

Jens Löschmann

# Geregelte Temperaturinduktion in Stahlbetontragwerke

Schriftenreihe des Instituts für  
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2023-02

# **Geregelte Temperaturinduktion in Stahlbetontragwerke**

vorgelegte

**Dissertation**

zur

**Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

der

**Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der  
Ruhr-Universität Bochum**

von

**Jens Löschmann, M. Sc.**

Bochum, im Juli 2022



Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2023-2

**Jens Löschmann**

**Geregelte Temperaturinduktion  
in Stahlbetontragwerke**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8937-0

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

# Zusammenfassung

---

In der Arbeit wird eine Methode zur Steuerung von Schnittgrößen durch geregelte Temperaturinduktion entwickelt und experimentell an Stahlbetonbalken validiert. Die Methode basiert darauf, dass Temperaturänderungen Dehnungen hervorrufen, aus denen Verformungen und bei Behinderung der freien Ausdehnung Zwangsschnittgrößen hervorgehen. Die Arbeit zeigt, wie Temperaturfelder aktiv beeinflusst und dadurch Schnittgrößen in Stabtragwerken gesteuert werden können. Eine Übertragung auf weitere Tragwerksarten, z. B. einachsig gespannte Platten, ist möglich. Zur gezielten Erzeugung von stationären Temperaturfeldern in Betonbauteilen werden Heiz- und Kühlsysteme entwickelt und technisch umgesetzt. Als geeignete Heizsysteme erweisen sich Silikonheizmatten und Infrarotstrahler. Zum Kühlen werden Systeme mit Wasserkreisläufen ( $\geq 5\text{ °C}$ ) und Peltier-Elementen ( $< 5\text{ °C}$ ) entworfen. Wesentliche Entwicklungspunkte sind die präzise Regelung der Bauteiltemperatur, die Minimierung thermischer Verluste an die Umgebung und die Kombination von Systemen zur Erzielung vertikaler Temperaturgradienten. Zur Steuerung der aus den induzierten Temperaturfeldern hervorgehenden Schnittgrößen werden analytische Berechnungsformeln und Diagramme für beliebige statisch unbestimmte Systeme abgeleitet.

Mit der entwickelten Methode können Tragwerke lokal entlastet und ungünstige Zwangsbeanspruchungen temporär kompensiert werden. Darüber hinaus werden zwei Methoden zur praktischen Umsetzung der Schnittgrößensteuerung bei der Herstellung und der Verstärkung von Tragwerken eingeführt. Bei der abschnittswisen Tragwerksherstellung, wie z. B. dem Freivorbau, ermöglicht Temperaturinduktion eine beliebige Umlagerung des aus dem Bauzustand eingepprägten Eigenlastmoments. Bei der Tragwerksverstärkung kann Temperaturinduktion eingesetzt werden, um nachträglich ergänzte Bewehrung vorzuspannen und diese dadurch für die Abtragung des Eigengewichts zu aktivieren. Beide Methoden werden erfolgreich an Stahlbetonbalken demonstriert. Grundsätzlich bestätigen die Versuche, dass eine präzise Steuerung von Biegemomenten mittels Temperaturinduktion möglich ist. Es zeigt sich, dass Rissbildung zu einem Abbau der induzierten Schnittgrößen führt, sodass nichtlineare Berechnungen mit wirklichkeitsnahen Steifigkeiten erforderlich werden. Die Berechnungen erfolgen hier auf der Grundlage modifizierter Momenten-Krümmungs-Beziehungen.

Ergänzend zu den Versuchen werden numerische Simulationsrechnungen zur Regelung von Temperaturfeldern unter ambienten Bedingungen durchgeführt. Sie zeigen die Machbarkeit der Methode an realmaßstäblichen Brücken und ermöglichen eine erste Abschätzung des Energiebedarfs.



---

# Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2016 bis 2022 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark für die Begleitung und Förderung meiner Forschungsarbeit sowie für den gewährten Freiraum bei der Erstellung der Arbeit an seinem Lehrstuhl. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Meurer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach für den wissenschaftlichen Austausch und die Übernahme der weiteren Fachgutachten. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl möchte ich mich für den fachlichen und freundschaftlichen Austausch und die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Herrn Dr.-Ing. David Sarnio und Herrn Dr.-Ing. Mark Alexander Ahrens danke ich für die wertvollen Anregungen bei der Durchsicht des Manuskriptes und die hilfreichen Diskussionen in der Entstehungsphase der Arbeit. Meinen wissenschaftlichen Hilfskräften Magdalena Kühl und Lasse Bentlage bin ich für ihre vielfältigen Tätigkeiten und ihren zuverlässigen Einsatz dankbar. Den Mitarbeitern der Konstruktionsteilprüfung unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh sei für die erfolgreiche Umsetzung meiner Versuche sowie die wertvolle Unterstützung bei der Planung gedankt.

Schließlich bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Familie und meinen Freunden – insbesondere bei meiner zukünftigen Frau Dunja, meinen Eltern, meiner Großmutter und meiner Schwester – für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und den bedingungslosen Rückhalt in den letzten Jahren.

Bochum, im Dezember 2022

Jens Löschmann

Tag der Einreichung: 04.07.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 14.11.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum  
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Meurer, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach, Technische Universität Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt, Ruhr-Universität Bochum





---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen der Berechnung und Regelung von Temperaturfeldern</b>	<b>7</b>
2.1 Theorie der Wärmeübertragung . . . . .	7
2.1.1 Vorgänge des Wärmetransports . . . . .	7
2.1.2 Wärmeleitung nach Fourierschem Gesetz . . . . .	9
2.1.3 Konvektiver Wärmeübergang . . . . .	11
2.1.4 Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	14
2.2 Numerische Berechnung instationärer Temperaturfelder . . . . .	16
2.3 Regelungstechnik . . . . .	19
2.3.1 Allgemeines . . . . .	19
2.3.2 Regelstrecke . . . . .	20
2.3.3 Regeleinrichtung . . . . .	21
<b>3 Wirkung von Temperaturänderungen auf Stahlbetontragwerke</b>	<b>25</b>
3.1 Einwirkungsarten . . . . .	25
3.2 Temperatureinwirkungen . . . . .	27
3.2.1 Thermische Dehnungen . . . . .	27
3.2.2 Wirkung auf Systemebene . . . . .	31
3.2.3 Schnittgrößenberechnung nach Elastizitätstheorie . . . . .	34
3.3 Einfluss von Rissbildung . . . . .	37
3.3.1 Allgemeines . . . . .	37
3.3.2 Mitwirkung des Betons am Zugstab . . . . .	37
3.3.3 Übertragung der Zugversteifung auf Biegebauteile . . . . .	43

3.3.4	Nichtlineare Schnittgrößenberechnung . . . . .	45
3.4	Einfluss von Kriechen . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer Methode zur Steuerung von Schnittgrößen durch induzierte Temperaturen</b>	<b>49</b>
4.1	Prinzip und Randbedingungen . . . . .	49
4.2	Temperaturinduktion in Stahlbetontragwerke . . . . .	50
4.2.1	Allgemeines . . . . .	50
4.2.2	Methode der Temperaturinduktion . . . . .	52
4.2.3	Experimentelle Untersuchungen zur Methode . . . . .	59
4.2.4	Auswertung von Temperaturfeldern . . . . .	66
4.2.5	Fazit und Empfehlungen . . . . .	68
4.3	Steuerung von Schnittgrößen . . . . .	69
4.3.1	Einführung . . . . .	69
4.3.2	Linear-elastische Berechnung . . . . .	70
4.3.3	Nichtlineare Berechnung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Praktische Umsetzung der Schnittgrößensteuerung</b>	<b>77</b>
5.1	Umlagerung von Schnittgrößen . . . . .	77
5.1.1	Konventionelle Tragwerksherstellung . . . . .	78
5.1.2	Tragwerksherstellung mit Temperaturinduktion . . . . .	80
5.1.3	Zeitabhängige Verluste und Umlagerungen . . . . .	82
5.2	Thermische Vorspannung . . . . .	84
5.2.1	Konventionelle Querschnittsverstärkung . . . . .	84
5.2.2	Querschnittsverstärkung mit Temperaturinduktion . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Numerische Simulationsrechnungen und prototypische Umsetzungen</b>	<b>89</b>
6.1	Berechnungen zur Regelung von Temperaturfeldern . . . . .	89
6.1.1	Temperaturfeldberechnungen für Brücken . . . . .	90
6.1.2	Temperaturregelung unter ambienten Bedingungen . . . . .	94
6.2	Experimente . . . . .	97
6.2.1	Tragwerksherstellung mit Temperaturinduktion . . . . .	97
6.2.2	Querschnittsverstärkung mit Temperaturinduktion . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>123</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Herleitungen zur Berechnung induzierter Schnittgrößen</b>	<b>145</b>
<b>B</b>	<b>Ergänzende Materialdaten</b>	<b>151</b>
<b>C</b>	<b>Ergänzende Messdaten</b>	<b>153</b>