskörpertyp wurde ein spezialisierter Fuzzy-Regler entwickelt. Während die Regelung der Traverse auf Basis der gemessenen vertikalen Verformungen an den Umlenkstellen erfolgte (modellbasiert), wurden die an diskreten Stellen gemessenen Dehnungen des Bewehrungsstahls als Eingangsgrößen für die Regelung des Spannbetonbalkens herangezogen (modellfrei). Im Folgenden wird der allgemeine Versuchsaufbau erläutert. Dabei werden Informationen zu dem Regelungskonzept, der Anbindung der Regelung an die Hardware, dem Aufbau der Hydraulikanlage sowie den verwendeten Aktuatoren gegeben. Anschließend werden die beiden Versuchskörper vorgestellt.

Zur Umsetzung der entwickelten Regler-Lösungen wurde das Programm Matlab[®] von The MathWorks Inc. eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine interaktive objektorientierte Entwicklungsumgebung zur numerischen Lösung mathematischer Probleme basierend auf Matrizenrechnung. Neben der eigenen Programmiersprache der vierten Generation (4GL) sind die Möglichkeiten zur Visualisierung von Lösungen sowie die Erweiterungsmöglichkeit durch so genannte „Toolboxen“ von besonderer Bedeutung. Hierdurch wird ein weites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten für unterschiedlichste Problemstellungen gegeben [Sch08, Stei11].

Zur Verfügung steht beispielsweise die Fuzzy-Logic-Toolbox von The MathWorks Inc. Diese ist eine Sammlung verschiedener Funktionen in Form von Programmdateien (*.m-Dateien) zur Erstellung, Simulation und Darstellung von Fuzzy-Logik-Inferenzsystemen (FIS) [TMW02, Stei11].

5.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

5.1.1 Regelungsaufbau (Kaskadenregelung)

Die Regelung der Vorspannkraft ist als Kaskadenregelung aufgebaut. Der Fuzzy-Regler übernimmt dabei als übergeordneter Regler die Aufgabe „Verformungsminimierung“ bzw. „Spannungsregulierung“. Bei der Druck- bzw. Spannkraftregelung als weitere Teilstrecke kommt ein analoger PID-Regler (PID = Proportional Integral Differential) zum Einsatz. Dieser arbeitet im geschlossenen Regelkreis und regelt Abweichungen vom Sollwert des Fuzzy-Reglers selbstständig aus. Das hat den Vorteil, dass der Fuzzy-Regler somit in einem übergeordneten Regelkreis arbeitet, der die Aufgabe übernimmt, die entsprechende Führungsgröße zu erzeugen und diese an den Hilfsregelkreis mit der Teilstrecke „Druck“ weiterzugeben. Die Parameter bezüglich des Zeitverhaltens der Druckregelung bleiben dabei im vorliegenden Fall über fein einstellbare mechanische Potenziometer frei veränderbar, was eine flexible Anpassung des Systemverhaltens vor Ort ermöglicht (s. Kapitel 5.2.6). Gemäß den Bezeichnungen aus DIN 19226 handelt es sich bei dem Fuzzy-Regler um den Führungsregler (Hauptregler) und bei dem PID-Regler des Druckregelkreises um den Folgeregler (Hilfsregler). In Bild 37 ist ein Wirkungsplan des Regelungskonzeptes dargestellt.

5.1.2 Anbindung der Regelung

Der Regelungsaufbau beinhaltet Signalübertragungen von und zu externen Modulen. Dabei müssen Messwerte in das Regelungsprogramm eingebracht und ein analoges Ausgangssignal aus dem Programm heraus gesendet werden. Für die Erfassung und Konditionierung der Messwerte wurde das modulare Messsystem AUTOLOG 3000 der Firma Peekel Instruments verwendet (s. Bild 38). Die Anbindung des Messsystems an den Prozessrechner erfolgte über die CANBUS-Schnittstelle des AUTOLOG 3000, der über einen externen Konverter an einen USB-Port des PC anschließbar ist.

Zur Integration der Messhardware in die Matlab®-Umgebung wurde der von Peekel Instruments bereitgestellte ActiveX-Treiber genutzt. ActiveX ist ein Softwarekomponenten-Modell von Microsoft für eine von der Programmiersprache unabhängigen Einsetzbarkeit unterschiedlicher Softwareobjekte. Zur Nutzung des Treibers in Matlab® ist es notwendig, einem „Event“, welcher bei jeder Erfassung eines neuen Messwertes ausgelöst wird, eine bei Eintritt auszuführende Funktion zu übergeben. Der Programmablauf ist wie folgt [Stei11]:

```
% Instanz p des ActiveX-Servers erstellen
p=actxserver('CA3460NET.CA3460NetCtrl.1')

% Oberfläche für Einstellungen aufrufen
p.ViewProperties

% Einen Event registrieren und Funktion
übermitteln
p.registerevent({'NewLogValue' 'Funktionsname'})
```

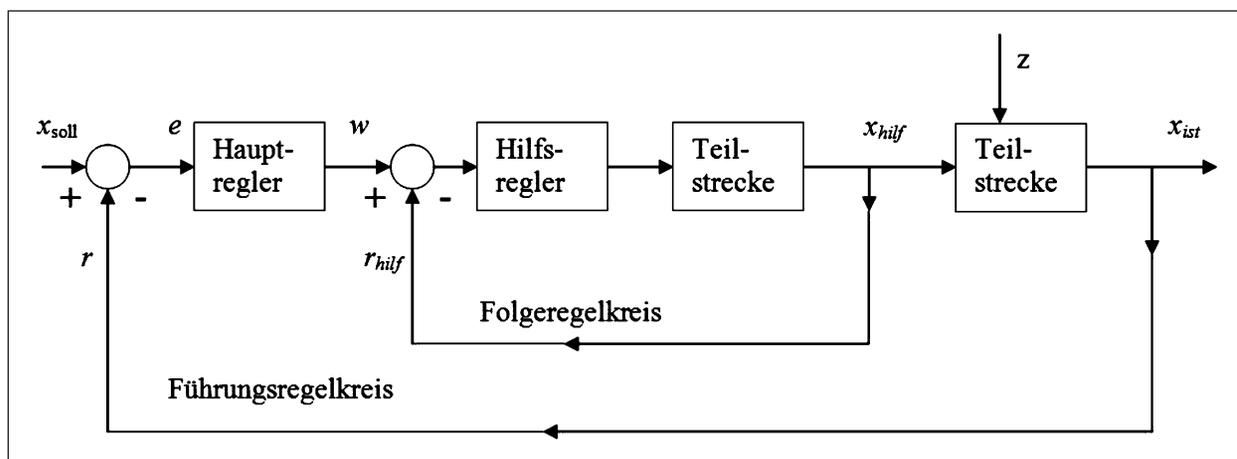


Bild 37: Wirkungsplan einer Kaskadenregelung [Küh11]

```
% Messung starten
    p.WantLogData=2

% Messung beenden
    p.WantLogData=0

% alle Events entfernen
    p.unregisterallevents

% Instanz p entfernen
    p.release
    clear p
```

Um der hydraulischen Stelleinrichtung den aktuellen Sollwert der Vorspannkraft (Reglerausgabe) zu übermitteln, wird ein Eingangssignal zwischen 0 und 10 Volt für den PID-Regler benötigt. Dieser regelt automatisch den Arbeitsdruck der hydraulischen Kolben, wodurch die aufgebrachte Vorspannkraft angepasst wird. Eine Spannung von 0 Volt entspricht dabei einem Druck von 0 bar und keiner Vorspannkraft, 10 Volt entsprechen dem maximalen Arbeitsdruck und der maximal möglichen Vorspannkraft. Für die Ausgabe des Signals wurde das Modul e.bloxx A9-1 von Peekel Instruments zur Erzeugung eines analogen Ausgangssignals verwendet (s. Bild 38) [Ste11].

Die Anbindung des Moduls in Matlab® erfolgte anhand einer DLL-Datei (Dynamic Link Library). Diese beinhaltet Methoden, die die Kommunikation mit dem Modul ermöglichen. Die Anwendung der Programm-bibliothek wird folgendermaßen erreicht [Ste11]:

```
% Laden der Bibliothek
    Loadlibrary('Ismbus32', 'd:\MSMBUS32.h')

% Aufruf einer Methode der Bibliothek durch
calllib
% Initialisierung eines Kanals (211 = e.bloxx A9-1)
    calllib('Ismbus32','CDDLG_SetModuleKind',211)
```

```
% (BaudRate=115200/Comport=1/Format=8E1/
Protocol=Localbus)
    calllib('Ismbus32','CDDLG_InitPort',115200,1, 1,3)

% Ändern der Spannung (Volt) des Kanals
% (Adresse=1/Kanal=1/Spannung=5 [Volt])
    calllib('Ismbus32','CDDLG_SendChannelReal',
1,1,5)

% Beenden und schließen
    calllib('Ismbus32','CDDLG_SendChannelReal',
1,1,0)
    unloadlibrary('Ismbus32')
```

5.1.3 Analoger PID-Regler

Der eingesetzte PID-Regler ist Bestandteil der Mess- und Regeleinheit „Servoreg 5000“ von Walter + Bai (s. Bild 39). Über den eingebauten Servoverstärker bzw. Servoregler wurden das Servoventil und das Reglerverhalten über Potenziometereinstellungen angepasst. Der aktuelle Druck am Ausgang des Servoventils kann an einer eingebauten Digitalanzeige direkt abgelesen werden.

5.1.4 Servogeregelte Hydraulikanlage

Zur Erzeugung der hydraulischen Energie des Stellantriebes wurde ein Pumpenaggregat der Firma Walter + Bai verwendet. Das Aggregat aus dem Bestand der Versuchshalle des Instituts für Massivbau besitzt ein eingebautes Servoventil und wurde für den Betrieb an der in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Mess- und Regeleinheit (Servoreg 5000) vorbereitet. Die Hauptpumpe (Konstantpumpe) des Aggregats hat eine Förderleistung von 8,0 l/min. Unter Vernachlässigung aller Verluste und Einflüsse durch kapazitives Verhalten der angeschlossenen Komponenten ergibt sich für diese Förderleistung eine theoretische Kolben-

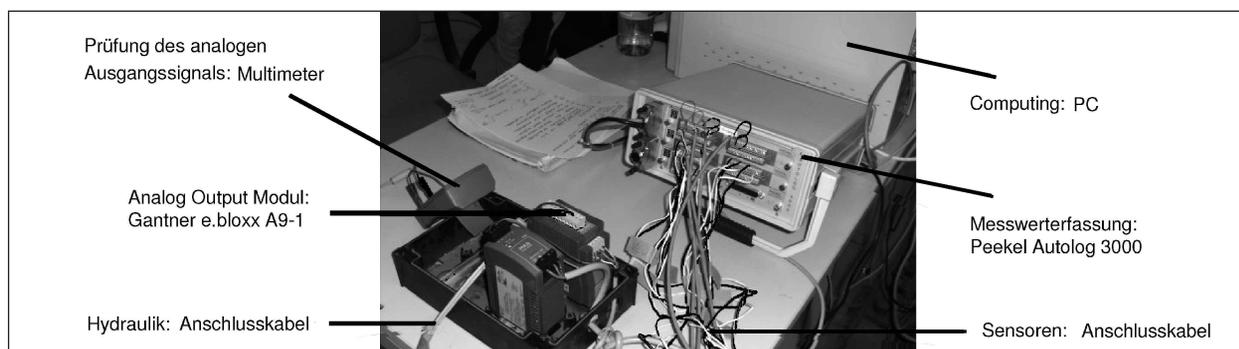


Bild 38: Externe Module zur Anbindung der Regelung [Ste11]

geschwindigkeit der Aktuatoren von ca. 6 mm/s. Der maximale Arbeitsdruck des Aggregats beträgt 350 bar und kann bei Bedarf durch ein von außen bedienbares Druckbegrenzungsventil heruntergesetzt werden. Das Drucköl im Pumpenkreislauf wird den Anforderungen für den Betrieb von Servoventilen entsprechend fein gefiltert und

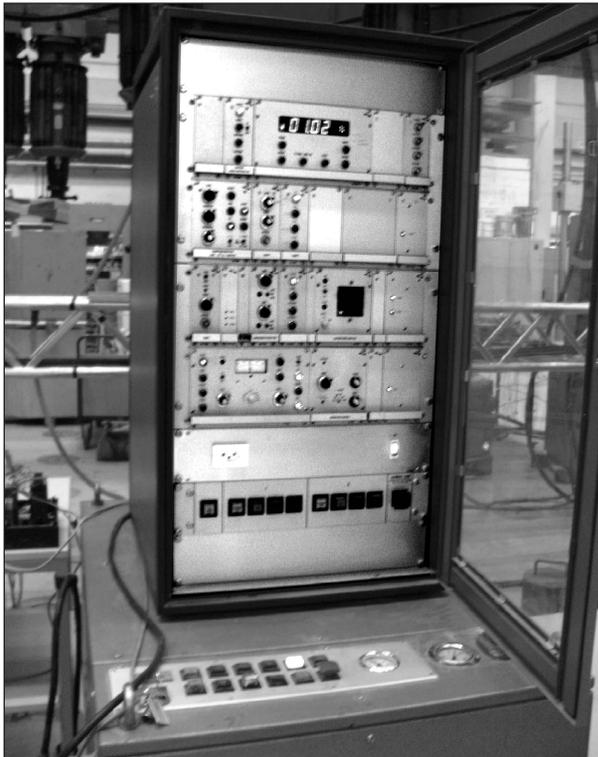


Bild 39: Servoreg 5000 von Walter + Bai

durch eine Wasserkühlung ständig gekühlt. Die aktuelle Temperatur des Drucköls ist ebenfalls über ein Anzeigeinstrument ablesbar. Der Anschluss der hydraulischen Aktuatoren erfolgte parallel an einem Ausgang des Servoventils, der zweite Ausgang blieb verschlossen (einfach wirkende Kolben). Dies führt dazu, dass die Drosselung des Volumenstromes nur über eine Steuerkante des Ventilkolbens erfolgt und der Druckverlust halb so groß ist (ca. 35 bar) wie bei Verwendung doppelt wirkender Zylinder [Küh11]. Bild 40 zeigt eine Darstellung des hydraulischen Schaltplans der eingesetzten Anlage.

Das vom e.bloxx generierte analoge Outputsignal (0 bis 10 Volt) stellt den Sollwert zwischen 0 und 100 % bzw. 0 und 200 bar des PID-Reglers dar, der den Öldruck auf die Hohlkolbenzylinder (Aktuatoren) und somit die Vorspannkraft vorgibt. Hierbei gehen sowohl der analoge Sollwert als auch der gemessene Ist-Wert der vorhandenen Stellgröße (Öldruck) in die analoge PID-Regelung ein. Diese steuert das Stellglied (Servoventil), welches die Stellgröße entweder erhöht oder abmindert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die gewünschte Vorspannkraft auf das statische System aufgebracht wird und bis zur nächsten Änderung bestehen bleibt. Die Fuzzy-Regelung regelt somit den übergeordneten Fuzzy-Regelkreis.

Für die Versuche wurde der maximale Pumpendruck von 350 bar über das einstellbare Druckbegren-

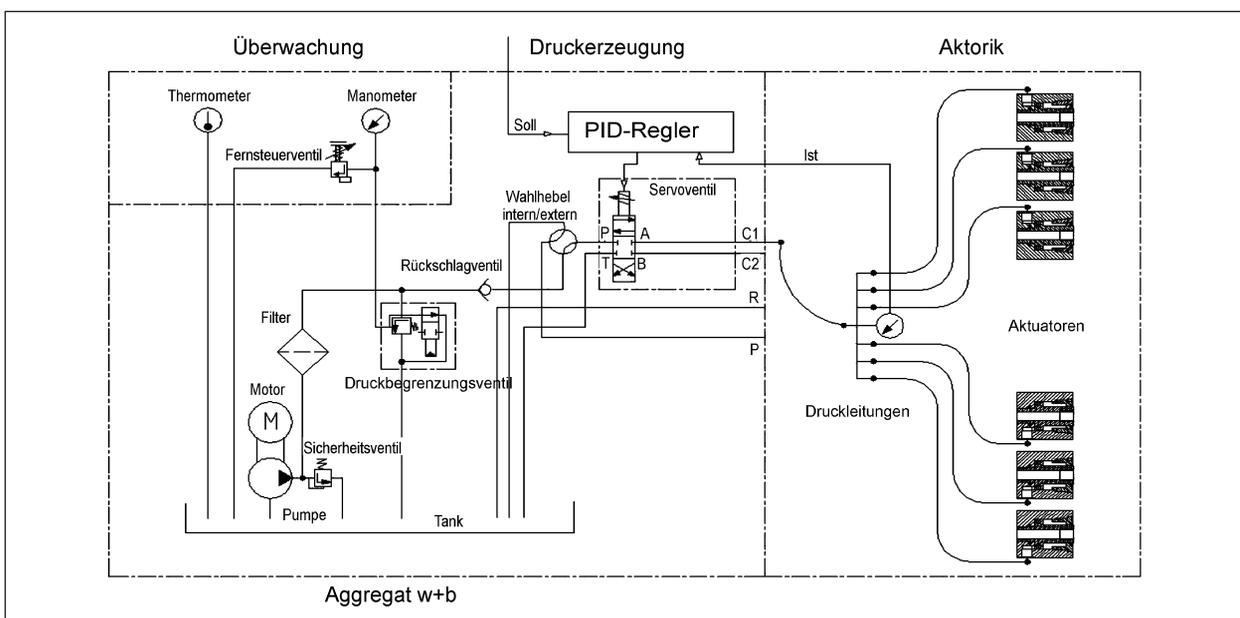


Bild 40: Hydraulischer Schaltplan [Küh11]

zungsventil auf 230 bar begrenzt, wodurch die Gewährleistung des Maximaldruckes von 200 bar nach Verlusten an der Steuerkante des Servoventil-Ausgangs eingehalten ist. Der für die hydraulische Anlage erforderliche Mindestdruck liegt mit ca. 2 bar zwischen 1,02 und 1,05 % des Maximaldruckes von 200 bar. Da der Mindestdruck auf den Sollwert aufaddiert wird, entspricht ein Signal von 10 Volt oder 100 % folglich einem angezeigten Wert von 101,02 %.

Um den Einsatz des vorhandenen Servoventils zu ermöglichen, wurde die zulässige Druckänderung auf 10 % des Maximaldruckes bzw. auf 1,0 Volt Signaländerung begrenzt. Aus Sicherheitsgründen wurde das Zeitintervall zur Aufbringung einer Druckänderung durch Anordnung eines Signal-Integrators auf eine Länge von 2,0 Sekunden ausgehend. Dadurch wird die zuverlässige Funktionalität der Anlage gewährleistet.

Die Einstellungen der hydraulischen Anlage zur Regelung der Vorspannkraft sind in Tabelle 4 zusammengefasst, wobei Einschränkungen für die Fuzzy-Regelung hervorgehoben sind.

Maximaler Volumenstrom Pumpe	8,00 l/min
Maximaler Volumenstrom Servoventil	20,00 l/min
Pumpendruck	350,00 bar
Druckbegrenzung	230,00 bar
Maximum Arbeitsdruck	200,00 bar
Druckverlust ca.	15,00 % 30,00 bar
Minimaldruck für Anlage	1,02 % 2,31 bar 0,00 kN
Maximale Vorspannkraftänderung	10,00 ± % 20,00 ± bar 22,61 ± kN
Zeitliche Verzögerung	2,00 Sekunden
Minimum Adaptionfaktor	0,58 [-]
Maximum Adaptionfaktor	1,42 [-]
Minimum Ausgangssignal	0,00 Volt 0,00 bar 0,00 kN
Maximum Ausgangssignal	10,00 Volt 200,00 bar 226,08 kN
Maximale Signaländerung	1,00 ± Volt

Tab. 4: Einstellungen bezüglich der Hydraulikanlage [Ste11]

5.1.5 Aktuatoren

Im Rahmen der Versuche wurden Einzellitzen (Monolitzen) der Firma SUSPA DSI verwendet. Zum Vorspannen derartiger Litzen auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk werden in der Regel Einhandpressen oder auch einfache Hohlkolbenzylinder eingesetzt. Beim Vorspannen mit Pressen, die eher als Spannwerkzeug und weniger als Aktuator zu sehen sind, wird die Litze von griffigen Spannbacken eingeklemmt und hydraulisch gezogen. Die zum Vorspannen verwendeten Hohlkolbenzylinder hingegen sind vielseitig einsetzbare Standardkomponenten aus dem Bereich der Hebetchnik bzw. der Hydraulik im Allgemeinen. Um Litzen oder Spannstäbe auf diese Weise vorzuspannen, wird eine zusätzliche Abstützungsstruktur (Spannstuhl) benötigt, die das eigentliche Verankerungselement überbrückt, es aber dennoch zum Einsetzen der Spanneile bzw. zum Nachziehen der Stützmutter bei Spannstäben zugänglich belässt [Küh11].

Resultierend aus einer Marktrecherche wurden Spannpressen aufgrund ihrer Größe und ihres relativ hohen Gewichts ausgeschlossen. Die Beaufschlagungsart der Litze und die fehlende Leckölfreiheit stellen weitere Ausschlusskriterien dar. Unter den gängigen Hebe- und Spannzylindern hingegen befinden sich zahlreiche Produkte der unterschiedlichsten Hersteller in der Leistungsklasse bis 20 t. Bestehende Fragen bezüglich dynamischer Eigenschaften, Eignung für den Dauereinsatz, Leckölanfalls und Reibungsfaktoren konnten nicht eindeutig beantwortet werden. Für den herkömmlichen Einsatz zum Heben und Spannen sind diese Aspekte weniger relevant. Jedoch werden im Bereich des Maschinenbaus bekanntermaßen ebenfalls Hohlkolbenzylinder verwendet, welche bei Fertigungsmaschinen zum Festspannen von Werkstücken und Apparaten unter teils rauen Umgebungsbedingungen (Schmutz, Feuchtigkeit, hohe Temperaturen, Späne usw.) im Dauereinsatz dynamisch betrieben werden.

Einfach wirkende Hohlkolbenzylinder der Firma Germa GmbH wurden speziell hinsichtlich der Anforderungen bei diesem Projekt modifiziert. Die Anpassungen betrafen die Kippsicherheit des Hohlkolbens bedingt durch die Bauweise (Plunger-Zylinder) und das Dichtungssystem. Da bei der Anwendung als Aktuator in einem System zur geregelten adaptiven Vorspannung keine integrierte Druckfeder für die Rückstellung des Kolbens beim Entlasten benötigt wurde, konnte auf diese verzichtet

und in den dadurch frei gewordenen Bauraum ein leistungsfähigeres Dichtungssystem sowie Führungsbänder zur Stabilisierung des Kolbens gegen Kippen eingebaut werden. In der Größenordnung der maximalen Vorspannkraft für eine Monolitze kommt die leistungstärkste Variante der Hohlkolbenzylinder vom TYP 82-50 (s. Bild 41) zum Einsatz. Der höchste Arbeitsdruck liegt bei 500 bar, was bei einer Kolbenfläche von $37,19 \text{ cm}^2$ (incl. Verlusten) einer Kraft von 186 kN entspricht. Die Endanschläge von Kolben und Zylindern sind zudem dynamisch voll belastbar, sodass der Hub nicht überwacht werden muss. Im Auslieferungszustand sind die Zylinder bereits gespült und mit Drucköl vorgefüllt. Die Zylinder haben einen Durch-

messer von 100 mm und eine Höhe von 110 mm. Der Durchmesser der Durchgangsbohrung des Hohlkolbens beträgt 27 mm [Küh11].

Die Aktuatoren verfügen über einen relativ geringen Hub von 16 mm, der für den eigentlichen adaptiven Spannvorgang zwar ausreichend ist, aber wenig Spielraum für den Ausgleich von Schlupf der Verankerung oder für das Aufbringen einer Grundvorspannung lässt. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Vorspannkonstruktion entwickelt, bei der über acht M12-Schrauben zwei massive Stahlplatten zwischen Verankerung und Aktuator auseinander geschoben werden (s. Bild 42 und Bild 43). Durch allmähliches kreuzweises Anziehen der Schrauben kann die Grundvorspannung der Litzen aufgebracht werden [Küh11].

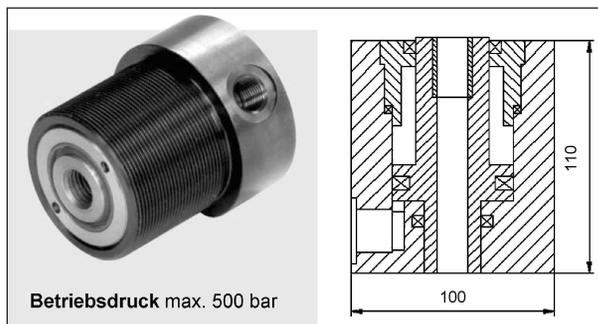


Bild 41: Eingesetzter Aktuator [ger11]



Bild 42: Vorspannvorrichtung

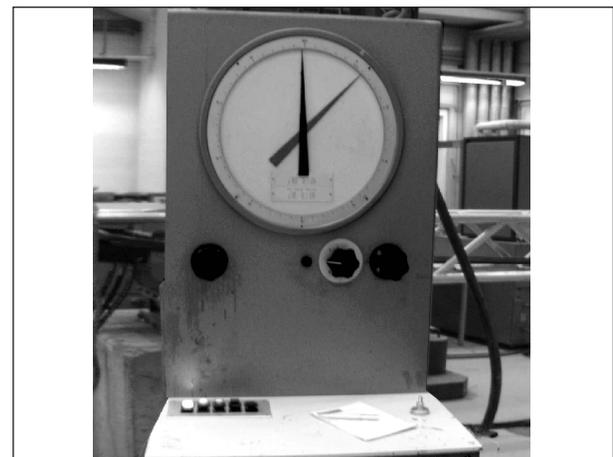


Bild 44: Hydraulisches Steuerpult zur Belastung

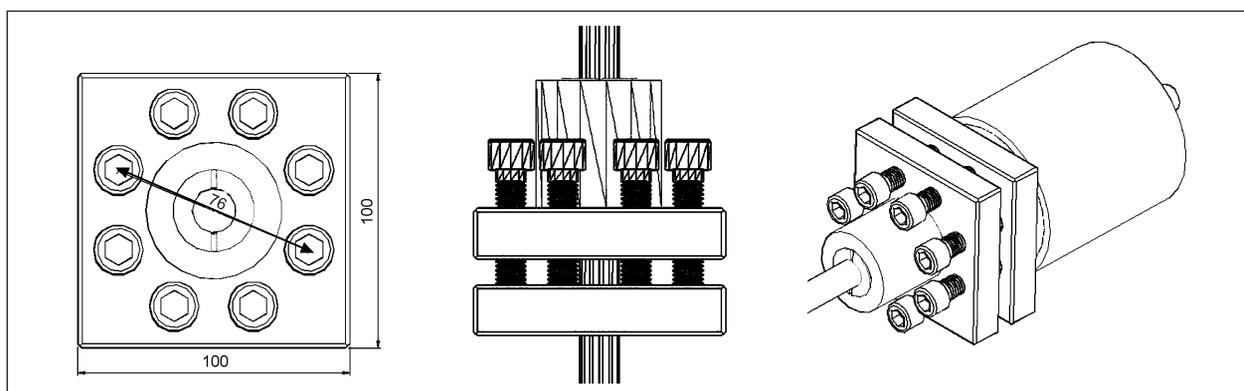


Bild 43: CAD-Detail der Vorspannvorrichtung [Küh11]



Bild 45: Prüfzylinder zur Belastung

s. Bild 45) verwendet. Damit die Möglichkeit besteht, durch die Erhöhung der Vorspannung eine Verformungsrückstellung zu erhalten, wird diese Anlage kraftgesteuert geregelt. Zu beachten ist hierbei, dass nur ein Bruchteil ($12/500 = 2,4\%$) der möglichen Kraft aufgetragen werden darf. Der manuelle Lastauftrag bedarf somit einer hohen Feinfühligkeit. Ein besonderes Phänomen ist zu erwarten, da bei dieser Art der Belastung in Zusammenhang mit dem Aggregat zur Vorspannung zwei hydraulische Anlagen gegeneinander arbeiten.

5.2 Versuchsträger 1: Aluminium-Traverse

Beim ersten Versuchsträger handelt es sich um eine Aluminiumtraverse als vorgespannter Einfeldträger (s. Bild 46). Die Vorspannung wird mittels drei Monolitzen mit einer Querschnittsfläche von jeweils 150 mm^2 durchgeführt. Die Spannstahlführung weist zwei Umlenkstellen in den Drittelspunkten des Trägers bei zentrischer Verankerung auf. Zur Regelung kam der in Kapitel 5.2.7 vorgestellte Fuzzy-Regler zum Einsatz, der gemäß Kapitel 4.3 an die notwendige Hardware angeschlossen wurde. Zur Aufbringung der Vorspannkraft wurden die in Kapitel 5.1.5 beschriebenen hydraulischen Hohlkolbenzylinder eingesetzt.

5.2.1 Vorteile der Traverse als Versuchsträger mit adaptiver Vorspannung

Aufgrund der Materialeigenschaften von Aluminium ist für einen im Vergleich zum Baustoff Beton deutlich größeren Verformungsbereich ein linear-elastisches und duktiler Verhalten zu erwarten. Daher ist

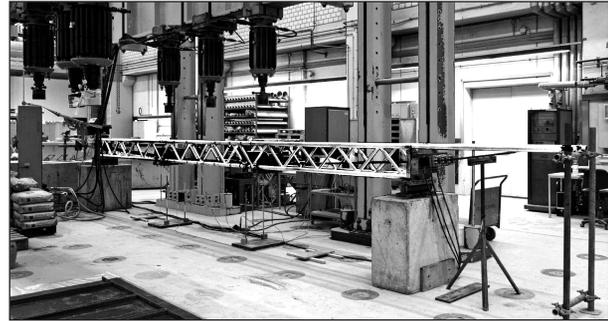


Bild 46: Versuchskörper 1: vorgespannte Aluminiumtraverse

es möglich, das Verhalten der entwickelten Fuzzy-Regelung zu testen und Beschädigungen des Versuchskörpers durch mögliche Stöße oder Schwingungen zu vermeiden, die bei den Einstellarbeiten der hydraulischen PID-Regelung oder durch ein anfängliches Fehlverhalten des Fuzzy-Reglers auftreten könnten. Somit lässt sich eine gute Basis zur Weiterentwicklung des Reglers für die Anwendung an Spannbetonbauteilen schaffen, die anschließend anhand von Versuchen an einem extern vorgespannten Stahlbetonplattenbalken unter Beweis gestellt wird.

Da die erwartete Verformungsminimierung der Traverse unter Einsatz der entwickelten Regelung bei 90% liegt, ist außerdem die Realisierung eines Versuchsaufbaus mit hoher Aussagekraft der Ergebnisse möglich. Nicht zuletzt ermöglicht die Transparenz der Fachwerkkonstruktion eine direkte optische Kontrolle der Spannglieder und deren Verlauf innerhalb der Traverse.

5.2.2 Systemdaten

Als Grundlage für die Entwicklung der Versuchstraverse wurde der Standard-Traversentyp 300S der Firma HOAC gewählt. Die Bezeichnung 300S bezieht sich auf die schwere Ausführung mit einem Achsmaß von 300 mm . Die Gurtrohre haben einen Durchmesser von $48,3\text{ mm}$ bei einer Wandstärke von $3,2\text{ mm}$. Diese Standardvariante besitzt an den Enden massive Flansche aus Vierkantprofilen, an denen über Schraubenverbindungen weitere Traversenteile anschließbar sind. Anhand der bekannten Maße der Anschlüsse war es möglich, passende Kopfplatten zur Spannkrafteinleitung sowie Umlenkstellen zu konstruieren. Diese wurden in der Metallwerkstatt der Universität Duisburg-Essen angefertigt. Die Diagonalen und Bindestäbe haben einen rechteckigen Querschnitt von $33 \times 22\text{ mm}$ mit einer Wandstärke von 3 mm . Bei den Anschluss-

flanschen kommen Vierkantprofile mit einer Kantenlänge von 50 mm zum Einsatz. Die Wandstärke beträgt hier 3,2 mm, wobei im Bereich der Bohrungen zusätzlich Vollquerschnitte eingeschweißt sind. Als Aluminiumlegierung kommen bei den Gurtrohren die ausscheidungsgehärtete Knetlegierung EN-AW 6082 im Zustand T6 und bei allen weiteren Profilen EN-AW 6060 im Zustand T5 zur Anwendung.

Bei der Entwicklung der Geometrie der Hauptachsen wurden die konstruktiven Entwurfsregeln für Gitterträger des Eurocodes 9 (DIN EN 1999-1-1, Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln) beachtet. Außerdem wurde die Geometrie so festgelegt, dass ein Spanngliedverlauf mit bis zu drei Umlenkstellen, sowohl innerhalb als auch als Unterspannung aus dem Querschnitt herausgeführt, möglich ist. Die Ausbildung der Fachwerkkonstruktion mit 12 Feldern und 11 Knoten ergab sich aus der Anforderung, dass sich Fachwerkknoten an den Stellen befinden, an denen die aus der Vorspannung resultierenden Umlenkkräfte in den Träger eingeleitet werden können. Aus einem Winkel von 45° für die Diagonalen und einem Achsabstand von 30 cm resultiert eine Feldlänge von 6,0 m. Die 12 Felder ergeben rechnerisch eine Systemlänge des Trägers von 7,2 m. Die Gesamtlänge der Traverse beträgt 7,4 m. In Bild 47 sind die Überlegungen bei

der Entwicklung der Achsabstände dargestellt [Küh11].

Im Eurocode 9 wird zur Vermeidung zusätzlicher Torsionsmomente durch eine Biegebelastung zu einer gleichläufigen Vergitterung paralleler Ebenen geraten, sodass eine Seite die Projektion der gegenüberliegenden darstellt. Hierauf wurde bei der Anordnung der Fachwerkknoten geachtet. Aufgrund der somit vorliegenden Lage der Knoten und der Notwendigkeit, dass im Fall der unterspannenden Anordnung der Spannglieder diese auch aus dem Träger herausgeführt werden müssen, wurde die schwache Achse der Traverse als Vierendeelträger ohne Diagonalen ausgeführt. Dazu wurden alle Hauptknoten gegeneinander abgestützt und zusätzliche Stäbe in den Mitten der Felder angeordnet. Auf der Unterseite musste auf zwei Stäbe im Bereich der Durchdringung der Spannglieder zur Vermeidung von Kollisionen verzichtet werden. Bei den Stabilitätsnachweisen kann dies vernachlässigt werden, da die Schubsteifigkeiten der Stäbe zu einem Kontinuum „verschmiert“ werden. Die endgültige Geometrie der Traverse ist in Bild 48 dargestellt [Küh11].

Unabhängig von dem letztendlich eingesetzten Arbeitsdruck der hydraulischen Anlage und den daraus resultierenden Vorspannkräften wurden überschlägig Nachweise für die Belastungszustände mit

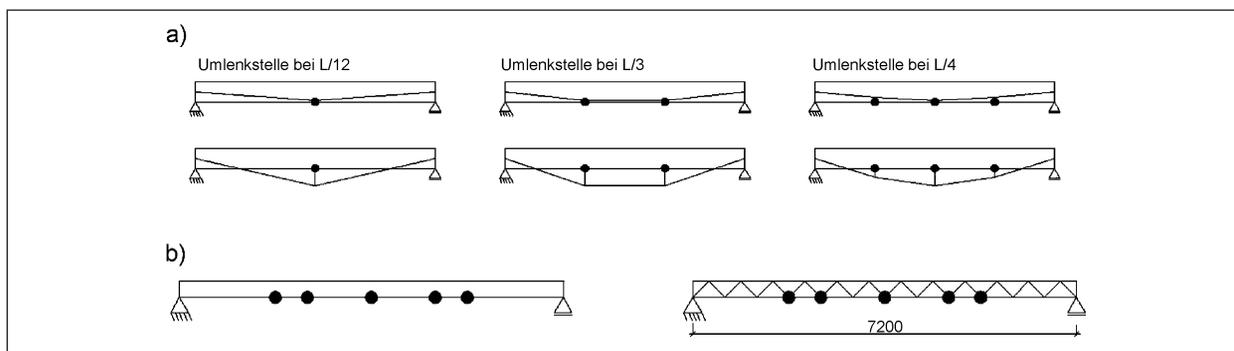


Bild 47: a) Mögliche Anordnungsvarianten der Umlenkstellen und b) daraus resultierende Geometrie bzw. Knotenabstand [Küh11]

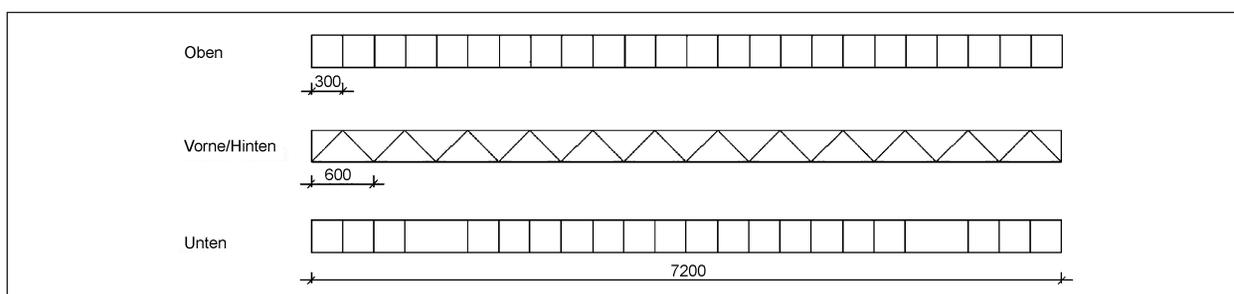


Bild 48: Endgültige Geometrie der Traverse [Küh11]

und ohne Verformungsadaption geführt. Dabei wurden zwei Fälle unterschieden [Küh11]:

- **Traverse ohne Vorspannung:** In diesem Fall liegt ein Biegeträger vor, bei dem die größte Relevanz auf dem lokalen Ausknicken und Beulen der druckbeanspruchten Querschnitte sowie auf der reduzierten Zugbeanspruchbarkeit in der Wärmeeinflusszone (WEZ) der Schweißnähte liegt. Kritisch sind hierbei die Gurtrohre in der Mitte des Trägers und die jeweils erste Druckstrebe des Fachwerkes. Für die Gurtrohre wurde unter Annahme der charakteristischen Festigkeiten (Laborbedingungen) eine Knicklast von ca. 56 kN und für die Diagonalen von ca. 25 kN ermittelt. Die Belastbarkeit auf Zug in der WEZ beträgt ca. 46 kN, da der Wärmeeintrag bei WIG-Schweißungen beträchtlich ist.
- **Traverse mit Vorspannung:** Das System ähnelt einem zentrisch belasteten Druckstab mit zusätzlicher Biegebelastung. In der Haupttragrichtung hat dies zur Folge, dass die Belastung der Druckstreben abnimmt und die Gurtrohre durch Umlagerung der Schnittgrößen nur noch Druck aufnehmen müssen. In der Nebentragrichtung ergibt sich durch die Belastung aus Normalkraft allerdings die Gefahr des globalen Ausknickens, welches berücksichtigt werden muss.

5.2.3 Spannlitzen

Zur externen Vorspannung kamen allgemein bauaufsichtlich zugelassene Monolitzen mit niedriger Relaxation der Firma SUSPA-DSI zum Einsatz. Die vom deutschen Institut für Bautechnik erteilte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung trägt die Nummer Z-13.72-30036. Die Monolitzen wurden dankenswerterweise von der Firma SUSPA-DSI in Langenfeld zur Verfügung gestellt. Eine Monolitze besteht aus sieben verdrehten Spannstahldrähten St 1570/1770, die durch eine fettgefüllte PE-Ummantelung vor Korrosion geschützt werden. Laut Herstellerangaben beträgt der Reibbeiwert zwischen Litze und Mantel $\mu = 0,06$. Die eingesetzten Litzen haben einen Nenndurchmesser von 15,7 mm, was einem Nennquerschnitt von 150 mm² entspricht. Der Außendurchmesser, d. h. inklusive PE-Mantel, ist im Allgemeinen größer als 20 mm und betrug in diesem Fall ca. 30 mm. Der kleinste zulässige Krümmungsradius der eingesetzten Monolitzen beträgt 2,60 m (St 1570/1770). Bei Einhaltung dieses Radius kann im Bereich der Krümmun-

gen auf den Nachweis der Spannstahlrandspannungen verzichtet werden.

Nach Zulassung ist die aufzubringende Höchstkraft auf $P_{0,max} = 0,9 A_p f_{p0,1k} = 0,9 \cdot 150 \cdot 1.500 \cdot 10^{-3} \approx 203$ kN und der Mittelwert der Vorspannkraft nach dem Absetzen der Pressenkraft auf die Verankerung auf $P_{m0,max} = 0,85 A_p f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 150 \cdot 1.500 \cdot 10^{-3} \approx 191$ kN zu begrenzen.

Der PE-Mantel wurde im Werk auf beiden Seiten entfernt und an je einem Ende eine Hülse als Endverankerung aufgepresst. Für die Verankerung der Spannlitze auf der gegenüberliegenden Seite wurde eine herkömmliche Keilverankerung mit loser Ankerbüchse eingesetzt [Küh11].

5.2.4 Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannlitzen

Die Spannlitzenverankerung wurde gelenkig ausgeführt, damit eine eventuelle Änderung der Stichhöhe sowie der Anzahl der Umlenkstellen möglich bleibt. Die Verankerung erfolgte über festgeschweißte Achsen an der Kopfplattenkonstruktion (Bild 50), an denen Ankerplatten aus U-100-Profilen (Bild 51) über entsprechende ausgerundete Aussparungen montiert wurden. Die Hohlkolbenzylinder (Durchmesser 100 mm) wurden auf diesen Ankerplatten montiert. In Bild 52 sind die pulvergestrahlten Kopfplatten dargestellt [Küh11].

Die Umlenkstellen wurden als geschraubte Stahlkonstruktionen konzipiert und in den Drittelpunkten der Traverse angeordnet. Der maximale Stich der Spannglieder liegt bei 45 cm. Die Einleitung der Umlenkkräfte erfolgt über zwei U-Profile, die als Querträger mit halben Rohrkupplungen an die Gurtrohre der Traverse geschraubt werden und über Gewindestangen mit Tragblechen verbunden sind. Diese wurden so konstruiert, dass der kleinste Krümmungsradius der Monolitzen gemäß der entsprechenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-13.72-30036 mindestens 2,60 m beträgt. Aufgrund ihrer Bauweise ist die Konstruktion der Umlenkstelle flexibel und kann an verschiedene Spanngliedverläufe angepasst werden. Durch den Einsatz von Gewindestangen als Verbindung zu dem Träger sind Stich und resultierender Umlenkwinkel über die Muttern frei einstellbar. Die Achsen sind dazu dreh- und die Querträger längs verschiebbar ausgeführt worden. Details der Umlenkkonstruktion sind in Bild 53 bis Bild 57 dargestellt [Küh11].

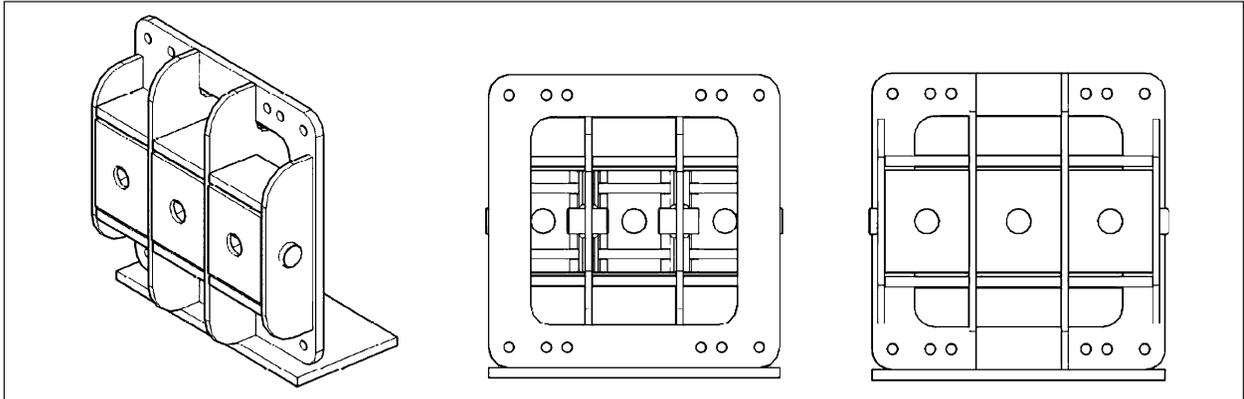


Bild 50: Modell Kopfplatte (Isometrie – hinten – vorne) [Küh11]

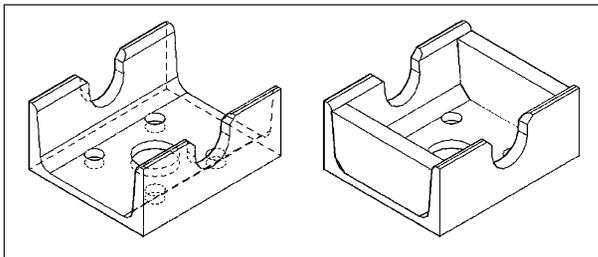


Bild 51: Ankerplatte [Küh11]

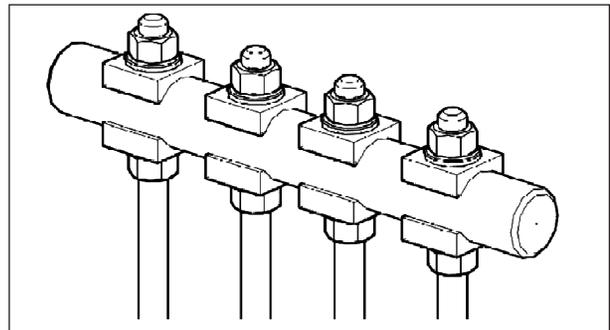


Bild 54: Achse der Umlenkstelle [Küh11]



Bild 52: Kopfplatten nach dem Pulverstrahlen

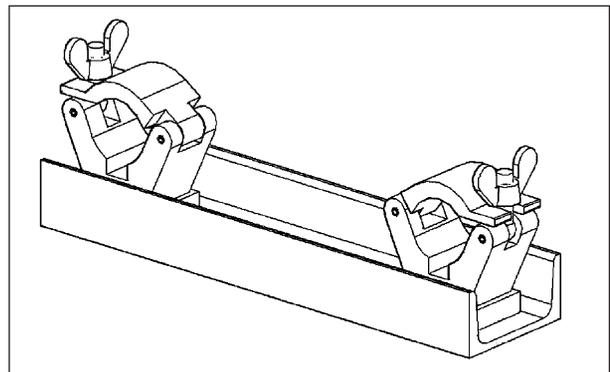


Bild 55: Querträger [Küh11]

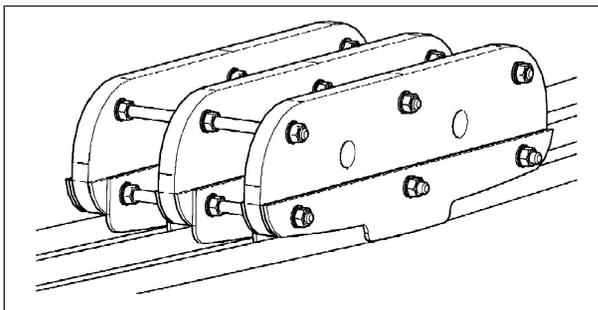


Bild 53: Miteinander verbundene Tragbleche der Umlenkstelle [Küh11]

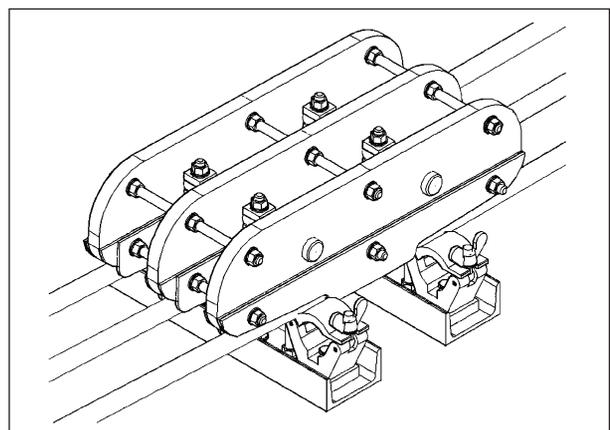


Bild 56: CAD-Detail der vollständigen Umlenkkonstruktion [Küh11]

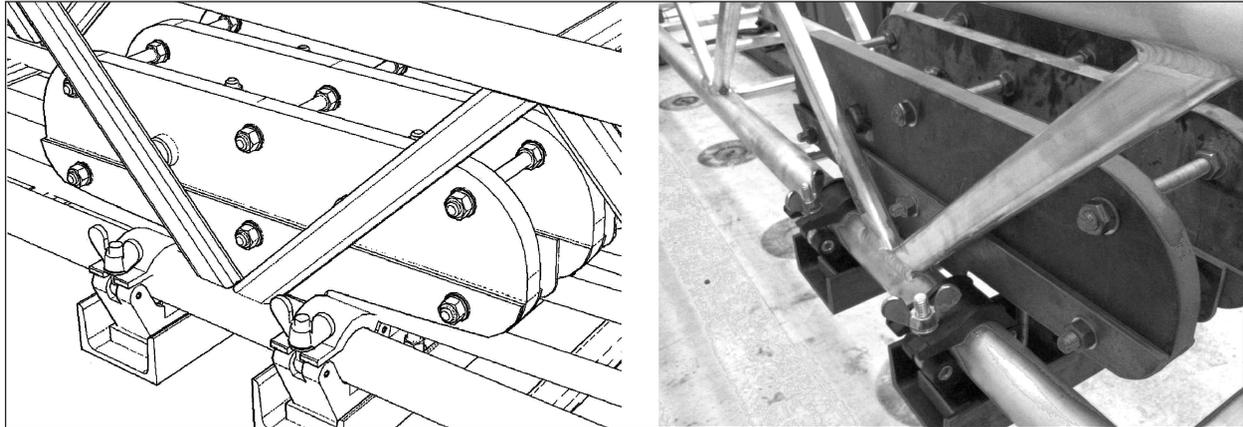


Bild 57: Detail der integrierten Umlenkstelle [Küh11]

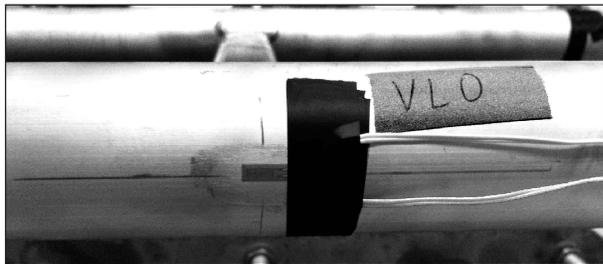


Bild 58: Applizierter Dehnmessstreifen

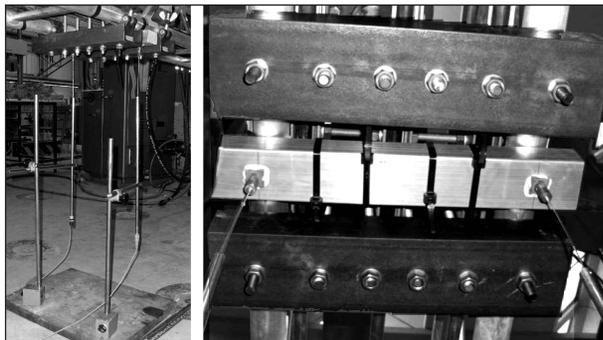


Bild 59: Wegaufnehmer an einer Umlenkstelle, fixiert auf Magnetstativ

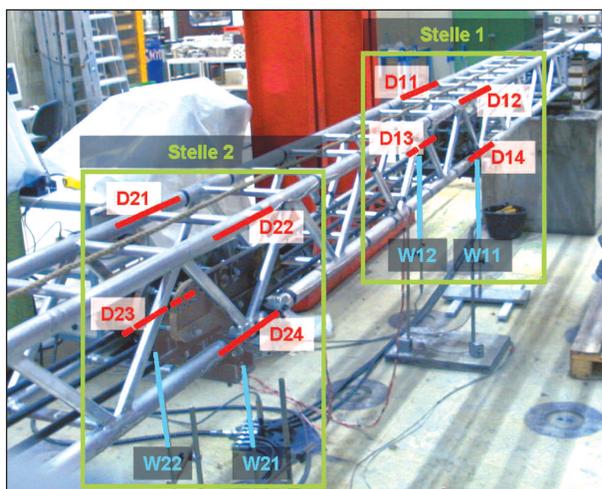


Bild 60: Anordnung der Sensoren

5.2.5 Messstellen und Sensoren

Insgesamt wurden vier induktive Wegaufnehmer mit einem Messbereich von 20 cm verwendet. Von diesen wurden jeweils zwei pro Umlenkstelle eingesetzt, damit eine Verdrehung des Querschnittes kompensiert werden kann (s. Bild 59).

Zur Kontrolle der Dehnungen wurden je Umlenkstelle vier Dehnmessstreifen (DMS) in der Schwerpunktlage der Gurtrohre angeordnet (s. Bild 58). Die DMS vom Typ FLA-6-23-5LQ der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. sind speziell für den Einsatz an Aluminium konzipiert und weisen einen Messbereich bis zu einer Dehnung von 5 % auf. Die Anordnung der Sensoren an dem Versuchskörper ist in Bild 60 dargestellt.

Das Messwerterfassungssystem AUTOLOG 3000 von Peekel Instruments wurde über eine USB-Schnittstelle mit dem PC verbunden. Mittels des ActiveX-Treibers konnten die Messwerte in einer Messfrequenz von 5 Hertz für alle Sensoren online in die Matlab®-Oberfläche gespeist und somit dem Regelungsprogramm zugänglich gemacht werden. Das analoge Output-Modul e.bloxx A9-1 von Peekel Instruments wurde über die RS485-Schnittstelle angebunden. Zur Anbindung dieses Moduls an die Matlab®-Umgebung wurden bereitgestellte DLL-Methoden verwendet [Ste11], s. hierzu Kapitel 5.1.2.

5.2.6 Zielsetzung der Regelung

Das gewünschte Ergebnis der Adaption ist die Minimierung der Verformungen. Anhand der Durchbiegungen an den Umlenkstellen wird festgestellt, in welcher Intensität eine Adaption erfolgen soll, um diese zu kompensieren. Hierzu werden symmetrische und asymmetrische Belastungsbilder und aus

ihnen resultierende Verformungszustände unterschieden. Werden an den Umlenkstellen Durchbiegungen gleicher Größe gemessen, ist das Ziel der Anpassung eine Rückstellung dieser Verformungen zu null. Unterschiedlich große gemessene Durchbiegungen können durch die symmetrische Anordnung der beiden Umlenkstellen nicht auf die gleiche Weise kompensiert werden. In diesem Falle soll die Adaption die Rückstellung des Durchschnitts der beiden Verformungen zu null zur Folge haben. Die Ermittlung der notwendigen Änderung der Vorspannkraft zur Rückstellung der Verformungen wird anhand eines numerischen Modells des statischen Systems ermittelt.

5.2.7 Aufbau des Fuzzy-Reglers

Die verwendete Regelung ermittelt den Bedarf und die Intensität einer Änderung der auf die Alumi-

nium-Traversal wirkenden Vorspannkraft und führt diese gegebenenfalls in optimierter Intensität durch (Adaption). Die am Versuchskörper gemessenen Eingangswerte sind die Durchbiegungen an den Umlenkstellen (w_{11} bis w_{22}) jeweils an beiden Seiten. Durch zwei adaptive Parameter wird das Regelungsverhalten gesteuert. Der Regelungskreis wird schematisch in Bild 61 gezeigt, wobei der Pfad der Verformungen in Rot, der Pfad der Vorspannung in Blau, der Regelalgorithmus in Grün und die Konstruktion in Schwarz dargestellt sind.

Eine schematische Darstellung der Regelung wird in Bild 62 gezeigt. Die Bestandteile der Entscheidung werden in Grün und die Bereiche der zu regelnden Vorspannkraft in Blau gezeigt. Die Basis der Adaption ist die gemessene Verformung (Rot), welche als Eingangsvariablen in das System eingehen und als Ergebnis einer Adaption aus dem

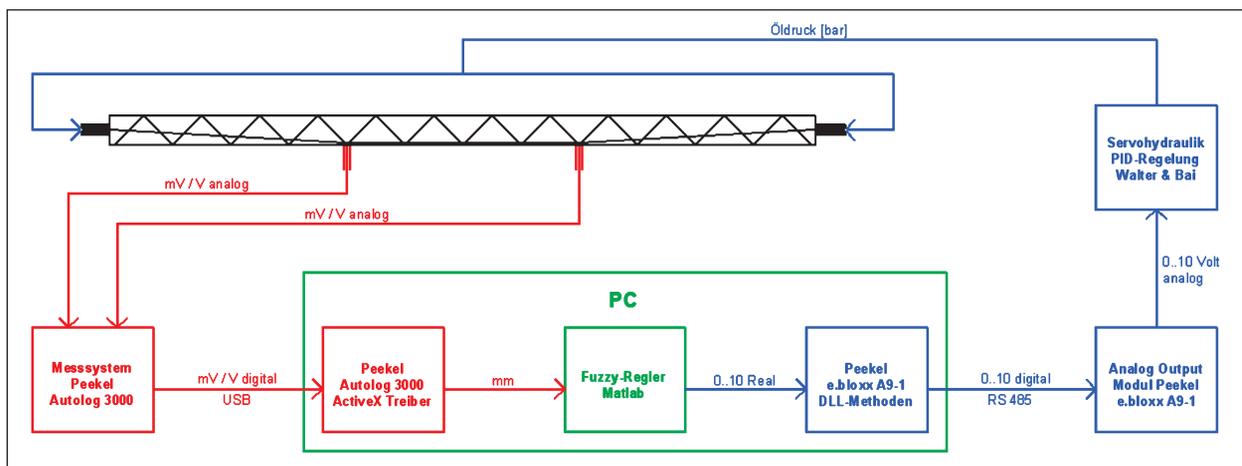


Bild 61: Schema des Regelungskreislaufes [Ste11]

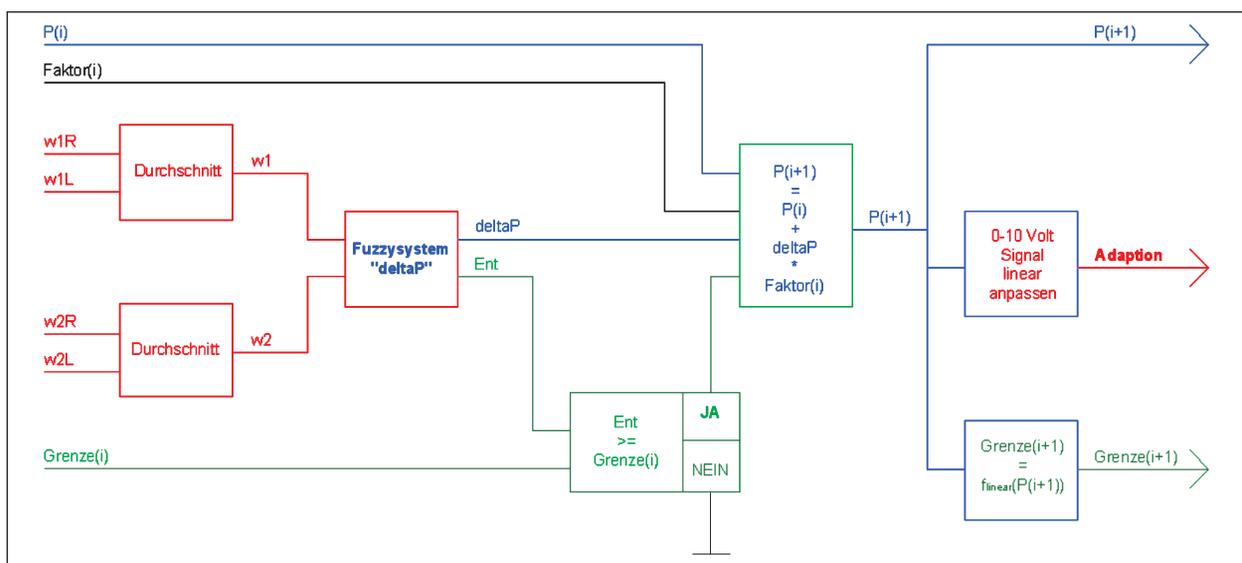


Bild 62: Schema des Regelungssystems [Ste11]

System resultieren. Da die Änderung der Vorspannkraft durch die Umlenkung der Spannglieder eine Verformungsänderung zur Folge hat, ergibt sich mit den gemessenen Durchbiegungen der Regelungskreislauf.

Die Entscheidungsgrenze (Grenze) ist die Schwelle, ab deren Erreichen eine Adaption als notwendig angesehen wird. Erreicht der Entscheidungswert nach einer Evaluation der aktuell gemessenen Durchbiegungen durch das Fuzzy-System diese Schwelle, wird eine Änderung der Vorspannkraft ausgelöst. Um den gegebenen Querschnitt auch bei kleinen Lasten optimiert ausnutzen zu können, ohne eine unnötig hohe Frequenz an Adaptionen zu erhalten und Zugspannungen bei kleinen Belastungen zu vermeiden, wird diese Grenze in Abhängigkeit der aktuell vorhandenen Vorspannkraft linear angepasst (s. Bild 63). Mit wachsender Vorspannkraft wächst ebenfalls die Grenze der Entscheidung, wodurch bei kleiner Belastung öfter und geringer und bei großer Belastung weniger und stärker adaptiert wird.

Eine weitere Anpassungsfähigkeit ist mit der Verwendung eines Adaptionfaktors gegeben. Dieser korrigiert die bei einer Adaption aufzubringende Änderung der Vorspannkraft, sodass die Verformungsminimierung möglichst präzise eingehalten wird. Zur Ermittlung des aktuellen Adaptionfaktors wird nach jeder Adaption die erreichte mit der gewünschten Verformungsänderung verglichen und das kalkulierte Verhältnis zur Anpassung des Adaptionfaktors herangezogen. Auf diese Weise sollen nicht modellierte Gegebenheiten und von der idealisierten Grundlage des statischen Systems abweichende Größen kompensiert werden.

Das eingesetzte Fuzzy-System des MA-Modells beinhaltet die funktionale Abbildung der Eingabe-

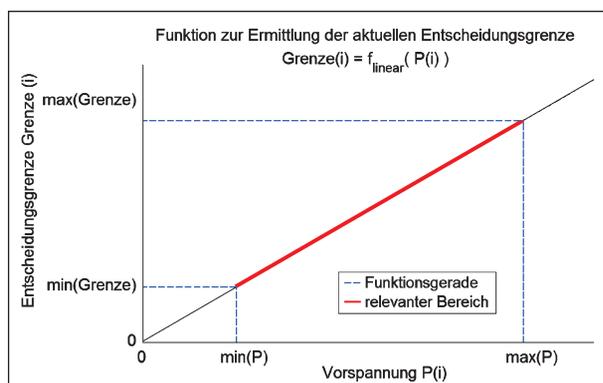


Bild 63: Ermittlung der aktuellen Entscheidungsgrenze [Steil11]

mengen der gemessenen Durchbiegungen an den Umlenkstellen (w_1 und w_2) auf die Ausgabemengen der zur Verformungsminimierung notwendigen Änderung der Vorspannkraft (ΔP) und eines Entscheidungsfaktors (Ent). Zur Entwicklung des Systems wurde die modellbasierte Analyse mit linearelastischer Grundlage entsprechend dem gewählten statischen System herangezogen. Die Auswertung der aktuellen Verformungen wird daher ebenfalls linear vorgenommen, wodurch schiefe Ebenen als Funktionsoberflächen entstehen.

Zur Ermittlung der Rahmenbedingungen für die Erstellung des Fuzzy-Systems wurde das Prinzip der virtuellen Kräfte an einem idealisierten System eingesetzt. Die sich aus einer Belastung, welche eine Spannung von 45 % der Materialfestigkeit hervorruft, ergebende Durchbiegung stellt das Maximum und somit den Grenzwert der Verformungen dar. Zur analogen Berechnung der minimalen Verformungsgrenze wurde die maximale Vorspannung angesetzt. Die Vorspannkraft, welche die maximale Verformung durch Belastung kompensiert, wird als maximale Vorspannkraft definiert, da diese der Zielsetzung der Verformungsminimierung entspricht.

Zur Festlegung der Regelungsgenauigkeit, der Adaptionshäufigkeit und der erreichbaren Intensität eines Adaptionsschrittes werden zwei Faktoren eingeführt: Der Quotient zur Begrenzung der möglichen Adaptionintensität (w_{quot}) wird zur Ermittlung der maximalen Vorspannungsänderung herangezogen. Nach der Reduktion der maximalen Durchbiegung infolge Belastung mittels des Faktors „ w_{quot} “ wird die Vorspannkraft ermittelt, welche eine Aufhebung der reduzierten Verformung zur Folge hat. Somit wird aus einer angegebenen Verformungsänderung die maximale Vorspannkraftänderung ermittelt. Die Angabe der Anzahl zu verwendender Fuzzy-Mengen (SetAnz) hat eine entsprechende Mengendichte und eine damit korrelierende Genauigkeit zur Folge. Diese Angabe stellt ebenfalls den maximalen Wert des Entscheidungsfaktors (Ent) dar. Der Aufbau der Inputvariablen ist in Bild 64 dargestellt. Hierbei wird die Verformung einer Umlenkstelle betrachtet, wobei die Grenzen der Grundmenge in Rot, die Nulllage in Blau, Eckwerte zur Generierung der Fuzzy-Mengen in Schwarz und die Fuzzy-Aufteilung in Grün abgebildet sind.

Nach den Rahmenbedingungen werden automatisch die triangulären Zugehörigkeitsfunktionen aufgestellt und die Regeln entsprechend der linearen

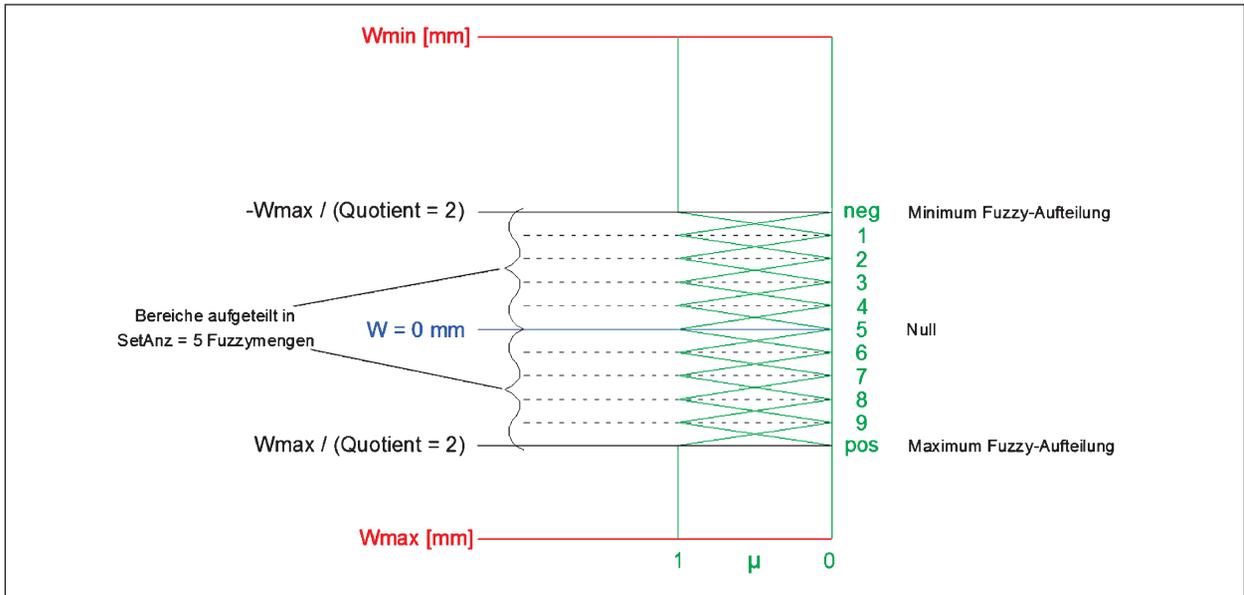


Bild 64: Aufbau der Input-Fuzzy-Variablen [Ste11]

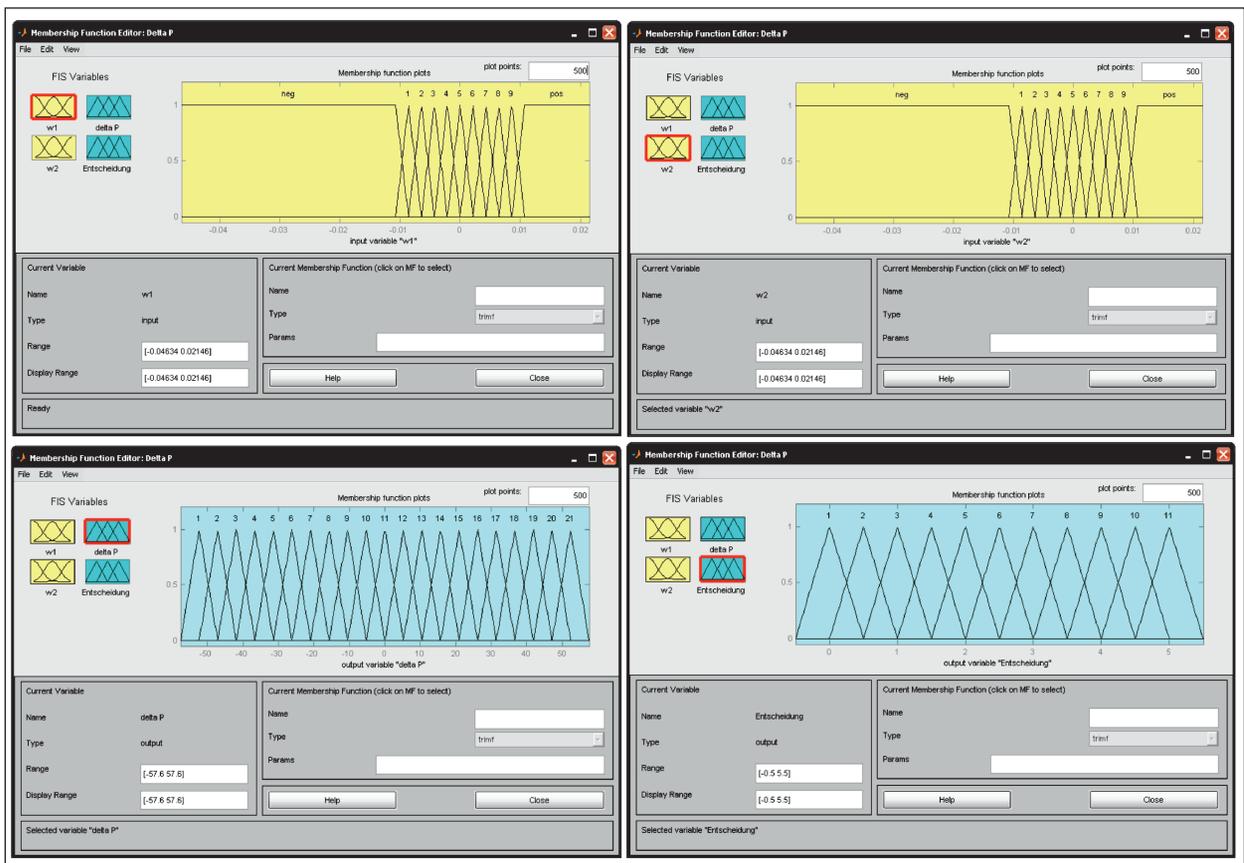


Bild 65: Fuzzy-Variablen der Regelung [Ste11]

Auswertung generiert. Den Randbereichen der Grundmengen der Inputvariablen wurden trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen zugewiesen, um ab den reduzierten Extrema eine Plateaubildung zu erreichen (s. Bild 65 oben). Hierdurch wird die Einhaltung der zugelassenen Adaptionsintensität ge-

währleistet, indem auch stärkere Verformungen auf das festgelegte Maximum verweisen. Abhängig von der Aufteilung der Inputvariablen werden Menge und Lage der Fuzzy-Mengen der Outputvariablen bestimmt. Die Grundmenge der Fuzzy-Variable „Vorspannungsänderung deltaP“ wird durch die

Vorspannkraft begrenzt, welche eine Aufhebung der Durchbiegung bei maximaler Fuzzy-Aufteilung (Wmax/Quotient) zur Folge hat. Diese Vorspannungsänderung wird sowohl positiv (Anspannen) als auch als negativ (Nachlassen) angesetzt. Die Anzahl m der Fuzzy-Mengen wird anhand der Mengenzahl n der Inputvariablen ermittelt. Für eine komplette Abbildung der Funktion werden im linearen Fall $m = 2 \cdot n - 1$ Mengen benötigt, welche als trianguläre Zugehörigkeitsfunktionen gleichmäßig über die Grundmenge verteilt werden (s. Bild 65 unten links).

Die Grundmenge der Outputvariable „Entscheidungswert Ent“ wird anhand der angegebenen Anzahl zu verwendender Fuzzy-Mengen SetAnz definiert. Die Anzahl m der gleichmäßig über die Grundmenge verteilten Fuzzy-Mengen beträgt zur vollständigen Funktionsabbildung $m = 2 \cdot \text{SetAnz} + 1$ (s. Bild 65 unten rechts).

Die funktionale Zuordnung (Kartierung) der Input zu den entsprechenden Outputmengen ist in der Regelbasis gegeben (s. Tabelle 5). Erkennbar sind sowohl die Nullgerade als auch die Symmetriegerade der Funktionsoberflächen (s. Bild 66). Aufgrund der linearen Abhängigkeit von zwei Inputvariablen erscheint die Funktionsoberfläche in den relevanten Bereichen als schiefe Ebene.

Aufgrund der Mengenzuordnungen in der Regelbasis und der wertmäßigen Aufteilung der Grundmengen wird die Funktion $\text{deltaP} = f(w1, w2)$ generiert. Durch diese wird die Vorspannkraftänderung ermittelt, welche eine Aufhebung der mittleren Durchbiegung am simulierten System zur Folge hat. Dabei steigt der Entscheidungswert, je weiter die aktuell gemessene Situation von dem Optimum ($w1 + w2$)/

$2 = 0$ abweicht. Die verwendeten Einstellungen des Fuzzy-Reglers während der Simulationen und Laborversuche sind in Tabelle 6 aufgeführt [Steil1].

deltaP		w1										
		min										max
UND		neg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	pos
min	neg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
w2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
max	pos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Ent		w1										
		min										max
UND		neg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	pos
min	neg	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	5	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2
	2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3
	3	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4
w2	4	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5
	5	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6
	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7
	7	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8
	8	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	9	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
max	pos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Nullgerade
 rot Symmetriegerade

Tab. 5: Regelbasis des Fuzzy-Reglers [Steil1]

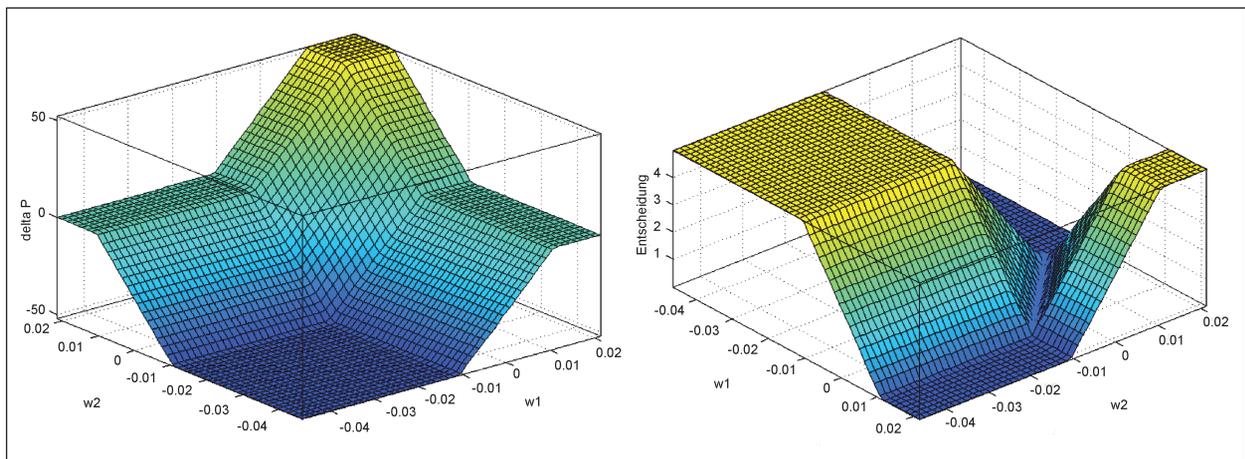


Bild 66: Funktionsoberflächen des Fuzzy-Reglers [Steil1]

Einstellungen	
Quotient für maximale Durchbiegung	2
Anzahl Fuzzy-Mengen	5
Entscheidungsgrenze Minimum	0,2
Entscheidungsgrenze Maximum	1
Anzahl Diskretisierungspunkte	500
Fuzzy-Operatoren	
Aggregation (UND)	Minimum
Implikation	Produkt
Akkumulation	Maximum
Defuzzifikation	Centroid

Tab. 6: Einstellungen der Regelung [Ste11]

5.2.8 Simulationen in Matlab®

Im Vorfeld der Bauteilversuche wurden mit dem Programm Matlab® numerische Simulationen der Versuche durchgeführt. Die Simulationen basieren auf der Anwendung des Prinzips der virtuellen Kräfte (PdvK). Dabei werden die Verformungen an den Umlenkstellen durch Momente erster Ordnung ermittelt. Anschließend werden die einzelnen Verformungsanteile aus Last und Vorspannung zu den Gesamtverformungen superponiert. Die unterschiedlichen Belastungen sind die Umlenkkräfte aus Vorspannung, Einzellasten infolge der Lastanordnung und Streckenlasten infolge Eigengewichts oder Lastanordnung. Die Aufbringung der Belastungen aus Lastanordnung erfolgt inkrementell in Last- oder Wegschritten. Dabei wird nach jedem Inkrement eine Evaluation durch den in Kapitel 5.2.7 vorgestellten Fuzzy-Regler vorgenommen und gegebenenfalls eine Adaption durchgeführt. Die minimale Vorspannkraft P_{\min} wird durch die Kompensation der Durchbiegungen infolge des Eigengewichtes ermittelt.

Zur Berücksichtigung einer nicht idealen Steifigkeit und damit zur Kontrolle der Funktion des Adaptionfaktors wird die Verformung aufgrund der Vorspannung durch einen Modifikationsfaktor abgeändert. Auf diese Weise wird eine von der Berechnungsgrundlage abweichende Tragwerksreaktion simuliert.

Erwartet wird eine nach der ersten Adaption optimale Regelung der Durchbiegungen zum möglichen Minimum. Hierbei sollte nach jedem Lastschritt, nach dem der evaluierte Entscheidungswert die aktuelle Grenze überschreitet, eine Anpassung der Vorspannung stattfinden. Die Auswirkung der

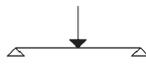
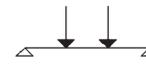
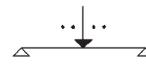
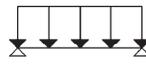
linear ansteigenden Entscheidungsgrenze sollte in den Verformungen gut sichtbar sein, indem mit steigender Vorspannung größere Durchbiegungen akzeptiert werden. Der Adaptionfaktor sollte nach der ersten Adaption den Kehrwert des Modifikationsfaktors aufweisen, um diesen über die restliche Laufzeit auszugleichen. Die Intensität der Vorspannung sollte die gültigen Grenzen ($P_{\min} = 5,55 \text{ kN}$; $P_{\max} = 226,08 \text{ kN}$) nicht überschreiten. Obwohl sie keine Relevanz für die Regelung aufweisen, sollten die Spannungen innerhalb der festgelegten Grenzen von $-117,0$ bis $1,0 \text{ N/mm}^2$ liegen. Eine Ausnahme ist hierbei die Lastanordnung „2 Zylinder symmetrisch“, bei welcher die Maxima planmäßig überschritten werden.

5.2.9 Versuchsdurchführung

Die Einsetzbarkeit der Fuzzy-Regelung wurde sowohl mittels Simulationen als auch durch Laborversuche mit identischen Lastanordnungen untersucht (s. Tabelle 7). Die Größe der durch Prüfzylinder aufgebrachten Einzellasten wurde anhand der maximal möglichen Umlenkraft von $R_{\max} = 11,15 \text{ kN}$ festgelegt, wobei eine Erhöhung von $0,85 \text{ kN}$ das weitere Systemverhalten nach Überschreiten der Umlenkkräfte aufzeigen soll. Die Größen der Wander- und der Streckenlast wurden aufgrund praktischer Gegebenheiten festgelegt.

Zur Ermittlung des grundlegenden Verhaltens der Regelung wurde eine Einzellast in Feldmitte aufgebracht. Das Verhalten bei asymmetrischer Belastung wurde anhand einer Einzellast über einer Umlenkstelle ermittelt. Durch Anordnung zweier Einzellasten über den Umlenkstellen wurde planmäßig eine Überlastung des Systems hervorgerufen, um das Grenzverhalten der Regelung zu ermitteln. Im Hinblick auf den Einsatz einer adaptiven Vorspannung bei Brückenbauwerken wurden zusätzlich die Lastanordnungen „Wanderlast“ und „Streckenlast“ eingeführt, welche das Verhalten unter Verkehrsbelastung darstellen sollen.

Die geplanten Lastanordnungen wurden am Versuchskörper sowohl mit als auch ohne Adaption durchgeführt. Die Belastungen „1 Zylinder Mitte“ (oben links, Mitte links), „2 Zylinder“ (oben rechts), „Streckenlast“ (Mitte rechts) und „Wanderlast“ (unten) sind in Bild 67 gezeigt. Zur Einleitung der durch die Prüfzylinder aufgebrachten Einzellasten auf eine Länge von 60 cm entsprechend der Länge eines Feldes des Fachwerks wurden Lastverteilungsplatten angeordnet (Mitte links). Zur Aufbrin-

Lastanordnung	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Asymmetrisch	2 Zylinder Symmetrisch	Wanderlast	Streckenlast
Lastbild					
Last	12 kN	12 kN	2 X 12 kN	4 kN	1,44 kN/m
Maximum bei 1 N/mm ² Zug	8,9 kN	10,0 kN	2 X 6,7 kN	8,9 kN	2,44 kN/m
Maximum bei 0,45* f _{uk} Zug	17,6 kN	19,9 kN	2 X 13,2 kN	17,6 kN	4,83 kN/m

Tab. 7: Lastanordnungen [Steil11]

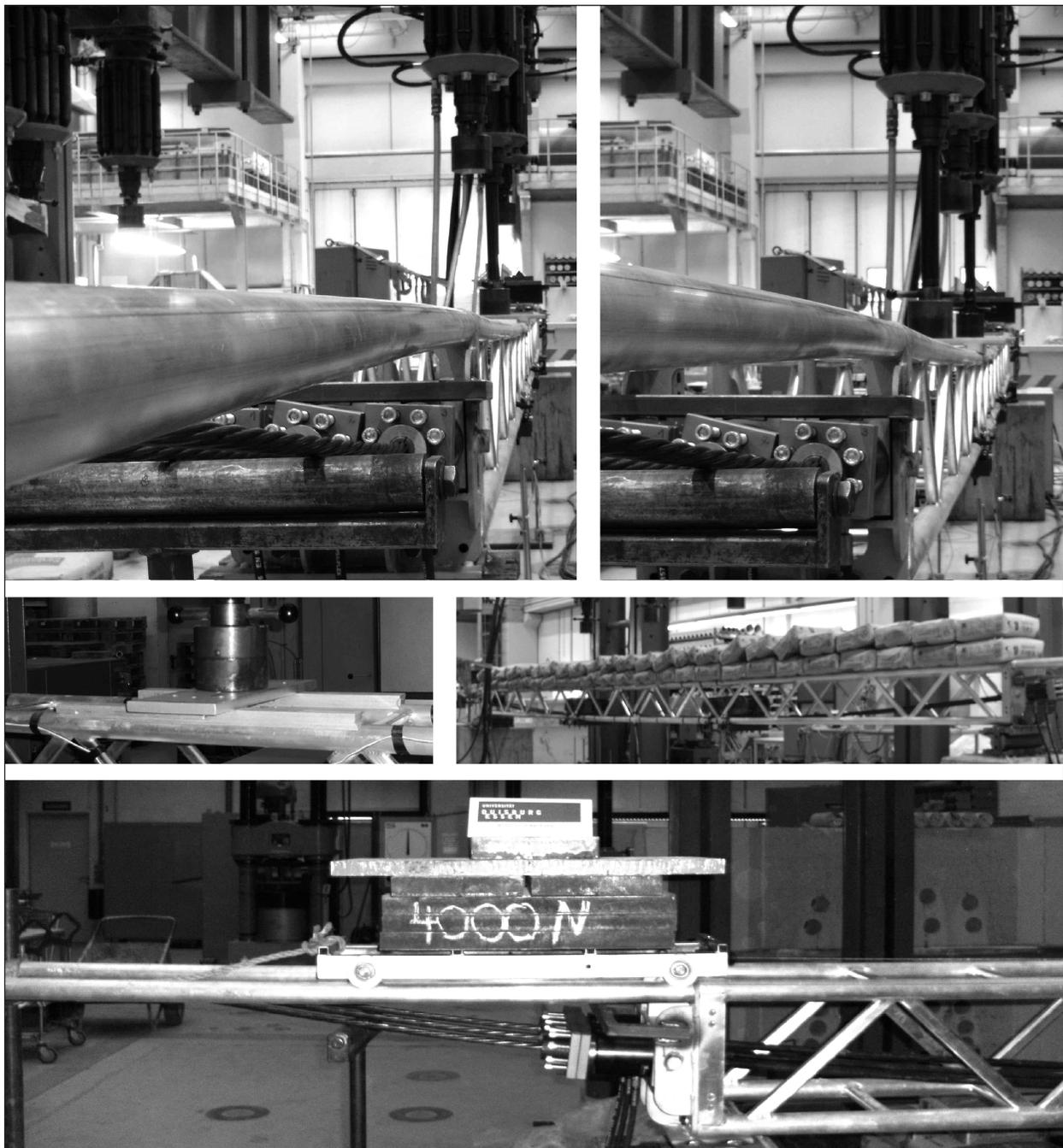


Bild 67: Belastungsanordnungen der Traverse [Steil11]

gung der Streckenlast wurden Zementsäcke mit einem Gewicht von jeweils 25 kg verwendet. Diese wurden mit der kürzeren Seite von 35 cm längs zur Traverse in zwei Schichten angeordnet (Mitte rechts), um die gewünschte Streckenlast von 1,44 kN/m zu erreichen. Die Wanderlast wurde mit Hilfe eines speziell angefertigten Wagens (unten) mit einem Achsabstand von 60 cm aufgebracht. Die Regelung sollte in der Lage sein, die Durchbiegungen an den Umlenkstellen deutlich zu minimieren. Verglichen mit den Durchbiegungen an einem System ohne Vorspannung sollte eine Reduktion auf ca. 10 % erreicht werden. Sobald der evaluierte Entscheidungswert die aktuelle Grenze überschreitet, sollte eine Adaption ausgeführt werden, sofern die letzte Adaption mindestens zwei Sekunden zurückliegt. Die Vorspannkraft sollte zu jedem Zeitpunkt innerhalb der gültigen Grenzen ($P_{\min} = 0$ kN, $P_{\max} = 226,08$ kN) liegen, wobei das Eigengewicht g zur Ermittlung von P_{\min} zu 0 kN/m angenommen wurde, da die Verformung aufgrund g während der Versuche in die Tarierung eingeflossen ist. Während der Versuche gemessene Dehnungen sollten die gewählten Grenzen der Dehnungen, welche in Verbindung mit dem angenommenen E-Modul von 70.000 N/mm² ermittelt werden, nicht überschreiten.

Zusätzlich werden auch alle äußeren Effekte, welche die Verformungen beeinflussen, in dem lernfähigen Faktor berücksichtigt. Dazu gehören insbesondere Verluste innerhalb des hydraulischen Systems, Eigenschaften des Hydraulikaggregates für die Vorspannung und auch Belastungstendenzen, die innerhalb der zwei Sekunden Wartezeit auftreten, wozu insbesondere das „Schwingen“ der Hydrauliksysteme gegeneinander zählt (s. Kapitel 5.1.4). Zu erwarten ist das Oszillieren des lernfähigen Adaptionfaktors um einen Wert, welcher dem Kehrwert des Modifikationsfaktors der Simulationen ähnlich ist. In Tabelle 8 sind die Eckdaten der Traverse zusammengefasst.

5.2.10 Ergebnisse

Ergebnisse der Simulation [Ste11]

Zur Evaluation der während der Simulationen entstandenen Verläufe wurden die Durchbiegungen an den Umlenkstellen, die Spannungen an den Umlenkstellen, die Vorspannkraft, der Entscheidungsfaktor und der Adaptionfaktor jeweils über den Verlauf der Belastung untersucht. Hierzu gehören sowohl das schrittweise Aufbringen als auch das schrittweise Ablassen der jeweiligen Lastanordnungen.

Material	Elastizitätsmodul	$E = 70.000,00$ [N/mm ²]
	Materialfestigkeit	$f_{uk} = 260,00$ [N/mm ²]
	einzuhaltende Druckspannung	$\sigma_{\min} = -117,00$ [N/mm ²]
	einzuhaltende Zugspannung	$\sigma_{\max} = 1,00$ [N/mm ²]
Traverse	Querschnittsfläche	$A = 1,81 \text{ E}+03$ [mm ²]
	Widerstandsmoment	$W = 2,75 \text{ E}+05$ [mm ³]
	Flächenträgheitsmoment	$I = 4,13 \text{ E}+07$ [mm ⁴]
	Stützweite	$L = 7,30$ [m]
	maximale Einzellast	$F_{\max} = 8,89$ [kN]
	maximale Streckenlast	$q_{\max} = 2,44$ [kN/m]
	Durchbiegung bei max. Einzellast	$w_{\max} = 21,46$ [mm]
Vorspannung	Stichhöhe	$f = 120,00$ [mm]
	maximaler Arbeitsdruck	$D_{r_{\max}} = 200,00$ [bar]
	Kolbenfläche	$A_{kol} = 3.768,00$ [mm ²]
	Anzahl Spannritzen	$V_{anz} = 3$ [-]
	maximale Vorspannkraft	$P_{\max} = 226,08$ [kN]
	maximale Umlenkkraft	$R_{\max} = 11,15$ [kN]
	maximale Vorspannkraftänderung	$dP_{\max} = 52,36$ [±kN]
	Durchbiegung bei max. Vorspannkraft	$W_{\min} = 46,34$ [mm]

Tab. 8: Eigenschaften des statischen Systems

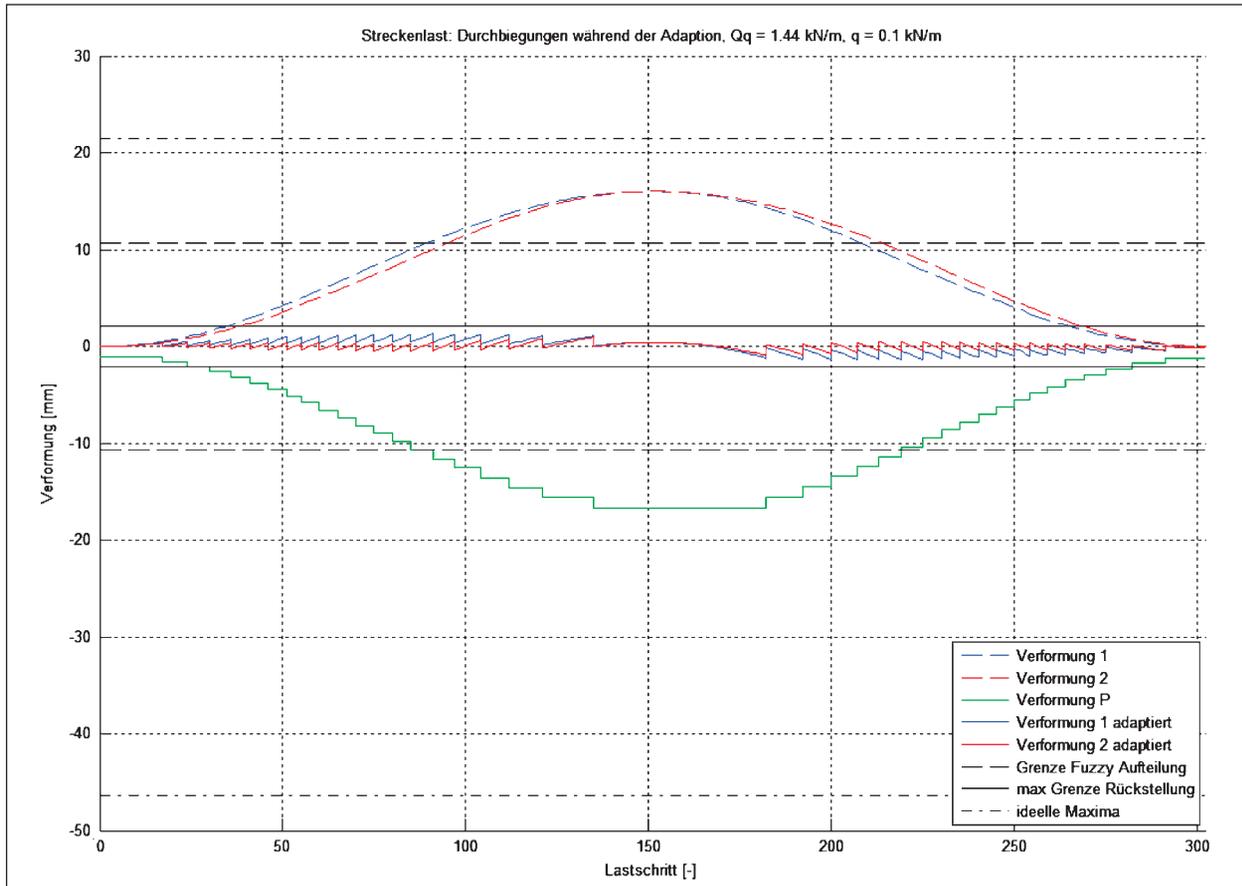


Bild 68: Verformungsverläufe Simulation Streckenlast [Ste111]

gen. Als Darstellungsbeispiel wurde die Lastanordnung „Streckenlast“ gewählt. Entsprechende Abbildungen der übrigen Belastungen sind in Kapitel 7 zu finden.

Die ermittelten Durchbiegungen an den Umlenkstellen (s. Bild 68) sind sowohl für das nicht vorgespannte statische System (Strichlinien) als auch für das adaptiv vorgespannte System (solide Linien) dargestellt. Hierbei sind Verformungen der Stelle 1 in Blau und der Stelle 2 in Rot hervorgehoben. Die Durchbiegung aus Vorspannung ist in Grün dargestellt, wobei aufgrund der symmetrischen Anordnung der Umlenkstellen für beide Messstellen derselbe Wert zu erwarten ist. Zusätzlich wurde die Aufteilung der Fuzzy-Variablen w_1 und w_2 in Schwarz abgebildet. Dabei sind die Begrenzungen der Grundmenge als Strichpunktlinien, der die dreiecksförmigen Fuzzy-Mengen beinhaltende Bereich mit Strichlinien und die dem maximalen Entscheidungswert zugehörigen Durchbiegungen als solide Linien markiert.

Die Wirkung der adaptiv geregelten Vorspannung ist eindeutig zu erkennen. Die Verformung aus Last wird in steigenden Intensitäten zurückgesetzt, wobei die einzelnen Adaptionsschritte zur Folge

haben, dass die Summe der Durchbiegungen an den Umlenkstellen deutlich minimiert wird.

Die sich in der Simulation ergebenden Spannungsverläufe sind in Bild 69 dargestellt. Hierin wurden zum direkten Vergleich zusätzlich zu den Ergebnissen mit Adaption (solide Linien) die Verläufe ohne Änderung der Vorspannung (Strichlinien) eingefügt, wobei die Stelle der jeweiligen Spannung farblich hervorgehoben ist. Des Weiteren werden die gewählten einzuhaltenden Grenzspannungen in Schwarz gezeigt.

Die Vermeidung von Zugspannungen aufgrund der Adaptionen ist deutlich zu erkennen: Spannungen auf der Unterseite des Querschnittes (Cyan, Magenta), welcher ohne Adaption starke Zugspannungen erfährt, werden mit jeder Änderung der Vorspannkraft weiter in den Druckspannungsbereich bewegt. Einerseits werden zwar größere Druckspannungen erreicht, andererseits wird jedoch das Auftreten von Zugspannungen gänzlich vermieden. Eine anfängliche Druckspannung aufgrund der minimalen Vorspannung und insbesondere die Einhaltung der gewählten Grenzspannungen durch die Regelung sind ebenfalls erkennbar.

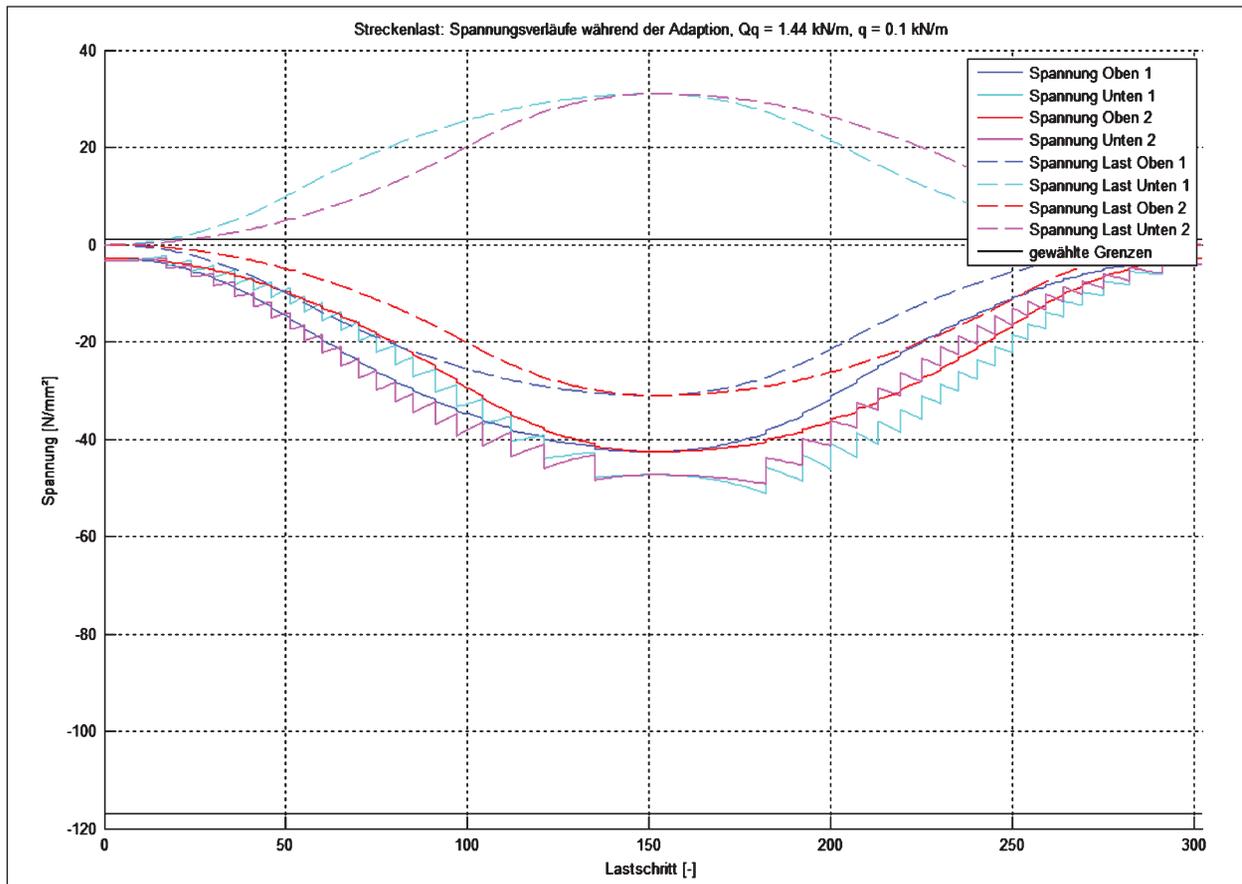


Bild 69: Spannungsverläufe Simulation Streckenlast [Ste11]

Die Darstellung der sich während der Simulation ergebenden Vorspannkraft (Bild 70, grüne Strichlinie) wurde um die pro Lastschritt vom Fuzzy-System evaluierte notwendige Änderung der Vorspannkraft ΔP ergänzt (solide Linie, Grün). Zur Kontrolle der Intensitäten sind zusätzlich die Grenzen der Vorspannkraft (Strichlinie, Schwarz) und der evaluierten Änderung (solide Linie, Schwarz) abgebildet.

Die Änderungen der Vorspannkraft, welche sich aus der linearen Anpassung der Entscheidungsgrenze ergeben, sind als „Stufen“ unterschiedlicher Höhe zu erkennen (Strichlinie, Grün). Bei kleiner Vorspannkraft erfolgen niedrigere und bei höherer Vorspannkraft größere Intensitäten zur Adaption. Im Verlauf der evaluierten Änderung der Vorspannkraft ist die Korrelation dieser zur aufgebrachtten Vorspannung zu sehen. Die Einhaltung der Grenzwerte ist ebenfalls ersichtlich. Mit jedem Adaptionsschritt wird die evaluierte Änderung auf die vorhandene Vorspannkraft aufgebracht, wodurch die Vorspannung erhöht wird und unmittelbar nach der Adaption die evaluierte Änderung wieder zu null reduziert wird. Dieses Verhalten bedeutet bezogen auf die Regelung, dass die aus der Änderung der Vorspannkraft resultierende Verformungsänderung

eine minimierte Durchbiegung unmittelbar nach der Adaption darstellt. Eine Abweichung von dem in den Regeln bestimmten Optimum hätte Intensitäten der Vorspannungsänderung zur Folge, welche unmittelbar nach der Adaption deutlich von null abweichen.

Eine Illustration des Verlaufes des evaluierten Entscheidungswertes (Bild 71, Blau) wurde um die aktuelle Entscheidungsgrenze (Rot) und die Extrema der Entscheidungsgrenze (Schwarz) ergänzt. Die Funktion der Entscheidung ist deutlich zu erkennen: Sobald der evaluierte Entscheidungswert die aktuelle Entscheidungsgrenze überschreitet, wird eine Adaption ausgelöst, wodurch die Verformung des statischen Systems minimiert wird, sodass der evaluierte Wert wieder abfällt. Des Weiteren ist die stufenweise lineare Anpassung der Aktionsgrenze aufgrund der aktuellen Vorspannkraft und damit das Zulassen höherer Entscheidungswerte und auch höherer Durchbiegungen sichtbar. Erwartungsgemäß sollte der Entscheidungswert nach jeder Adaption den Wert null betragen, jedoch ist erkennbar, dass der erwartete Wert nicht erreicht wird. Diese Abweichung entstammt hauptsächlich der Vorgehensweise während der Simulation, in der

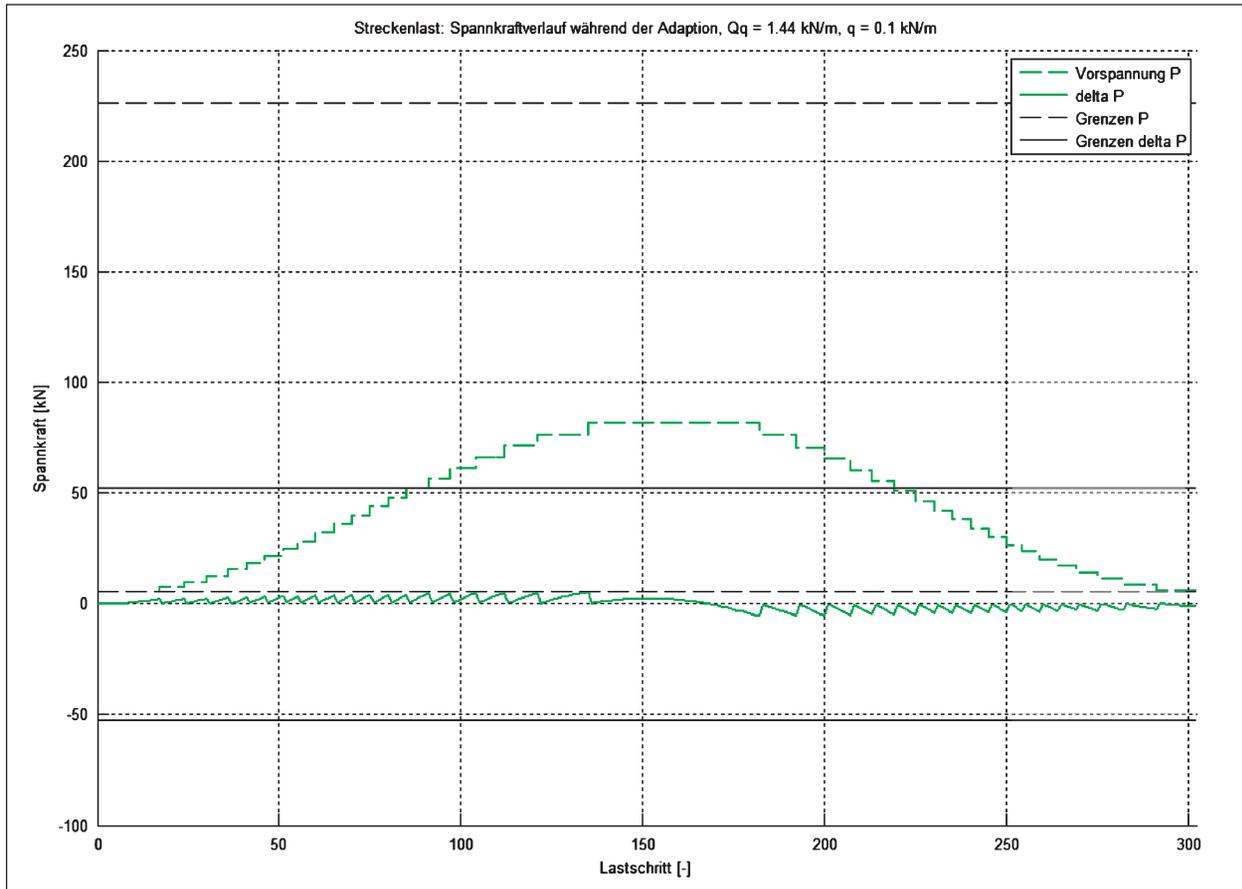


Bild 70: Vorspannungsverlauf Simulation Streckenlast [Ste11]

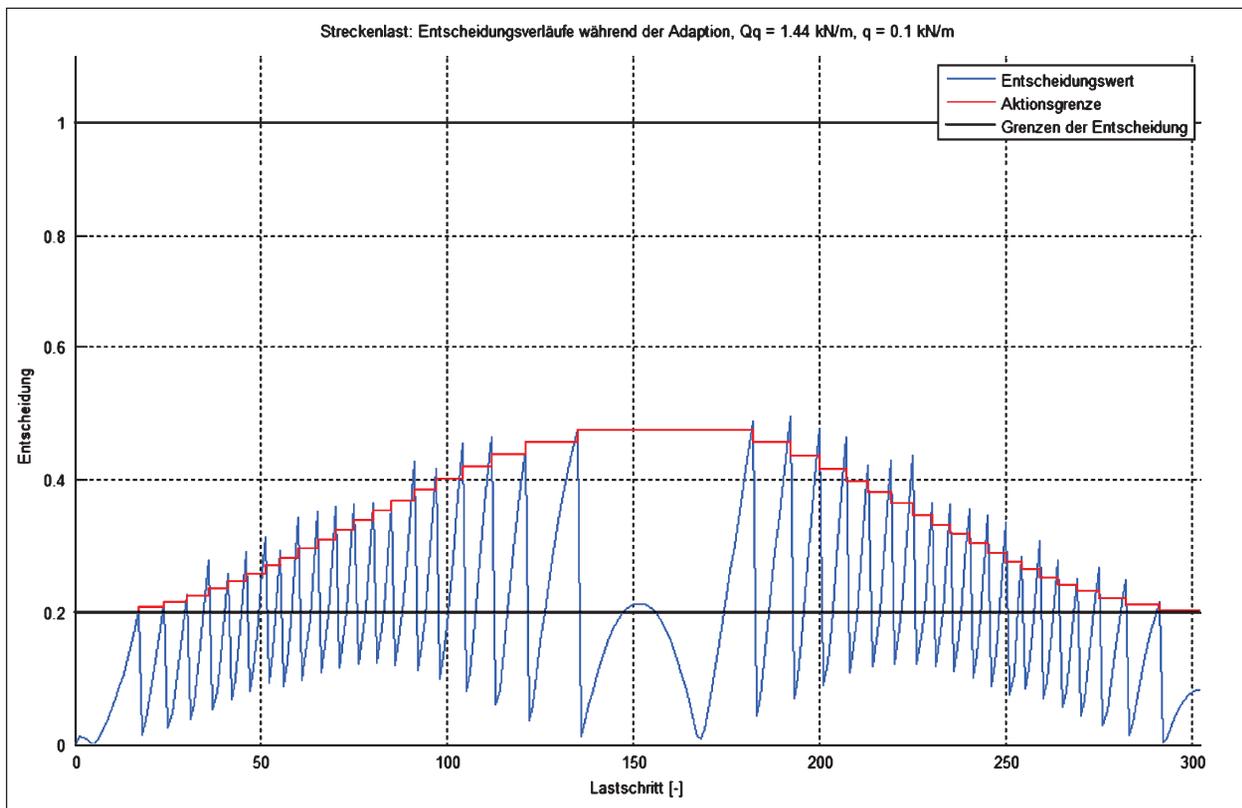


Bild 71: Entscheidungsverlauf Simulation Streckenlast [Ste11]

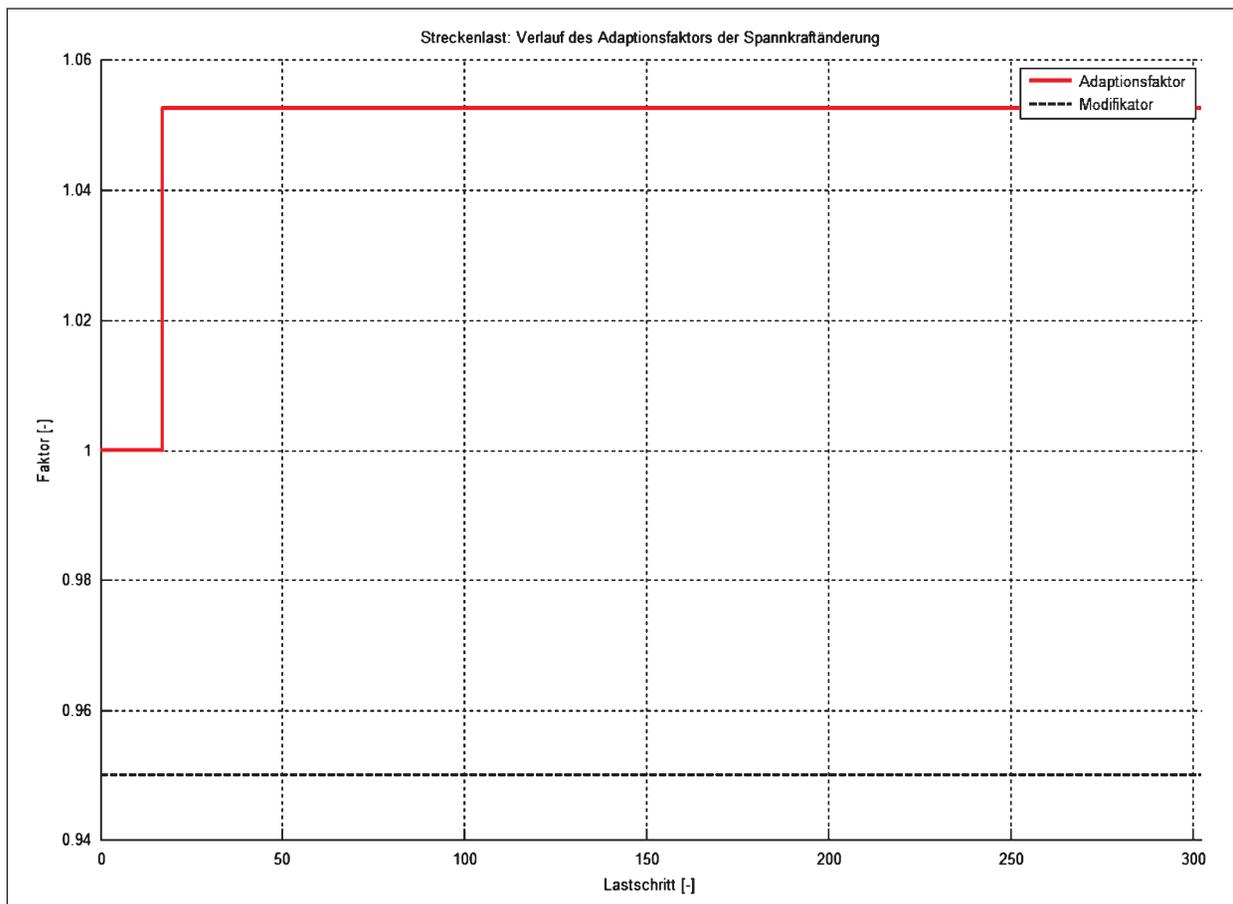


Bild 72: Adaptionfaktorverlauf Simulation Streckenlast [Ste11]

vor der Evaluierung eines Inputs zunächst das nächste Lastinkrement aufgebracht wird. Somit enthält die nächste Evaluierung sowohl die Adaption als auch den folgenden Lastschritt, wodurch die erwartete Rückstellung des Entscheidungswertes zu null übersprungen wird.

Ein Resultat der Konstellation aus triangulären Zugehörigkeitsfunktionen und der COG-Methode zur Defuzzifikation ist ein entstehender Fehler während der Evaluierung durch das Fuzzy-System. Zur Minimierung dieses Fehlers kann die Mengendichte zur Aufteilung der Fuzzy-Variablen erhöht werden, zum Beispiel indem eine höhere Anzahl an Mengen gewählt wird.

Die Darstellung des Adaptionfaktors (Bild 72, Rot) wurde um den angegebenen Modifikator zur Änderung der Systemsteifigkeit (Strichlinie, Schwarz) erweitert. Wie erwartet wird der Adaptionfaktor nach der ersten Adaption angepasst und verweilt über den gesamten Simulationsablauf beim Kehrwert ($1,053 = 1/0,95$) des Modifikators (0,95). Dieser Verlauf ist bei allen durchgeführten Simulationen identisch [Ste11].

Ergebnisse der Laborversuche

Zur Ermittlung des Regelungsverhaltens während der Laborversuche werden die gemessenen Durchbiegungen und Dehnungen an den Umlenkstellen und die Verläufe der Vorspannung, der Entscheidungswerte und des Adaptionfaktors vorgestellt. Die Ergebnisse werden über die Versuchszeit abgebildet, wobei jeder Versuch eine individuelle Dauer aufweist. Zu Vergleichszwecken wurde analog zu den Simulationen die Lastanordnung „Streckenlast“ zur Darstellung der Ergebnisse gewählt. Entsprechende Abbildungen der weiteren Versuche sind in Kapitel 7 zu finden.

Die gemessenen Durchbiegungen werden sowohl für Versuche ohne (Bild 73) als auch mit Adaption (Bild 74) dargestellt. Hierbei stellen die abgebildeten Verläufe für Stelle 1 (Blau) und Stelle 2 (Rot) die Mittelwerte der jeweils zwei eingesetzten Wegaufnehmer dar. Analog zu den Abbildungen der Simulationsergebnisse wurden ebenfalls die ausschlaggebenden Größen der Input-Fuzzy-Variablen eingefügt.

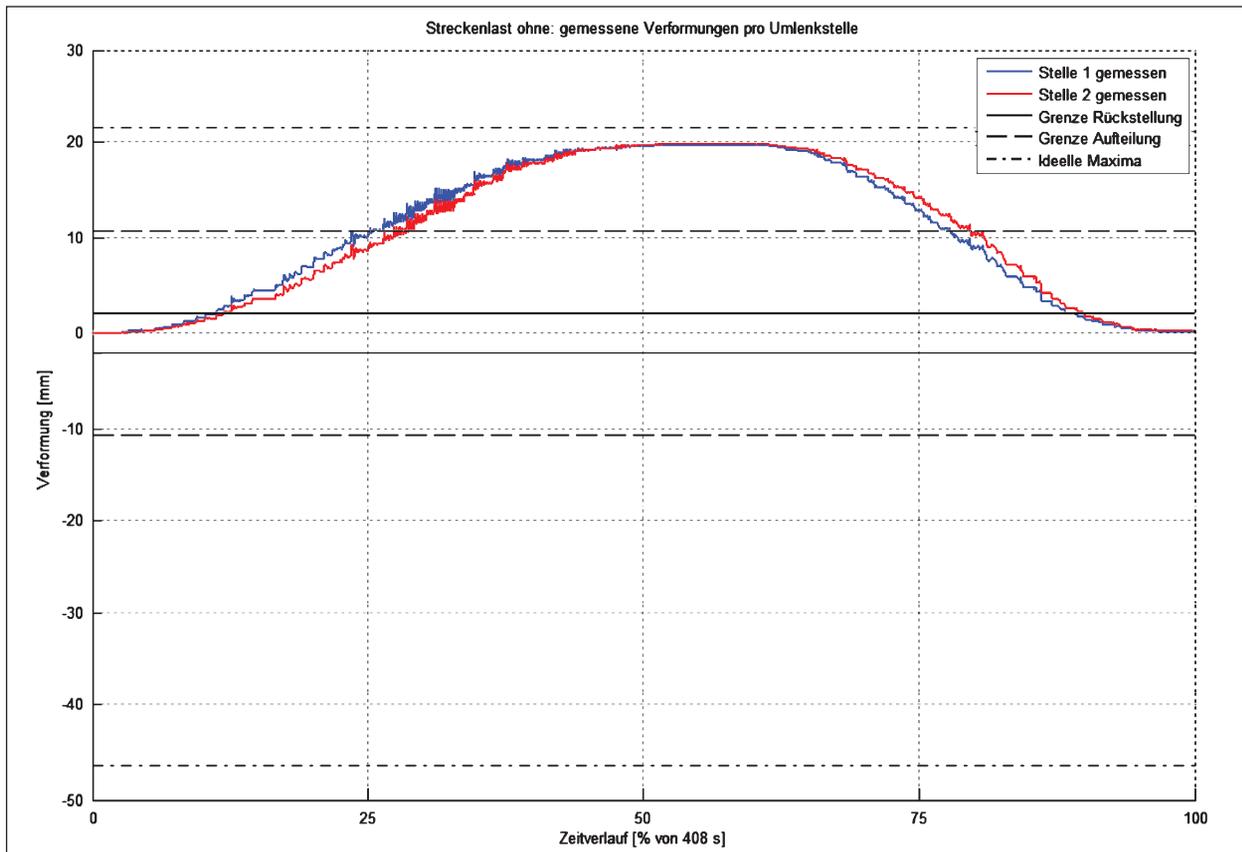


Bild 73: Durchbiegungsverläufe Laborversuch Streckenlast [Ste11]

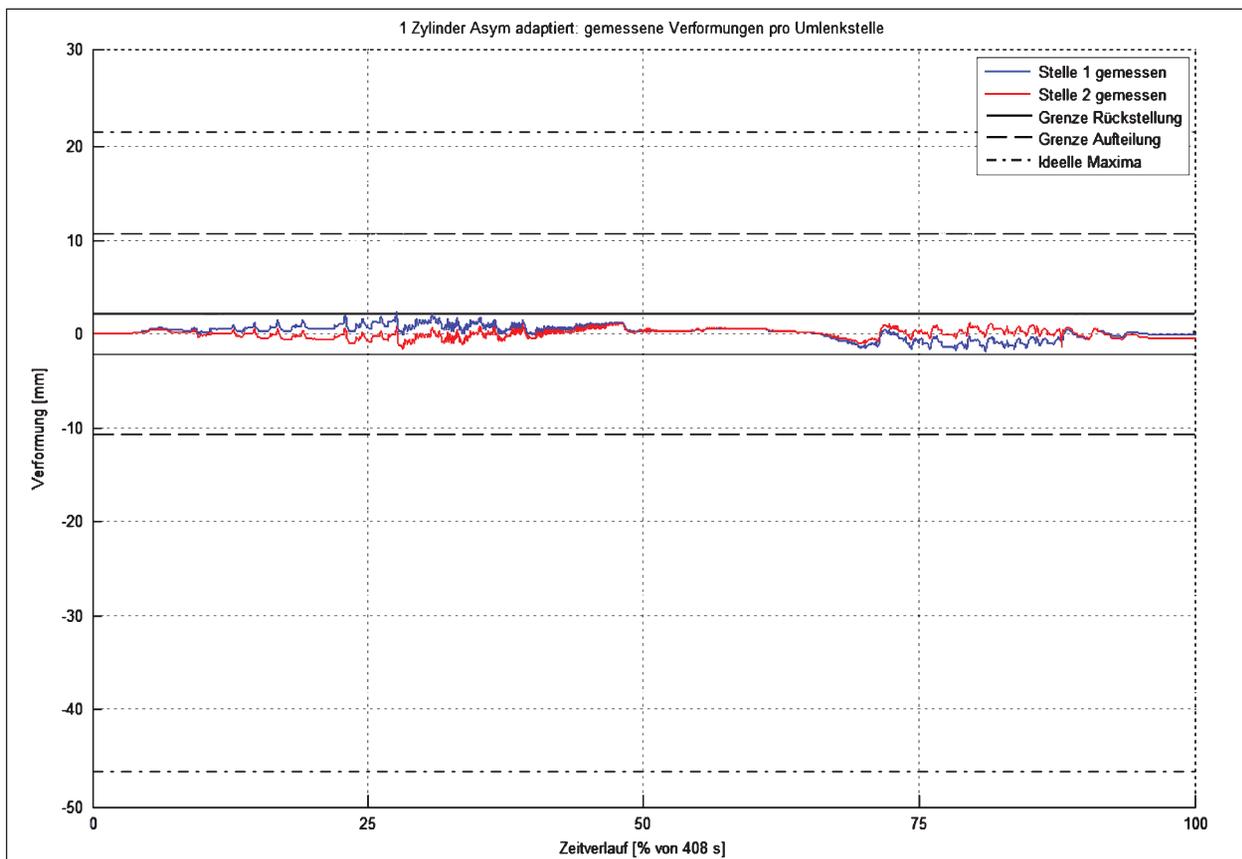


Bild 74: Durchbiegungsverläufe Laborversuch Streckenlast adaptiert [Ste11]

Der direkte Vergleich der Durchbiegungen verdeutlicht deren Minimierung durch die geregelte Vorspannung. Die schrittweise Erhöhung der Vorspannkraft führt zu einer stufenweisen Rücksetzung der Verformungen. Zusätzlich ist ein geringes Schwingen des statischen Systems zu erkennen, welches auf das schnelle Ablegen einzelner Zementsäcke zurückzuführen ist.

Zur Darstellung der gemessenen Dehnungen wurden die Mittelwerte der Messwerte von den jeweils zwei angeordneten Dehnmessstreifen verwendet. Für einen direkten Vergleich sind sowohl die Ergebnisse der Versuche ohne (Bild 75) als auch mit Adaption (Bild 76) dargestellt. Hierbei sind die Dehnungen der Stelle 1 (Blautöne) und Stelle 2 (Rottöne) jeweils in den Obergurten (Blau, Rot) und in den Untergurten (Cyan, Magenta) abgebildet. Ergänzend werden die einzuhaltenden Dehnungsgrenzen als schwarze solide Linien gezeigt.

Ein Vergleich der Dehnungsverläufe verdeutlicht die durch die adaptive Vorspannung entstehende Spannungumlagerung: Während ohne Anpassung auf der Unterseite relativ große Zugspannungen entstehen, ergeben sich aufgrund der Adaption der

Vorspannkraft fast ausschließlich Druckspannungen. Unerwartete Dehnungen und auch Durchbiegungen am Ende eines Versuches resultieren aus dem notwendigen minimalen Anpressdruck der Belastungshydraulik. Um vorzeitige Reaktionen zu vermeiden, wurde die Tarierung der Sensoren erst nach dem Aufbringen der Minimalkraft durchgeführt, wodurch die Messwerte nach vollständiger Entlastung gering von null abweichen können.

Der Illustration des Vorspannkraftverlaufes (Bild 77, solide Linie, Grün) wurden ergänzend die Verläufe der evaluierten (solide Linie, Blau) und der durch den Adaptionsfaktor angepassten Vorspannkraftänderung (Strichlinie, Grün) hinzugefügt. Des Weiteren werden die jeweiligen Grenzen (Schwarz) gezeigt.

Die Aktualisierung der Vorspannkraft erfolgt stufenweise und ist auch in den Dehnungen der unteren Gurte gut erkennbar. Bedingt durch die Schwingung der Aluminium-Traverse aufgrund schnellen Ablegens der Zementsäcke sind zwei Überreaktionen der Regelung bei ca. 27 % und 85 % des Zeitverlaufes zu erkennen, welche nach Ablauf der Wartezeit von zwei Sekunden sofort korrigiert wurden. Da das Eigengewicht und die minimale

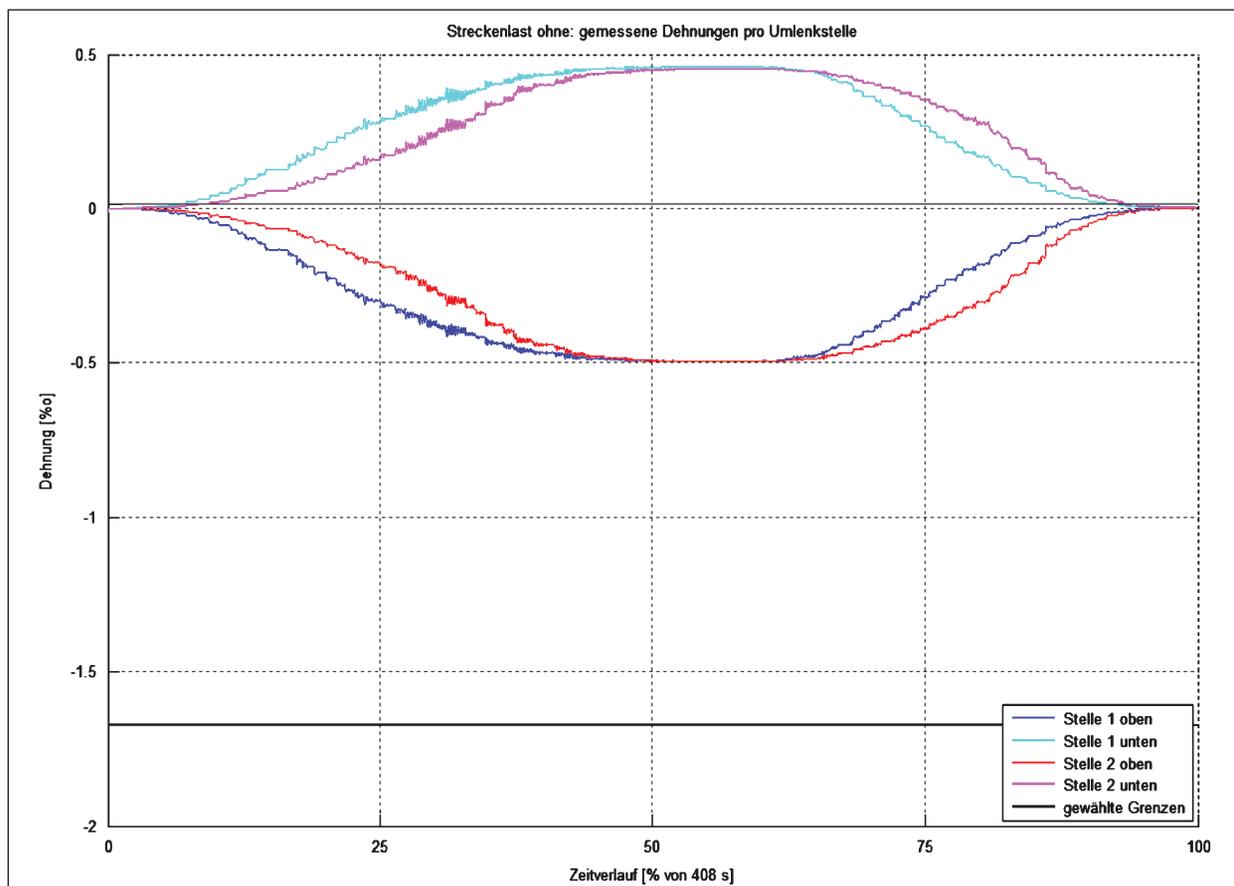


Bild 75: Dehnungsverläufe Laborversuch Streckenlast [Ste11]

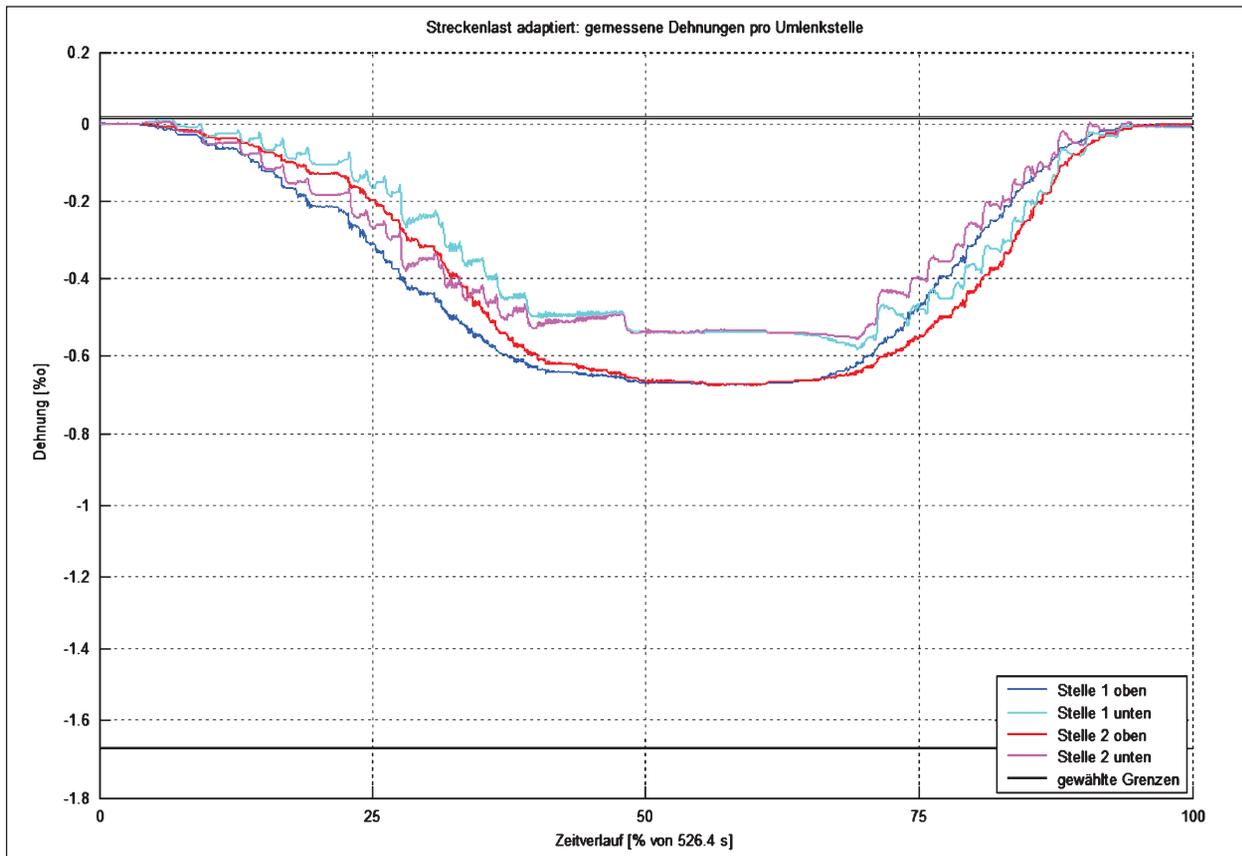


Bild 76: Dehnungsverläufe Laborversuch Streckenlast adaptiert [Ste11]

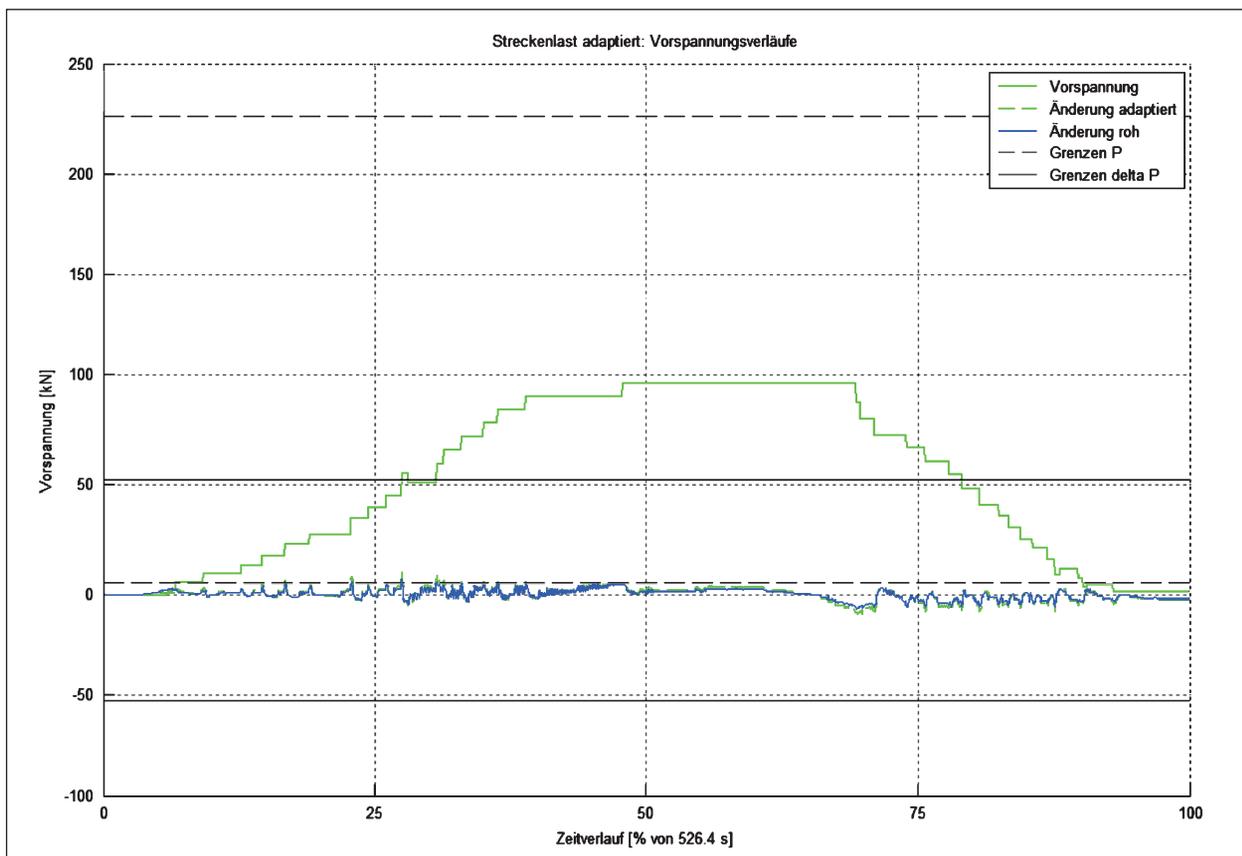


Bild 77: Vorspannungsverlauf Laborversuch Streckenlast adaptiert [Ste11]

Vorspannung aufgrund der Tarierung vor jedem Versuchsdurchlauf nicht in die Messdaten einfließen, wurde das Minimum der Vorspannkraft innerhalb des Regelungsprogramms auf 0 kN festgelegt. Dieses wurde stets eingehalten.

Zur Darstellung des Entscheidungsverlaufes (Bild 78) wurden der evaluierte Entscheidungswert (Blau) und die Entscheidungsgrenze (Rot) mit ihren Extrema (Schwarz) abgebildet. Sobald der Entscheidungswert die Grenze überschreitet, wird erwartungsgemäß eine Adaption ausgelöst. Anders als während der Simulation sinkt der Entscheidungswert nicht sofort auf ein lokales Minimum zurück, sondern benötigt aufgrund der notwendigen Reaktionszeit der Hydraulikanlage einen Zeitraum von zwei Sekunden, in denen bereits eine Steigerung der Belastung zu verzeichnen ist. Des Weiteren sind auch im evaluierten Entscheidungswert die Schwingungen des statischen Systems erkennbar, da diese Verformungen gemessen werden und als Eingangswerte in das Fuzzy-System eingehen.

Zur Analyse des Verlaufes des Adaptionsfaktors (Bild 79) wurde dieser (Blau) mit seinen Grenzen (Strichlinie, Blau) neben dem analogen Ausgangs-

signal der Regelung (Rot) mit den entsprechenden Grenzen (Strichlinie, Rot) abgebildet. Die Anpassung des Adaptionfaktors wird durchgeführt, sobald zwei Sekunden nach einer Adaption vergangen sind. Der lernfähige Faktor verweilt einen Großteil der Versuchsdauer an seinem Maximum. Ein Vergleich mit den gemessenen Durchbiegungen der Aluminium- Traverse auf den Faktor, welcher in den schwingungsreichsten Bereichen vom Maximum abweicht. Ebenfalls ist eine starke Abweichung zu den Zeitpunkten zu erkennen, an denen eine Überreaktion stattfand. Da die zu starke Anpassung zu hohe Verformungsänderungen nach sich zog, wurde der Adaptionsschritt abgemindert.

Die Tendenz des lernfähigen Faktors hin zum Maximum deutet darauf hin, dass die angenommene Steifigkeit der Traverse unterschätzt wurde, da die durch Änderung der Vorspannkraft zu erzielende Durchbiegungsänderung nicht erreicht wird. Des Weiteren hat das niedrige Gewicht in Verbindung mit hoher Steifigkeit des Trägers Schwingungen zur Folge, welche auf zufällige Weise in den Adap-

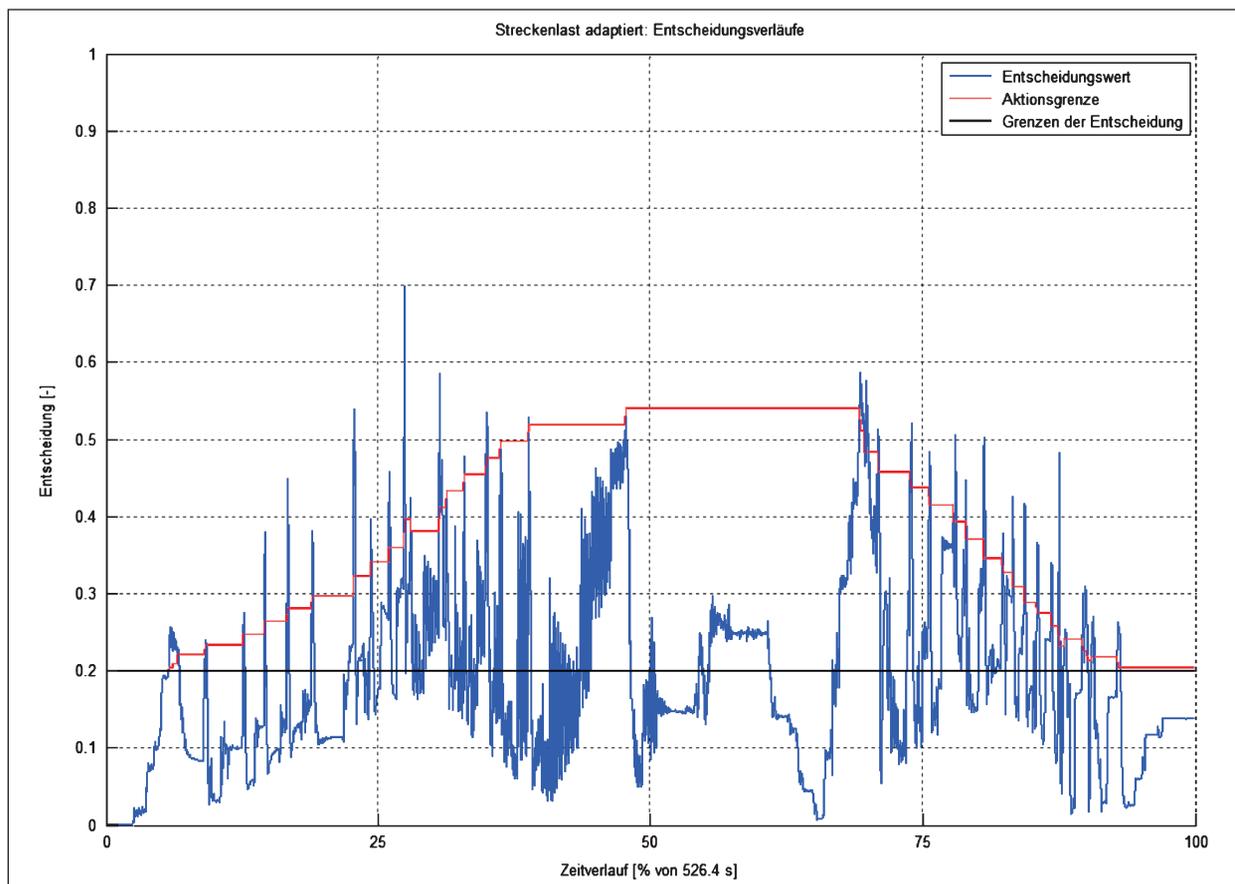


Bild 78: Entscheidungsverlauf Laborversuch Streckenlast adaptiert [Ste11]

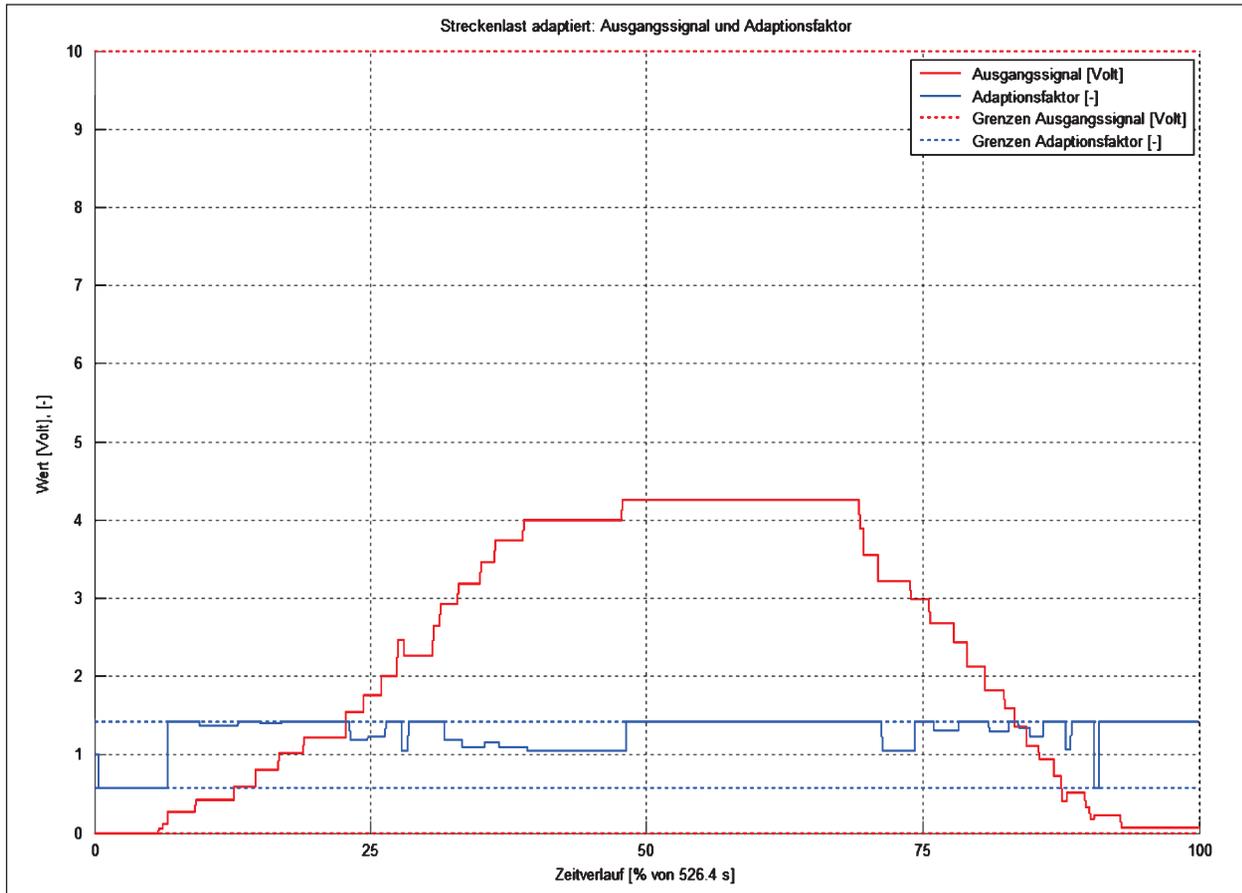


Bild 79: Signalverlauf Laborversuch Streckenlast adaptiert [Ste11]

tionsfaktor eingehen. Da der Faktor aufgrund des Verhältnisses von gewünschter zu erreichter Verformung aktualisiert wird und die erreichte Verformung genau eine Messwertzusammenstellung zwei Sekunden nach Adaption beinhaltet, wirkt ein dynamisches Verhalten störend. Da keine Informationen der Schwingungsamplitude zu diesem Zeitpunkt vorliegen, gehen die dynamischen Verformungen direkt in den Adaptionfaktor ein [Ste11].

5.2.11 Zwischenbilanz

Bei den durchgeführten Simulationen wurde nach jedem Überschreiten der Entscheidungsgrenze durch den evaluierten Entscheidungswert eine Adaption ausgelöst. Die Durchbiegungen konnten bei maximaler Last auf einen Bereich zwischen 2,56 % und 10,19 % der Durchbiegungen ohne Adaption minimiert werden. Die entsprechend der Vorspannkraft modifizierte Grenze ist sowohl in den Verformungen als auch in der Vorspannkraft durch unterschiedlich intensive Abstufungen gut sichtbar. Der Adaptionfaktor weist nach der ersten Anpassung den Kehrwert des Modifikators auf und gleicht die

modifizierte Steifigkeit über die gesamte Laufzeit zuverlässig aus. Mit Ausnahme der Spannungen während planmäßiger Überlast weisen bei der Adaption alle Parameter Werte innerhalb der zugelassenen Bereiche auf. Ungenauigkeiten aufgrund des gewählten Fuzzy-Systems sind minimal, wobei keine Auswirkungen auf die Regelungsqualität erkennbar sind.

Im Verlauf der Laborversuche konnten die aus der Belastung entstehenden Durchbiegungen bei maximaler Last auf einen Bereich zwischen 2,68 % und 11,88 % der Durchbiegungen ohne Adaption minimiert werden. Sobald der Entscheidungswert die von der aktuellen Vorspannkraft abhängige Entscheidungsgrenze überschreitet, wird eine Adaption ausgelöst, worauf anlagenbedingt ein passiver Zeitraum von zwei Sekunden folgt. Erst nach Ablauf dieses Zeitfensters wird der Adaptionfaktor angepasst und die Möglichkeit einer weiteren Adaption freigegeben. Die Vorspannkraft liegt innerhalb der gültigen Grenzen, wobei das Minimum aus praktischen Gegebenheiten auf 0 kN festgelegt wurde, weshalb keine Überdrückung des Querschnittes und damit keine Reserve an Druckspannung vorlie-

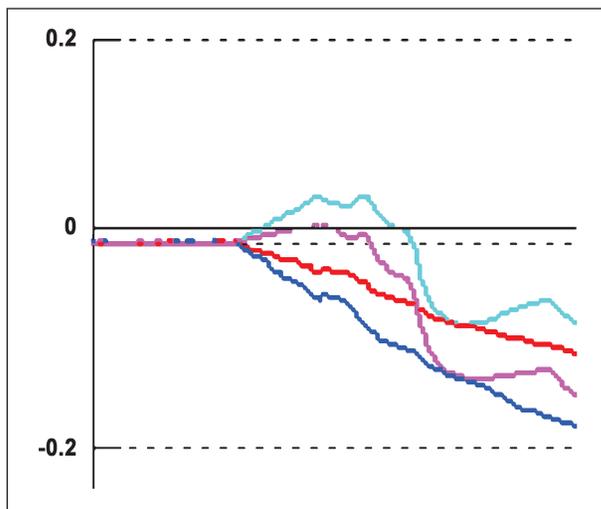


Bild 80: Zugdehnung bei Belastungsbeginn [Steil11]

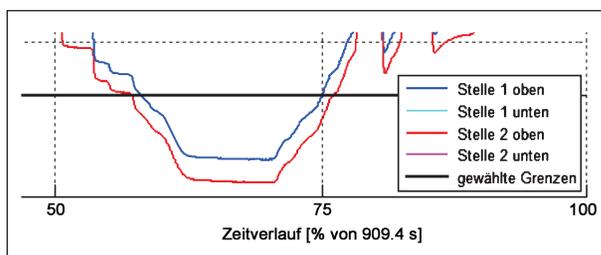


Bild 81: Druckspannung bei Überlast [Steil11]

gen. Aus diesem Grund führen Belastungen bei minimaler Vorspannkraft zu Zugspannungen, welche größer ausfallen als die zugelassene Maximalspannung von 1 N/mm^2 (s. Bild 80: Dehnungen unter Wanderlast, adaptiert). Die maximale Druckspannung wird, außer nach Erreichen einer Überlast (s. Bild 81: Dehnungen unter 2 Einzellasten, adaptiert), eingehalten.

Das Verweilen des lernfähigen Adaptionfaktors an dessen Maximum deutet darauf hin, dass die tatsächliche Steifigkeit der Traverse größer ist als die in der ideellen Berechnung ermittelte. Das erwartete Verhalten der Oszillation um das Verhältnis der Steifigkeiten des ideellen statischen Systems und der Traverse wurde nicht erreicht.

Ein angemessenes Regelungsverhalten ist deutlich erkennbar. Zugspannungen treten nur bei Belastungsbeginn auf. Ein Schwingen der hydraulischen Anlagen gegeneinander ist zwar bemerkbar (s. Bild 82: Vorspannung unter Einzellast in Feldmitte, adaptiert), jedoch strebt die Regelung einen Ausgleich dieses Phänomens an. Überreaktionen der Regelung, zum Beispiel durch Schwingungen, werden schnell korrigiert (s. Bild 83: Vorspannung unter Streckenlast, adaptiert).

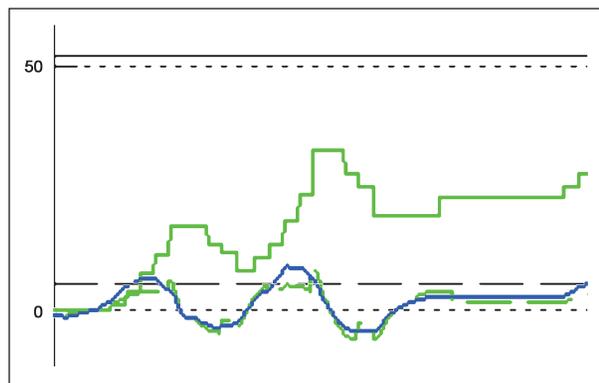


Bild 82: Schwingen der hydraulischen Anlagen [Steil11]

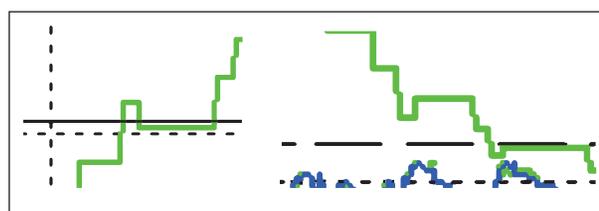


Bild 83: Korrektur von Überreaktionen [Steil11]

Zur Auswertung wurden die Extrema der Verformungen sowohl global über den gesamten Zeitverlauf als auch lokal bei maximaler Belastung betrachtet. Des Weiteren wurden die maximal erreichte Vorspannkraft und sich ergebende Extrema der Spannungen verglichen (s. Tabelle 9). Die durch die Regelung reduzierten Anteile der Durchbiegung sind in Grün hervorgehoben. Spannungen, welche die angegebenen Grenzen überschreiten, sind in Rot markiert.

Zusammenfassend kann in dieser ersten Versuchsphase festgehalten werden, dass die entworfene Regelung zuverlässig und sehr robust arbeitet [Steil11].

5.3 Versuchsträger 2: Spannbetonplattenbalken

Um die Eignung der entwickelten Fuzzy-Regelung an Bauteilen in Spannbetonbauweise zu untersuchen, wurde ein zweiter Versuchskörper als Spannbetonplattenbalken konzipiert (s. Bild 84). Im Gegensatz zum Werkstoff Aluminium ist das Verhalten von Beton im Allgemeinen nicht linear. Dabei kann bis zu einer Druckspannung in Höhe von ca. 30 % der Betondruckfestigkeit von einem nahezu linearen Materialverhalten ausgegangen werden. Unter Zugbeanspruchung verhält sich Beton bis zum Erreichen der Zugfestigkeit annähernd linear-elastisch.

	1 Zylinder Mitte 12 kN	1 Zylinder Asym 12 kN	2 Zylinder 2 x 12 kN	Wanderlast 4 kN	Streckenlast 1,44 kN/m
Maximale Verformungen [mm]					
Simulation ohne Adaption	28,68	26,60	49,86	9,65	16,02
Simulation adaptiert	1,51	2,96	4,42	1,27	1,33
Reduktion auf [%]	5,26	11,13	8,86	13,16	8,30
Versuch ohne Adaption	31,00	28,88	54,88	11,05	19,75
Versuch adaptiert	1,89	3,51	9,39	2,18	2,26
Reduktion auf [%]	6,10	12,15	17,11	19,73	11,44
Verformung bei max. Last [mm]					
Simulation ohne Adaption	28,68	26,60	49,86	9,65	16,02
Simulation adaptiert	1,51	2,71	4,42	0,49	0,41
Reduktion auf [%]	5,26	10,19	8,86	5,08	2,56
Versuch ohne Adaption	31,00	28,88	54,88	11,05	19,75
Versuch adaptiert	1,42	3,43	9,39	0,72	0,53
Reduktion auf [%]	4,58	11,88	17,11	6,52	2,68
Minimale Verformungen [mm]					
Simulation ohne Adaption	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Simulation adaptiert	-1,58	-2,81	-2,22	-1,32	-1,38
Versuch ohne Adaption	-0,50	-0,61	-0,09	0,00	-0,01
Versuch adaptiert	-9,00	-4,26	-8,52	-2,34	-1,78
Maximale Vorspannkraft [kN]					
Simulation	137,61	121,30	226,08	49,99	81,50
Anteil von P_{\max} [%]	60,87	53,65	100,00	22,11	36,05
Versuch	142,00	126,81	226,08	50,74	96,21
Anteil von P_{\max} [%]	62,81	56,09	100,00	22,44	42,56
Maximale Spannungen [N/mm²]					
Simulation ohne Adaption	53,07	70,76	106,13	23,59	30,99
Simulation adaptiert	-2,27	-1,91	-1,91	-2,15	-2,27
Versuch ohne Adaption	47,30	50,59	85,72	21,17	32,22
Versuch adaptiert	1,59	2,03	2,34	3,26	0,94
Minimale Spannungen [N/mm²]					
Simulation ohne Adaption	-53,07	-70,76	-106,13	-23,59	-30,99
Simulation adaptiert	-86,69	-86,89	-134,34	-35,42	-51,06
Versuch ohne Adaption	-52,75	-72,87	-108,21	-25,11	-34,79
Versuch adaptiert	-69,47	-90,05	-137,00	-30,81	-47,34

Tab. 9: Zusammenstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an der adaptiv vorgespannten Aluminium-Traverse [Ste11]

Das Ziel der für den Spannbetonplattenbalken entwickelten Fuzzy-Regelung besteht zunächst darin, jegliche Rissbildung im Balken zu verhindern, d. h., Zugspannungen zu vermeiden, welche die Zugfestigkeit des Betons überschreiten. Unzulässig hohe Druckspannungen sollen dabei eben-

falls vermieden werden. Nach Beendigung des Versuchsprogramms für den ungerissenen Balken wird der Balken gezielt geschädigt, um das Versuchsprogramm für den gerissenen Balken (nichtlineares Materialverhalten) zu wiederholen.

Bei den Versuchen am Spannbetonplattenbalken wurde der Aufbau des Reglers als Kaskadenregelung beibehalten. Auch das Stellgliedsystem, bestehend aus der servo-geregelten Hydraulikanlage, kam unverändert zum Einsatz. Für die Versuche an der Aluminiumtraverse wurde, wie bereits erwähnt, die Mess- und Regeleinheit Servoreg 5000 von einem Experten eingestellt und die Hydraulikanlage erfolgreich in Betrieb genommen. Bei der Dimensionierung des Plattenbalkens wurden die durchgeführten Einstellungen der Hydraulik bezüglich des maximalen Drucks von 200 bar sowie der Parameter der PID-Regelung berücksichtigt, sodass eine erneute Einstellung der Parameter entfallen konnte.

5.3.1 Systemdaten

Querschnitt

Der Träger wurde als Plattenbalken mit einer Gesamthöhe von 44 cm und einer Gesamtbreite von 40 cm hergestellt (s. Bild 85). Die Stegbreite betrug 15 cm und die Dicke des Flansches 10 cm. Diese Abmessungen wurden nach mehreren Optimierungsberechnungen zur Erreichung einer optimalen Anordnung der Hohlkolbenzylinder oberhalb und unterhalb der Schwerlinie des T-Querschnittes festgelegt.

Statisches System

Der Stahlbetonplattenbalken hatte eine Systemlänge von 5,0 m und ist ebenfalls als Einfeldträger konzipiert. Der Balken (s. Bild 86 und Bild 87) wurde in der Versuchshalle des Instituts für Massivbau geschalt, bewehrt und betoniert. Die Konstruktion wurde extern mit insgesamt vier eng am Steg geführten Monolitzen unmittelbar nach dem Einbau des Versuchskörpers mit der minimalen Vorspannkraft vorgespannt. Die Spannfitzen wurden in symmetrischer Anordnung (jeweils zwei pro Seite) gegen dieselben bei der Traverse erfolgreich eingesetzten einseitig verankerten Hohlkolbenzylinder einseitig verankert. Der maximale Hub bzw. Spannweg betrug 16 mm. Die maximal erreichbare Vorspannkraft von ca. 300 kN war entsprechend höher als bei der Aluminiumtraverse, da die Vorspannung mit vier Spannfitzen erfolgte.

Die Betonstahlbewehrung des Versuchskörpers ist in Bild 88 und Bild 89 dargestellt. Bei der Bemessung der Betonstahlbewehrung für das vorliegende statische System „Einfeldträger“ des Plattenbalkens wurden Einwirkungen aus dem Eigengewicht

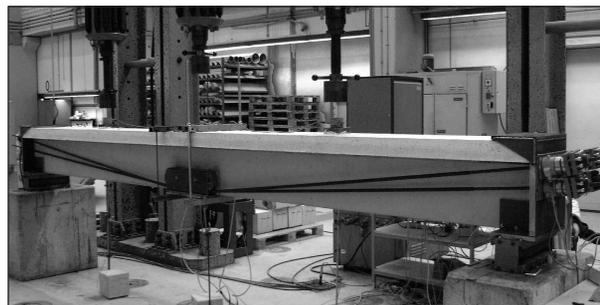


Bild 84: Adaptiv vorgespannter Stahlbetonplattenbalken

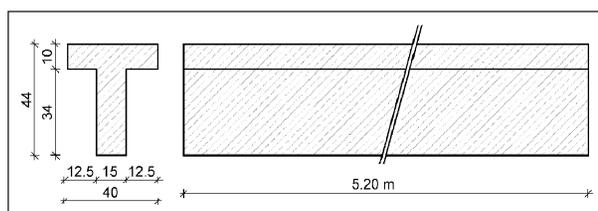


Bild 85: Abmessungen des Plattenbalkens

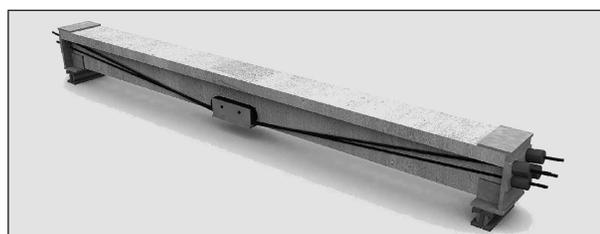


Bild 86: 3D-Darstellung des Plattenbalkens

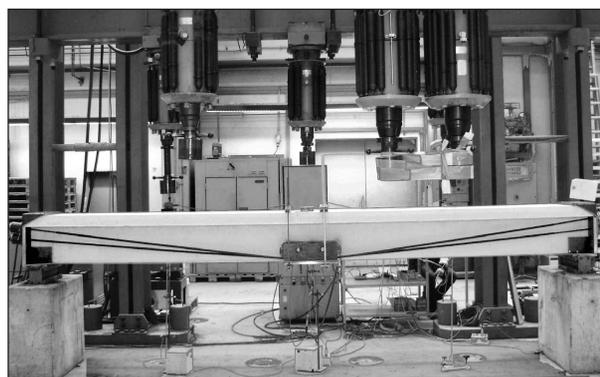


Bild 87: Seitenansicht des Plattenbalkens

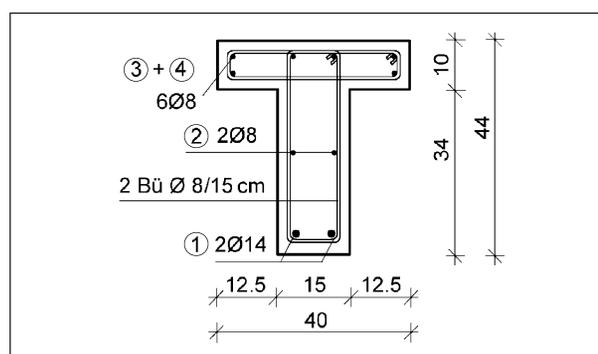


Bild 88: Betonstahlbewehrung des Plattenbalkens im Querschnitt

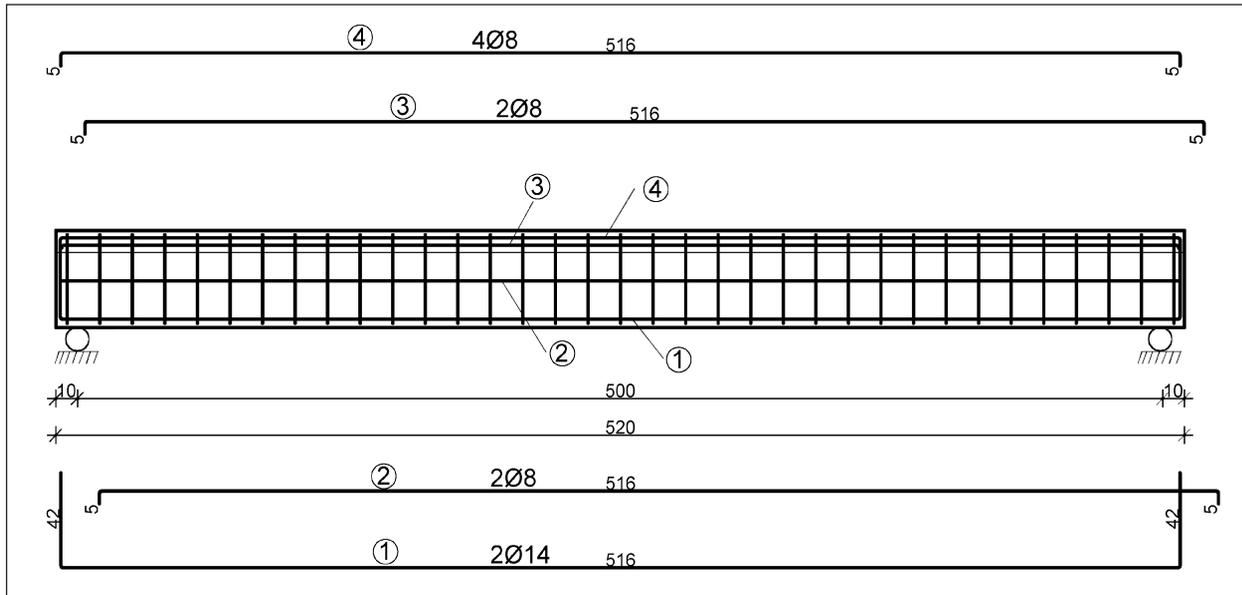


Bild 89: Betonstahlbewehrung des Plattenbalkens am Längsschnitt dargestellt

des Balkens und der Umlenkstelle sowie aus Anteilen der geplanten Einzellaststellungen berücksichtigt. Der Lastfall „Transport“ ist durch die vorhandene Bewehrung ebenfalls abgedeckt.

Baustoffe und Materialeigenschaften

Verwendet wurde ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45. Da die Betondeckung 2,0 cm beträgt, wurde der Größtkorndurchmesser auf maximal 8 mm begrenzt. Als Bindemittel wurde Hochofenzement CEM III A 42,5 N mit einer mittleren Festigkeitsentwicklung verwendet. Als Zusatzstoffe wurden EFA-Füller S-B/F und Baumineral benutzt. Zur Beeinflussung der Konsistenz des Frischbetons wurde als Zusatzmittel ein Betonverflüssiger (BV-S) eingesetzt. Der Beton weist die Konsistenzklasse F3 auf. Der Frischbeton wurde in einer Charge mit einem Fahrmischer geliefert.

Für die Bestimmung der Festigkeitswerte und des Elastizitätsmoduls des Betons nach 28 Tagen und am Prüftag wurden folgende Begleitkörper hergestellt:

- Neun Zylinder mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm zur Bestimmung von Spaltzugfestigkeit (3 x), Zylinderdruckfestigkeit (3 x) in Verbindung mit dem statischen E-Modul (3 x), da bei der Ermittlung des E-Moduls gemäß DIN 1048-5 als Mittelwert der Druckfestigkeit drei Probekörper gleicher Art und Maße, Herstellung und Nachbehandlung erforderlich sind. Der Elastizitätsmodul wurde als Se-

Betonalter	Zylinder-Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]	Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
28 Tage	50,04	3,76	3,50	26.700
Prüftag (55 Tage)	56,95	4,03	4,36	30.515

Tab. 10: Nach DIN 1048-5 ermittelte Betonkennwerte

kantenmodul zwischen einer Unterspannung von 0,5 N/mm² und einer Oberspannung von einem Drittel der Zylinderdruckfestigkeit ermittelt.

- Sechs Biegebalken mit einer Länge von 700 mm und einem quadratischen Querschnitt 150 x 150 mm zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit.

Der Balken und die Prüfkörper wurden 4 Tage nach dem Betoniervorgang ausgeschalt und in der Versuchshalle unter Laborbedingungen gelagert. Beim Einbau des Versuchsstandes war der Betonplattenbalken bis auf wenige Schwindrisse rissfrei.

Die nach DIN 1048-5 ermittelten Betonkennwerte als Mittelwerte aller jeweils drei geprüften Begleitkörper im Alter von 28 Tagen und am Prüftag sind in Tabelle 10 aufgeführt. Für die Betonstahlbewehrung wurde gerippter Betonstahl BSt 500 S nach DIN 488 verwendet.

5.3.2 Spannkitzen

Zur externen Vorspannung wurden vier Monolitzen der Firma SUSPA-DSI verwendet (s. Kapitel 5.2.3).

5.3.3 Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannslitzen

Zur Verankerung der Monolitzen kam eine Stahlkonstruktion zum Einsatz, deren allgemeiner Aufbau sich nach bereits bewährten Formen von Umlenkstellen aus dem Brückenbau richtete. Dabei muss der Krümmungsradius der Spannglieder beachtet werden und die Übertragung der Umlenkkräfte bei Plattenbalken durch U-förmige Sättel aus Stahl erfolgen, die am Steg zur Lagesicherung entweder geklebt oder verdübelt werden [zt08, vt08, AlBe11]. Beispiele ausgeführter Umlenkstellen sind dem Bild 90 und Bild 91 zu entnehmen.

Beim Entwurf der Verankerungsplatte wurde den unterschiedlichen Neigungswinkeln der Monolitzen im Verankerungsbereich durch zusätzlich angeschweißte Stahlkeile Rechnung getragen. In Bild 92 und Bild 93 sind die Verankerungen der Monolitzen auf beiden Seiten des Plattenbalkens dargestellt.

Anders als bei der Traverse weist der Spanngliedverlauf beim Spannbetonplattenbalken nur eine

Umlenkstelle auf. Diese wurde so konstruiert, dass der Mindestkrümmungsradius der Monolitzen (2,6 m) eingehalten bleibt und die Übertragung der aus der Vorspannkraft resultierenden Umlenkkraft in den Steg formschlüssig durch eine U-förmige

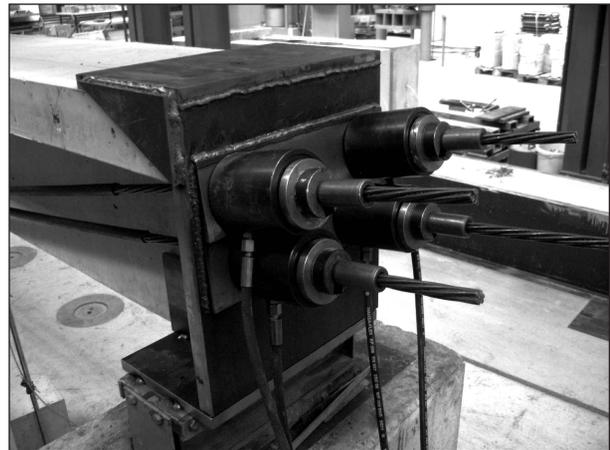


Bild 92: Verankerung der Monolitzen auf Zylinderseite



Bild 90: Umlenkstelle bei der Brücke ü. Rostocker Seehafen im Zuge der BAB A 19 [AlBe11]

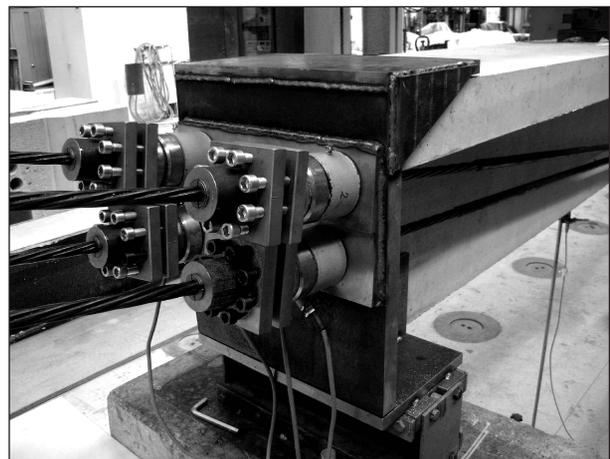
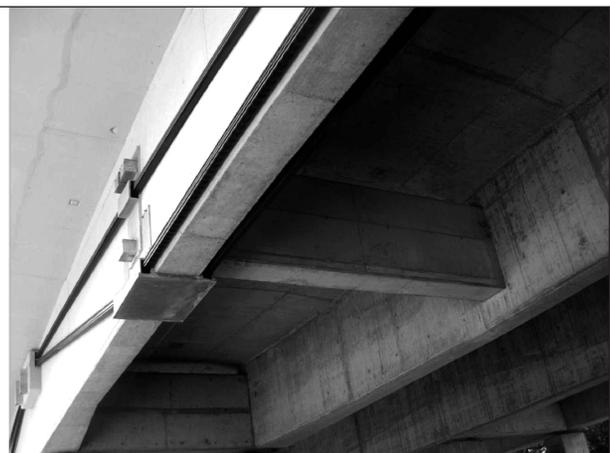


Bild 93: Verankerung der Monolitzen auf der Seite der Kraftmessdosen und der Vorspannvorrichtung



Bild 91: Umlenkstellen bei der Rachenbachbrücke, Österreich [zt08, vt08]



Konstruktion erfolgt. Details der Umlenkstelle sind in den Bildern 94 bis 96 gezeigt.

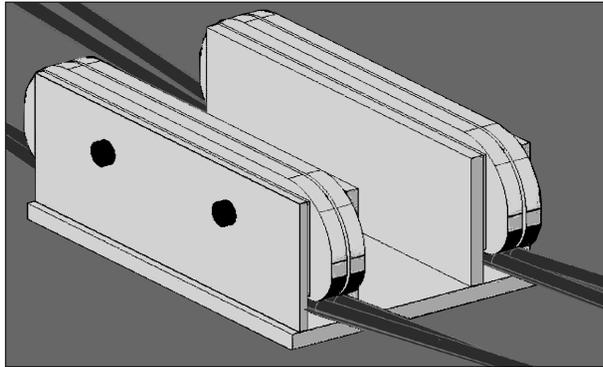


Bild 94: 3D-Darstellung der Umlenkstelle

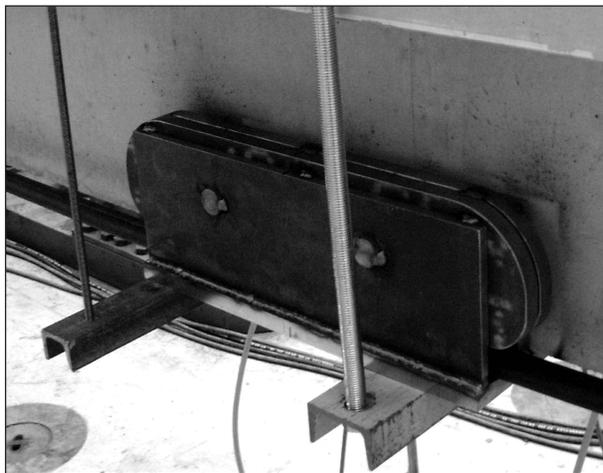


Bild 95: Umlenkstelle in eingebautem Zustand



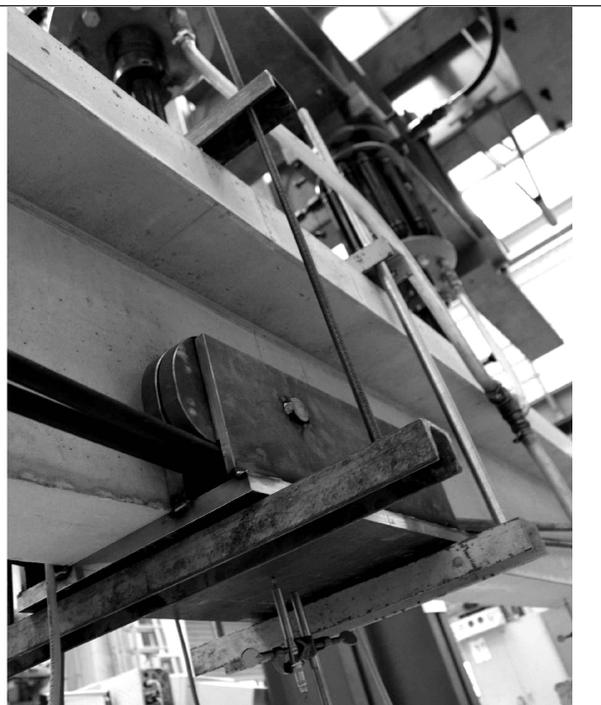
Bild 96: Umlenkstelle aus weiteren Blickwinkeln

Die Hohlkolbenzylinder bzw. Spannritzen wurden bei diesem Versuch einseitig und symmetrisch mit einem Achsabstand von 5,0 cm ober- und unterhalb der Schwerachse des Querschnittes angeordnet. Daraus resultiert eine mittlere Stichhöhe von 25 cm an der Umlenkstelle (s. Bild 97).

In Tabelle 11 sind die Daten des Versuchsträgers 2 zusammengefasst. Für die zulässigen Spannungen wurde ein Bereich von $-0,6 f_{ck}$ bis 1 N/mm^2 gewählt.

Werkstoffkennwerte	
Druckfestigkeit	56,95 [N/mm ²]
Biegezugfestigkeit	4,36 [N/mm ²]
Elastizitätsmodul	30.515,00 [N/mm ²]
Durch Adaption einzuhalten	
zulässige Druckspannung	-34,17 [N/mm ²]
zulässige Zugspannung	1,00 [N/mm ²]
Statisches System	
Stützweite	5,00 [m]
Querschnittsfläche	9,10E + 04 [mm ²]
Trägheitsmoment	1,61E + 09 [mm ⁴]
Widerstandsmoment oben	-9,28E + 06 [mm ³]
Widerstandsmoment unten	6,03E + 06 [mm ³]
Hydraulik	
mittlere Stichhöhe	25,00 [cm]
maximaler Arbeitsdruck	200,00 [bar]
Kolbenfläche	3.768,00 [mm ²]
Anzahl Spannritzen	4 [-]

Tab. 11: Eckdaten des Versuchsaufbaus beim Versuchsträger 2



Diese Grenzwerte wurden in Anlehnung an die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit von vorgespannten Konstruktionen festgelegt.

5.3.4 Messstellen und Sensoren

Zur Messung der Dehnungen in den oberen und unteren Bewehrungsstäben in Feldmitte sowie in den Viertelpunkten des Trägers wurden Deh-

nungsmessstreifen vorgesehen (s. Bild 100). Zum Einsatz kamen DMS vom Typ FLA-2-11-1L der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, die speziell für den Einsatz an Betonstahl konzipiert sind und einen Messbereich der Dehnungen von bis zu 5 % aufweisen. Die Dehnungswerte dienen als Eingangsgrößen für das Regelungsprogramm. Außerdem wurden zusätzlich zu dem Drucksensor der hydraulischen Anlage Kraftmessdosen zur Mes-

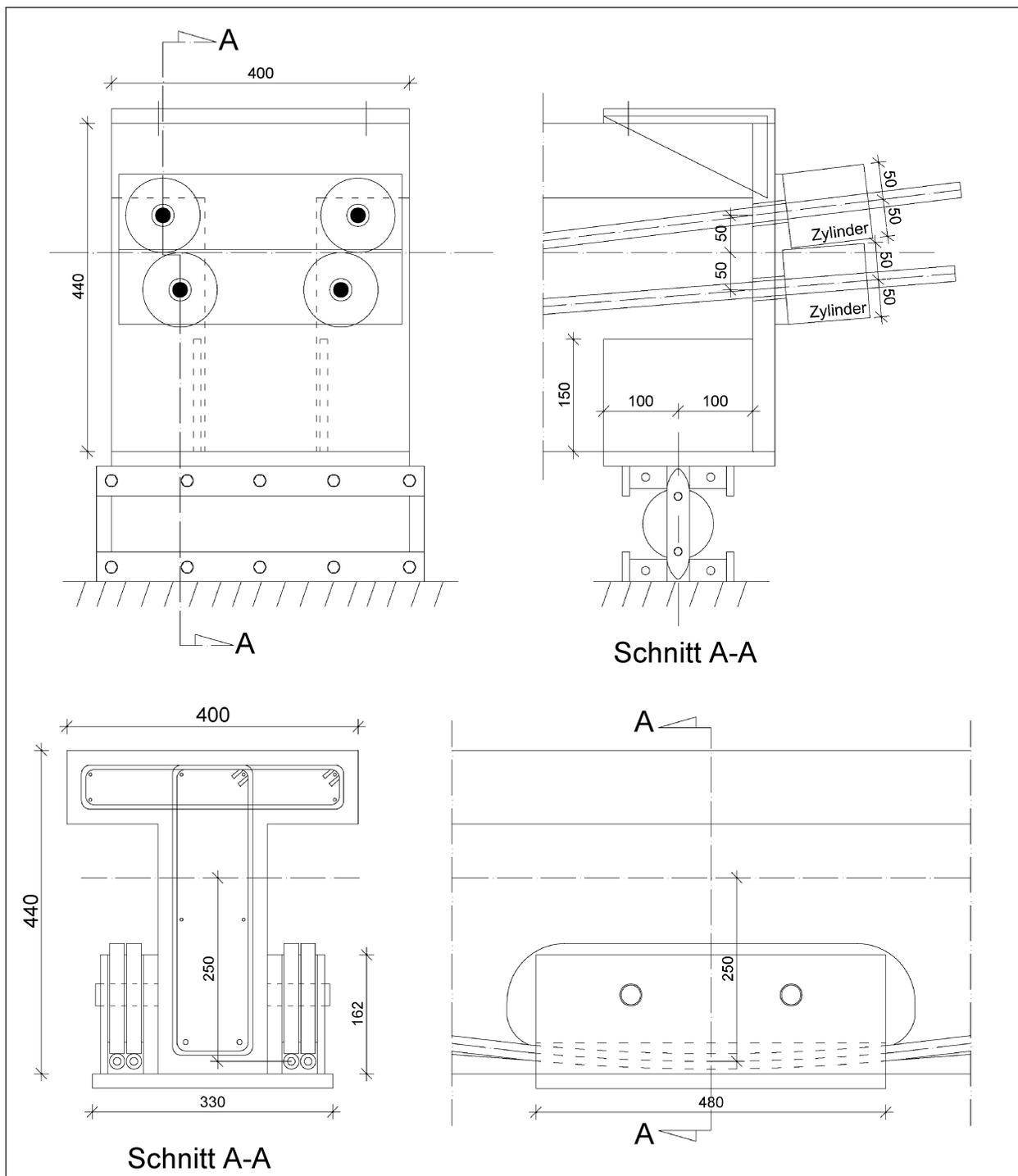


Bild 97: Details der Verankerungs- und Umlenkstellen

sung der Vorspannkraften (s. Bild 99) in den einzelnen Spannslitzen sowie induktive Wegaufnehmer (s. Bild 98) zur Erfassung der Durchbiegungswerte in Feldmitte und in den Viertelpunkten verwendet. Unter den Messgrößen sind die Dehnungen rege-

lungsrelevant, die restlichen Messgrößen dienen zur Kontrolle (s. auch Bild 101).

Der Anschluss des AUTOLOG 3000 von Peckel Instruments zur Messwertaufnahme und die Anbindung des Output-Moduls wurden analog zum Versuchsaufbau der Traverse durchgeführt (s. Kapitel 5.1.2 sowie Kapitel 5.2.5).

5.3.5 Zielsetzung der Regelung

Aufbauend auf dem Zusammenhang zwischen Last, Vorspannkraft und resultierender Spannung wurden zunächst Vorabschätzungen herangezogen. Basierend auf einem als linear angenommenen

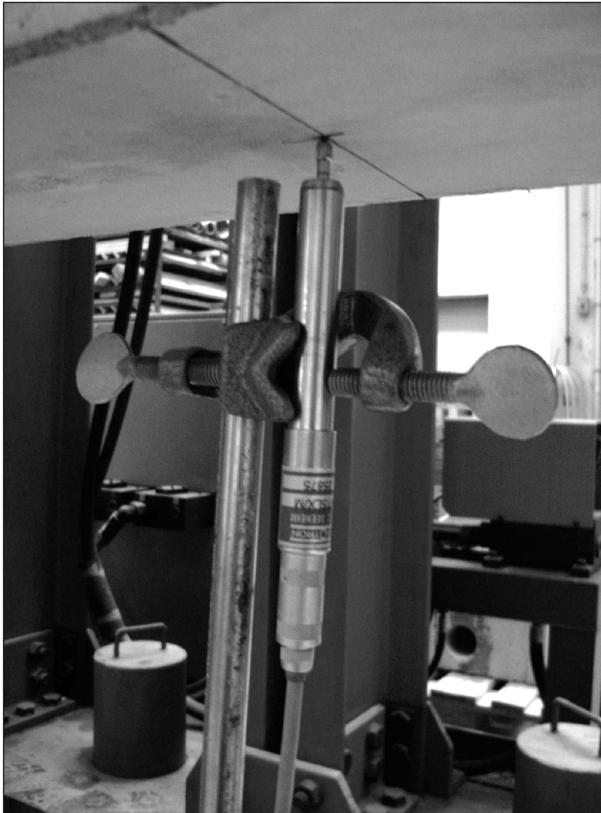


Bild 98: Induktiver Wegaufnehmer

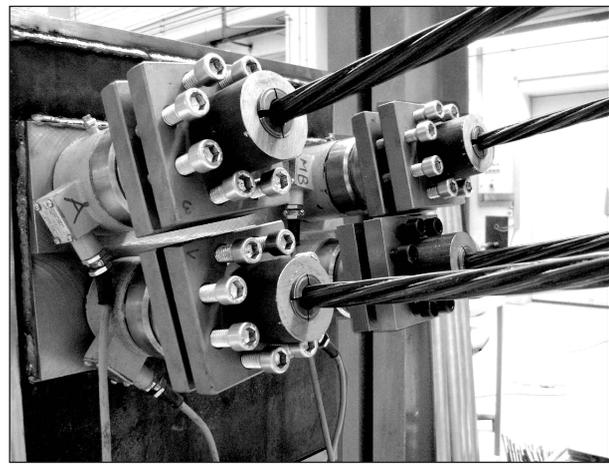


Bild 99: Gegen die Ankerplatte verankerte Kraftmessdosen

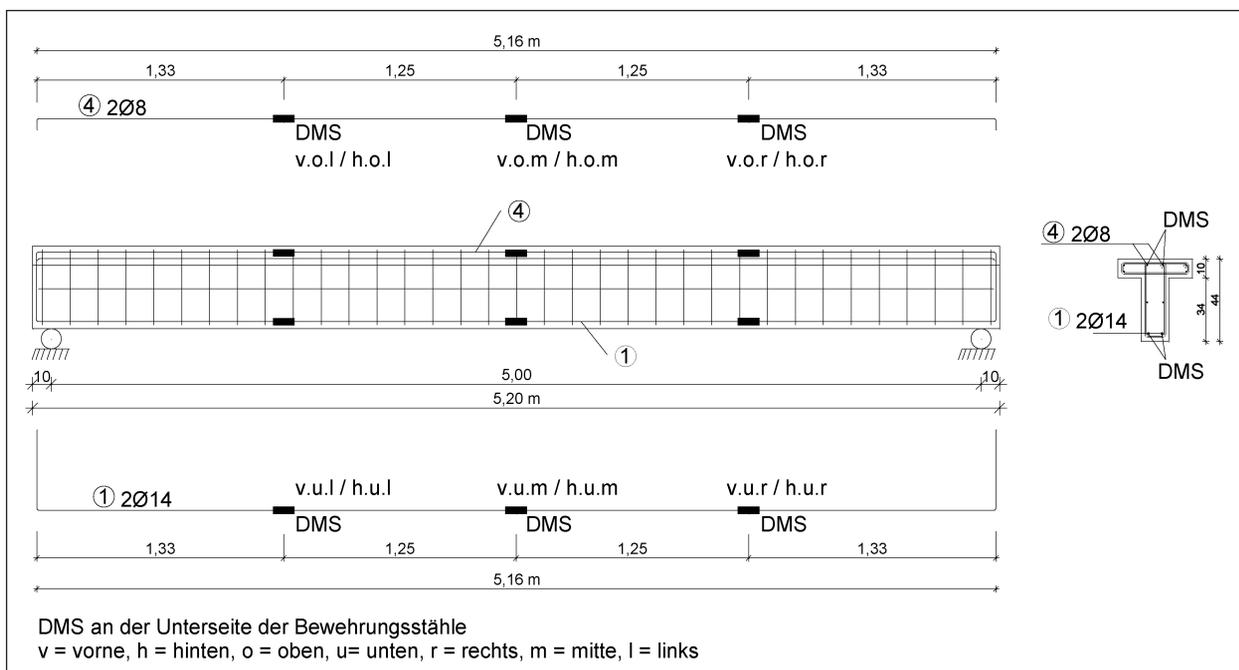


Bild 100: Messstellenplan des Plattenbalkens (nur DMS)

nen Systemverhalten wurden mögliche und ideale Verläufe der Vorspannkraft in Abhängigkeit von der Lastart und Lastgröße ermittelt (s. Bild 102). Hierzu wurden die aus den Momenten- und Normalkraftverläufen resultierenden Spannungen nach der Beziehung $\sigma = N/A + M/W$ bezüglich ihres Maximums über die gesamte Trägerlänge untersucht und dargestellt. Dabei weisen Bereiche in Blau ausschließlich Druckspannungen, rote Bereiche Zugspannungen über 1 N/mm^2 und grüne Bereiche Spannungen zwischen 0 und 1 N/mm^2 auf. Zudem wird der Verlauf des Minimums der Maxima als schwarz-weiße Strichlinie sowie die Ergebnisse eines

Durchlaufträgers in Anlehnung an die Verformungsminimierung als schwarze solide Linie dargestellt.

Die minimale Vorspannkraft wird auf 14% der maximalen Vorspannkraft festgelegt. Bei asymmetrischer Lastanordnung kann das Auftreten von Zugspannungen nicht verhindert werden (vgl. Einzelast Viertelpunkt). Zur Berücksichtigung dieses Effektes wurde eine maximale Spannung von 1 N/mm^2 zugelassen. In Anlehnung an die Nachweise für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird die minimale Spannung auf $-0,6 f_{ck}$ festgelegt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass eine

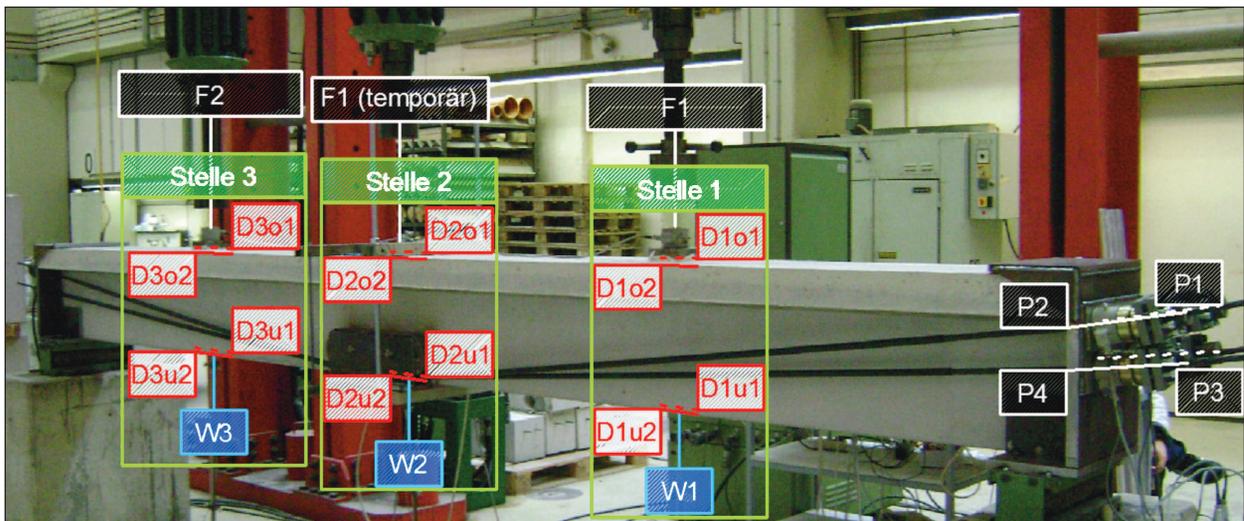


Bild 101: Anordnung der Sensoren im Spannbetonplattenbalken

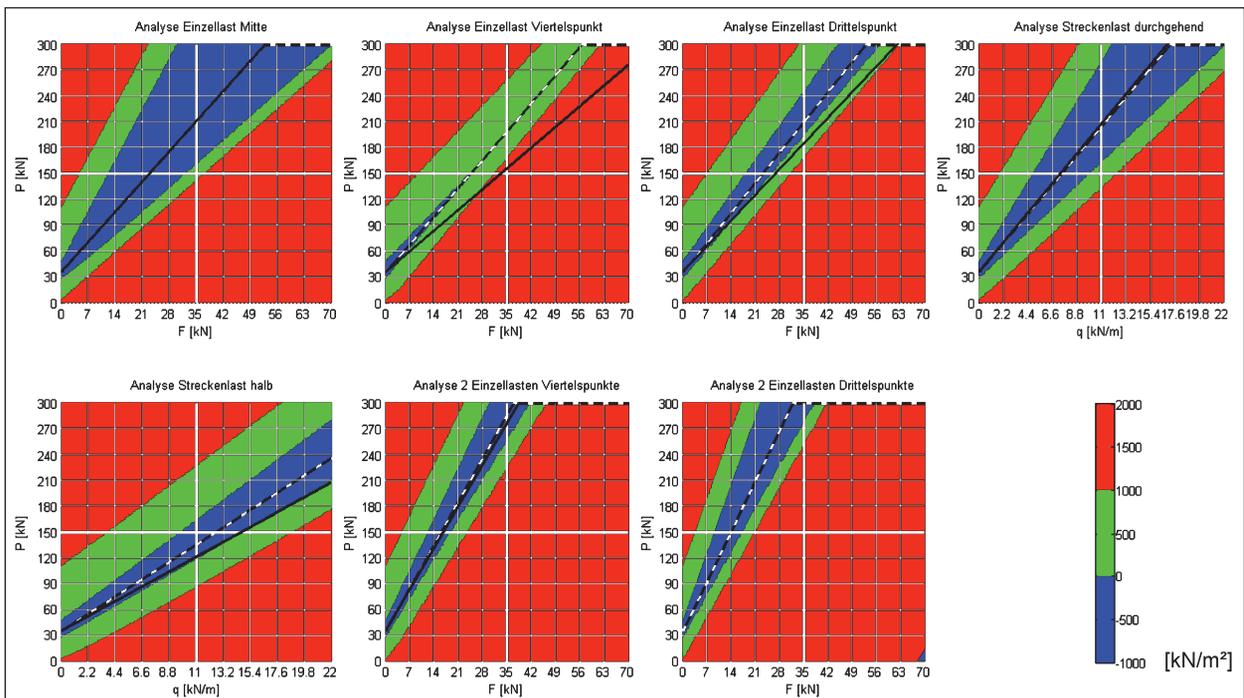


Bild 102: Vorüberlegung zum Spannungszustand

reine Verformungsminimierung wegen auftretender Zugspannungen für den Plattenbalken nicht einsetzbar ist.

Die Anpassung der Vorspannkraft erfolgt unter der Zielsetzung, Zugdehnungen weitestgehend zu vermeiden und eine optimierte Querschnittsausnutzung durch die sich ergebenden Schnittgrößen zu erreichen. Ausgehend von gemessenen Dehnungsverteilungen an drei diskreten Messstellen wird eine notwendige positive oder negative Vorspannkraftänderung sowie die Dringlichkeit einer Adaption ermittelt. Sowohl die Intensität der notwendigen Anpassung als auch die Dringlichkeit steigen, je näher eine gemessene Dehnung an die gewählten Grenzen gelangt. Innerhalb der Wissensbasis werden die Messstellen einzeln betrachtet und die Folgerungen anschließend durch das Fuzzy-System zusammengefasst, wodurch ein „Kompromiss“ bei gegensätzlichen Ergebnissen erzielt wird. Innerhalb der modellfreien Grundlage wird die Regelbasis auf dem Grundsatz aufgebaut, die Vorspannkraft bei Auftreten von Dehnungen nahe der Grenzen anzupassen. Dabei gelten die folgenden Ausgangskriterien:

- Zug unten: P erhöhen,
- Zug oben: P verringern,
- Druck unten: P verringern,
- Druck oben: P erhöhen.

5.3.6 Aufbau des Fuzzy-Reglers

Aufbauend auf dem entworfenen Grundprinzip (s. Kapitel 4.3) ermittelt die Regelung ausgehend von gemessenen Dehnungen an dem Spannbetonplattenbalken die notwendige Intensität der Vor-

spannkraftänderung sowie die Dringlichkeit einer Adaption. Der Regelungskreislauf ergibt sich analog zu dem des ersten Versuchskörpers (s. Bild 103). Hierbei sind Dehnungen die Eingangswerte (Rot) des Regelalgorithmus (Grün), durch welchen das Ausgangssignal zur Adaption der Vorspannkraft (Blau) des Versuchskörpers (Schwarz) festgelegt wird. Durch die Adaption erfolgt eine Änderung der gemessenen Tragwerksreaktionen, wodurch der Regelungskreislauf geschlossen wird.

Das in Bild 104 dargestellte Programmschema sieht zur Durchführung der Regelung zwölf gemessene Dehnungen D1o1 bis D3u2 an drei diskreten Messstellen, den Viertelspunkten und der Mitte, vor. Diese und auch die Ausgabe des analogen Signals stellen die Anbindung (Rot) der Software an die Peripheriegeräte dar. Durch die Bildung des Durchschnittes pro Eingangswert in das Fuzzy-System sollen Exzentrizitäten der Lastangriffspunkte der Belastung und der einzelnen Spannflächen und daraus resultierende Momente kompensiert werden. Innerhalb des Programms werden außerdem unter Annahme einer über den Querschnitt linearen Dehnungsverteilung aus den gemessenen Stahldehnungen die Dehnungen an den Betonkanten ermittelt und zur weiteren Verarbeitung herangezogen. Anhand dieser Werte ermittelt das Fuzzy-System die Vorspannkraftänderung ΔP und die Dringlichkeit einer Adaption. Sobald die Dringlichkeit die aktuelle Grenze überschreitet (Grün), wird zunächst die ideelle Vorspannkraft (Blau) geändert, indem die durch einen lernfähigen Faktor optimierte Änderung aufaddiert wird. Anschließend wird die Adaption des Tragwerks mittels des analogen Ausgangssignals veranlasst und eine neue Dringlichkeitsgrenze ermittelt.

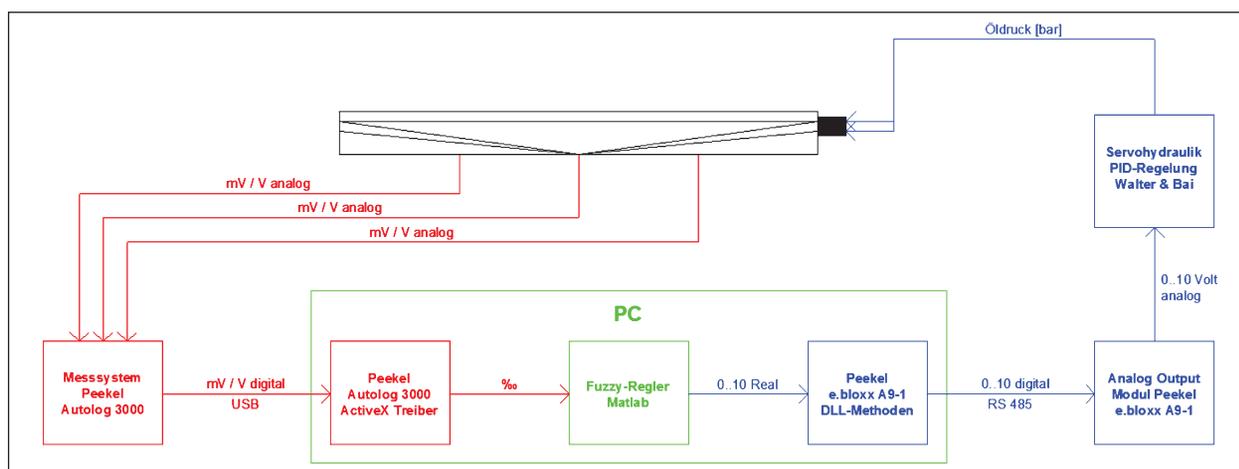


Bild 103: Regelungskreislauf Spannbetonplattenbalken

Für die funktionale Abbildung der Inputmengen auf die Outputmengen wurde zunächst ein Fuzzy-System des MA-Modells erstellt und anschließend

in ein System des TSK-Modells (s. Bild 105) konvertiert. Auf diese Weise wurden das naturnahe Entscheidungsverhalten des MA-Modells und die

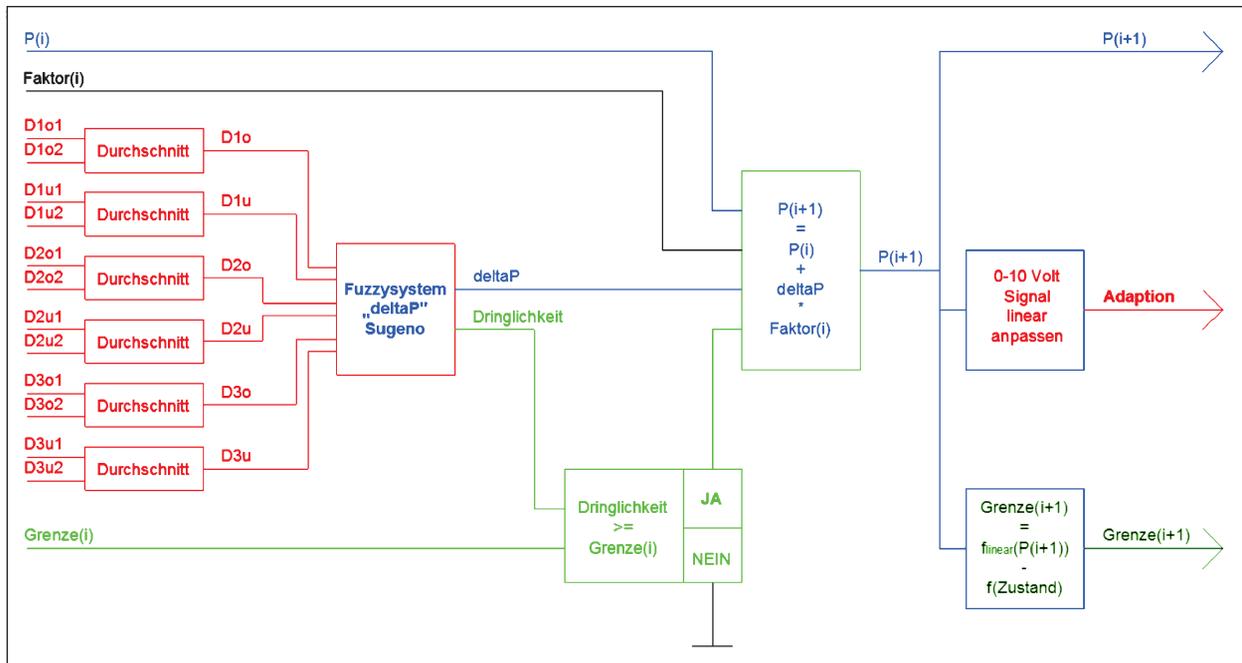


Bild 104: Programmschema der Regelung des Spannbetonplattenbalkens

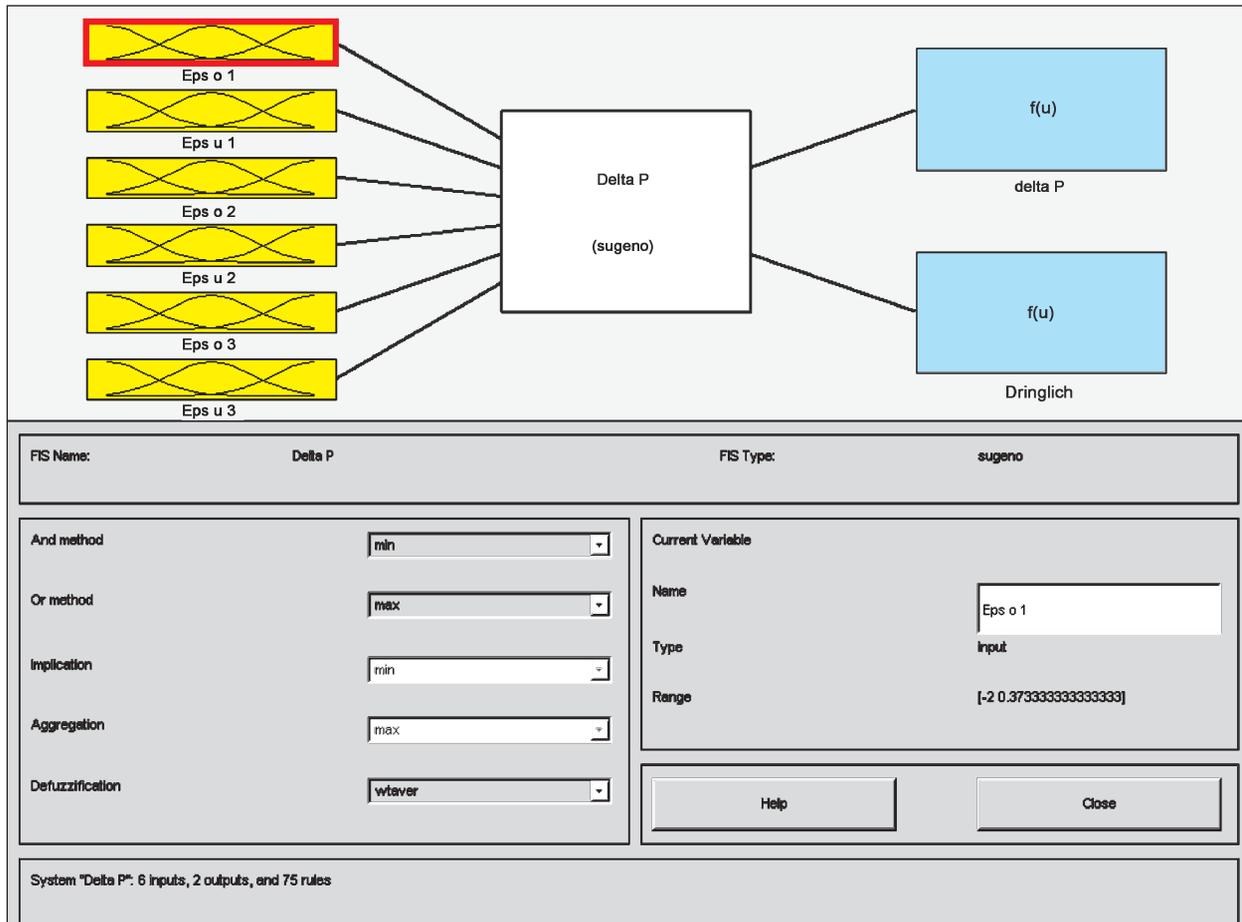


Bild 105: Schema des eingesetzten Fuzzy-Systems

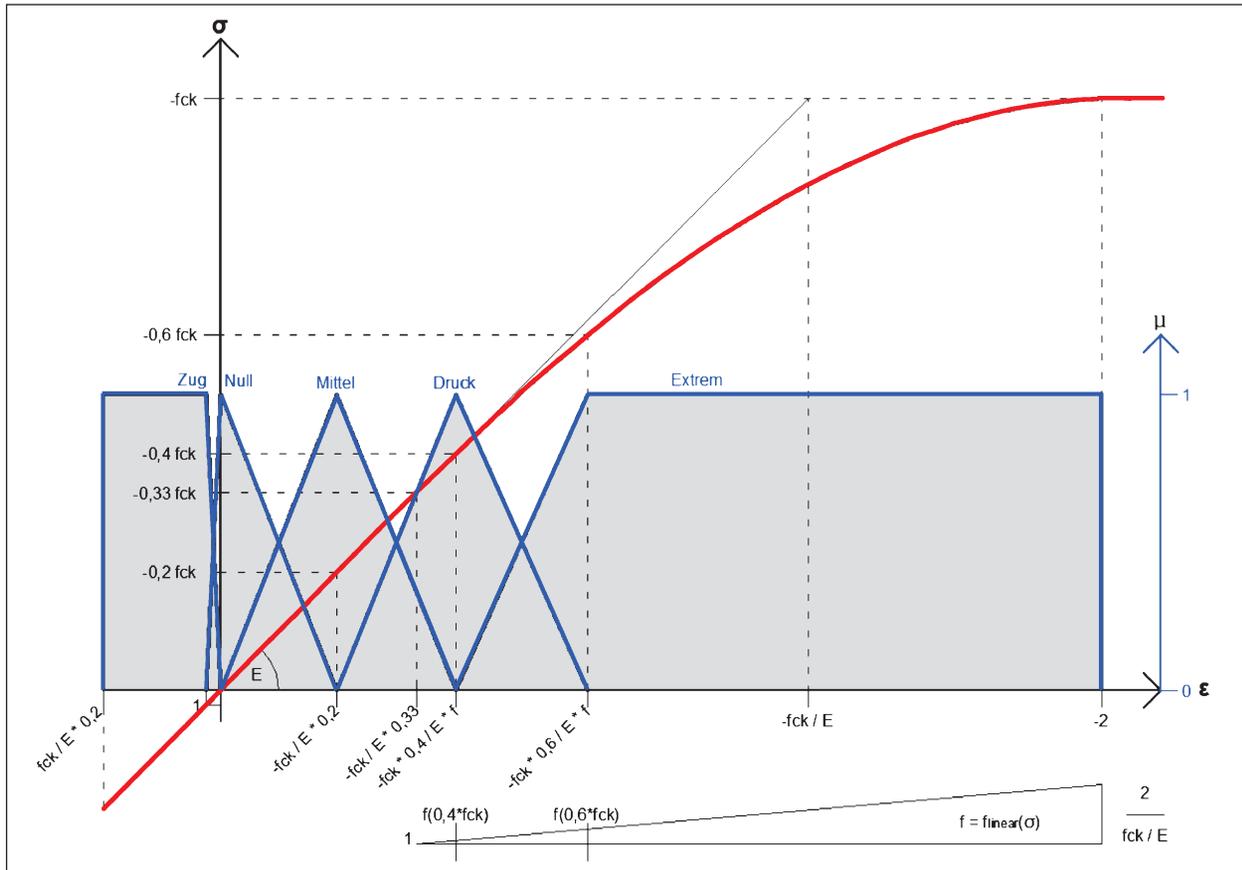


Bild 106: Definition der Fuzzy-Mengen der Inputvariablen

höhere numerische Genauigkeit des TSK-Modells kombiniert. Die Konversion selbst hat eine formulare Inferenz mit Konstanten (Funktionen nullter Ordnung) mit den Mengenschwerpunkten der Fuzzy-Mengen der Outputvariablen zur Folge. Zur Aggregation der UND-verknüpften Mengen wurde der Minimum-Operator und als Defuzzifikationsmethode wurde der gewichtete Durchschnitt (wtaver) verwendet.

Mittels eines modellfreien Verfahrens wird die Regelbasis aufgestellt. Hierzu werden zunächst die Fuzzy-Mengen der Inputvariablen definiert, indem die Aufteilung an einen nichtlinearen Verlauf der Dehnungen angenähert wird (s. Bild 106). Ausgehend von einem als linear angenommenen Bereich bis zu einer Druckspannung von $1/3 \cdot f_{ck}$ wird durch einen linear ansteigenden auf die Spannung bezogenen Faktor f die lineare Grundlage f_{ck}/E erweitert. Einen notwendigen Eckwert liefert dabei die Annahme, dass bei einer Spannung in Höhe der Betondruckfestigkeit eine Stauchung von 2 ‰ erreicht wird. Die sich ergebenden Dehnungen werden zur Aufstellung der Fuzzy-Mengen verwendet, sodass eine Annäherung an das nichtlineare Materialverhalten erfolgt. Die Grundmengen der Inputva-

riablen werden durch die maximale Stauchung von -2 ‰ und eine maximalen Dehnung entsprechend $0,2 \cdot f_{ck}/E$ großzügig eingegrenzt.

Die Outputmengen werden äquidistant in dreieckförmige Fuzzy-Mengen unterteilt (s. Bild 107, farbliche Zuordnungen analog zu Tabelle 12). Aufgrund der Konversion zum TSK-Modell werden lediglich die Flächenschwerpunkte der Mengen als funktionale Stützpunkte benötigt. Die Grundmenge der Vorspannkraftänderung (in [%] von P_{max}) wird zunächst durch die technisch mögliche maximale Änderung von 10 % festgelegt. Um das Regelungsverhalten nachträglich optimieren zu können, wird ein Multiplikator X verwendet, durch den die Intensität der Adaptionsschritte gesteuert wird. Die Dringlichkeit weist eine Grundmenge in dem normierten Bereich von 0 bis 1 auf. Hierbei bedeutet eine Dringlichkeit von 0 „keine Notwendigkeit einer Adaption“ und von 1 „höchste Notwendigkeit einer Adaption“.

Zur Aufstellung der Regelbasis wurden die drei angeordneten Messstellen einzeln betrachtet (s. Tabelle 12). Die resultierenden Ergebnisse je Stelle werden während der Evaluierung durch das Fuzzy-

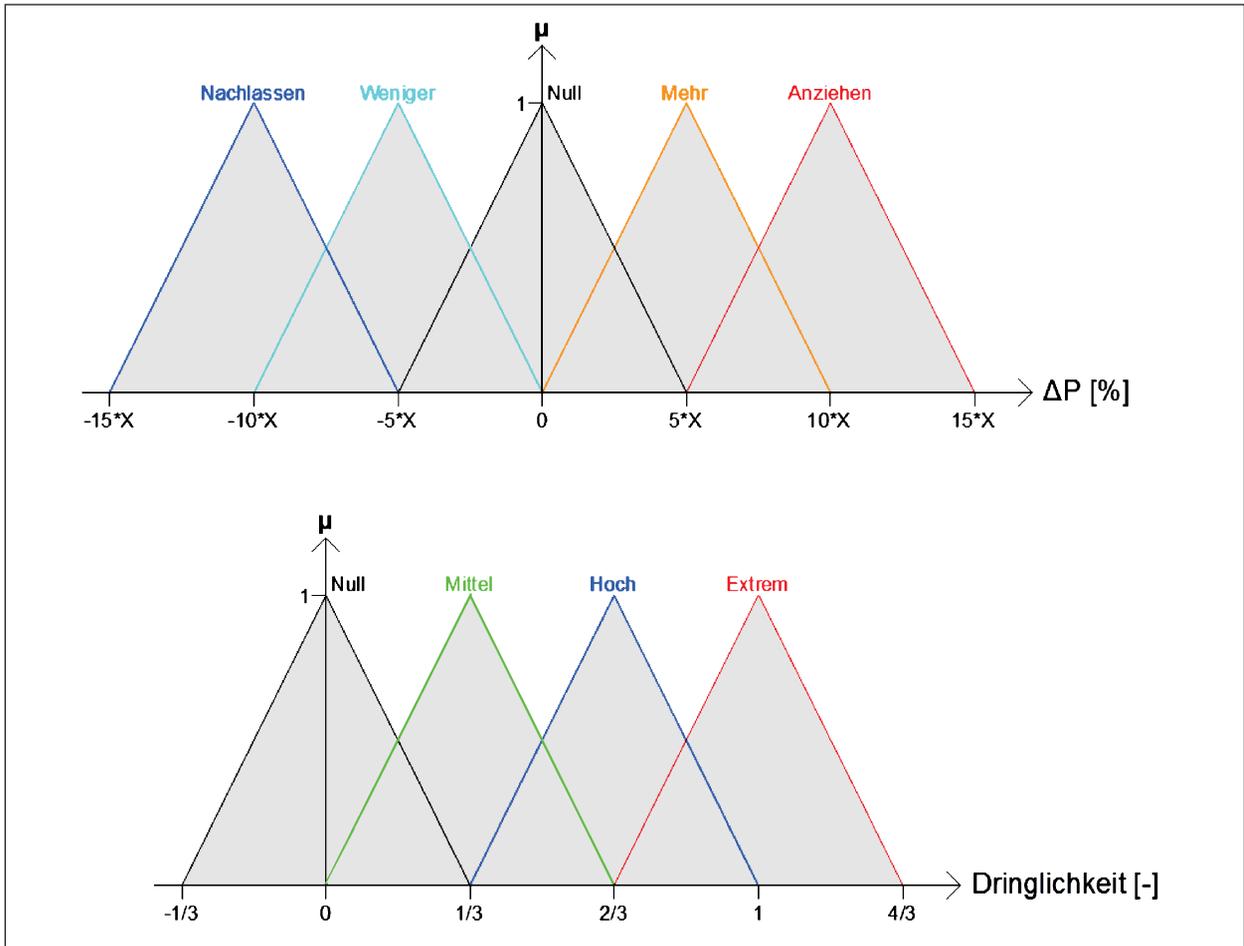


Bild 107: Definition der Fuzzy-Mengen der Outputvariablen

deltaP	UND	Dehnung oben				
		Extrem	Druck	Mittel	Null	Zug
Dehnung unten	Extrem	Null	Weniger	Weniger	Nachlassen	Nachlassen
	Druck	Mehr	Null	Null	Weniger	Nachlassen
	Mittel	Mehr	Null	Null	Weniger	Nachlassen
	Null	Anziehen	Mehr	Mehr	Null	Weniger
	Zug	Anziehen	Anziehen	Anziehen	Mehr	Null
Dringlichkeit	UND	Dehnung oben				
Dehnung unten	Extrem	Extrem	Extrem	Extrem	Extrem	Extrem
	Druck	Extrem	Hoch	Mittel	Hoch	Extrem
	Mittel	Extrem	Mittel	Null	Hoch	Extrem
	Null	Extrem	Hoch	Hoch	Hoch	Extrem
	Zug	Extrem	Extrem	Extrem	Extrem	Extrem

Tab. 12: Regelbasis Spannbetonplattenbalken

System zusammengefasst, wobei im Bedarfsfall ein Kompromiss aus gegensätzlichen Zuständen geschlossen wird. Die Regeln zur Ermittlung der Vor-

spannkraftänderung ΔP (s. Bild 108) basieren auf der Annahme einer linearen Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe und auf den gemäß

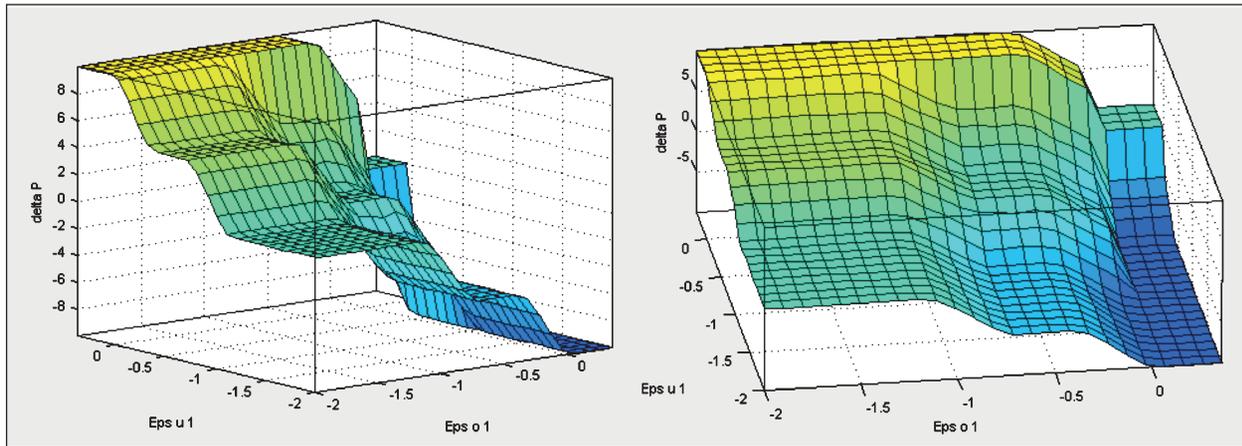


Bild 108: Oberflächendarstellung deltaP

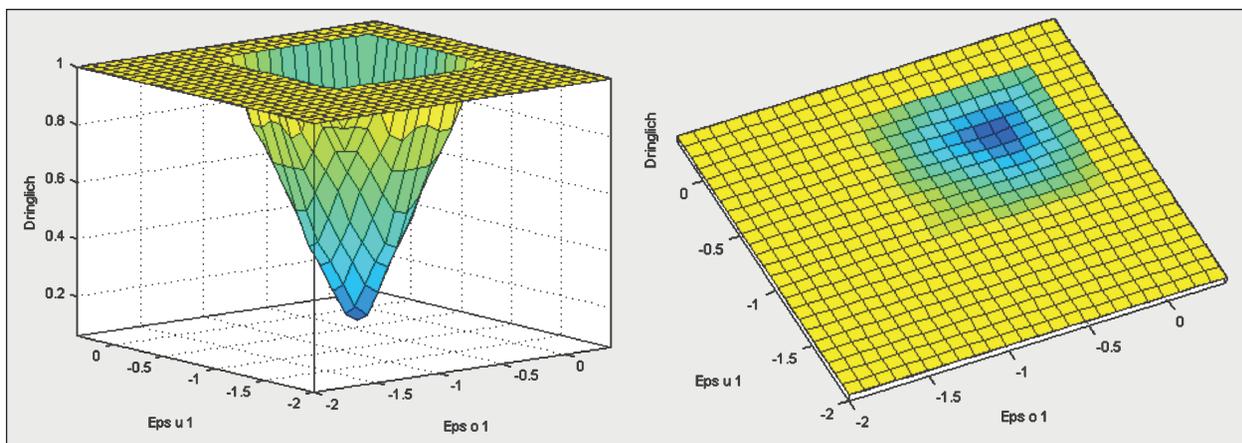


Bild 109: Oberflächendarstellung Dringlichkeit

der Zielsetzung aufgestellten Ausgangspunkten. Diese haben zur Folge, dass bei höheren Unterschieden der gemessenen Dehnungen eine höhere Anpassung vollzogen wird.

Ein optimaler Dehnungsbereich wird in dem Bereich der zu den Spannungen $0,2 f_{ck}$ und $0,4 f_{ck}$ zugehörigen Dehnungen definiert. Dieser Bereich ist gleichzeitig innerhalb der Wissensbasis zur Ermittlung der Dringlichkeit von Bedeutung. Durch die dort festgelegte geringere Dringlichkeit soll eine Adaption erst erfolgen, sobald der gemessene Zustand von diesem Optimum abweicht. Im Gegensatz dazu weisen Bereiche, welche zu vermeiden sind, eine hohe Dringlichkeit auf, um bei Bedarf eine rechtzeitige Adaption auszulösen. Durch den daraus entstehenden „Trichter“ (s. Bild 109) soll das Regelungsverhalten den Tragwerkszustand zum gewählten Optimum hin anpassen.

Zur automatischen Optimierung des Regelungsverhaltens wird ein Adaptionfaktor genutzt, der die Änderung der Vorspannkraft ΔP anpasst. Falls

nach einem durchgeführten Adaptionsschritt das gewünschte Ergebnis gemäß der Zielsetzung nicht erreicht wurde, erfolgt eine Anpassung des lernfähigen Faktors. Dabei werden die sechs Eingangswerte des Fuzzy-Systems unter Beachtung der letzten Aktion auf Zug oder zu hohen Druck untersucht und eine gewichtete Anpassung aufgrund eines maximalen vorgegebenen Wertes Δ durchgeführt (s. Tabelle 13). Durch die Gewichtung des Maximalwertes sowie dessen Begrenzung wird eine intensive Anpassung auf mehrere Schritte unterteilt, wodurch einerseits das Erreichen eines Optimums verzögert, jedoch andererseits ein Lernvorgang ähnlich dem eines künstlichen neuronalen Netzwerkes etabliert wird. Auf diese Weise wird ein sprunghaftes Verhalten der Optimierung weitestgehend verhindert, eine Oszillation des Faktors gedämpft und die Konvergenz zu einem Grenzwert verstärkt.

Die durch das Fuzzy-System abgebildete Funktion zur Ermittlung der notwendigen Anpassung der Vorspannkraft wird somit zunächst durch den angege-

nach	Adaption	Anziehen			Anpassung
WENN	unten	Zug	DANN	höher	+ $\Delta/6$
WENN	oben	Zug	DANN	niedriger	- $\Delta/6$
WENN	unten	Druck	DANN	niedriger	- $\Delta/6$
WENN	oben	Druck	DANN	höher	+ $\Delta/6$
nach	Adaption	Nachlassen			Anpassung
WENN	unten	Zug	DANN	niedriger	- $\Delta/6$
WENN	oben	Zug	DANN	höher	+ $\Delta/6$
WENN	unten	Druck	DANN	höher	+ $\Delta/6$
WENN	oben	Druck	DANN	niedriger	- $\Delta/6$

Tab. 13: Anpassung des lernfähigen Adaptionfaktors

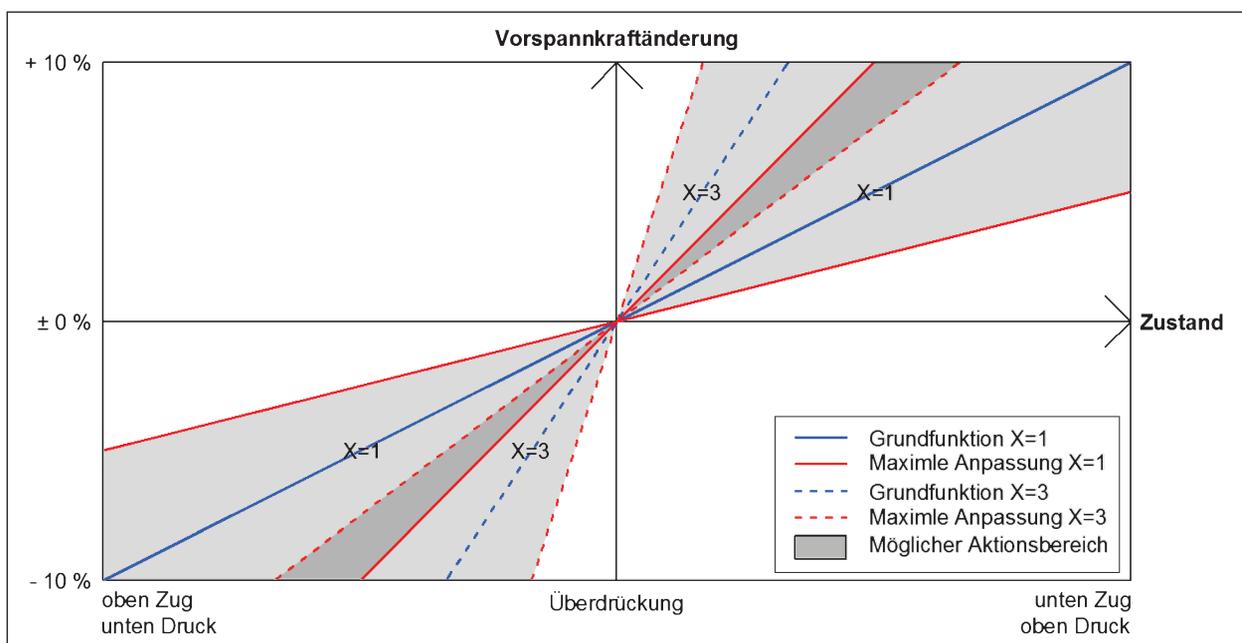


Bild 110: Prinzipdarstellung der Vorspannkraftänderung

benen Multiplikator X und während der Laufzeit des Regelungsprogramms durch den lernfähigen Adaptionfaktor (Faktor (i)) optimiert (s. Bild 110). Jene Bereiche, in denen die Regelung agieren kann (Grau), werden durch die Grundfunktion (Blau) in Verbindung mit dem Adaptionfaktor (Rot) festgelegt, wobei der mögliche Wertebereich des Faktors aus Sicherheitsgründen auf das Intervall $[0,5;2]$ begrenzt ist.

Zur Ermittlung der Notwendigkeit einer Adaption der Vorspannkraft wird die evaluierte Dringlichkeit mit einer Dringlichkeitsgrenze (Grenze (i), s. Bild 111) verglichen. Sobald der vom Fuzzy-System ermittelte Wert diese Grenze überschreitet, wird eine Anpassung ausgelöst. Als weiterer adaptierbarer Parameter wird die Dringlichkeitsgrenze zum einen

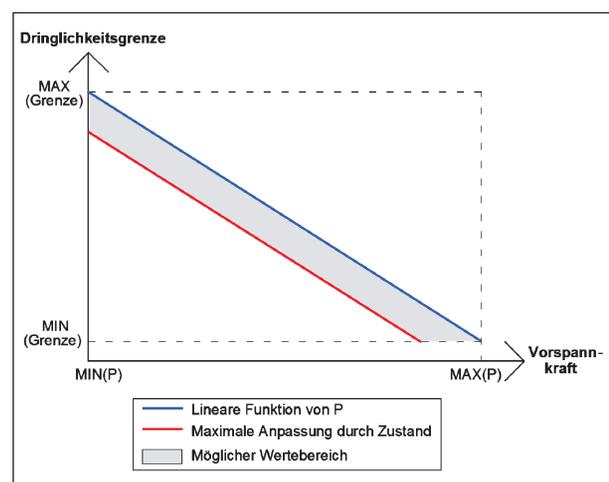


Bild 111: Verlauf Dringlichkeitsgrenze

in Abhängigkeit von der aktuellen Vorspannkraft (Blau) und zum Anderen aufgrund der erreichten Regelungsqualität (Rot) angepasst.

Das Verringern des Grenzwertes bei steigender Vorspannkraft dient der Führung des Systemzustandes in Richtung des in der Regelbasis festgelegten Optimums, sofern die Möglichkeit dazu besteht. Bei steigender Belastung und entsprechend steigender Vorspannkraft sollen die auftretenden Spannungen, gemäß den Regeln zur Ermittlung der Dringlichkeit, in den Bereich zwischen $0,2 f_{ck}$ und $0,4 f_{ck}$ bewegt werden. Hierzu wird die Dringlichkeitsgrenze genutzt, um Adaptionen auszulösen, solange oder sobald der optimale Zustand nicht oder nicht mehr eingehalten ist. Aufgrund der permanent mäßigen Ausnutzung der vorhandenen Betonfestigkeit wird die Dauerhaftigkeit des Bauteils nicht oder nur gering durch Lastwechsel und Adaption beeinträchtigt.

Eine weitere Anpassung der Grenze erfolgt, sobald der lernfähige Adaptionsfaktor geändert wird. Der logische Ausgangspunkt, das Regelungsverhalten aufgrund zu geringer Qualität optimieren zu müssen, führt zu der weiteren Berücksichtigung des Verhaltens in der Dringlichkeit (Zustandsdringlichkeit). Je ungeeigneter die Regelungsqualität ist, desto dringlicher wird die nächste Anpassung. Indem die Dringlichkeitsgrenze abgemindert wird, überschreitet die evaluierte Dringlichkeit diese früher. Sobald nicht optimale Adaptionen durchgeführt werden, wird auf diese Weise ein schnellstmöglicher Ausgleich durch weitere Anpassungen der

Vorspannkraft veranlasst. Sobald durchgeführte Adaptionen eine ausreichende Qualität aufweisen, also keine Anpassung des Adaptionsfaktors erfolgt, wird die Zustandsdringlichkeit wieder schrittweise in Richtung Null erhöht, da der qualitative Zustand der Regelung eine ausreichende Güte aufweist.

In Tabelle 14 sind die Einstellungen der adaptiven Fuzzy-Regelung während der Versuche aufgeführt.

5.3.7 Versuchsdurchführung

Die Belastung des Plattenbalkens erfolgte durch den in Kapitel 5.1.6 gezeigten hydraulischen Prüfstand mit den in Tabelle 15 aufgeführten Lastanordnungen. Dabei sollte zunächst das Grundverhalten der Regelung anhand der einfachen Belastungsart „Einzellast in Feldmitte“ ermittelt werden. Mittels der asymmetrischen Anordnungen in den Viertelpunkten des Balkens sollten gegensätzliche Zustände an den Messstellen erzwungen und somit die Fähigkeit des Algorithmus, eine zufriedenstellende Kompromisslösung zu erzielen, evaluiert werden. Komplementär dazu wurde die symmetrische Anordnung von Lasten in den Viertelpunkten durchgeführt.

Im Hinblick auf den Einsatz adaptiver Vorspannung bei Brückenbauwerken wurde das Regelungsverhalten unter einer Wanderlast untersucht. Zur Simulation einer wandernden Last, welche für Brückenbauwerke eine typische Einwirkung darstellen, wurden Einzellasten (SWL) an empfindlichen Stellen aufgebracht. Eine Voruntersuchung zu den kriti-

Vorspannung	Maximum	301,03 [kN]
	Minimum	42,14 [kN] \pm 14 [%] von P_{max}
	Max. Delta P	30,10 [\pm kN] \pm 10 [\pm %] von P_{max}
	Multiplikator X	1; 3 oder 5 [-]
Fuzzysystem	Modell	Sugeno
	Aggregation (UND)	Minimum
	Defuzzifikation	WTAverage
Dringlichkeitsgrenze	Maximum	0,68 [-]
	Minimum	0,05 [-]
	Min. Zustandsdringlichkeit	-0,10 [-]
Lernfaktor	Startwert	1,00 [-]
	Maximum	2,00 [-]
	Minimum	0,50 [-]
	Max. Änderung Δ	0,10 [-]

Tab. 14: Einstellungen der Fuzzy-Regelung für die Versuche am Spannbetonplattenbalken

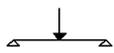
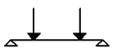
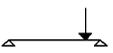
schen Lastangriffspunkten ergab diskrete Stellen mit einem Abstand von 80 cm von den Auflagerachsen. Die sich ergebenden Dehnungen an den Lastangriffspunkten wurden aus den an den Messstellen gemessenen Dehnungen linear interpoliert.

Zur Ermittlung der erreichbaren Lasten wurden die Belastungen in Einzelschritten von 5 kN gesteigert, bis das Maximum der gemessenen Dehnungen annähernd die zu der Spannung von 1 N/mm² äquivalente Dehnung erreichte oder eine weitere Laststeigerung höhere Dehnungen zur Folge gehabt hätte. In mehreren anschließenden Versuchsreihen (s. Tabelle 16) wurde die eingesetzte Regelung weiterentwickelt und die Einsatzfähigkeit detailliert untersucht.

Die Anbindung der Hardware wurde wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben realisiert. Die Abtastfrequenz des Messsystems wurde im Gegensatz zu den

Laborversuchen an der Aluminiumtraverse auf ein Hertz festgelegt. Da aufgrund der Einstellungen der hydraulischen Anlage zur Aufbringung der Vorspannkraft (s. Kapitel 5.1.4) zwischen einzelnen Adaptionsschritten eine Zeitspanne von zwei Sekunden liegen muss, wurde zugunsten der Performance und der Programmstabilität eine geringere Abtastrate akzeptiert.

Von der Regelung wurde erwartet, dass sie während der Laststeigerung die Vorspannkraft derartig anpasst, dass Spannungen größer 1 N/mm², bzw. die zugehörigen Dehnungen, vermieden werden, solange die maximale Vorspannkraft nicht erreicht wird. Die Überdrückung des gesamten Querschnittes mit der Tendenz zu höheren Stauchungen bei höheren Lasten ist der Idealfall, welcher in der Wissensbasis definiert ist. Des Weiteren wurde erwartet, dass eine Anpassung erfolgt, sobald die evalu-

Lastanordnung	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder Symmetrisch	Simulierte Wanderlast Links	Simulierte Wanderlast Rechts	Simulierte Wanderlast Symmetrisch
Lastbild							
erreichte Last mit Adaption	78 kN	67 kN	68 kN	2 X 48 kN	58 kN	58 kN	53 kN
Maximum ohne Adaption (1 N/mm ² Zug)	5 kN	6 kN	6 kN	2 X 5 kN	9 kN	9 kN	8 kN
Maximum ohne Adaption ($f_{ct} = 4,4$ N/mm ²)	21 kN	28 kN	28 kN	2 X 21 kN	39 kN	39 kN	33 kN

Tab. 15: Lastanordnungen für die Versuche am Spannbetonplattenbalken

Versuchsreihe	Änderung	1 Zyl. Mitte	1 Zyl. Links	1 Zyl. Rechts	2 Zyl.	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.	Anmerkung
1	Grundzustand	55	50	55	30	55	55	50	übernommen
2	Begrenzung Zustanddringlichkeit	65	60	65	45	55	55	50	übernommen
3	Erhöhung Multiplikator auf 3	70	65	65	40	55	55	50	übernommen
4	Änderung des Fuzzy-Systems	75	60	60	45	55	55	50	nicht übernommen
5	Erhöhung Multiplikator auf 5	75	60	60	45	55	55	50	nicht übernommen
6	Belastung ohne Wartezeit	75	60	60	45	55	55	50	übernommen
	Höhere mögliche Vorspannkraft								Einstellung des PID
	Vorspannung entfernen								
0	Versuche ohne Adaption	8	10	9	7	13	13	9	ungerissen
	Belastung bis Rissbildung ohne Adaption				23				gleichmäßige Rissverteilung
	Vorspannung wieder anbringen (wie nachträgliche Verstärkung)								
R	Versuche nach Rissbildung	75	60	60	45	55	55	50	

Tab. 16: Versuchsprogramm

ierte Dringlichkeit über der aktuellen Grenze liegt und die letzte Adaption mindestens zwei Sekunden zurückliegt. Sämtliche vorgegebenen Grenzwerte der Regelungsparameter sollten eingehalten werden, hierzu zählt insbesondere die minimale Vorspannkraft, die während der gesamten Laufzeit durch die Regelung mindestens aufgebracht werden muss. Die Aufbringung durch die Schraubvorrichtung dient der Sicherheit.

5.3.8 Ergebnisse der Versuche am Plattenbalken im ungerissenen Zustand

Durch Visualisierung der Dehnungen, Kräfte und Regelungsparameter über die Versuchsdauer lässt sich das Regelungsverhalten interpretieren. Ergänzend dazu wurden die Verformungen dargestellt. Abgebildete Dehnungen und Verformungen beziehen sich auf die angeordneten diskreten Messstellen an den Viertelpunkten und in Feldmitte (s. hierzu Kapitel 5.3.4).

Ergänzend zu den gemessenen Dehnungen als Mittel von Messwerten zweier Dehnmessstreifen (s. Bild 112, Punktlinien) werden die aus dem über die Querschnittshöhe linearen Dehnungsverlauf

ermittelten Betonranddehnungen (solide Linien) dargestellt. Anhand der Farbgebung werden die verschiedenen Messstellen (Stelle 1: Blautöne, Stelle 2: Rottöne, Stelle 3: Grüntöne) unterschieden. Zusätzlich werden materialabhängige Dehnungen gezeigt (schwarze Strichlinien), um die erreichte Optimierung abschätzen zu können. Hierzu zählen die Dehnungen, welche in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls den Spannungen (von unten nach oben) $-0,3 f_{ck}$, 1 N/mm^2 und f_{ct} zugehörig sind. Das Streben der Regelung, Spannungen in den Druckbereich zu leiten, war bei der vorliegenden Lastanordnung von einer Einzellast in Feldmitte deutlich erkennbar. Zug wurde nahezu gänzlich vermieden, sodass eine ständige Überdrückung des Querschnittes verblieb und von einem ungerissenen Zustand (Zustand I) ausgegangen werden konnte.

Zur Darstellung aller vorhandenen Kräfte (s. Bild 113) werden die Vorspannkraften sowohl als ideeller Wert innerhalb der Regelung (Rot) als auch in Form der gemessenen Kraft (Blau) herangezogen. Zusätzlich sind die Grenzen, in denen sich die Vorspannkraft bewegen kann bzw. darf (schwarze Strichlinie), und die ermittelte (Grün) sowie opti-

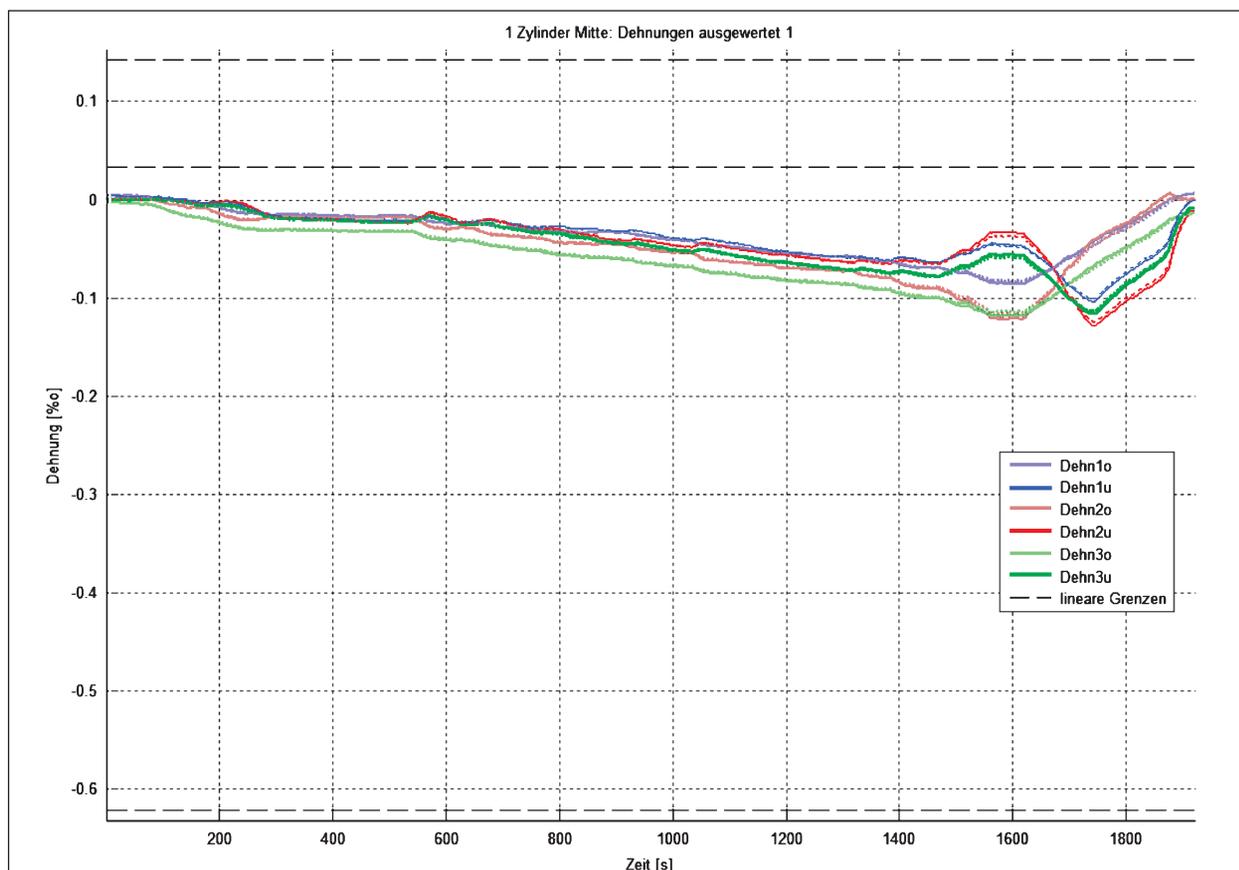


Bild 112: Versuchsreihe 1: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Dehnungen

mierte (Magenta) Vorspannkraftänderung dargestellt. Des Weiteren werden die Verläufe der Belastungen gezeigt (Cyan). Mit steigender Last wurde die Vorspannkraft erhöht, bis die maximal mögliche Kraft erreicht wurde. Die Anpassungen in den einzelnen Adaptionsschritten fielen, bezogen auf die möglichen 10 %, gering aus.

Zu den dargestellten Faktoren (s. Bild 114) zählen das ausgegebene Voltsignal mit seinen Grenzen (Rot), der lernfähige Adaptionsfaktor mit den zugehörigen Grenzwerten (Grün), das Verhältnis von der ideellen zu gemessener Vorspannkraft (Magenta), die evaluierte Dringlichkeit (Cyan) und die aktuelle Dringlichkeitsgrenze mit entsprechenden Grenzwerten (Blau). Der Verlauf des analogen Signals war affin zur dem der ideellen Vorspannkraft, die Ausgabe des Programms an die Peripherie war demnach korrekt. Der Adaptionsfaktor stieg zunächst stark an, verweilte danach jedoch in einer nicht grenzwertigen Lage, woraus eine zu gering angesetzte Änderung der Vorspannkraft ableitbar war. Die Differenzen des Verhältnisses ideeller zu gemessener Vorspannkraft wiesen sowohl auf eine Übersteuerung der hydraulischen Anlage als auch auf eine sichtbare Trägheit bei der Reaktion auf Änderungen

des analogen Signals hin (s. hierzu Kapitel 5.1.4). Aufgrund der Absenkung der evaluierten Dringlichkeit in den Bereichen höherer Überdrückung des Querschnittes konnte auf das Streben der Regelung hin zu dem in der Regelbasis definierten Optimum geschlossen werden. Da die Begrenzung der Zustandsdringlichkeit bei dieser Versuchsreihe noch nicht implementiert war, verweilte die Dringlichkeitsgrenze an ihrem Minimum, da die während des Anstiegs des Adaptionsfaktors aufgebaute Zustandsdringlichkeit in der restlichen Versuchslaufzeit nicht abgebaut werden konnte. Die vergleichsweise kleinen Anpassungen erfolgten in der maximal möglichen Frequenz von 0,5 Hertz, da die Dringlichkeit über die gesamte Versuchsdauer hinweg über der Grenze lag. In Bild 115 sind die gemessenen Durchbiegungen der diskreten Messstellen (Stelle 1: Blau, Stelle 2: Rot, Stelle 3: Grün) dargestellt.

Die Fähigkeit der Regelung, aus Kompromissen resultierende Lösungen mit zufriedenstellenden Ergebnissen zu erzielen, wird in Bild 116 deutlich. Zwar wurde das Auftreten von Zugspannungen nicht verhindert, jedoch konnten diese stets unter 1 N/mm^2 gehalten und somit die Zielsetzung erfüllt werden. Die wichtigsten Kenngrößen der Versuche

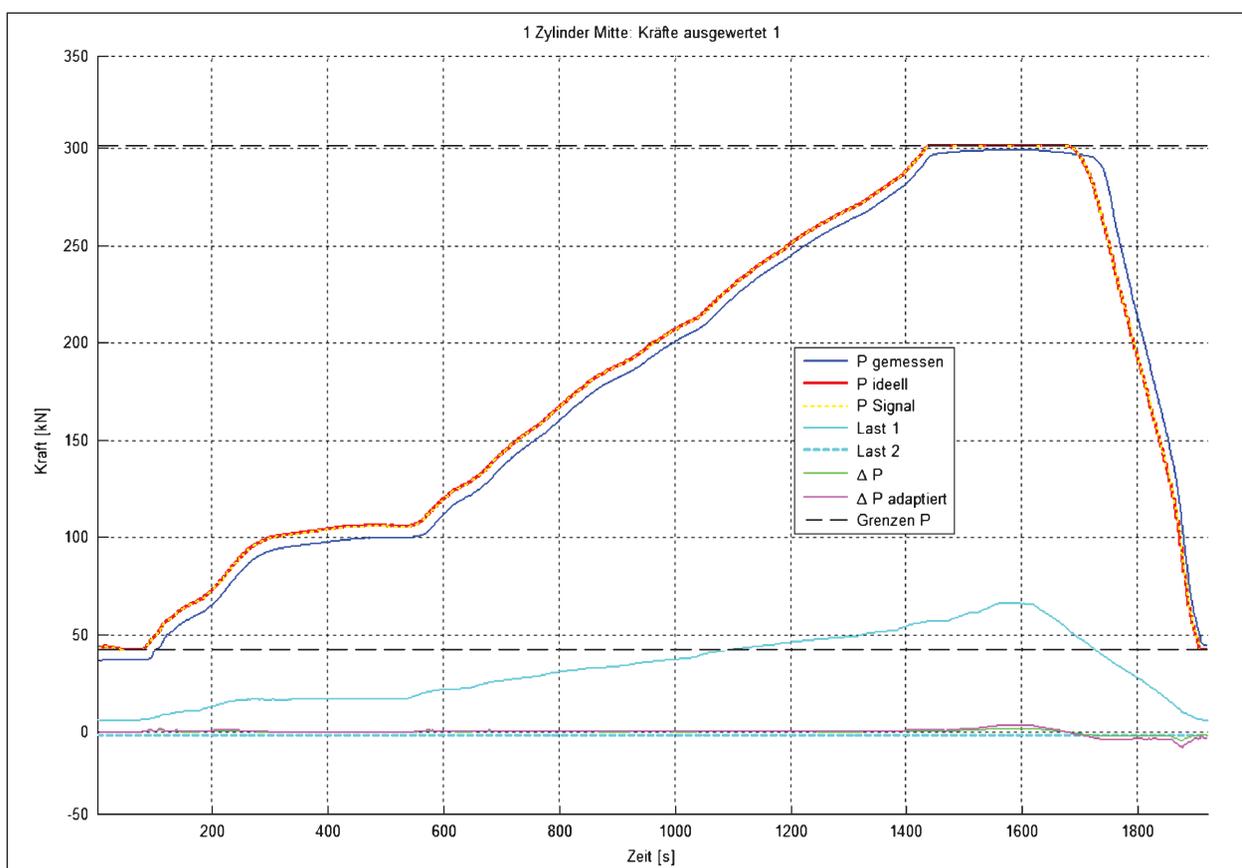


Bild 113: Versuchsreihe 1: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Kräfte

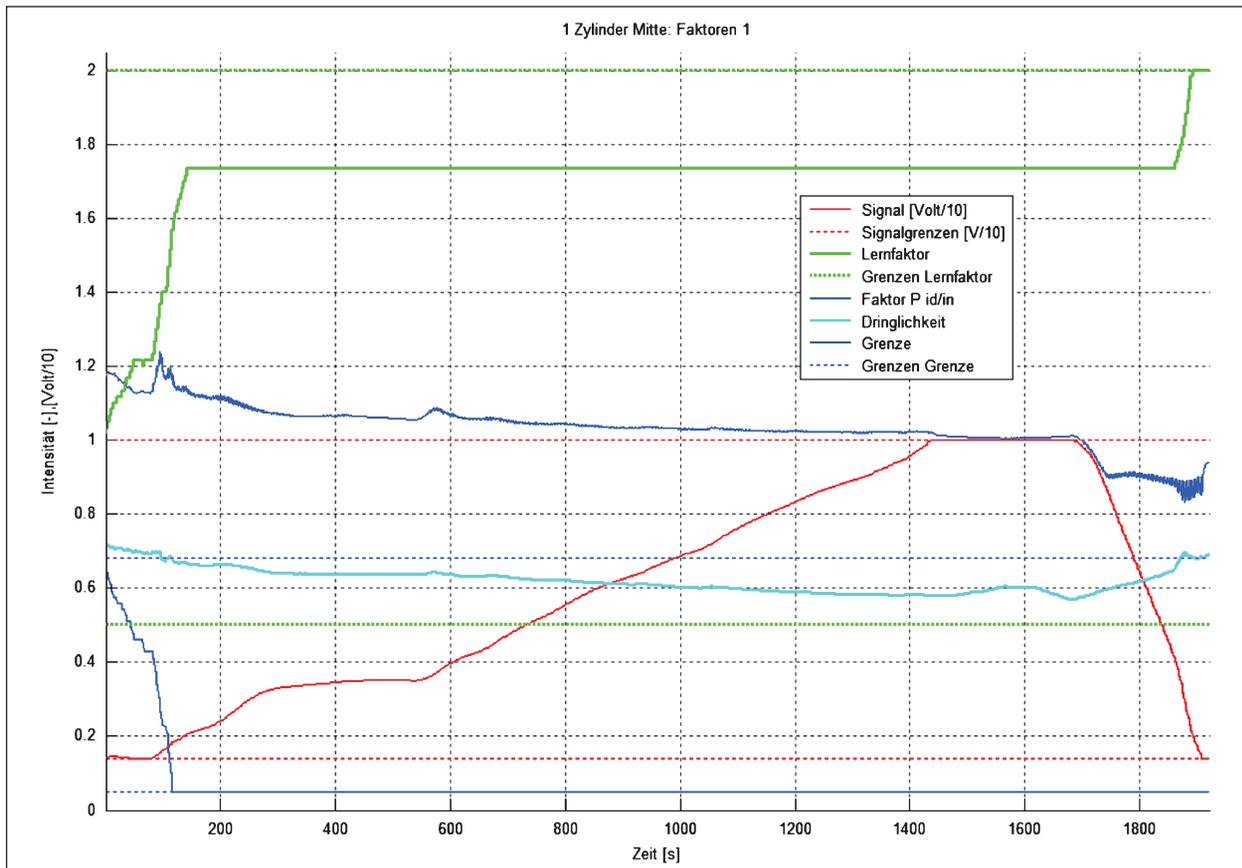


Bild 114: Versuchsreihe 1: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Parameter

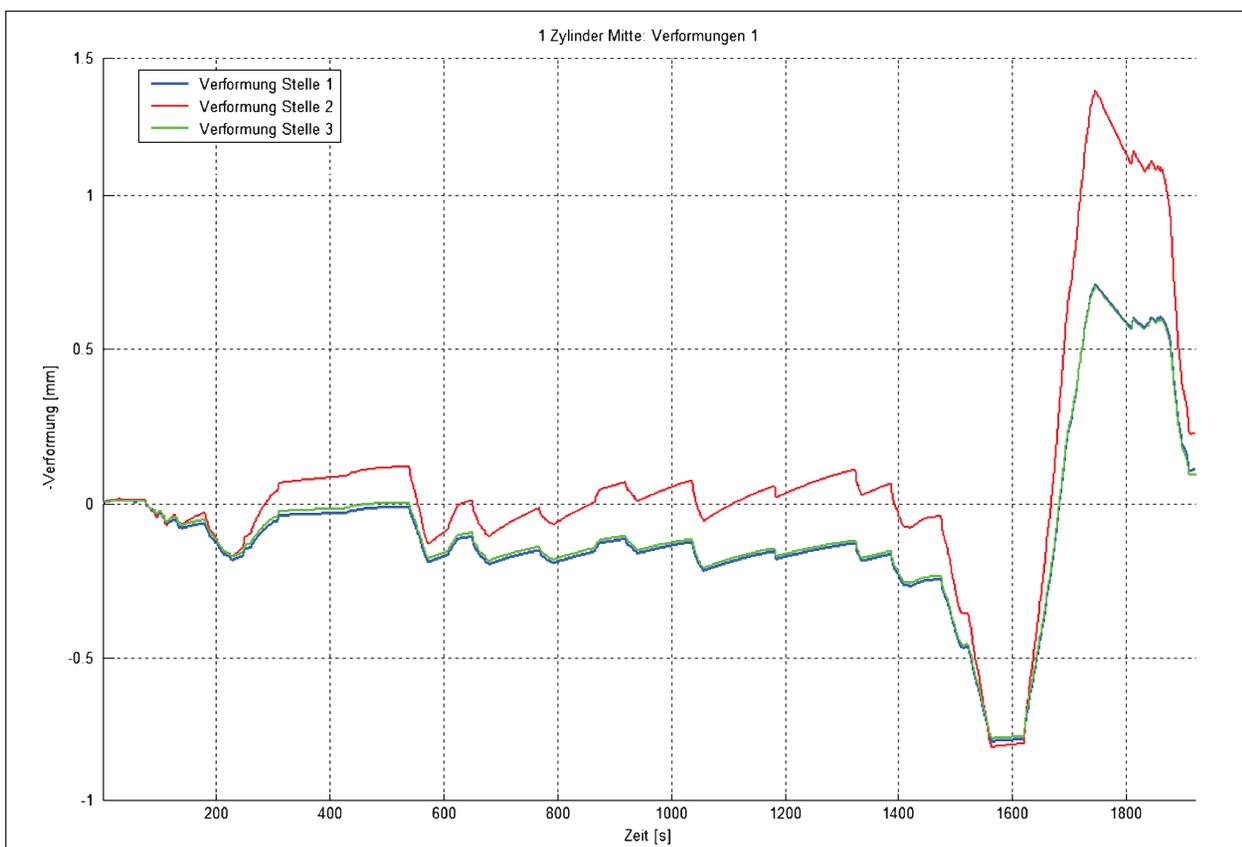


Bild 115: Versuchsreihe 1: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Durchbiegungen

sind als Maxima über die gesamte Versuchsdauer (Kapitel 5.3.7).
in Tabelle 17 aufgeführt (zur Lasterhöhung siehe

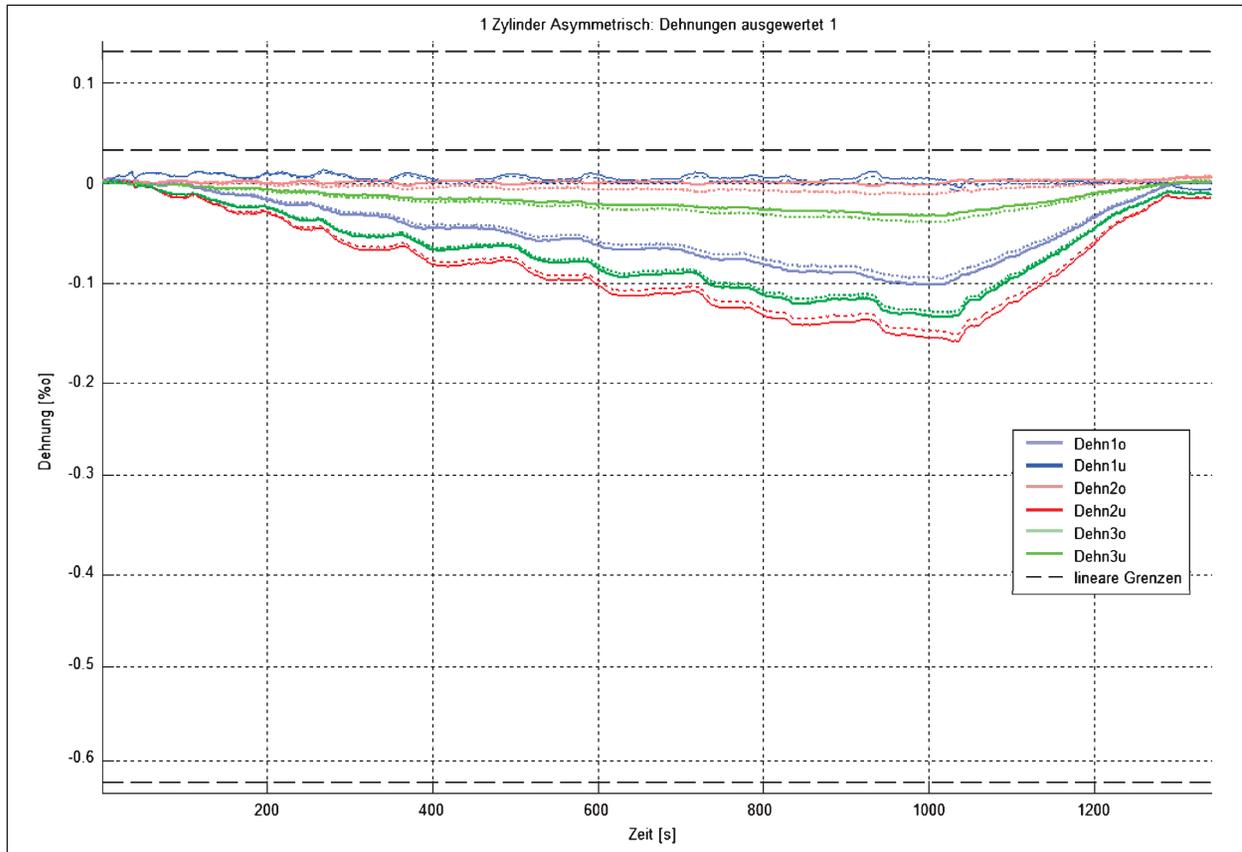


Bild 116: Versuchsreihe 1: 1 Zylinder Links: Verlauf Dehnungen

Versuchsreihe 1 X = 1	Grundzustand übernommen						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder (3)	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	59,98	52,66	57,83	33,41	58,28	57,40	52,94
Erhöhung [-]	12,43	8,18	8,99	6,92	6,49	6,39	7,02
max. P ideell	301,03	278,68	301,03	301,03	198,04	214,81	301,03
von Pmax [%]	100,00	92,58	100,00	100,00	65,79	71,36	100,00
max. P gemessen	299,67	276,68	293,99	294,32	205,30	223,72	311,03
von Pmax [%]	99,55	91,91	97,66	97,77	68,20	74,32	103,32
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0070	0,0133	0,0093	0,0072	0,0748	0,0436	0,0370
Ausnutzungsgrad [%]	21,36	40,58	28,38	21,97	228,25	133,05	112,91
Ort	Mitte oben	Links unten	Rechts unten	Mitte oben	Last unten	Last unten	Last links unten
min. Dehnung	-0,1282	-0,1582	-0,1645	-0,1580	-0,1077	-0,1297	-0,1755
Ausnutzungsgrad [%]	11,11	13,71	14,25	13,69	9,33	11,24	15,21
Ort	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Last oben	Last oben	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	-0,0294	0,0055	0,0027	-0,0072	0,0444	0,0232	0,0215
Wege [mm]							
max. Verformung	0,79	0,12	0,17	0,40	0,30	0,32	0,63
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-1,34	-1,19	-1,20	-1,04	-0,56	-0,62	-1,41
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	32:00	22:20	19:40	18:42	20:12	13:25	09:15

Tab. 17: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Begrenzung der Zustandsdringlichkeit auf ein Minimum (-0,1) vorgenommen. Zur Veranschaulichung der linearen Abhängigkeit der Dringlichkeitsgrenze (s. Bild 117,

blaue solide Linie) von der aktuellen Vorspannkraft (Rot) musste der Einfluss des Regelungszustandes begrenzt werden. Resultierende Kenngrößen der zweiten Versuchsreihe sind in Tabelle 18 dargestellt.

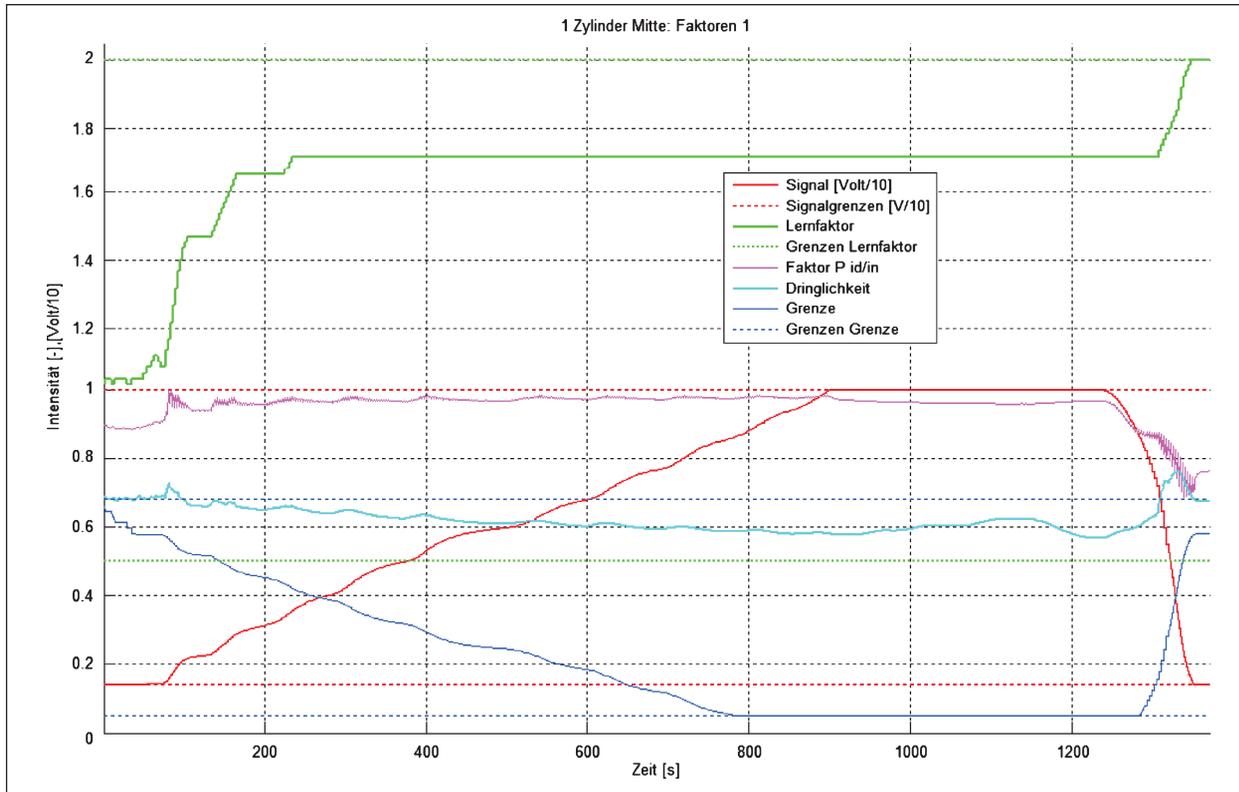


Bild 117: Versuchsreihe 2: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Parameter

Versuchsreihe 2 X = 1	Zustandsdringlichkeit begrenzt (übernommen)						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder (3)	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	67,42	63,25	67,27	47,51	55,23	58,36	51,00
Erhöhung [-]	13,97	9,83	10,45	9,84	6,15	6,50	6,76
max. P ideell	301,03	301,03	301,03	301,03	221,07	214,88	301,03
von Pmax [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	73,44	71,38	100,00
max. P gemessen	313,75	312,58	310,61	313,58	230,43	223,54	312,00
von Pmax [%]	104,23	103,84	103,18	104,17	76,55	74,26	103,64
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0253	0,0233	0,0181	0,0228	0,0504	0,0434	0,0179
Ausnutzungsgrad [%]	77,20	71,10	55,23	89,57	153,80	132,44	54,62
Ort	Mitte oben	Links unten	Rechts unten	Links unten	Last unten	Last unten	Last links unten
min. Dehnung	-0,1474	-0,1681	-0,1820	-0,1760	-0,1148	-0,1318	-0,1724
Ausnutzungsgrad [%]	12,77	14,57	15,77	15,25	9,95	11,42	14,94
Ort	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Rechts oben	Mitte unten	Last oben	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	-0,0263	0,0072	0,0094	-0,0052	0,0257	0,0228	0,0066
Wege [mm]							
max. Verformung	1,50	0,29	0,25	1,25	0,32	0,32	0,66
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-2,00	-1,21	-1,36	-1,33	-0,72	-0,65	-1,21
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	22:50	50:35	18:06	17:25	12:07	16:00	10:29

Tab. 18: Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

Zur Intensivierung der Adaptionen wurde in der dritten Versuchsreihe der Multiplikator X auf den Wert 3 erhöht. Die Folge war ein im Gegensatz zu den ersten Versuchsreihen stärkeres Reaktionsver-

mögen und eine schnellere Optimierungsgeschwindigkeit des Regelalgorithmus (s. Bild 118). Tabelle 19 zeigt die Kenngrößen der dritten Versuchsreihe.

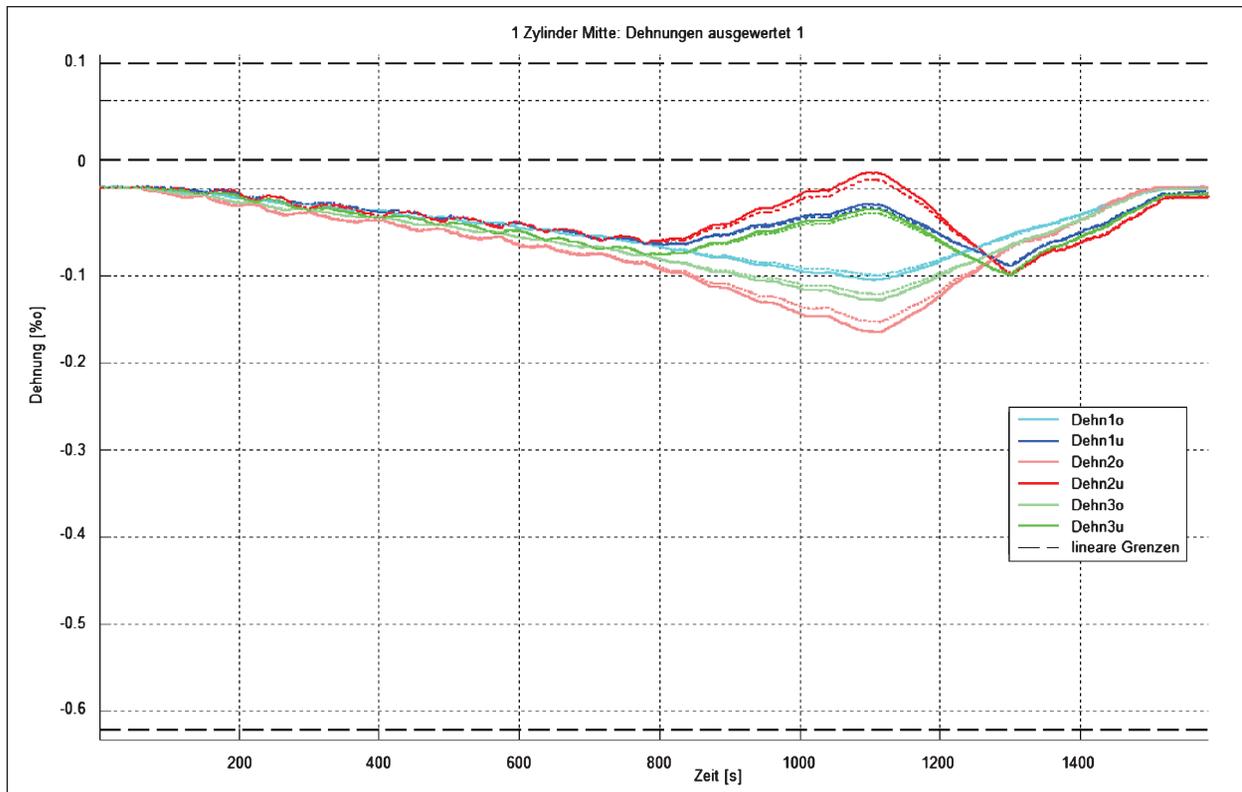


Bild 118: Versuchsreihe 3: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Dehnungen

Versuchsreihe 3 X = 3	Multiplikator erhöht auf 3 (übernommen)						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder (2)	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	72,24	66,62	68,35	41,86	57,90	57,87	51,45
Erhöhung [-]	14,97	10,35	10,62	8,67	6,45	6,45	6,82
max. P ideell	301,03	301,03	301,03	301,03	222,68	213,41	301,03
von Pmax [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	73,97	70,89	100,00
max. P gemessen	315,52	313,63	313,60	312,45	232,86	222,11	313,27
von Pmax [%]	104,81	104,19	104,18	103,79	77,35	73,78	104,07
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0175	0,0311	0,0341	0,0102	0,0481	0,0433	0,0180
Ausnutzungsgrad [%]	53,40	94,90	104,06	31,13	146,78	132,13	54,93
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Links unten	Last unten	Last unten	Last links unten
min. Dehnung	-0,1661	-0,1618	-0,1935	-0,1523	-0,1148	-0,1326	-0,1664
Ausnutzungsgrad [%]	14,39	14,02	16,77	13,20	10,26	11,49	14,42
Ort	Mitte oben	Mitte unten	Rechts oben	Rechts oben	Mitte unten	Last oben	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	-0,0258	0,0043	0,0054	-0,0047	0,0235	0,0212	0,0080
Wege [mm]							
max. Verformung	1,96	0,55	0,52	0,89	0,26	0,33	0,60
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-0,71	-1,01	-1,04	-0,78	-0,79	-0,55	-1,09
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	25:30	18:06	17:15	13:20	11:45	12:50	08:29

Tab. 19: Ergebnisse der dritten Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

In der vierten Versuchsreihe wurde das eingesetzte Fuzzy-System modifiziert. Durch Verschiebung der Fuzzy-Mengen „Zug“ und „Null“ der Input-Variablen in Richtung des Stauchungsbereiches sollte die Re-

gelung dazu veranlasst werden, Zugbeanspruchungen gänzlich zu vermeiden. Die Modifikation der Fuzzy-Mengen hatte zur Folge, dass die Fähigkeit der Regelung, Kompromisslösungen zu finden (Ka-

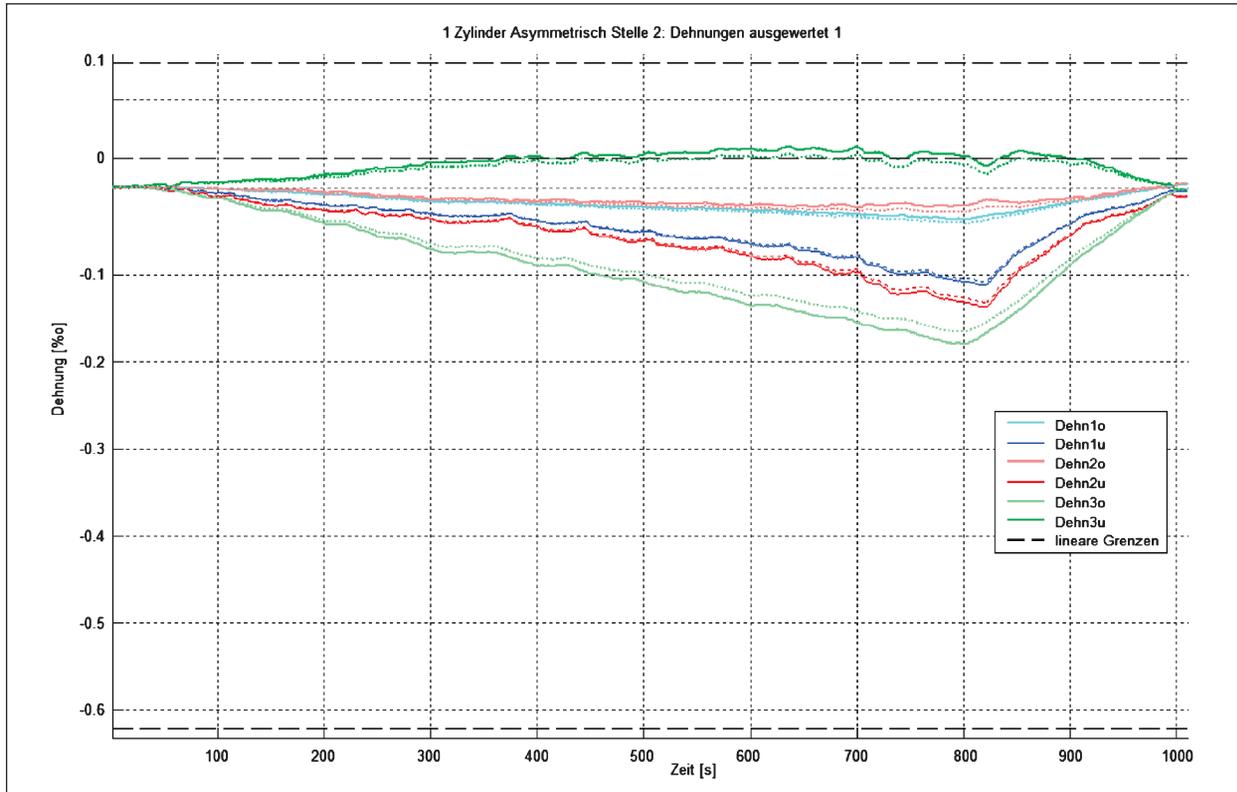


Bild 119: Versuchsreihe 4: 1 Zylinder Rechts: Verlauf Dehnungen

Versuchsreihe 4 X = 3	Änderung des Fuzzy-Systems (nicht übernommen)						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	77,71	62,96	63,60	46,98	57,18	57,66	52,72
Erhöhung [-]	16,10	9,78	9,88	9,73	6,37	6,42	6,99
max. P ideell	301,03	290,98	281,49	301,03	175,13	174,16	301,03
von Pmax [%]	100,00	96,66	93,51	100,00	58,18	57,85	100,00
max. P gemessen	316,55	298,84	291,20	315,36	182,51	182,22	312,96
von Pmax [%]	105,16	99,87	96,73	104,476	60,63	60,53	103,96
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0114	0,0335	0,0474	0,0188	0,0716	0,0716	0,0165
Ausnutzungsgrad [%]	34,79	102,23	144,64	57,37	226,73	218,49	50,35
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Links unten	Last unten	Last unten	Last Links unten
min. Dehnung	-0,2171	-0,1375	-0,1797	-0,1739	-0,1169	-0,1299	-0,1477
Ausnutzungsgrad [%]	18,81	11,92	15,57	15,07	10,13	11,6	12,80
Ort	Mitte oben	Mitte unten	Rechts oben	Rechts oben	Last oben	Last oben	Last Rechts oben
mittlere max. Dehnung	-0,0378	0,0144	0,0271	-0,0095	0,0374	0,0364	0,0045
Wege [mm]							
max. Verformung	2,40	0,57	0,71	1,26	0,78	0,82	0,62
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-0,87	-0,50	-0,54	-0,45	-0,12	-0,11	-0,26
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	25:30	19:25	16:50	12:30	14:00	13:45	08:35

Tab. 20: Ergebnisse der vierten Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

pitel 5.3.6), stark eingeschränkt wurde. Die Aufbringung von Lasten in Größenordnungen, welche in den vorherigen Versuchsreihen erzielt wurden, führten bei asymmetrischer Lastanordnung zu wesentlich höheren Zugspannungen (Bild 119, Tabelle 20).

Zur Untersuchung einer gesteigerten Intensivierung der Vorspannkraftänderung wurde in der fünften Versuchsreihe der Multiplikator auf 5 erhöht. Aufgrund der (nochmals) gesteigerten Reaktion der Regelung wurden die Adaptionen zu stark ausge-

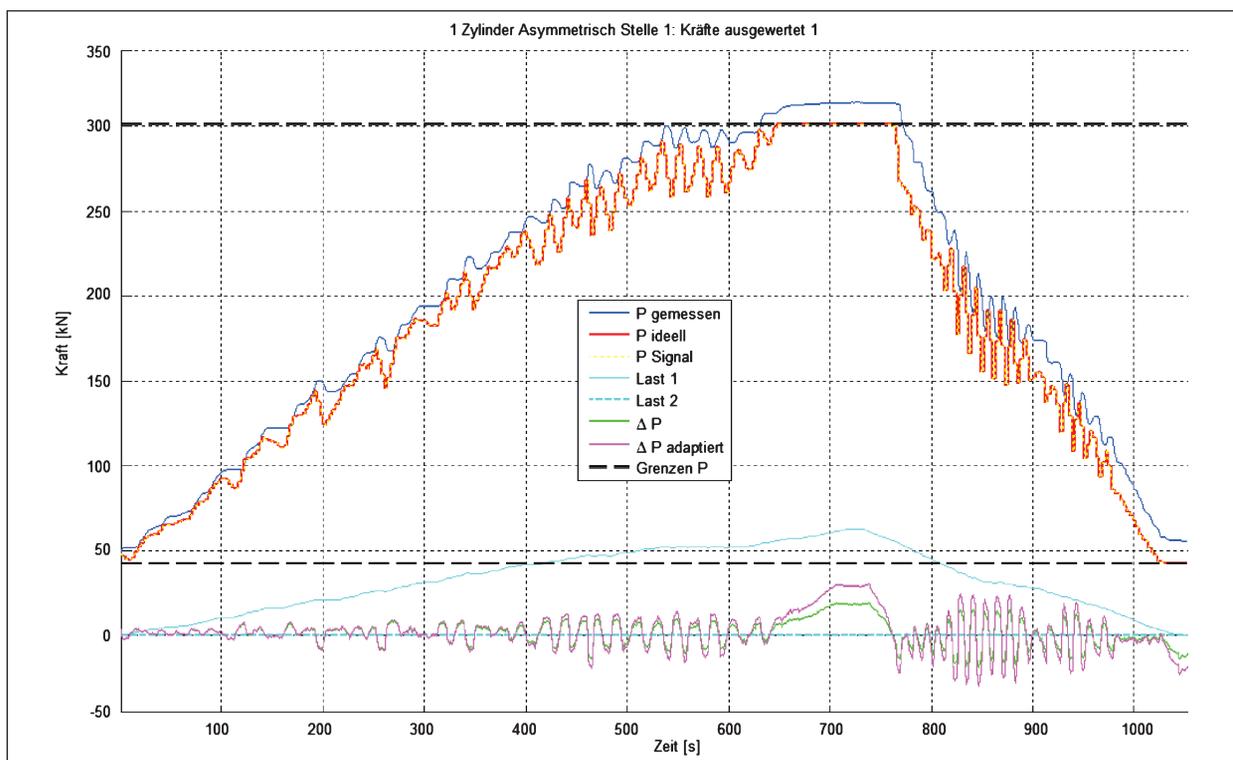


Bild 120: Versuchsreihe 5: 1 Zylinder Links: Verlauf Kräfte

Versuchsreihe 5 X = 5	Erhöhung Multiplikator auf 5 (nicht übernommen)						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	76,82	61,75	63,61	46,61	57,67	58,13	50,70
Erhöhung [-]	15,92	9,60	9,88	9,66	6,42	6,47	6,72
max. P ideell	301,03	301,03	301,03	301,03	225,97	214,13	301,03
von Pmax [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	75,06	71,13	100,00
max. P gemessen	317,60	313,89	312,36	314,80	234,21	223,00	313,31
von Pmax [%]	105,50	104,27	103,76	104,57	77,80	74,08	104,08
Dehnungen (Rand) [%]							
max. Dehnung	0,0340	0,0266	0,0192	0,0189	0,0485	0,0447	0,0171
Ausnutzungsgrad [%]	103,75	81,17	58,59	57,67	148,00	136,40	52,18
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Links unten	Last unten	Last unten	Last Links unten
min. Dehnung	-0,1926	-0,1656	-0,1782	-0,1739	-0,1207	-0,1343	-0,1503
Ausnutzungsgrad [%]	16,69	14,35	15,44	15,07	10,46	11,64	13,02
Ort	Mitte oben	Mitte unten	Rechts oben	Rechts oben	Mitte unten	Last oben	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	-0,0272	0,0062	0,0048	-0,0079	0,0241	0,0242	0,0070
Wege [mm]							
max. Verformung	2,37	0,27	0,28	1,24	0,31	0,36	0,49
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-0,73	-1,23	-1,11	-1,01	-0,76	-0,55	-0,49
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	20:20	17:32	15:15	11:22	13:20	11:15	14:40

Tab. 21: Ergebnisse der fünften Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

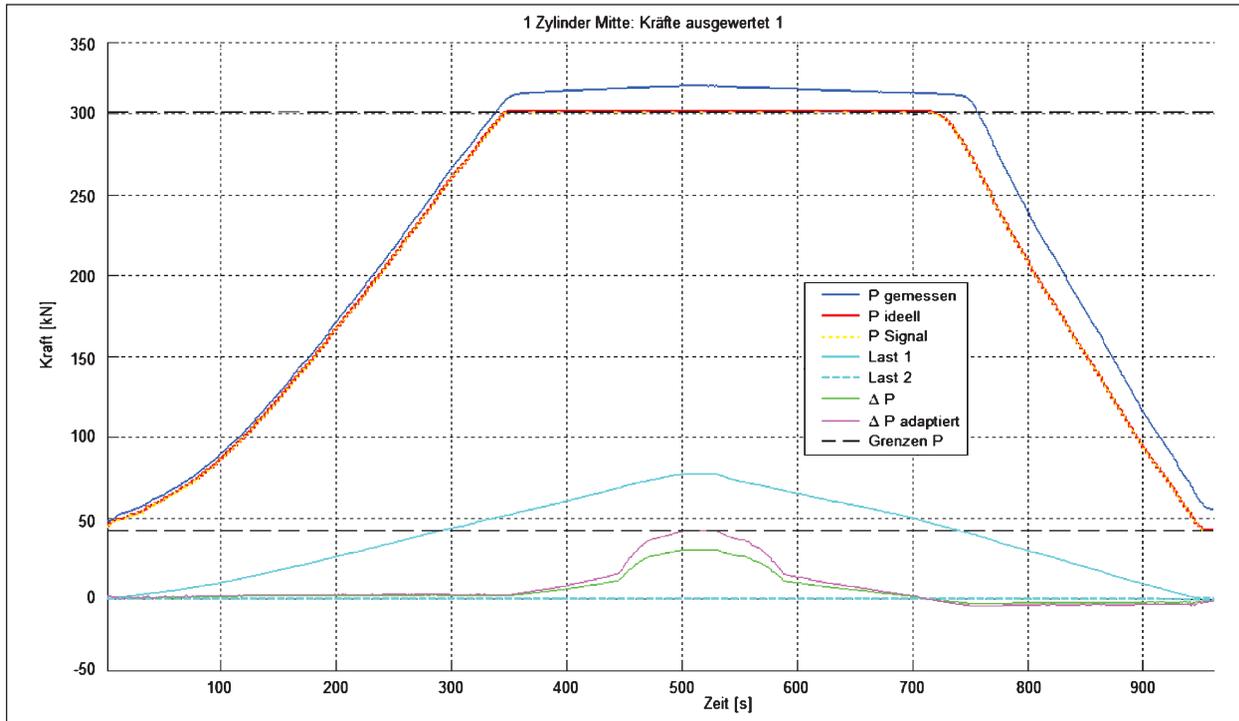


Bild 121: Versuchsreihe 6: 1 Zylinder Mitte: Verlauf Kräfte

Versuchsreihe 6 X = 3	Belastung ohne Wartezeit (übernommen)						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	76,91	61,19	63,53	47,28	57,20	58,28	52,00
Erhöhung [-]	15,93	9,51	9,87	9,80	6,37	6,49	6,90
max. P ideell	301,03	301,03	301,03	301,03	222,59	213,65	301,03
von Pmax [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	73,94	70,97	100,00
max. P gemessen	316,98	313,18	313,39	315,26	231,63	222,72	313,62
von Pmax [%]	105,30	104,04	104,11	104,73	76,95	73,99	104,18
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0338	0,0216	0,0189	0,0200	0,0473	0,0428	0,0144
Ausnutzungsgrad [%]	103,14	65,91	57,67	61,03	144,34	130,60	43,94
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Links unten	Last unten	Last unten	Last Links unten
min. Dehnung	-0,1915	-0,1623	-0,1745	-0,1724	-0,1190	-0,1315	-0,1553
Ausnutzungsgrad [%]	16,59	14,06	15,12	14,94	10,31	11,40	13,46
Ort	Mitte oben	Mitte unten	Rechts oben	Rechts oben	Mitte unten	Last oben	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	-0,0209	0,0042	0,0042	-0,0047	0,0227	0,0223	0,0044
Wege [mm]							
max. Verformung	2,37	0,28	0,27	1,25	0,22	0,33	0,59
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-0,73	-1,13	-1,10	-0,92	-0,76	-0,60	-0,63
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	16:01	14:25	13:10	11:05	09:25	07:05	09:59

Tab. 22: Ergebnisse der sechsten Versuchsreihe am Spannbetonplattenbalken

führt. Das Ergebnis war eine Übersteuerung der Regelung und damit einhergehende Oszillationen (s. Bild 120, Tabelle 21).

Während bisher einzelne Steigerungen von jeweils 5 kN stattfanden, wurde in der sechsten Versuchs-

reihe das Regelungsverhalten bei kontinuierlicher Belastung (s. Bild 121) ermittelt. Dabei wurden die bereits erreichten Lastgrößen ohne Unterbrechungen auf den Plattenbalken aufgebracht (s. Tabelle 22). Die Regelungsqualität wies hierbei sogar eine leichte Verbesserung auf.

Versuchsreihe 0	Ohne Vorspannung/Adaption						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	7,99	10,55	9,20	7,33	13,59	13,51	9,49
Erhöhung [-]	1,65	1,64	1,43	1,52	1,51	1,51	1,26
Dehnungen (Rand) [%]							
max. Dehnung	0,0395	0,0336	0,0342	0,0351	0,0369	0,0370	0,0334
Ausnutzungsgrad [%]	120,53	102,53	104,36	107,11	112,60	112,91	101,92
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Mitte unten	Last unten	Last unten	Mitte unten
min. Dehnung	-0,0304	-0,0259	-0,0289	-0,0302	-0,0238	-0,0297	-0,0261
Ausnutzungsgrad [%]	2,63	2,24	2,50	2,62	2,06	2,57	2,26
Ort	Mitte oben	Links oben	Rechts oben	Rechts oben	Last oben	Last oben	Last Rechts oben
mittlere max. Dehnung	0,0117	0,0095	0,0111	0,0104	0,0131	0,0103	0,0128
Wege [mm]							
max. Verformung	0,74	0,65	0,58	0,94	0,60	0,61	0,95
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
min. Verformung	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	04:00	04:28	03:55	03:14	07:16	05:47	06:45

Tab. 23: Ergebnisse der Versuchsreihe „0“ ohne Vorspannung am Spannbetonplattenbalken

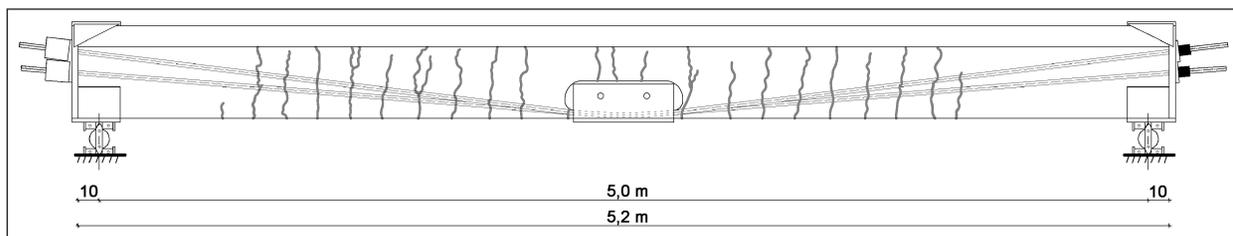


Bild 122: Rissbild

Nach Ablassen der Vorspannung von dem Plattenbalken wurde der Träger mit den angesetzten Lastanordnungen in der Versuchsreihe „0“ ohne den Einfluss der Vorspannkraft belastet. Dabei erfolgte eine schrittweise Lasterhöhung, bis eine Spannung von 1 N/mm² erreicht wurde. Aus den Ergebnissen dieser Reihe (s. Tabelle 23) geht hervor, dass die tatsächliche Steifigkeit des Plattenbalkens größer ist als die rechnerisch ermittelte.

5.3.9 Ergebnisse der Versuche am vorgeschädigten Plattenbalken

Vorschädigung des Plattenbalkens

Um die Einsetzbarkeit der verwendeten adaptiven Vorspannung für eine Verstärkung bestehender Bauwerke zu untersuchen, wurde die Regelung in der Versuchsreihe „R“ an einem vorgeschädigten Versuchskörper vorgenommen. Hierzu wurde der Plattenbalken mittels der Belastung durch zwei Zylinder in den Viertelpunkten zunächst zum Reißen gebracht. Dabei entstand ein Rissbild aus

Rissbildung		2 Zyl
Kräfte [kN]		
max. Belastung		23,67
Erhöhung [-]		4,90
Dehnungen (Rand) [%]		
max. Dehnung		1,6092
Ausnutzungsgrad [%]		4910,47
Ort		Mitte unten
min. Dehnung		-0,2703
Ausnutzungsgrad [%]		23,42
Ort		Mitte oben
mittlere max. Dehnung		0,9880
Wege [mm]		
max. Verformung		18,89
Ort		Mitte
min. Verformung		0,00
Ort		Mitte
Dauer [min]		107:50

Bild 123: Messung der Rissbreite und Ergebnistabelle der Risserzeugung

gleichmäßig verteilten Biegerissen (s. Bild 122) mit Rissbreiten bis zu 0,25 mm (s. Bild 123).

Versuchsergebnisse des gerissenen Plattenbalkens

Nach der Vorschädigung wurde das Versuchsprogramm an dem gerissenen Plattenbalken wie-

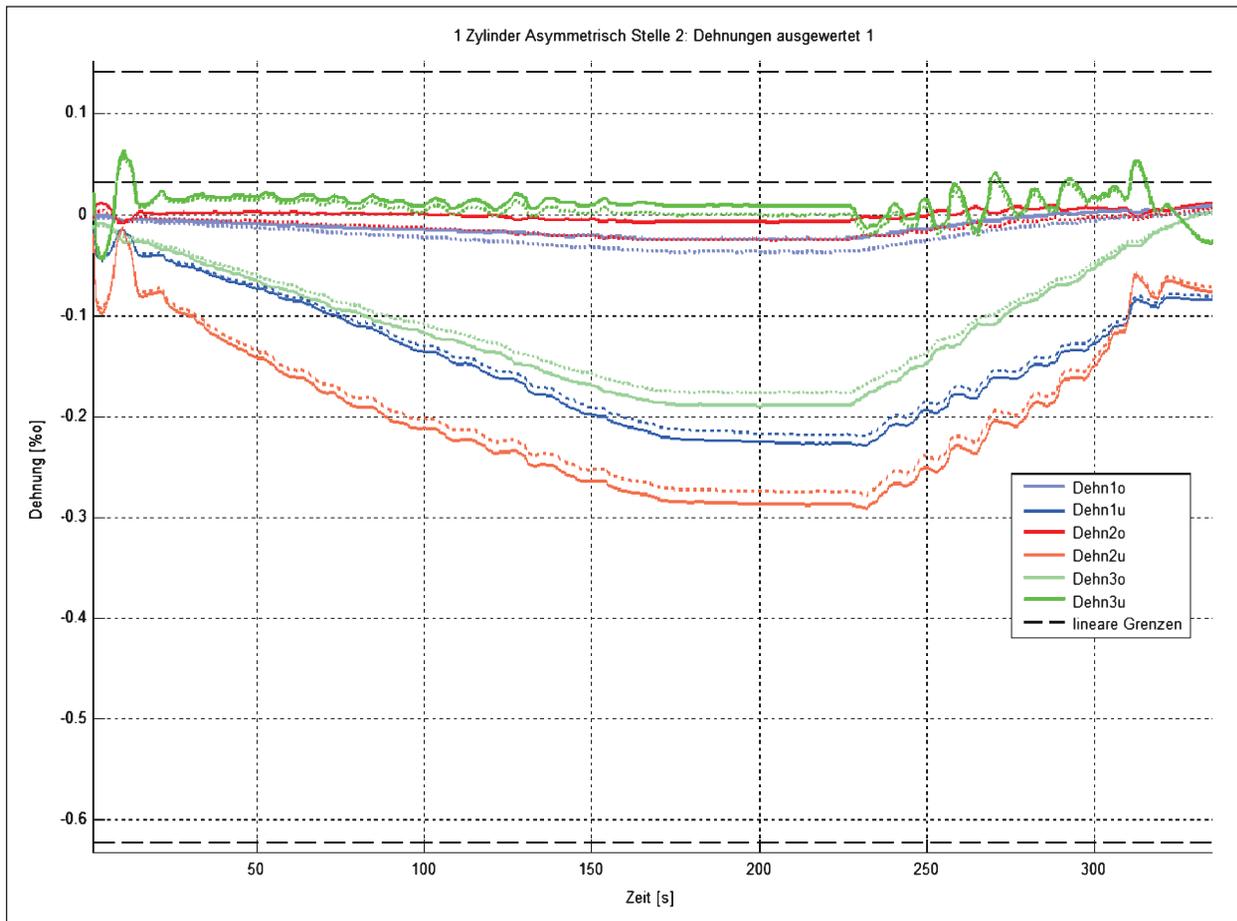


Bild 124: Versuchsreihe R: 1 Zylinder Rechts: Verlauf Dehnungen

Versuchsreihe R X = 3	Nach Rissbildung						
	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Kräfte [kN]							
max. Belastung	75,05	62,01	58,17	46,97	57,40	57,78	52,26
Erhöhung [-]	15,55	9,64	9,04	9,73	6,39	6,44	6,93
max. P ideell	301,03	286,22	279,14	301,03	189,54	187,42	236,07
von Pmax [%]	100,00	95,08	92,73	100,00	62,96	62,26	78,42
max. P gemessen	315,70	297,40	290,68	314,10	196,18	195,95	246,14
von Pmax [%]	104,87	98,79	96,56	101,34	65,17	65,09	81,77
Dehnungen (Rand) [‰]							
max. Dehnung	0,0786	0,0366	0,0636	0,0140	0,1252	0,0915	0,0539
Ausnutzungsgrad [%]	239,85	111,68	194,08	42,72	382,05	279,21	164,48
Ort	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Links oben	Last unten	Last unten	Last Links unten
min. Dehnung	-0,2126	-0,2975	-0,2913	-0,2461	-0,2272	-0,2156	-0,2087
Ausnutzungsgrad [%]	18,42	25,78	25,24	21,33	19,69	18,68	18,08
Ort	Mitte oben	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten	Mitte unten
mittlere max. Dehnung	0,0052	0,0169	0,0135	-0,0084	0,0071	0,0646	0,0227
Wege [mm]							
max. Verformung	1,73	0,11	0,37	0,80	0,06	0,07	0,73
Ort	Mitte	Links	Rechts	Links	Links	Rechts	Links
min. Verformung	-1,46	-2,22	-2,07	-1,39	-1,68	-1,38	-0,68
Ort	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Dauer [min]	06:26	05:06	05:35	05:53	10:35	08:25	08:24

Tab. 24: Ergebnisse der Versuchsreihe „R“ nach Rissbildung am Spannbetonplattenbalken

derholt (s. Tabelle 24). Zur Anwendung kam das wie bisher für den Plattenbalken verwendete Regelungsprogramm mit den bisherigen Einstellungen inklusive der im ungerissenen Zustand evaluierten und beibehaltenen Modifikationen (s. Kapitel 5.3.7).

Auffällig waren sprunghafte Änderungen in den gemessenen Dehnungen, welche aufgrund der Schließung oder nochmaligen Öffnung der vorhandenen Risse durch die veränderliche Vorspannkraft oder durch die Belastung auftraten (s. Bild 124). Dabei weisen die Zustände, in denen eine große Rissöffnung vorliegt (Versuchsbeginn) oder eine relativ schnelle Belastungsänderung (Entlastungsphase) eintritt, deutlich stärkere Schwankungen auf. Da der Beton in dem Bereich eines Risses keine Zugspannung aufnehmen kann, verringert sich dort die Steifigkeit des Plattenbalkens, wodurch die Spannung im Bewehrungsstahl steigt. Aufgrund der daraus resultierenden höheren und durch die Änderungen von Rissöffnungen verzerrten interpolierten Betondehnungen erfolgt ein weniger beständiges, jedoch die Tragfähigkeit gewährleistendes Regelungsverhalten, solange keine vollständige Überdrückung des Querschnittes vorliegt. Durch den Einsatz anderer Messtechniken, welche von der Rissbildung unbeeinflusst bleiben, können die Auswirkungen der erhöhten Stahldehnungen in Bereichen, in denen Risse auftreten, umgangen werden.

Obwohl entgegen der Zielsetzung Spannungen größer als 1 N/mm^2 auftraten, konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit der adaptiven Vorspannung zur Verstärkung bestehender und auch vorgeschädigter Tragwerke demonstriert werden.

5.3.10 Zwischenbilanz

Die vorgegebene Zielsetzung, Zugdehnung weitestgehend zu vermeiden und die Querschnittsausnutzung zu optimieren, wurde durch die adaptive Regelung erfolgreich eingehalten. Durch das Regelungsverhalten wurde der Zustand des statischen Systems in Richtung des vordefinierten Optimums angepasst, wobei die Verarbeitung gegensätzlicher Zustände der einzelnen Messstellen durch eine Kompromisslösung in angemessener Weise durchgeführt werden konnte. Dabei wurden die im Voraus abgeschätzten erreichbaren Lasten angeordnet und sogar übertroffen (s. hierzu Tabelle 25, Grün). Die Auswirkungen der Lastanordnun-

gen, deren Lastangriffspunkte nicht der Lage der Messstellen entsprachen und deren maximale Momente somit nicht durch das Messsystem erfasst wurden (SWL), sind von der Regelung in angemessener Weise ausgeglichen worden. Zur Analyse dieser kritischen Anordnungen wurde eine sensible Auswertung eingeführt, in welcher der Zeitpunkt des ersten Überschreitens einer Spannung von 1 N/mm^2 hinsichtlich der vorhandenen Lastgröße und der Stelle des Auftretens betrachtet wird (s. Tabelle 26).

Unter der Voraussetzung, Zugspannungen auf 1 N/mm^2 zu begrenzen, war eine Laststeigerung auf das ca. 7- bis 15fache möglich. Bei besonders ungünstiger Lastanordnung (SWL asymmetrisch) konnte eine Erhöhung der aufbringbaren Last auf das 3- bis 5fache erfolgen. Die maximalen aufgetretenen Spannungen liegen lediglich in Einzelfällen über der einzuhaltenden Grenze von 1 N/mm^2 . Anhand des Mittelwertes der maximalen Spannungen über die Versuchslaufzeit lassen sich die Ergebnisse der Versuchsreihen untereinander vergleichen.

Die Begrenzungen der adaptiven Regelungsparameter wurden eingehalten. Die minimale Vorspannkraft wurde über sämtliche Versuchszeiträume auf den Plattenbalken aufgebracht. Außerdem wurden durch die hydraulischen Anlage bedingte Einschränkungen, durch welche eine Wartezeit von zwei Sekunden zwischen einzelnen Adaptationen erfolgen musste und die Anpassungsintensität maximal 10 % betragen durfte (siehe Kapitel 5.1.4), eingehalten. Ein Aufschwingen der hydraulischen Anlagen konnte im Gegensatz zu den Vorkommnissen bei der Aluminiumtraverse (s. Kapitel 5.2.9) nicht beobachtet werden, da aufgetretene Durchbiegungen und somit verformungsinduzierte Lasterhöhungen an dem Stahlbetonplattenbalken wesentlich geringer ausfielen. Die grundsätzliche Einsetzbarkeit der adaptiven Vorspannung zur Verstärkung vorhandener Bauwerke wurde demonstriert. Das entwickelte Regelungsprogramm ist sowohl für den Einsatz bei linearem als auch bei nichtlinearem Materialverhalten geeignet.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die entwickelte adaptive Regelung eine hohe Zuverlässigkeit und Robustheit aufweist. Die modellfreie und in Form von Expertenwissen integrierte Grundlage wurde erfolgreich dazu verwendet, die Zielsetzung zu erfüllen.

Zusammenfassung	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Max. Last bei zul. 1 N/mm ² [kN]	4,83	6,44	6,44	4,83	8,98	8,98	7,54
Erhöhung nach Schätzung [-]	14,50	9,32	9,32	8,29	4,46	4,46	6,63
Versuchsreihe 1							
Lasterhöhung [-]	12,43	8,18	8,99	6,92	6,49	6,39	7,02
Max. Spannung [N/mm ²]	0,21	0,41	0,28	0,22	2,28	1,33	1,13
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-0,90	0,17	0,08	-0,22	1,35	0,71	0,66
Versuchsreihe 2							
Lasterhöhung [-]	13,97	9,83	10,45	9,84	6,15	6,50	6,76
Max. Spannung [N/mm ²]	0,77	0,71	0,55	0,70	1,54	1,32	0,55
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-0,80	0,22	0,29	-0,16	0,78	0,70	0,20
Versuchsreihe 3							
Lasterhöhung [-]	14,97	10,35	10,62	8,67	6,45	6,45	6,82
Max. Spannung [N/mm ²]	0,53	0,95	1,04	0,31	1,47	1,32	0,55
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-0,79	0,13	0,46	-0,14	0,72	0,65	0,24
Versuchsreihe 4							
Lasterhöhung [-]	16,10	9,78	9,88	9,73	6,37	6,42	6,99
Max. Spannung [N/mm ²]	0,35	1,02	1,45	0,57	2,27	2,18	0,50
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-1,15	0,44	0,83	-0,29	1,14	1,11	0,14
Versuchsreihe 5							
Lasterhöhung [-]	15,92	9,60	9,88	9,66	6,42	6,47	6,72
Max. Spannung [N/mm ²]	1,04	0,81	0,59	0,58	1,48	1,36	0,52
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-0,83	0,19	0,15	-0,24	0,74	0,74	0,21
Versuchsreihe 6							
Lasterhöhung [-]	15,93	9,51	9,87	9,80	6,37	6,49	6,90
Max. Spannung [N/mm ²]	1,03	0,66	0,58	0,61	1,44	1,31	0,44
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	-0,64	0,13	0,13	-0,15	0,69	0,98	0,13
Versuchsreihe 0							
Lasterhöhung [-]	1,65	1,64	1,43	1,52	1,51	1,51	1,26
Max. Spannung [N/mm ²]	1,21	1,03	1,04	1,07	1,13	1,13	1,02
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	0,36	0,29	0,34	0,32	0,40	0,31	0,39
Versuchsreihe R							
Lasterhöhung [-]	15,55	9,64	9,04	9,73	6,39	6,44	6,93
Max. Spannung [N/mm ²]	2,40	1,12	1,94	0,43	3,82	2,79	1,64
Mid. Max. Spannung [N/mm ²]	0,16	0,52	0,41	-0,26	0,22	1,97	0,69
-----: optimal -----: gut -----: kritisch							

Tab. 25: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse am Spannbetonplattenbalken

Strenge Auswertung	1 Zylinder Mitte	1 Zylinder Links	1 Zylinder Rechts	2 Zylinder	SWL Links	SWL Rechts	SWL Sym.
Max. Last bei zul. 1 N/mm ² [kN]	4,83	6,44	6,44	4,83	8,98	8,98	7,54
Erhöhung nach Schätzung [-]	14,50	9,32	9,32	8,29	4,46	4,46	6,63
Versuchsreihe 1							
Last [kN]	59,98	52,66	57,83	33,41	17,86	39,55	39,75
Stelle Zugspannung	–	–	–	–	Last Li unten	Last Re unten	Last Li unten
Lasterhöhung [-]	12,43	8,18	8,99	6,92	1,99	4,40	5,27
Versuchsreihe 2							
Last [kN]	67,42	63,25	67,27	47,51	39,03	43,51	51,00
Stelle Zugspannung	–	–	–	–	Last Li unten	Last Re unten	–
Lasterhöhung [-]	13,97	9,83	10,45	9,84	4,35	4,85	6,76
Versuchsreihe 3							
Last [kN]	72,24	66,62	68,06	41,86	36,72	42,81	51,45
Stelle Zugspannung	–	–	Rechts unten	–	Last Li unten	Last Re unten	–
Lasterhöhung [-]	14,97	10,35	10,58	8,67	4,09	4,77	6,82
Versuchsreihe 4							
Last [kN]	77,71	62,10	27,72	46,98	24,92	25,90	52,72
Stelle Zugspannung	–	Links unten	Rechts unten	–	Last Li unten	Last Re unten	–
Lasterhöhung [-]	16,10	9,65	4,31	9,73	2,78	2,88	6,99
Versuchsreihe 5							
Last [kN]	77,80	61,75	63,61	46,61	38,24	43,56	50,70
Stelle Zugspannung	Mitte unten	–	–	–	Last Li unten	Last Re unten	–
Lasterhöhung [-]	16,12	9,60	9,88	9,66	4,26	4,85	6,72
Versuchsreihe 6							
Last [kN]	77,47	61,19	63,53	47,28	39,20	44,38	52,00
Stelle Zugspannung	Mitte unten	–	–	–	Last Li unten	Last Re unten	–
Lasterhöhung [-]	16,05	9,51	9,87	9,80	4,37	4,94	6,90
Versuchsreihe 0							
Last [kN]	6,99	10,51	9,01	7,16	12,50	12,19	9,40
Stelle Zugspannung	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	Mitte unten	Last Li unten	Last Re unten	Mitte unten
Lasterhöhung [-]	1,45	1,63	1,40	1,48	1,39	1,36	1,25
Versuchsreihe R							
Last [kN]	7,75	21,48	5,34	465,97	8,92	8,69	16,52
Stelle Zugspannung	Mitte unten	Links unten	Rechts unten	–	Last Li unten	Last Re unten	Last Li unten
Lasterhöhung [-]	1,61	3,34	0,83	9,73	0,99	0,97	2,19
-----: gut -----: kritisch							

Tab. 26: Sensible Auswertung gemäß der Zielsetzung des Spannbetonplattenbalkens

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Sowohl die Zielsetzung der Verformungsminimierung als auch die der Spannungsoptimierung wurden mit zufriedenstellenden Ergebnissen erfolgreich durch das entworfene Regelungsprogramm erreicht, wobei modellbasierte und auch modellfreie Ansätze einsetzbar sind. Bei beiden Regelungsprogrammen (s. Tabelle 27) wurde eine Anpassung der Vorspannkraft ausgelöst, sobald die evaluierte aktuelle Notwendigkeit den jeweiligen Schwellenwert überschritt. Die anpassbaren Parameter konnten einerseits zur Optimierung der Regelungsqualität und andererseits zur Steuerung des gewünschten Systemzustandes verwendet werden, wobei vordefinierte Grenzen eingehalten wurden.

Der Einsatz der Fuzzy-Logic bietet neben der Anwendbarkeit modellfreier Ansätze in Form von natürlich ausgedrücktem Expertenwissen eine hohe Robustheit und Zuverlässigkeit. Insbesondere die Eigenschaften der verwendeten Hydraulik, daraus entstehende Phänomene und andere nicht eingeplante Einwirkungen konnten ohne eine Berücksichtigung in der Regelungsgrundlage abgefangen werden. Durch den Einsatz entsprechend den Rahmenbedingungen konzipierter mechanischer Komponenten ist ein noch wesentlich höheres Potenzial zur Erfüllung der Zielsetzungen erreichbar.

	Aluminiumtraverse	Spannbetonplattenbalken
Versuchskörper	VK1	VK2
Materialverhalten	linear-elastisch	nichtlinear
Adaptionsziel	Verformungs#s-minimierung	Spannungsoptimierung
Grundlage	modellbasiert	modellfrei
Wissensbasis	numerisches Modell	Expertenwissen
Fuzzy-Modell	Mamdani-Assilian	Takagi-Sugeno-Kang
Inputgrößen	Durchbiegungen	Dehnungen
Notwendigkeit	Entscheidung	Dringlichkeit
Umlenkung	Drittelspunkte	Feldmitte
Ergebnis	Verformungsanteil auf 6-20 % bzw. 3-12 %	Lasterhöhung auf 3- bis 15fach

Tab. 27: Gegenüberstellung der Versuchskörper

6 Auslegung und Anwendungsgebiete

In diesem Arbeitsschritt werden Fail-Safe-Konzepte zur Sicherstellung der Tragfähigkeit des Bauwerks im Falle eines Stromausfalls oder Ausfalls der Anlagentechnik bzw. der Vorspanntechnik vorgeschlagen. Zudem wird der Einsatz der adaptiven Vorspannung für den Neubau und für die nachträgliche Verstärkung von Spannbetonbrücken behandelt.

6.1 Fail-Safe-Konzepte

Eine permanente Zustandsüberwachung (Health Monitoring) der sicherheitsrelevanten Komponenten der eingesetzten Anlagentechnik ist unerlässlich, um die schnellstmögliche Meldung eingetretener kritischer Systemzustände zu ermöglichen.

6.1.1 Sensorsystem

Da das Sensorsystem bei adaptiv vorgespannten Brücken eine zentrale Rolle für die Regelung und auch für die Überwachung des Bauwerks spielt, ist die Systemredundanz äußerst wichtig. Dafür bietet sich der Einsatz eines Notstromaggregats sowie einer Einheit zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit einem Batteriesystem an (s. Kapitel 6.1.3).

6.1.2 Stellgliedsystem und Spanngliedausfälle

Durch den Ausfall eines Stellgliedes (stetiges Wegeventil) und somit der Zugriffsmöglichkeit kann die Vorspannkraft entweder zu gering zur Kompensation der vorliegenden Belastung oder auf einem unzulässig hohen Niveau verbleiben. Als vorbeugende Maßnahme gegen den erstgenannten Fall kann zur Erfüllung der rechnerischen Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein Mindestmaß an zusätzlicher ständiger Vorspannkraft angewendet werden, wodurch auch der Versagensfall „Stellkraftverlust“ berücksichtigt wäre. Dies lässt sich anhand einer Mischung aus passiven Betonstahlbewehrungselementen bzw. Spanngliedern und aktiven (adaptiv geregelten) Spanngliedern realisieren, wobei die passive, ständig vorhandene Vorspannung mindestens der zum Einhalten des Dekompressionsnachweises unter einer angemessenen Einwirkungskombination notwendigen Vorspannkraft entsprechen sollte.

Im Falle einer für den herrschenden Beanspruchungszustand unzulässig hohen Vorspannkraft ist die Anordnung eines hydraulischen Notablasses als Entlastungsmaßnahme denkbar, wodurch der Druck elektrisch oder mechanisch abgelassen werden kann.

Bei Ausfall eines Spanngliedes nehmen die Durchbiegungen der Brückenfelder zu. Zudem können je nach Lage der gerissenen Spannglieder Torsionsbeanspruchungen im Betonquerschnitt auftreten. In einem solchen Fall müssen bei konventionell vorgespannten Brücken Maßnahmen von einem vorläufigen Fahrverbot für Lkw und Schwertransporten bis hin zur sofortigen Sperrung der Brücke ergriffen werden. Bei Brücken mit adaptiver Vorspannung kann die Regelung auf diese außergewöhnliche Situation durch die Verteilung der fehlenden Vorspannkraft auf die restlichen aktiven Spannglieder reagieren. Bei separater Auslegung mehrerer Regelungsausgänge (und dadurch mehrerer Stellglieder) kann die fehlende Vorspannkraft weiterhin so verteilt werden, dass auch die hervorgerufenen Effekte kompensiert werden können.

6.1.3 Stromausfälle

Um die unterbrechungsfreie Stromversorgung des Regelungssystems zu gewährleisten, ist es sinnvoll, so genannte USV-Systeme (unterbrechungsfreie Stromversorgung, engl.: UPS: Uninterrupted Power Supply) zu installieren. Eine USV ist ein elektrisches Gerät, welches Stromverbraucher vor Spannungsunterbrechungen oder auch Spannungsspitzen schützt. Somit können auch jegliche Datenverluste vermieden werden. Während ein Rechner ohne USV einen Stromausfall von lediglich ca. 8-20 Millisekunden überbrückt, ist es bei mit USV ausgestatteten Rechnern möglich, über ca. 10-30 Minuten ohne Spannungszufuhr einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten [ruki12]. Für industrielle Anwendungen werden in der Regel spezielle Versionen der USV-Systeme eingesetzt, die robuster sind. Diese können beispielsweise Umgebungstemperaturen von -20 bis +55 °C problemlos ausgesetzt werden [fsi12].

USV-Systeme können in drei Typen unterteilt werden:

- OFF-Line (Standby) USV: Schutz vor Stromausfall, Spannungseinbrüchen sowie Spannungsspitzen. Das System kann bei Spannungsschwankungen oder Stromausfällen innerhalb

von ca. 2-4 Millisekunden auf Akkubetrieb umschalten.

- Line interactive (Hybrid) USV: schützt zusätzlich vor Unter- bzw. Überspannungen und kann mit Hilfe eines AVR (Automatic Voltage Regulator) eine stabilere Ausgangsspannung gewährleisten [ruki12].
- On-Line USV (Dauerwandler): Zusätzlich zu den oben genannten Funktionen bietet diese Variante einen Schutz vor Frequenzschwankungen, Schaltspitzen, harmonischen Oberwellen sowie Störspannungen. USV-Geräte dieses Typs sind in der Lage, die Ausgangsspannung und -frequenz unabhängig von den Eingangswerten zu erzeugen [ruki12, REST10].

Das USV-System kann zwischen Stromnetz und Anlage eingebaut werden. Sobald es im Stromnetz zu Störungen kommt, schaltet die USV über angeschlossene Batterien auf einen Akkubetrieb um und garantiert dadurch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Gleichzeitig erfolgt per SMS bzw. E-Mail eine Benachrichtigung des zuständigen Überwachungspersonals. In der von der Kapazität der USV abhängigen Überbrückungszeit ist es möglich, die Stromproblematik zu beheben oder sonst wichtige Daten zu speichern und notwendige Sperrmaßnahmen zu treffen.

Um USV-Systeme zu dimensionieren, wird die gesamte Anschlussleistung in Volt-Ampere (VA) durch Addition der Einzelleistungen der Geräte ermittelt und eine der Gesamtleistung sowie der zu erwartenden Ausfalldauer entsprechende USV gewählt. Zu beachten ist, dass die USV überdimensioniert werden sollten, da die Akkuleistung mit der Zeit nachlässt. Somit kann ein längerer Schutz gewährleistet werden [ruki12].

6.2 Anwendungsbeispiele

Der Grundgedanke der adaptiven Vorspannung liegt darin, die Vorspannkraft nicht einmalig und in voller Größe auf das Bauteil aufzubringen, sondern vorerst in einer Größenordnung, die dem Spannkraftbedarf einer quasi ständigen Einwirkung, d. h. Eigengewicht und einem definierten Anteil der Verkehrslast, entspricht. Die verbleibende Reserve an möglicher Vorspannkraft wird dann bei Bedarf sukzessive auf das Bauwerk aufgebracht. Dieser belastungsabhängig geregelte Vorgang hat zur Folge, dass der Betonquerschnitt nicht permanent

mit der maximalen Vorspannung beansprucht bleibt, sondern nur beim Auftreten der maximalen Bemessungslast bzw. von außergewöhnlich großen Beanspruchungen, beispielsweise durch Schwerverkehr. Insbesondere stellt die Flexibilität der adaptiv vorgespannten Brücken hinsichtlich der Reaktion auf den steigenden Trend der Verkehrsbelastung ein großes Potenzial dar.

Die Möglichkeit der Anwendung dieser Vorspannweise bietet sich überall dort an, wo Spannglieder ohne Verbund oder externe Vorspannung eingesetzt werden, eine Zugänglichkeit der Spannanker gegeben und ausreichender Platz für den Einbau eines Stellantriebes gegeben ist. Die Sensorik des adaptiven Systems bietet gleichzeitig die Möglichkeit der Zustandsüberwachung des Bauwerks. Bei langzeitlichen Beobachtungen können Trends der Einwirkungen und des Tragverhaltens erkannt und Aussagen über den Zustand des Bauwerks gemacht werden.

Die Idee der Ausführung einer Brückenvorspannung mit passiven Spanngliedern zur Gewährleistung der minimalen aufzubringenden Vorspannkraft und aktiven regelbaren Spanngliedern zur Anpassung des Bauwerks an veränderliche zukünftige Beanspruchungen bei Bedarf soll mit vereinfachten statischen Berechnungen vorgestellt werden. Dabei erfolgt eine Vorbemessung der erforderlichen Vorspannkraft über den Nachweis der Dekompression. Die Beispiele beziehen sich sowohl auf den Neubau als auch auf die Verstärkung von Brücken, wobei im Verstärkungsfall der Grundwert der Vorspannkraft durch die bereits vorhandene Vorspannung gewährleistet und bei einer Lasterhöhung die adaptive Vorspannung aktiviert wird.

Als Brückenobjekt im Neubau wird im Folgenden eine dreifeldrige Spannbetonbrücke mit einem Hohlkastenquerschnitt untersucht, die mit externer passiver Vorspannung und aktiver zentrischer Vor-

spannung auszustatten ist. Im zweiten Fall wird eine mit adaptiver Vorspannung zu verstärkende Hohlkastenbrücke untersucht.

Da bei Mehrfeldsystemen die Regelung der Vorspannkraft im Fall von wandernden Achslasten feldweise erfolgen muss, setzt dies auch die feldweise Führung der Spannglieder bzw. die separate Regelung der betroffenen Felder voraus. Als Alternative bietet sich die hier vorgeschlagene zentrische Einleitung der adaptiven Vorspannkraft an, welche zu einem wesentlich geringeren Aufwand bei der Ausführung sowie bei der Regelung der Vorspannkraft führt. Dies entspricht auch der Praxis bei der Verstärkung mit externen Spanngliedern, da ein Großteil der in den letzten 20 Jahren verstärkten Spannbetonbrücken mit zentrisch geführter externer Vorspannung (passiv) realisiert wurde [Hav11].

Die Berechnung der Schnittgrößen und Spannungen erfolgte an mit Stabelementen modellierten Mehrfeldsystemen mit der Programmsoftware SOFiSTiK Structural Desktop der SOFiSTiK AG.

6.2.1 Neubau

Die vorliegende Hohlkastenbrücke weist den in Bild 125 dargestellten Querschnitt auf. Das statische System der Brücke ist ein dreifeldriger Durchlaufträger mit den Spannweiten 40 – 50 – 40 m.

Die Spanngliederführung der passiven externen Vorspannung weist zwei Umlenkstellen je Feld sowie eine Umlenkstelle an jedem Stützbereich auf. Eine schematische Darstellung ist Bild 126 zu entnehmen.

Die Lastannahmen für Temperatur, Wind und Stützensenkung erfolgten nach DIN-Fachbericht 101:2009. Für die Verkehrslasten wurde das Lastmodell LM1 bzw. LMM nach DIN EN 1991-2/NA angesetzt, welches die Obergrenzen des realen zu-

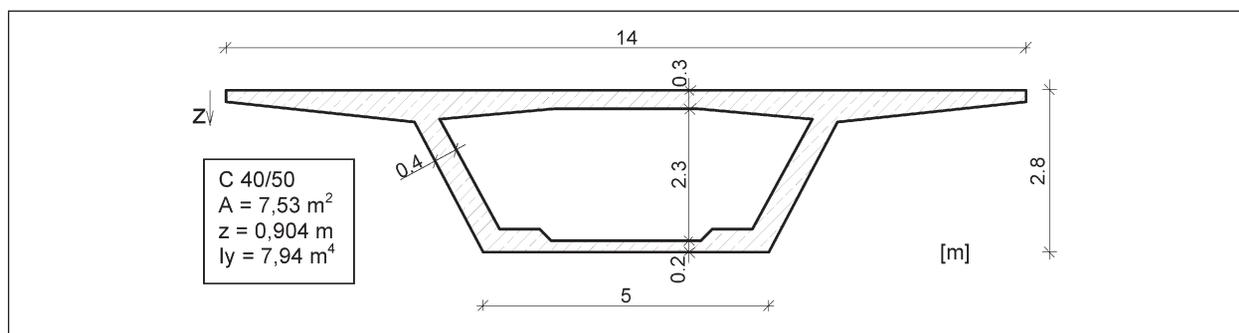


Bild 125: Querschnitt der untersuchten Beispielbrücke

künftigen Verkehrs abdecken soll. Das Lastmodell LM1 nach DIN-Fachbericht 101 deckt hingegen das aktuelle Verkehrsaufkommen ab [FBK11]. Bild 127 zeigt den Vergleich der beiden Lastmodelle.

Für die Ermittlung des Vorspanngrades der passiven Vorspannung bzw. der Grundvorspannkraft wurde der Nachweis der Dekompression für die quasi-ständige Einwirkungskombination herangezogen. Dabei werden lediglich 20 % der angesetzten Gesamtverkehrslasten berücksichtigt, was

gemäß DIN-Fachbericht 101 mit einer ständigen Auftrittshäufigkeit gleichzusetzen ist. Daraus ergibt sich eine passive Vorspannkraft von 41,0 MN.

Die Spannungsverläufe für diesen Fall sind Bild 128 zu entnehmen.

Als Nächstes wurde die zusätzliche zentrisch (bezogen auf die Schwerachse des Querschnittes) eingeleitete Vorspannkraft ermittelt, um die charakteristische Einwirkungskombination abzudecken und

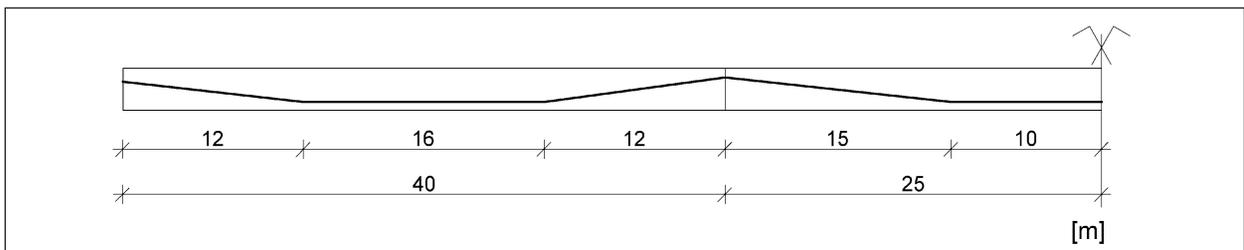


Bild 126: Spanngliedführung der passiven externen Vorspannung

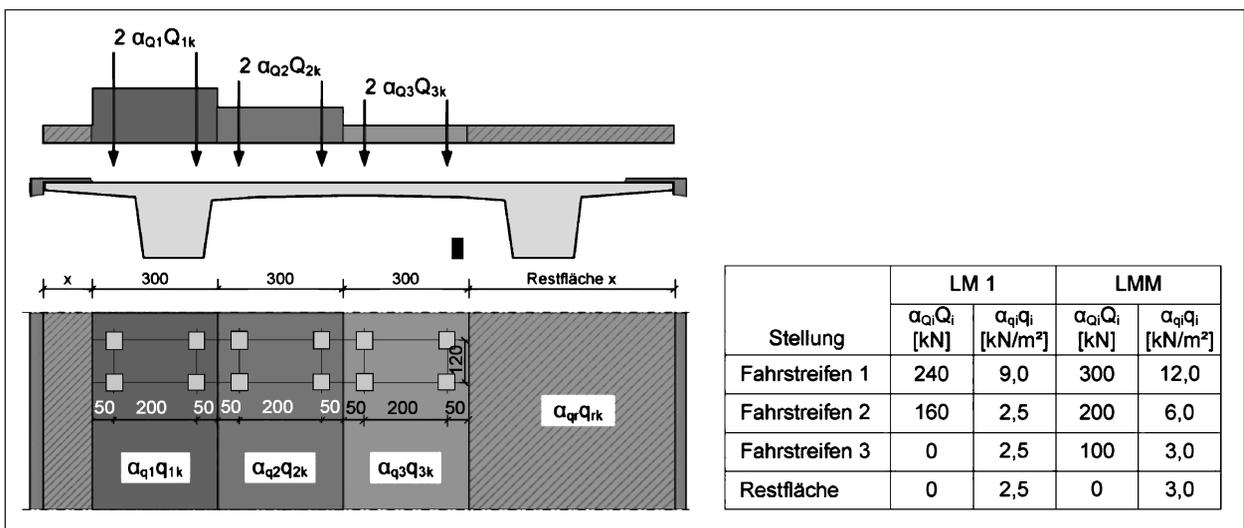


Bild 127: Lastmodelle LM1 und LMM [FFM12]

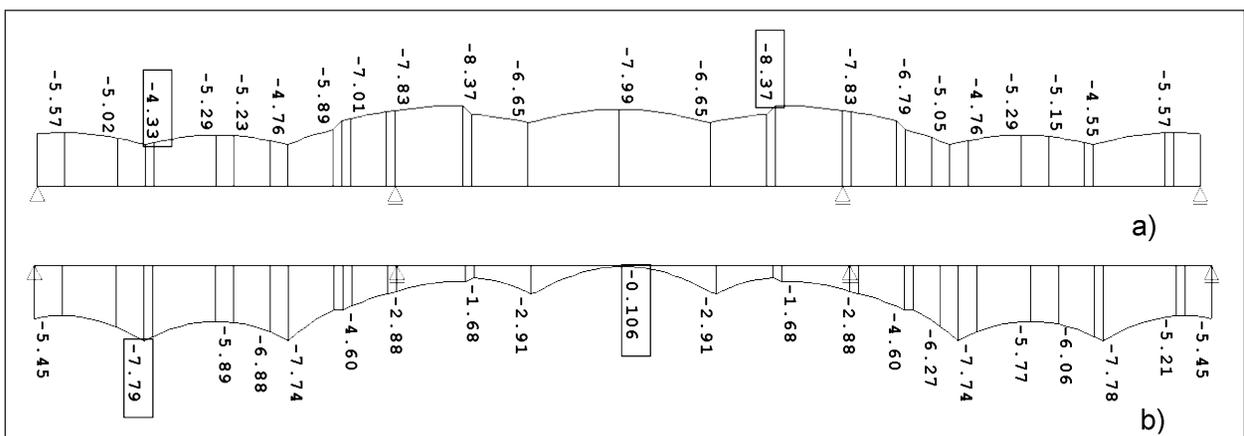


Bild 128: Spannungen infolge der quasi-ständigen Einwirkungskombination (a: oben, b: unten)

eine Überbrückung des Betonquerschnittes zu gewährleisten. Dabei werden 100 % der charakteristischen Werte der Verkehrslasten nach LMM angesetzt. Dafür ergibt sich eine maximale zentrische Vorspannkraft von 36,0 MN. Diese Vorspannkraft wird bei Bedarf beanspruchungsabhängig auf das Bauwerk aufgebracht und wirkt erst in voller Größe, wenn die äquivalenten Lasten des angesetzten Verkehrslastmodells LMM auf die Brücke einwirken. Dies entspricht einem Stauverkehr mit 52-t-Sattelzügen (Typ 98) in beiden Fahrstreifen [FBK11]. Die resultierenden Spannungsverläufe für die charakteristische Einwirkungskombination sind in Bild 129 dargestellt.

Da die Druckspannungen im Querschnitt deutlich unterhalb der normgemäß maximal zulässigen Druckspannungen von $0,6 f_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ liegen, können unter Ausnutzung der maximal zulässigen Druckspannungen die maximal aufnehmbare Vorspannkraft und die entsprechende Verkehrsbelastung theoretisch weiter erhöht werden. Es ergibt sich eine maximal ansetzbare adaptive Vorspannkraft von insgesamt 58,0 MN (dies entspricht dem 1,6fachen der ursprünglichen adaptiven Vorspannkraft von 36,0 MN). Das korrespondierende Verkehrslastmodell entspricht dem 1,5fachen des charakteristischen LMM. In Bild 130 sind die erreichbaren Druckspannungen bei dieser Belastungssituation dargestellt.

Sollte bei kurzfristiger Überlastung beispielsweise eine Druckbeanspruchung von $0,75 f_{ck}$ zulässig sein (unter Ausnutzung mehraxialer Druckbeanspruchung), ergibt sich die folgende Situation: Bei Annahme eines zulässigen Höchstwertes der Druckspannungen von beispielsweise $0,75 f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich eine theoretische maximale Vorspannkraft von 79,2 MN (dies entspricht dem 2,2fachen der ursprünglichen adaptiven Vorspannkraft von 36,0 MN), die kurzzeitig aufgenommen werden kann. Daraus resultiert eine Erhöhung der Lasten des Verkehrslastmodells LMM um den Faktor 2,10. In Bild 131 sind die erreichbaren Druckspannungen bei dieser Belastungssituation dargestellt.

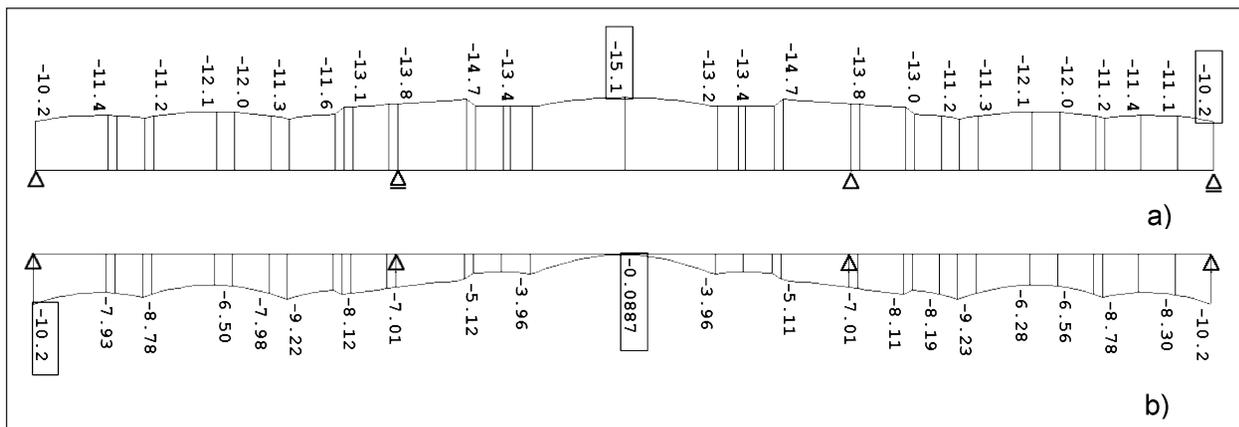


Bild 129: Spannungen infolge der charakteristischen Einwirkungskombination (a: oben, b: unten)

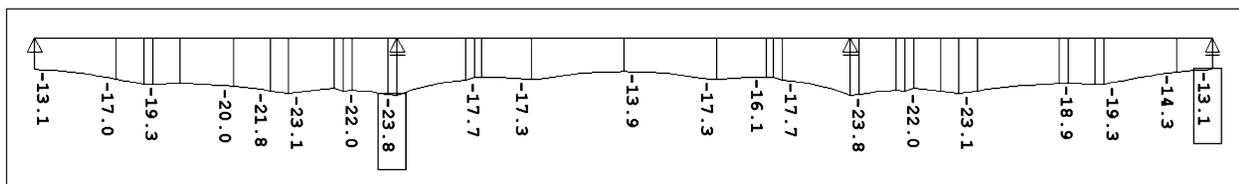


Bild 130: Erreichbare Druckspannungen bei maximal aufnehmbarer Vorspannung (Druckspannungen $\leq 0,6 f_{ck}$)

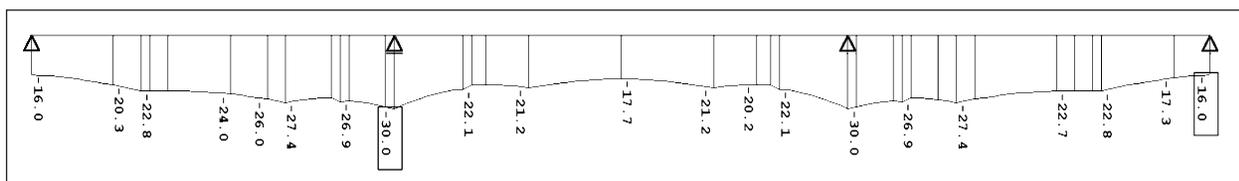


Bild 131: Erreichbare Druckspannungen bei maximal aufnehmbarer Vorspannung (Druckspannungen $\leq 0,75 f_{ck}$)

Die Möglichkeiten und Konsequenzen derartiger Steigerung des maximalen adaptiven Vorspannungsniveaus und der damit verbundenen temporären Überschreitung der zulässigen Spannungsgrenzen müssen genauer untersucht werden. Aufbauend auf den in diesem Projekt vorgestellten Grundlagen der adaptiven Vorspannung werden derzeit am IfM Konzepte erarbeitet.

6.2.2 Verstärkung

Bei der dargestellten Verstärkungsmaßnahme erfolgt eine erste, vereinfachte Ermittlung der maximalen zusätzlichen Vorspannung anhand der Betrachtung der aus den Verkehrslasten resultierenden Momentenverläufen in Längsrichtung. Im Regelfall müssen bei der Nachrechnung der Brücke zudem die Einwirkungen aus Temperatur, Stützensenkung, Wind sowie horizontalen Einwirkungen nach aktueller Norm (DIN-Fachbericht 101:2009 bzw. DIN EN 1991-2/NA) berücksichtigt werden.

Der Querschnitt sowie die Materialkennwerte der zu verstärkenden Hohlkastenbrücke entsprechen dem in Kapitel 6.2.1 betrachteten System. Die Spannweiten des dreifeldrigen Durchlaufträgers betragen 35 – 45 – 35 m. Eine Zuordnung der betrachteten Brücke zur Klasse 60/30 (Verkehrslastmodell nach DIN 1072:1985) kann angenommen werden. Durch die Verstärkung soll die Brücke Verkehrsbelastungen des Lastmodells LMM (nach DIN EN 1991-2/NA) aufnehmen können.

Die Ermittlung der charakteristischen Biegemomente nach dem Verkehrslastmodell der BK 60/30 nach DIN 1072:1985 und nach dem künftigen Lastmodell LMM nach DIN EN 1991-2/NA ergibt eine maximale Differenz der Biegemomente von 7.313 kNm (s. Bild 132). Die benötigte maximale Vorspannkraft bei einer zentrischen Anordnung der Spannglieder zur Kompensation dieser Momentendifferenz ergibt sich zu 14,0 MN.

Die auftretenden zusätzlichen Spannungen im Tragwerk (vereinfacht nur aufgrund der Verkehrslasten) sind in Bild 133 bis Bild 135 dargestellt.

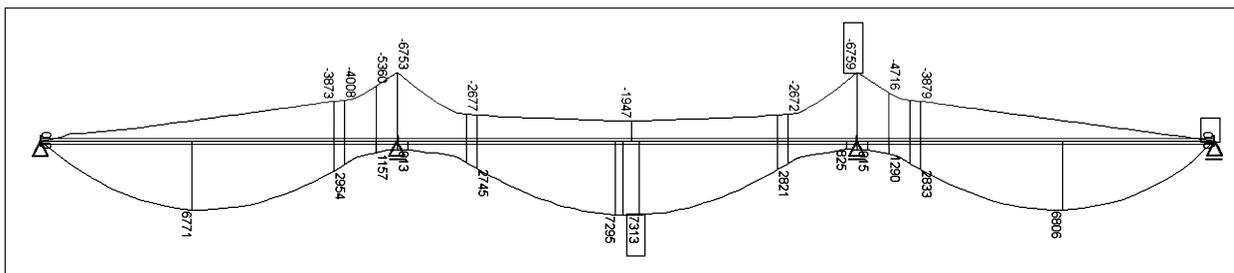


Bild 132: Grenzlinie der Differenz der charakteristischen Momente nach BK 60/30 und LMM

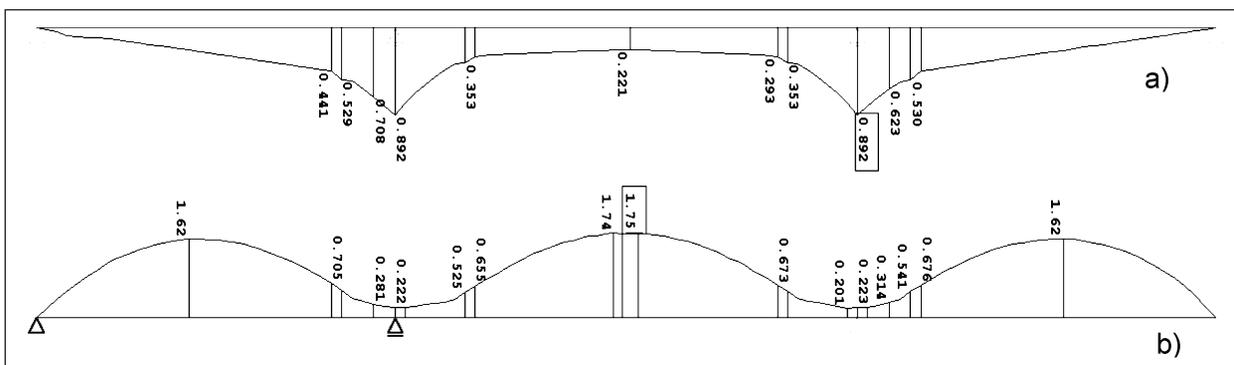


Bild 133: Zusatzspannungen aufgrund ΔM [N/mm²] (a: oben, b: unten)

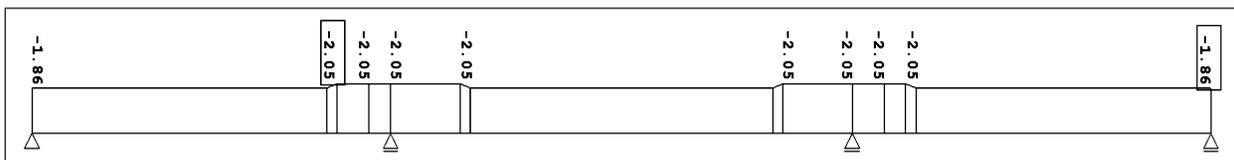


Bild 134: Zusatzspannungen aufgrund zus. P [N/mm²]

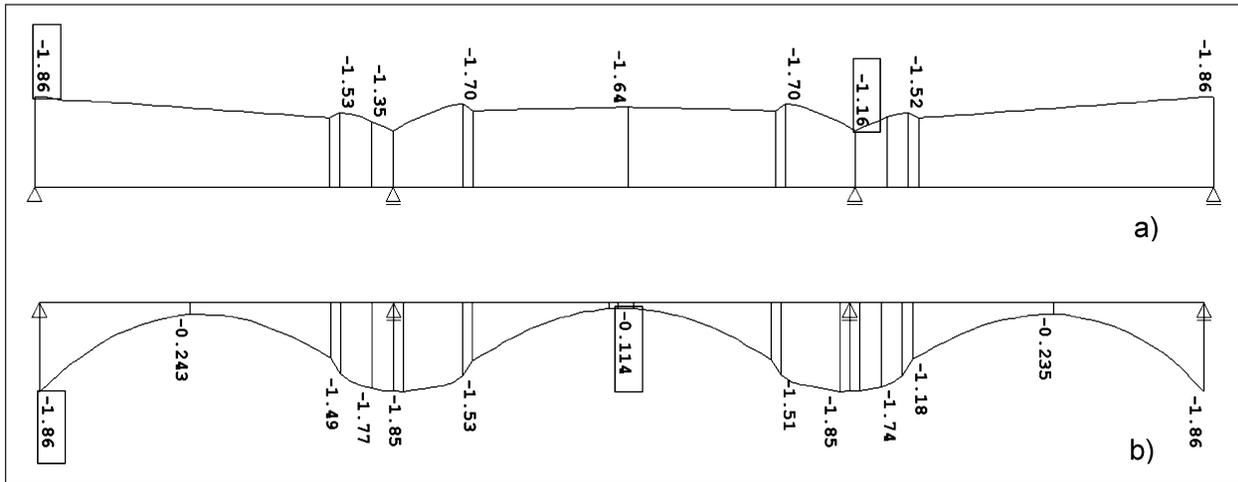


Bild 135: Zusatzspannungen aufgrund ΔM + zus. P [N/mm²] (a: oben, b: unten)

Erhöhte Verkehrslast	max. P [MN]	max. $\Delta\sigma$ infolge P [N/mm ²]	max. $\Delta\sigma$ infolge ΔM + P [N/mm ²]
1,0 · LM1	3,0	-0,40	-0,55
1,0 · LMM	14,0	-1,86	-3,70
1,5 · LMM	30,0	-4,4	-8,11
2,0 · LMM	50,0	-7,34	-13,1

Tab. 28: Zusatzspannungen bei Erhöhung der Verkehrsbelastung

Eine weitere Erhöhung der aufzunehmenden Verkehrslasten bzw. des Verstärkungsgrades zur Abdeckung außergewöhnlich großer Belastungen ist prinzipiell möglich, setzt jedoch voraus, dass die Gesamtspannungen im Querschnitt die zulässigen Werte nicht überschreiten. In Tabelle 28 sind beispielhaft die betragsmäßig maximalen zusätzlichen Druckspannungen bei Erhöhung des angesetzten Ausgangslastmodells der BK 60/30 dargestellt. Bei konventioneller Verstärkung mit externer Vorspannung (ohne Adaption) werden durch die permanent aufgebrachte Vorspannung hohe zusätzliche Druckspannungen im Querschnitt erzeugt, welche über der ansetzbaren Betondruckfestigkeit liegen, sobald die höheren Verkehrslasten nicht vollständig wirken. Durch Anwendung der adaptiven Vorspannung hingegen wird die Vorspannkraft in Abhängigkeit von den Einwirkungen so angepasst, dass lediglich die entsprechend dem Beanspruchungszustand erforderliche Vorspannkraft aufgebracht, ein homogener Spannungszustand erzielt und somit der Spannungszuwachs deutlich verringert wird.

7 Vorschlag zur Umsetzung bei einer Bestandsbrücke

Im Anschluss an dieses Projekt ist die Anwendung der adaptiven Vorspannung bei einem bestehenden Brückenbauwerk (Demonstrator) von großem Interesse. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Umsetzung des Demonstrators grob konzipiert.

7.1 Vorgehen bei einer Beispielbrücke

Als Beispiel eines mit adaptiver Vorspannung zu verstärkenden Brückenbauwerks wurde eine Einfeld-Plattenbalkenbrücke in Spannbetonbauweise mit drei Stegen und einer Spannweite von 23 m gewählt (s. Bild 136). Die Fahrbahnbreite beträgt insgesamt 5,50 m, was eine zweispurige Fahrt ermöglicht (RQ 7,5).

Das Vorgehen bei der Konzeption des adaptiven Vorspannsystems kann für eine beispielhafte Verstärkungsmaßnahme wie folgt zusammengefasst werden:

- Da die Brücke der Klasse 30/30 (Schwerlastwagen SLW 30 nach DIN 1072) zugeordnet ist, ergibt sich durch die Neuberechnung der Biegemomente nach dem aktuellen Lastmodell LM1 nach DIN-FB 102 ein Biegeverstärkungsbedarf. Die Differenz der maximalen Biegemomente beträgt in diesem Fall 2.442 kNm (s. Bild 137), der Zuwachs der Querkraft beträgt bei ungünstigster Laststellung 230 kN.
- Gemäß dem Verstärkungsbedarf, der Anzahl der Umlenkstellen und der möglichen Stichhöhen (Lichttraumprofil) und unter Berücksichti-

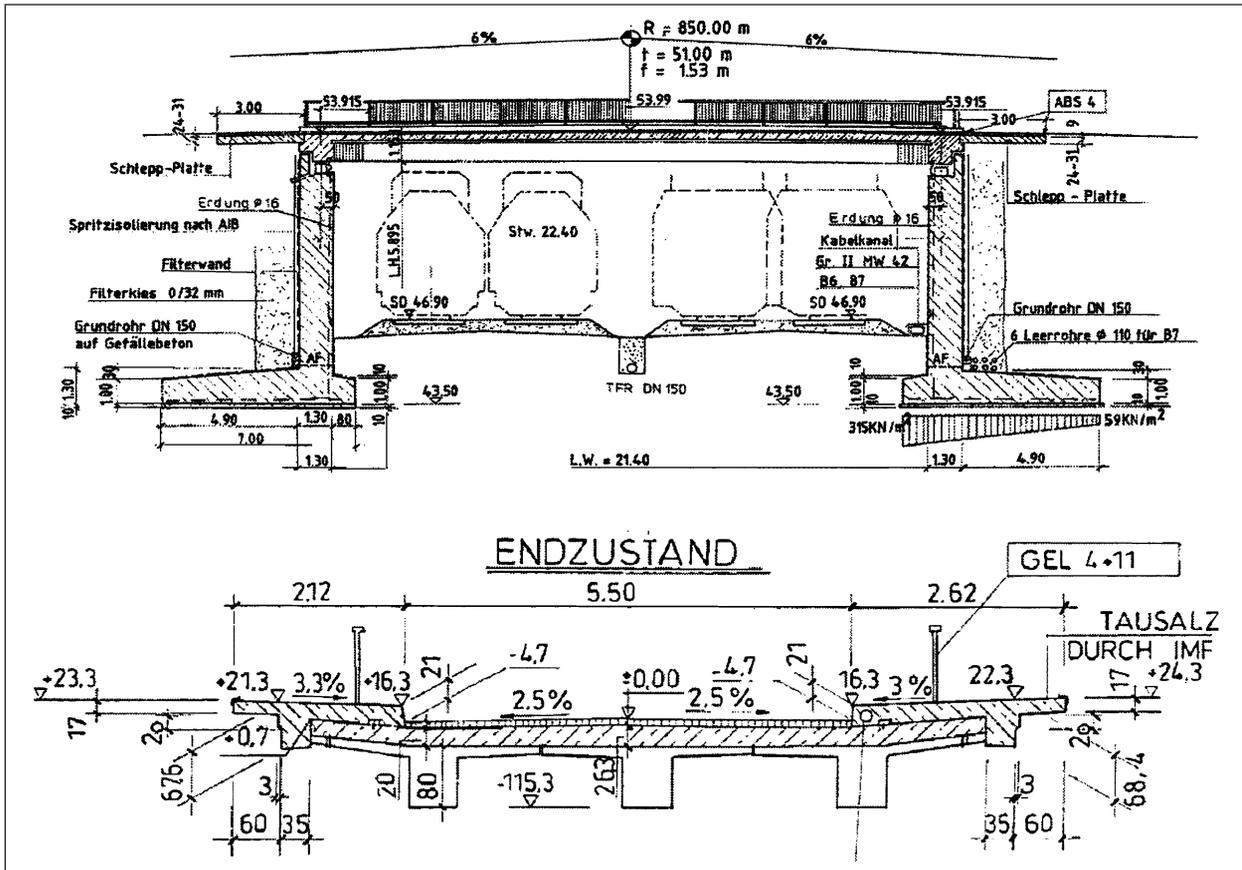


Bild 136: Bestehende Beispielbrücke

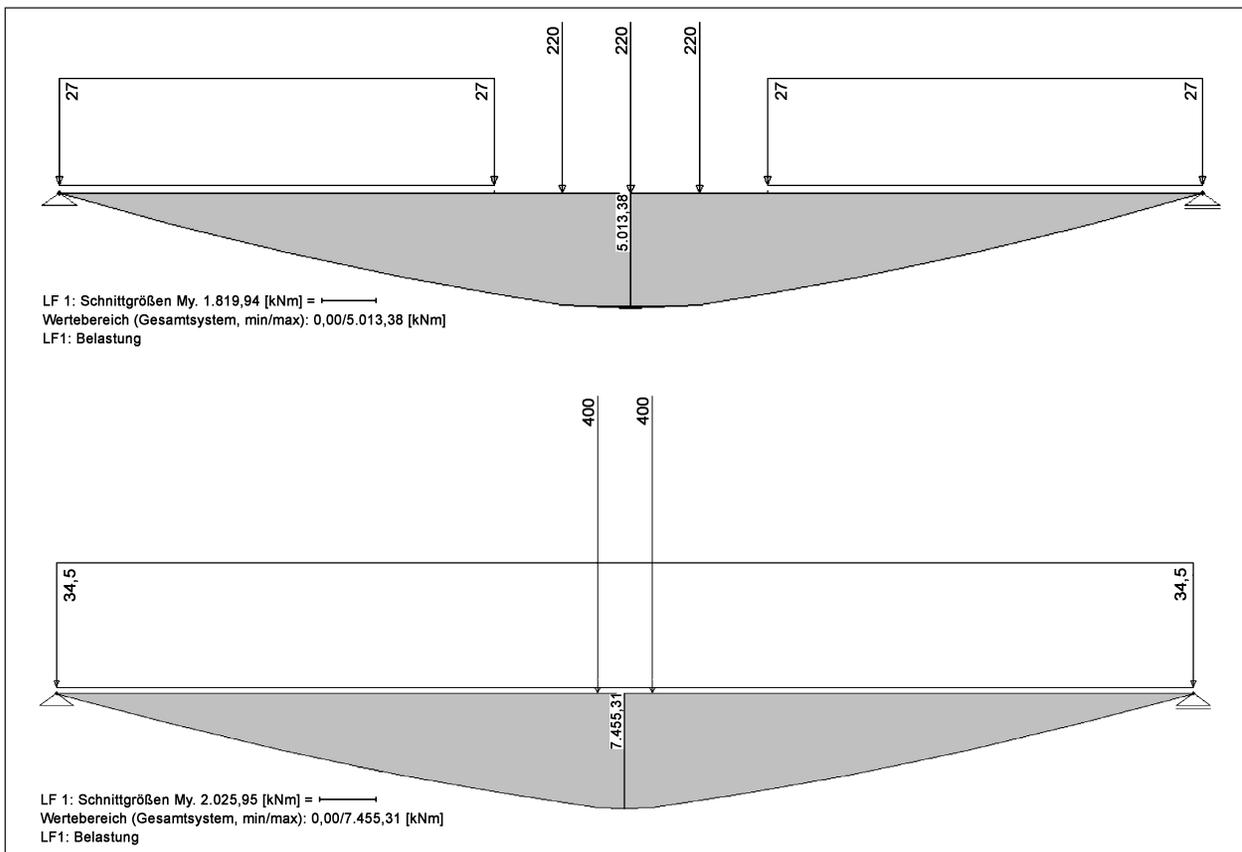


Bild 137: Maximale Biegemomente für das Lastmodell SLW 30 (oben) und LM1 (unten)

Querschnittswerte				
Fläche	A	12.290 cm ²		
Widerstandsmoment oben	W _o	-283.900 cm ³		
Widerstandsmoment unten	W _u	133-300 cm ³		
Systemwerte				
Momentendifferenz	DeltaM	2.442 kNm		
Stich	z	25 cm		
Vorspannkraft	P	-10 MN		
Vorspannmoment	MP	-2,5 Mnm		
Spannung infolge:	Ursprung	P	P-DeltaM	DeltaM
Spannung oben [N/mm ²]	0	0,67	-7,93	-8,60
Spannung unten [N/mm ²]	0	-26,89	-8,57	18,32

Tab. 29: Spannungen in Feldmitte aufgrund der Verkehrslasten

gung der beidseitigen Anordnung der Spannglieder an den Stegen ergeben sich die erforderliche Vorspannkraft und folglich die Anzahl der externen Spannglieder. In diesem Fall liegt die benötigte zusätzliche Vorspannkraft bei einer Umlenkstelle und einem Stich von 0,25 m bei 10 MN. Demnach werden sechs Spannglieder, beispielsweise des Typs SUSPA-Draht EX-42 ($P_{m0,max} = 1.890 \text{ kN}$), benötigt.

- Die Umlenk- und Verankerungskonstruktionen werden nach Vorgaben aus der entsprechenden Zulassung konstruiert und gemäß den Vorspannkraften bemessen.
- Das hydraulische Aktuatorensystem wird in Abhängigkeit der aufzubringenden Vorspannkraft dimensioniert und konfektioniert. Dazu zählen die Hydraulikzylinder (Pressen), das Pumpenaggregat, Druckspeicher, Ventile und Druckleitungen.
- Relevante Messstellen werden nach Festlegung einer geeigneten Zielsetzung der Regelung (z. B. Einhalten des Dekompressionszustandes) definiert. Im Vorfeld werden die Spannungs- und Dehnungsverläufe an diesen Stellen anhand von FEM-Berechnungen analysiert, um eine Wissensbasis für die Fuzzy-Regelung zu erstellen. Außerdem werden in einer Studie geeignete änderbare Parameter für die Adaption der Regelung festgelegt und die Gegebenheiten ihrer Anpassung untersucht. Grundsätzlich hängt dies von der Zielsetzung der Regelung ab und wie gut diese durch die Parameter erreicht und verbessert werden kann.

Bei konventioneller externer Vorspannung (ohne Adaption) werden durch die permanent aufgebrachte Vorspannung Druckspannungen im Quer-

schnitt erzeugt, die weit über den zulässigen Werten liegen, sobald die Lasten des Lastmodells LM1 nicht vollständig wirken. Durch die Anwendung adaptiver Vorspannung hingegen wird die Vorspannkraft in Abhängigkeit von den Einwirkungen so angepasst, dass lediglich die erforderliche Vorspannkraft angreift und die Spannungen dauerhaft innerhalb der zulässigen Bereiche liegen. Die auftretenden Spannungen in der Feldmitte der Brücke (zunächst vereinfacht nur infolge der Verkehrslasten) sind in Tabelle 29 dargestellt.

7.2 Bestandteile des adaptiven Vorspannsystems

7.2.1 Spannglieder

Es werden „SUSPA-DSI Draht EX“-Spannglieder eingesetzt.

7.2.2 Nachträglich angebrachte Umlenk- und Verankerungskonstruktionen

Bei Plattenbalkenquerschnitten bieten sich als Umlenkstellen U-förmige Konstruktionen zur Einleitung der vertikalen Umlenkkräfte an. Als Beispiel dient die Ausführung bei der Rachenbachbrücke in Österreich (s. Bild 138). Die Umlenkstellen werden an den Stegen des Plattenbalkens mit Dübeln zur Lagesicherung befestigt. Die Einleitung der Umlenkkräfte erfolgt formschlüssig und flächig über eine Stahlkonstruktion. Unter Einhaltung der Mindeststrahlen für die Umlenkung des gewählten Spanngliedtyps wird durch eine geeignete Materialpaarung einer Zwischenlage (z. B. Stahl/Messing oder Stahl/HDPE) eine einfache Gleitlagerung realisiert.

Für die End- bzw. Spannverankerung der Spannglieder werden zusätzlich angebrachte Stahlkonstruktionen, die über massive seitlich in den Steg einbetonierte Schubdorne (Knaggen) die Vorspannkraft in den Steg des Querschnitts einleiten, bevorzugt (s. Bild 139)

7.2.3 Sensorsystem und Messtechnik

Zur Messdatenerfassung können konventionelle DMS, aber auch faseroptische FBG-Sensoren und

die dazugehörigen Messdatenerfassungssysteme eingesetzt werden. Der Einsatz faseroptischer Sensoren wird allerdings wegen ihrer wesentlich besseren Dauerhaftigkeit und Robustheit im Vergleich zu konventionellen Sensoren bevorzugt. Für die Dehnungsmessungen werden an den Stegunterseiten und der Unterseite der Fahrbahnplatte in Feldmitte sowie in den Viertelspunkten Dehnungssensoren appliziert (s. Bild 140). Außerdem sind Temperatursensoren (Thermoelemente) zur Kompensation von Temperatureinflüssen an den gleichen Stellen erforderlich. Zur Messung der Vorspannkraft werden an den Spanngliedern Kraftmessdosen und an den Aktuatoren Drucksensoren angeordnet.

Der Einsatz faseroptischer Sensoren verursacht durch die Anschaffung der benötigten Hardware, dem Interrogator, zunächst höhere Kosten als eine konventionelle Lösung mit Dehnmessstreifen und Temperatursensoren. Ein Vorteil liegt in der Leistungsfähigkeit dieser Technik. Durch das optische Verfahren sind die Sensoren nicht anfällig für elektromagnetische Störungen und Einflüsse aus Tem-



Bild 138: Beispiel Umlenkstellen [zt08]

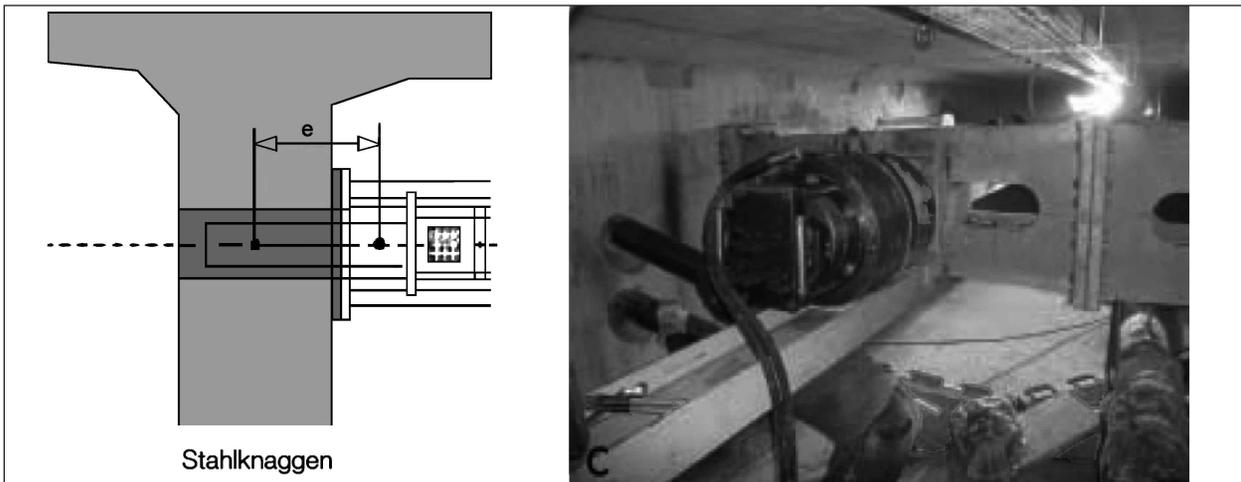


Bild 139: Verankerungskonstruktion bei der Draubridge beim KW Feistritz in Kärnten, Österreich [OIRa10]

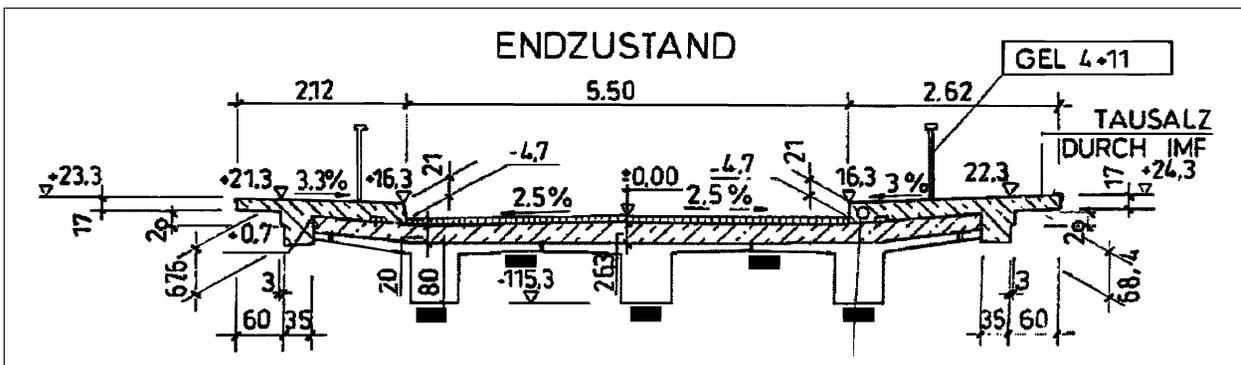


Bild 140: Messstellen in Feldmitte/Viertelspunkten

peraturschwankungen. Daher entfällt auch die externe Kalibrierung. Neben deutlich höherer Dauerhaltbarkeit gegenüber den analogen Systemen ist ein geringerer Verdrahtungsaufwand bei FBG-Sensoren erforderlich. Die Anzahl der Messeingänge bei den Messdatenerfassungssystemen bzw. Controllern wird deutlich geringer (Multiplexing).

7.2.4 Hydraulisches Aktuatorensystem

Nach Ermittlung des Verstärkungsbedarfs können die Aktuatoren (hydraulische Zylinder), die Hydraulikpumpe sowie die Regelventile im Hinblick auf das einzusetzende Regelungskonzept dimensioniert werden. Eine Auslegung, die eine individuelle Regelbarkeit jedes Steges vorsieht, bietet die Möglichkeit, auch Torsionseinflüssen entgegenzuwirken sowie die Redundanz des Systems zu steigern. Bei diesem Konzept sind Ventil, Druckspeicher sowie Leitungen für jeden Steg zwingend notwendig. Ob zur Erzeugung des Öldrucks bzw. des Volumenstroms ebenfalls drei separate Aggregate benötigt werden oder ob ein zentrales Aggregat mit entsprechend größerer Förderleistung eingesetzt wird, kann erst nach genauer Kenntnis der Anforderungen entschieden werden. Ein Schutz aller benötigten Komponenten des adaptiven Systems vor Witterungseinflüssen und Vandalismus ist erforderlich. Dafür können die Aggregate beispielsweise bei vor-

handenem Wartungsgang hinter der Kammerwand platziert werden oder bei externer Aufstellung im Bereich des Widerlagers eine Einhausung erhalten. Des Weiteren ist die Einrichtung eines elektrischen Betriebsraumes (nach EItVO) zur Unterbringung weiterer Hardware notwendig. Sollte als Demonstrator eine adäquate Hohlkastenbrücke zur Verfügung stehen, könnte dazu der Raum im Inneren des Querschnittes genutzt werden.

7.2.5 Hardware und Software

Für den Aufbau des Regelungssystems bietet sich unter Verwendung der Software LabVIEW der Einsatz eines robusten modularen Stand-alone-Systems von National Instruments an. Das Produkt CompactRIO besteht, wie in Bild 141 dargestellt, aus einem massiven Rahmen, der mit den benötigten Modulen bestückt wird.

Der ‚Programmable Automation Controller‘ (PAC) NI CompactRIO ist ein kostengünstiges und rekonfigurierbares Datenerfassungs-, Steuer- und Regelungssystem für Anwendungen, die höchste Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit erfordern. Das System bietet eine offene Embedded-Architektur bei gleichzeitig kompakter Größe und extrem hoher Robustheit. Des Weiteren können industrietaugliche I/O-Module auch während des laufenden Betriebes ausgetauscht werden.



Bild 141: Rahmen und Module des Controllers [National Instruments, www.ni.com]

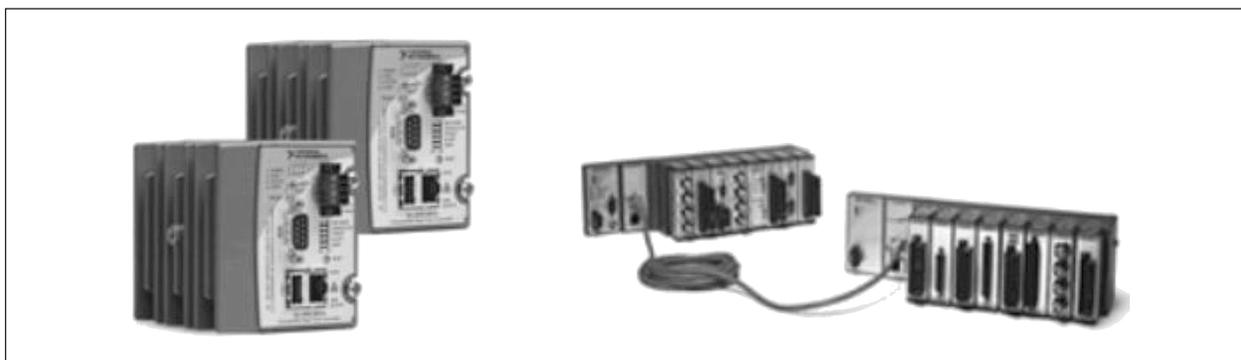


Bild 142: Schnittstellenmodul und Vernetzung mehrerer Einheiten [National Instruments]

Jeder Controller besitzt eine eigene CPU und arbeitet autark. Änderungen des Regelungsprogramms werden über eine Schnittstelle, z. B. Ethernet oder WLAN, von einem externen Rechner aus LabVIEW heraus auf die Einheit übertragen. Geloggte Prozessdaten können vice-versa ausgelesen werden. Die Controller können ebenfalls über eine BUS-Schnittstelle verbunden werden. Dadurch kann eine Kanalerweiterung oder ein redundanter Betrieb realisiert werden. Mögliche Schnittstellen und ein beispielhafter Aufbau des Systems sind in Bild 142 zu sehen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Gewährleistung der Mobilität von Wirtschaft und Gesellschaft sind die Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und somit die Sicherheit und Dauerhaftigkeit der enthaltenen Brückenbauwerke von besonderer Bedeutung. Ständig steigende Verkehrsbelastungen, extreme außergewöhnliche Einwirkungen und unplanmäßige Beanspruchungszustände erzeugen einen Konflikt zwischen Wirtschaftlichkeit und gestalterischen Ansprüchen. Die konventionelle „passive“ Bauweise von Brückenbauwerken (aus Spannbeton) enthält einen Kompromiss zwischen diesen Anforderungen und kann zu Entwurfs- und Verstärkungsmaßnahmen führen, welche die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes nur schwer oder mit unverhältnismäßig hohem Aufwand gewährleisten. Durch die Anpassungsfähigkeit adaptiver Tragwerke kann unter Einsatz geeigneter Regelungsvorgänge auf die aktuelle Belastungssituation reagiert werden, sodass Spannungen im Querschnitt homogenisiert und schließlich die Nutzungs- sowie Lebensdauer der Bauwerke verlängert werden. Dabei besteht insbesondere das Potenzial, unplanmäßigen und extremen Beanspruchungen sowie zeit- und belastungsabhängigen Verlusten der Vorspannkraft von Spannbetontragwerken entgegenzuwirken.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer adaptiven Spannbetonstruktur mit einem auf Fuzzy-Logic basierenden lernfähigen Regelungsalgorithmus. Die entworfene Regelung ermittelt auf Basis der mit einem Sensorsystem gemessenen Tragwerksreaktionen die erforderliche Vorspannkraftänderung, welche durch einen hydraulischen Stellantrieb auf das Tragwerk aufgebracht wird. Nach dem Vergleich verschiedener Sensor-

techniken wurden aufgrund ihrer hohen Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Haltbarkeit faseroptische Faser-Bragg-Gitter zum Einsatz bei adaptiv vorgespannten Brückenbauwerken favorisiert. Zur Aufbringung der geregelten Vorspannkraft wurden nach einer Gegenüberstellung unterschiedlicher Technologien ölhydraulische Stelleinrichtungen bevorzugt, da diese große Kräfte und geringe Reaktionszeiten ermöglichen. Beispiele zur Anwendung und mögliche Sicherheitsmaßnahmen einer adaptiven Spannbetonstruktur in der Praxis wurden vorgeschlagen. Der grundlegende Aufbau der adaptiven Regelung wurde auf Basis der Fuzzy-Logic entwickelt und mit zwei änderbaren Parametern, einer von diesen lernfähig, ausgestattet. Das entworfene Regelungssystem wurde sowohl mit einem modellbasierten Ansatz zur Verformungsminimierung als auch mit einem modellfreien Ansatz zur Spannungsoptimierung ausgeführt. Zur Evaluation der entworfenen Programme wurden Laborversuche an einer Aluminium-Traverse (Verformungsminimierung) und an einem Spannbetonplattenbalken (Spannungsoptimierung) durchgeführt.

Beide Zielsetzungen wurden durch den entwickelten Regelungsalgorithmus vollständig erreicht. Sowohl die modellbasierte als auch die modellfreie Regelbasis führten zu weitgehend optimiertem Tragwerkverhalten. Die Adaptivität der Regelung hatte die Optimierung der Regelungsqualität (Aluminium-Traverse) oder des Tragwerkszustandes (Spannbetonplattenbalken) zur Folge. Dabei wurde die Qualität der Adaptionen durch die Lernfähigkeit der Regelungen weiter verfeinert. Die Verformungen der Aluminium-Traverse wurden auf ca. 3 % bis 12 % verringert, die Laststeigerung des Spannbetonplattenbalkens wurde auf das ca. 3- bis 15fache ermöglicht. Dabei wurden Zugspannungen weitestgehend vermieden. Unter Einsatz der Fuzzy-Logic wurde eine lernfähige Regelung entworfen, die mit hoher Zuverlässigkeit und Robustheit die vorgegebenen Zielsetzungen bei linearem und nicht linearem Materialverhalten erfüllt. Zusätzlich wurde die Anwendbarkeit der adaptiven Vorspannung zur Verstärkung bestehender Bauwerke demonstriert.

Durch eine spezialisierte Auslegung der hydraulischen Komponenten kann die Effektivität der adaptiven Regelung um ein Vielfaches gesteigert werden. Die Dimensionierung des Stellgliedersystems sollte auf die notwendigen Parameter, hierzu zählen unter anderem der Arbeitsdruck, die Reaktions- und Adaptionsgeschwindigkeit und die erforderliche Änderung der Vorspannkraft, abgestimmt sein. Zu-

sätzlich sollte die Möglichkeit, anstelle der Vorspannkraft selbst die Stichhöhen der Umlenkstellen anzupassen, untersucht werden, da diese Methode geringere Kräfte erfordert und aufgrund zusätzlicher realisierbarer Anpassungsfähigkeiten ein größeres Potenzial bietet. Die Optimierung des Antriebssystems und der Sensortechnik hinsichtlich des Energiebedarfs stellt ein weiteres Aufgabenfeld aus ökonomischer und ökologischer Perspektive dar.

Die permanente Erfassung der Messgrößen ermöglicht die automatische Meldung eingetretener Störungen, welche durch Auswertung der gemessenen Tragwerksreaktionen ermittelt werden können. Darüber hinaus kann das verwendete Sensorsystem zur Zustandsüberwachung des Bauwerks verwendet werden. Die Langzeitüberwachung der Messgrößen ermöglicht die Erkennung von Trends der Einwirkungen sowie des Tragverhaltens und somit Aussagen über den Zustand des Bauwerkes.

Von besonderer Bedeutung beim Einsatz einer adaptiven Vorspannung für Brückenbauwerke sind die Auswirkungen der zahlreichen weiteren Einflüsse, welche in der Realität auf das Bauwerk wirken. Hierzu zählen die Kombination unterschiedlicher Einwirkungen, die statische Unbestimmtheit des Tragwerkes, Schwingungs- und insbesondere Resonanzphänomene sowie die mögliche Anpassungshäufigkeit mit zugehörigen Zeitpunkten. Zur Evaluation des Prinzips der adaptiven Vorspannung unter praxisnahen Bedingungen ist die Entwicklung eines Prototyps in Form eines realen Bauwerkes unerlässlich. Ein entsprechender Vorschlag wurde bereits erarbeitet (s. Kapitel 7). Die aus der praktischen Anwendung gewonnenen Informationen sollten zur Erstellung von Bemessungsvorschriften für adaptiv vorgespannte Betontragwerke herangezogen werden. Dabei sind neben den zu erfüllenden Bedingungen zur Sicherstellung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zusätzliche Sicherheitskonzepte notwendig, um die Variabilität von Tragwerkseigenschaften zu berücksichtigen.

Literatur

- [Alb01] ALBERT, A.: Softwaremodelle für die Repräsentation und die Verarbeitung des Entwurfs- und Bemessungswissens im Stahlbetonhochbau unter besonderer Berücksichtigung von Fuzzy-Methoden. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Darmstadt, 2001
- [AlBe11] ALEX, J., BERLIN, M.: Methodik und Beispiel einer Brückenertüchtigung durch externe Vorspannung. Beton- und Stahlbetonbau 106, 2011
- [Alt93] von ALTROCK, C.: Fuzzy-Logic. 1993
- [Bar06] BARIN, T.: Adaptiv geregelte Spannbe-
tontragwerke mit externer Vorspannung unter Einsatz von Fuzzy-Logic. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau, Essen, 2006
- [BB134] Fachtagung Bauwerksdiagnose: Praktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben. BAM Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung, DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Februar 2008.
- [Beh95] BEHMENBURG, C. F.: Zur adaptiven Fuzzy-Regelung technischer Systeme. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 485, 1995
- [Berg09] BERGMEISTER, K.: Monitoring und Lebensdauer von Brücken. Vortrag im Rahmen der Festveranstaltung 125 Jahre Materialprüfanstalt Stuttgart, 2009
- [BOGE07] BOYLE, W., GEBREMICHAEL, Y. M.: Fibre Optic sensors and Systems for Monitoring Applications. Beitrag aus dem Teilbericht „Monitoring Instrumentation and Techniques“ des EU-Forschungsprojektes „Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives“, 11.2007
- [Bonz03] BONZON, W. S.: Utility of Field Instrumentation and Data: An Industrial Perspective, 2003. Ohio Transportation Engineering Conference, Ohio, 6. November 2003

- [BRR11] BECKER, D., RIETDORF, A., RÜFFER, J.: ALLSAT® Global Monitoring an einer Spannbetonbrücke. VDVmagazin, 2011
- [BSVI08] BSVI-Aktuell: GigaLiner: Zukunft für den Straßengüterverkehr oder Alptraum für unsere Straßen und Brücken?, 2008
- [D60050] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN IEC 60050-351: Internationales elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 2009
- [DLMG08] DELEPINE-LESOILLE, S., MERLIOT, E., GAUTIER, Y.: Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State-of-the-art, industrial applications and outlook. BLPC, Nr. 272, 10.2008
- [Dom81] DOMKE, H., BACKÉ, W., MEYR, H., HIRSCH, G.; GOFFIN, H.: Aktive Verformungskontrolle von Bauwerken. Bauingenieur 56 (1981)
- [Dom84] DOMKE, H., BACKÉ, W., THEIßEN, H., MEYR, H., BOUTEN, H., ZACH, B., WITTE, B., BUSCH, W., GOFFIN, H.: Leistungssteigerung von Biegetragwerken durch Aktive Verformungskontrolle. Bauingenieur 59, Seiten 1-8, 1984
- [Du02] DUPONT, J.: Comportements de capteurs à fibres optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrage en béton. Dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris/Marne la Vallée, Frankreich, 2002
- [FBK11] FREUNDT, U., BÖNING, R., KASCHNER, R.: Straßenbrücken zwischen aktuellem und zukünftigem Verkehr – Straßenverkehrslasten nach DIN EN 1991-2/NA. Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 11. November, 2011
- [FFM12] FORMAN, P., FUST, C., MARK, P.: Aktualisierte Vergleichstabellen für militärische Lastenklassen bei Straßenbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 107, Heft 3. März, 2012
- [Hav11] HAVERESCH, K.: Nachrechnen und Verstärken älterer Spannbetonbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 2. Februar 2011
- [Hei04] HEILER, H., SCHEIBE, M.: Vorspannung intern, extern, mit und ohne Verbund. Wo liegt das Optimum, was bringt die Zukunft? Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 11, 2004
- [INCA99] INAUDI, D., CASANOVA, N.: Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren – Anwendungen von Lichtwellenleitersensoren zur Überwachung der Bauwerke. TFB-Veranstaltung 4371/72, S. 11, Wildeg, Schweiz, 03.-06.12.1999
- [INGR08] INAUDI, D., del GROSSO, A.: Fiber Optic Sensors for Structural Control. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, China, 10.2008
- [Ko12] KOHLBREI, U.: Messen ist Wissen. Deutsches Ingenieurblatt, 03/2012
- [Küh11] KÜHN, O.: Einsatz hydraulischer Stellglieder und Aktuatoren bei einer Fuzzy-geregelten adaptiven Spannbetonstruktur. Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau, Essen, 2011
- [LIVI99] LIVINGSTON, R. A.: FHWA Fiber-Optics Research Program: Critical Knowledge for Infrastructure Improvement. United States Department of Transportation – Federal Highway Administration, Public Roads, Vol. 63, No. 1, Juli/August 1999
- [Mat08] MATTHIES, H. J., RENIUS, K. T.: Einführung in die Ölhydraulik. Vieweg, Wiesbaden, 2008
- [MBV06] Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes NRW: Standard-Lastfahrzeuge bei Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes von 40 t/44 t auf 50 t. Düsseldorf, 2006
- [Mcn10] McNUTT, T.: Adaptive prestressing of concrete beams. Master-Thesis, Dalhousie University, Halifax, 2010
- [Men07] MENDEZ, A.: Fiber Bragg Grating Sensors: A Market Overview. Third European Workshop on optical fibre sensors, Proceedings of SPIE Vol. 6619, 2007
- [Met04] METZLER, H.: Die Erhaltung der Brücken – eine umfassende strategische Aufgabe. Bauingenieur 79, Juli/August, 2004

- [MoCa12] MOOR, G., DELLA CA, D.: Nutzenorientierte Bauwerksüberwachung. Tagungsband 22. Dresdner Brückenbau-Symposium. März 2012
- [Nau02] NAUMANN, J.: Die Brückenerhaltung ist für Ingenieure eine neue Herausforderung. Der Prüflingenieur, Oktober 2002
- [OIRa10] OLIPITZ, M., RASSINGER, R.: Die zentrische Vorspannung als Verstärkungsmaßnahme einer schlaff bewehrten Hohlkastenbrücke. zement+beton 3_10, Zement + Beton Handels- u. Werbeges. m. b. H, März 2010
- [PAA04] PACHECO, P., ADÃO da FONSECA, A., ANDRÉ, A., GUERRA, A., FREITAS, F., OLIVIERA, T., PINTO, C., MENDES, J.: Strengthening by organic prestressing of existing launching gantries, in the construction of high speed railway bridgedecks; http://www.berd.eu/lmgs/content/page_86/sc_0009.pdf
- [PaUS08] United States Patent, Pacheco: Gantry with Auto-Adjusting Prestressing. Patentnummer: US 7,366,634 B2. Patentdatum: 29.04.2008
- [PCG06] PACHECO, P., COELHO, H., GUERRA, A., OLIVIERA, T., BORGES, P., ANDRÉ, A.: OPS – a new technology in Bridge Engineering – Overview; http://www.berd.eu/lmgs/content/page_86/sc_0001.pdf
- [Pie01] PIEPLOW, K.: Untersuchungen zum Tragverhalten CFK-verstärkter Stahlbetonbauteile. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001
- [REST10] REVEMAN, S.: USV-System im Industrieinsatz; Monitor, 07.2010
- [SaB05] SANTA, U., BERGMEISTER, K.: Zustandsüberwachung und Bewertung von Betonbrücken. Beton- und Stahlbetonbau, Spezial 100, 2005
- [SchA03] SCHNELLENBACH-HELD, M., ALBERT, A.: Computergestütztes Entwerfen im Stahlbetonhochbau mit wissensbasierten Systemen und Fuzzy-Logic. Bauingenieur, Band 78, November 2003
- [Sch08] SCHWEIZER, W.: Matlab® kompakt. 3. Auflage, 2008
- [SEB12] Tagungsmaterial 2. Symposium Eisenbahnbrücken und KIB der VDEI-Akademie für Bahnsysteme, München, März 2012
- [Sob02] SOBEK, W., TEUFFEL, P., LANDAUER, A.: Stuttgarter Träger. ILEK, Stuttgart, 2002
- [Ste11] STEINER, D.: Einsatz der Fuzzy-Logik zur adaptiven Regelung von vorgespannten Konstruktionen. Master-Thesis, Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau, Essen, 2011
- [Teuf04] TEUFFEL, P.: Entwerfen adaptiver Strukturen – Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.
- [TMW02] The MathWorks™: Fuzzy-Logic Toolbox User's Guide; 2002
- [TÜV06] TÜV Nord: Mögliche Auswirkungen einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes von 40 Tonnen auf 50 Tonnen auf die Achslasten gängiger Fahrzeugkombinationen. Entwurf, 2006
- [Vo11] VOIGT, S.: Drucksensorkatheter auf Basis von Faser-Bragg-Gittern. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Chemnitz, 2011
- [Wei08] WEILANDT, A.: Adaptivität bei Flächentragwerken. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [Wil04] WILL, D., STRÖHL, H., GEBHARDT, N.: Hydraulik. Springer, Berlin, 2004

Internet-Quellen

Alle Zugriffe auf die betreffenden Internetseiten erfolgten innerhalb des Bearbeitungszeitraumes dieses Projektes (Januar 2011-Juni 2012).

- [ben11] Benzlers, Schweden
[www.benzlers.com]
- [bos11] Bosch Rexroth AG, Deutschland
[www.boschrexroth.com]

-
- [elek11] [www.elektromotoren.de]
- [elne11] Grundlagen der optischen Sensormessung mit Faser-Bragg-Gittern [www.elektromotoren.de]
- [fise11] FiberSensing, faseroptische Messtechnik, Portugal [www.fibersensing.com]
- [fsi12] FSI – Frank Schleier Industrievertretung, Deutschland [www.usv-medizin.de]
- [ger11] Germa GmbH, Deutschland [www.germa-gmbh.de]
- [ilek12] Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart (ILEK) [www.uni-stuttgart.de/ilek]
- [log11] Log Hydraulik GmbH, Deutschland [www.log-hydraulik.de]
- [luk12] Lukas Hydraulik GmbH, Deutschland [www.lukas.com]
- [mic12] Micron Optics Inc., faseroptische Messtechnik, USA [www.micronoptics.com]
- [mo11] Moog GmbH, USA [www.moog.de]
- [must12] Smartec: MuST, Fiber Bragg Gratings Leveling Meter Sensor [www.smartec.ch]
- [ni11] National Instruments: Fundamentals of FBG Optical Sensing, Online-Tutorial [www.ni.com]
- [pa11] Paul Maschinenfabrik GmbH & Co. KG [www.paul.eu]
- [ruki12] Ruoss-Kistler AG, Schweiz [www.ruoss-kistler.ch]
- [sbp11] Ingenieurbüro Schlaich Bergermann und Partner, Deutschland [www.sbp.de]
- [sch12] Schnake-Hydraulik GmbH [www.schnake-hydraulik.com]
- [sofo06] Smartec: SOFO Technology [www.smartec.ch]
- [sp11] Spantec Spann- & Ankertechnik GmbH [www.spantec-gmbh.de]
- [vt08] Vorspann-Brückentechnologie GmbH Österreich [www.vbt-systems.eu]
- [zt08] Projekt L39 Rachenbachbrücke, 2008 – A 10 Tauernautobahn/Kärnten, Zimmermann Consult ZT GmbH [www.zimmermann-consult.at]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Krause, Rath, Sawade, Dumat

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Steinauer, Mayer, Kündig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Sistenich

€ 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme

Schröder

€ 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung

Schröder

€ 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten

Schröder, Staack

€ 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff

Eilers

€ 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4

Bramshuber, Spörel, Warkus

€ 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,

Baltzer, Riepe, Kündig

€ 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Blosfeld

€ 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln

Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger

€ 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Tauscher

€ 14,50

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

Kuhlmann, Euler

€ 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen

Weschpennig, Kropf, von Witzhausen

€ 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller

€ 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum

€ 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller,

Steinauer, Scharnigg

€ 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“

Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“

Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“

Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los

€ 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann

€ 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle in Vorbereitung

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.