

Diploma Thesis

Damping behavior of textile-reinforced concrete

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Dämpfungsverhalten von Textilbeton

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Mevlut Yasin Çilesiz

Matr.Nr.: 00726658

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng **Johann Kollegger**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Susanne Gmainer**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer**

Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E212-2, A-1040 Wien

Wien, im Juni 2023

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meines Masterstudiums der Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Wien und widmet sich dem Thema "Dämpfungsverhalten von Textilbeton". Dabei bildet die Erfindung mit dem Titel "Betonkern für einen Schi" die grundlegende Basis für die durchgeführten Untersuchungen. Es war eine große Freude und eine äußerst bereichernde Erfahrung, mich intensiv mit den komplexen Aspekten und Herausforderungen dieses Themas auseinanderzusetzen. Diese Masterarbeit bietet einen Einblick in meine Erkenntnisse und Ergebnisse, die ich während der Untersuchung gewonnen habe.

An erster Stelle möchte ich O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger meinen aufrichtigen Dank aussprechen, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit in seinem Forschungsbereich zu verfassen. Besonderer Dank gebührt Dipl.-Ing. Dr.techn. Susanne Gmainer für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Ihre wertvollen Anregungen, konstruktive Kritik und fachliche Expertise waren von unschätzbarem Wert für die Umsetzung. Ebenso gebührt besonderer Dank meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. techn. Philipp Preinstorfer, dessen umfassendes Fachwissen im Bereich des Textilbetons eine entscheidende Stütze bei den experimentellen Untersuchungen war.

Des Weiteren möchte ich der Firma solidian GmbH meinen großen Dank für die Bereitstellung der textilen Bewehrungen aussprechen. Ich möchte mich auch herzlich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer bedanken, der nicht nur die Betonzusammensetzung für die Hauptversuche erstellt hat, sondern auch den Beton bereitgestellt hat.

Außerdem möchte ich meinen Arbeitgebern Dipl.-Ing. Hans Spreitzer und Dipl.-Ing. Konrad Reisenleitner für die fachliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte außerordentliche Verständnis während der Erstellung dieser Arbeit danken. Denn in dieser Phase war ich mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert, die eine flexible Arbeitszeitgestaltung erforderten. Da mir dieser Rückhalt geboten wurde, konnte ich mich umfassend meiner Forschung und dem Verfassen dieser Arbeit konzentrieren.

Ein besonderer Dank gilt meinen geschätzten Freunden Dipl.-Ing. Patrick Hollinsky, Dipl.-Ing. Can Küçükay und M. İkbal Tütünek, deren Präsenz und Zusammenarbeit während meines Studiums eine bereichernde Erfahrung waren. Durch den regen Austausch, die Diskussionen und das gemeinsame Studieren haben wir uns gegenseitig motiviert und inspiriert.

Ich möchte meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Bruder meinen aufrichtigen Dank aussprechen, da sie mir durch ihre volle Unterstützung mein Studium ermöglicht haben. Insbesondere meiner Schwester, Dr. Dilek Çilesiz-Ecit, möchte ich für die Korrekturlesung dieser Arbeit danken. Zu guter Letzt sei auch meiner Gattin, Berna Çilesiz, gedankt, für ihr Verständnis, die Unterstützung und Motivation.

Wien, im Juni 2023

Mevlut Yasin Çilesiz

Kurzfassung

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Erfindung mit dem Titel „Betonkern für einen Schi“. Die Besonderheit dieser Erfindung liegt in der Verwendung von Beton als Material für den Skikern. Die herausragenden Werkstoffeigenschaften textiler Bewehrungen sollen dazu dienen, diese Idee erfolgreich umzusetzen und somit völlig neue Anwendungsmöglichkeiten für Beton zu erschließen.

Im Gegensatz zum konventionellen Betonstabstahl weisen Textilbewehrungen geringere Querschnittsflächen bei gleichzeitig höherer Tragfähigkeit auf und sind zudem weitgehend korrosionsbeständig. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer großen Betondeckung, die sonst erforderlich ist, um einen ausreichenden Korrosionsschutz der Bewehrung zu gewährleisten. Für Textilbeton genügen zudem bereits Betondeckungen im Bereich weniger Millimeter, um den notwendigen Verbund zwischen den beiden Materialien sicherzustellen. Diese Eigenschaften eröffnen neue Optionen zur ressourcenschonenden Verwendung von Beton und ermöglichen die Realisierung äußerst schlanker Betonbauteile mit hoher Tragfähigkeit.

Angesichts der erhöhten Empfindlichkeit schlanker Bauteile gegenüber Schwingungen sind dynamische Untersuchungen in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung. Dabei spielt die Dämpfung eine entscheidende Rolle als wichtige Kenngröße zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften. Bei schwingenden Systemen, die nach einer Bewegung zur Ruhe kommen, tritt ein Mechanismus in Kraft, der zum Ausklingen der Schwingungen führt. Dieser Mechanismus wird als Dämpfung bezeichnet.

Im Rahmen dieser Studie wurden dynamische Versuche an Textilbetonbauteilen durchgeführt, um ihr Dämpfungsverhalten zu untersuchen. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Bewertung der Werkstoffdämpfung von Textilbeton anhand des Dämpfungsmaßes ζ . Hierfür wurden gezielte Ausschwingversuche bei verschiedenen Laststufen durchgeführt, wobei drei verschiedene Textilien in den Betonkörpern Verwendung fanden. Die Untersuchungen begannen mit unbelasteten und ungerissenen Proben. Mit jeder weiteren Laststufe wurde die Belastung gesteigert, um die Auswirkungen der Rissbildung auf das Dämpfungsmaß zu beobachten.

Abstract

The starting point of this work is the invention entitled "Concrete Core for a Ski". The invention's uniqueness lies in using concrete as the material for the ski core. The remarkable material properties of textile reinforcements enable a successful realization of this idea, thereby opening up entirely new possibilities for concrete applications.

In contrast to conventional steel reinforcement bars, textile reinforcements exhibit smaller cross-sectional areas while maintaining higher load-bearing capacities and are also corrosion-resistant. As a result, the need for a thick concrete cover, typically required to ensure sufficient protection against corrosion of the reinforcement, is eliminated. Moreover, in the case of textile-reinforced concrete, thin concrete covers in the range of a few millimeters are adequate to ensure the necessary bond between the two materials. These characteristics provide new opportunities for the resource-efficient use of concrete and enable the realization of slender concrete components with high load-bearing capacities.

Considering the increased sensitivity of slender components to vibrations, dynamic investigations are of great importance. Damping plays a crucial role for characterizing dynamic properties. In vibrating systems that come to rest after motion, a mechanism causes the dissipation of vibrations. This mechanism is referred to as damping.

In the scope of this study, dynamic experiments were conducted on textile-reinforced concrete elements to investigate their damping behavior. The focus was set on evaluating the material damping of textile reinforced concrete using the damping factor ζ . For this purpose, targeted free-vibration tests were performed at various load levels, using three different textiles in the concrete specimens. The investigations commenced with unloaded and uncracked samples, and with each subsequent load level, the applied load was increased to observe the effects of crack formation on the damping factor.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Lateinische Großbuchstaben.....	IX
Lateinische Kleinbuchstaben	IX
Griechische Großbuchstaben	X
Griechische Kleinbuchstaben.....	X
Indizes.....	XI
Abkürzungen.....	XI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	2
1.4 Abgrenzung	3
2 Textilbeton – Stand der Forschung	4
2.1 Einleitung.....	4
2.2 Textile Bewehrung	7
2.2.1 Einleitung und Begriffe	7
2.2.2 Textile Faserstoffe	9
2.2.3 Herstellung von Chemiefasern	9
2.2.4 Carbonfaser	11
2.2.5 Glasfaser.....	13
2.2.6 Beschichtung bzw. Imprägnierung.....	14
2.2.7 Flächengebilde	16
2.3 Beton.....	19
2.3.1 Anforderungen	19
2.3.2 Betonrezeptur.....	19
2.3.3 Herstellung.....	22
2.4 Tragverhalten.....	23
2.5 Verbundverhalten.....	25
3 Grundlagen der Dämpfung	27
3.1 Einleitung	27
3.1.1 Definition	27
3.1.2 Dämpfungsarten	27
3.2 Geläufige Dämpfungsmodelle	29

3.2.1	Rheologische Modelle.....	29
3.2.2	Viskose Dämpfung	30
3.2.3	Hysteresis-Dämpfung.....	31
3.2.4	Coulomb-Dämpfung.....	31
3.3	Dämpfungsverhalten von Stahlbeton.....	32
3.3.1	Einleitung	32
3.3.2	Ursachen für die innere Dämpfung von Beton.....	32
3.3.3	Dämpfungseigenschaften von unbewehrtem Beton	33
3.3.4	Dämpfungseigenschaften von Stahlbeton.....	34
4	Experimentelle Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von Textilbeton.....	37
4.1	Einleitung	37
4.1.1	Ausschwingversuch.....	37
4.1.2	Vorversuche.....	38
4.2	Probekörper	39
4.2.1	Dimensionierung der Betonprobekörper für die Versuche	39
4.2.2	Beton	43
4.2.3	Bewehrung.....	44
4.2.4	Probekörperbezeichnung.....	46
4.3	Versuch.....	47
4.3.1	Versuchsaufbau.....	47
4.3.2	Versuchsablauf.....	48
4.3.3	Last-Verformungsverhalten	51
4.4	Grundlagen zur Ermittlung der Dämpfung	53
4.4.1	Aufstellung der Bewegungsgleichung	53
4.4.2	Lösung der Bewegungsgleichung.....	54
4.4.3	Herleitung des Dämpfungsmaßes	60
4.5	Auswertung der Messgrößen.....	62
4.5.1	Vorgehen bei der Auswertung.....	62
4.5.2	Zusammenfassung der Messergebnisse	64
4.5.3	Gegenüberstellung der Dämpfungswerte	65
4.5.4	Gegenüberstellung der Frequenzwerte	66
4.6	Zusammenfassung der Auswertung.....	67
4.6.1	Dämpfung.....	67
4.6.2	Frequenz	68
5	Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick.....	69
	Literaturverzeichnis.....	73
	Anhänge	75
	Matlab-Code Drei-Punkt-Biegeversuch	75
	Messungen Drei-Punkt-Biegeversuche.....	77
	Matlab-Code Ausschwingversuche	79
	Messungen Ausschwingversuche.....	81

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Großbuchstaben

A, A_i	Konstante des Exponential-Lösungsansatzes
A_s	Querschnittsfläche Einzelstab (Stahl) [mm^2]
A_T	Querschnittsfläche Einzelstrang (Textil) [mm^2]
B, B_i	Konstante Koeffizienten
C	Konstante
D	Druckkraft [N]
E_{cm}	Mittleres Elastizitätsmodul des Betons [N/mm^2]
E_T	Elastizitätsmodul des Textils [N/mm^2]
F	Belastung [N], Erregerkraft [N]
F_c	Dämpfungskraft [N]
F_{cd}	Betondruckkraft [N]
F_E	Bruchlast in der Einspannung [N]
F_k	Federkraft [N]
F_m	Trägheitskraft [N]
F_{T1}	Textilzugkraft [N]
L	Kraglänge [mm]
M	Biegemoment [Nmm]
M_{cr}	Rissmoment [Nmm]
M_E	Maximal aufnehmbares Einspannmoment [Nmm]
N	Normalkraft [N]
Q	Querkraft [N]
T	Schwingungsdauer [s] Zeitterm des Separationsansatzes,
Z	Zugkraft [N]

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Realteil der komplexen Zahl [-]
b	Bauteilbreite [mm], Imaginärteil der komplexen Zahl [-]
c	Dämpfungskonstante [Ns/m]
c_c	Kritische Dämpfung [Ns/m]
d	Statische Nutzhöhe [mm]
d_1	Randabstand der Zugbewehrung [mm]
d_2	Randabstand der Druckbewehrung [mm]
f	Frequenz [$1/\text{s}$]
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons [N/mm^2]

f_{ck}	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons [N/mm ²]
f_{Tt}	Bruchspannung des Textils [N/mm ²]
h	Bauteilhöhe [mm]
i	Imaginäre Zahl
k	Federkonstante [N/m] Periodenanzahl [-]
l	Bauteillänge [mm]
m	Masse [kg]
n	Periodenanzahl [-]
n_{AT1}	Einzelstranganzahl der Druckbewehrung (Textil) [-]
n_{AT2}	Einzelstranganzahl der Zugbewehrung (Textil) [-]
p	Allgemeine Linienlast [N/mm]
t	Zeit [s]
w	Durchbiegung [mm]
x	Richtung der Bauteil-Längsachse [mm], Richtung der Schwingungen [mm]
x_{lim}	Maximale Höhe der Betondruckzone [mm]
z	Richtung der Bauteil-Querachse [mm], Innerer Hebelsarm [mm] Komplexe Zahl

Griechische Großbuchstaben

Λ	Logarithmisches Dekrement
ϕ	Wegterm des Separationsansatzes

Griechische Kleinbuchstaben

ρ_{cT}	Dichte Textilbeton [kg/m ³]
ε	Dehnung [-]
ε_{cu2}	Maximale Betonrandstauchung [-]
ε_{T1}	Dehnung des Textils [-]
ζ	Dämpfungsmaß (Dämpfungswert, Dämpfungsgrad) [-]
κ	Beiwert für das Parabel-Rechteck-Diagramm [-]
λ	Substitutionsterm für die Konstante C, Konstante des Exponential-Lösungsansatzes, Beiwert für das Parabel-Rechteck-Diagramm [-]
μ	Gleitreibungskoeffizient [-]
σ	Normalspannung [N/mm ²]
σ_{rel}	Relative Spannung in der Stahlbewehrung [N/mm ²]
τ	Verbundspannung [N/mm ²]
φ	Winkel der komplexen Zahlen [rad]
\varnothing	Durchmesser [mm]
ω	Eigenkreisfrequenz [1/s]

ω_0	Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems [1/s]
ω'	Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems [1/s]

Indizes

0	Ungedämpftes System
1	Zugzone
2	Druckzone
E	Einspannstelle
T	Textil
c	Concrete, Beton Kritisch
cr	Crack, Riss
i	Index
k	Charakteristisch
lim	Limit, Grenzwert
m	Mean, Mittelwert
max	Maximalwert
rel	Relativ
s	Steel, Stahl
t	Tensile, Zug
u	Ultimate, Grenzwert

Abkürzungen

abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AR	Alkaliresistenz
EI	Biegesteifigkeit [N/mm ²]
HM	High Modulus, hochmodulige Fasern
HPC	High-Performance Concrete, hochfester Beton
HS	High Strength, hochsteife Fasern
HT	High Tensile, hochfeste Fasern
IM	Intermediate Modulus, Intermediate-Modul Fasern
LS	Laststufe
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PES	Polyester
PVC	Polyvinylchlorid
UHM	Ultra High Modulus, ultrahochmodulige Fasern
SFB	Sonderforschungsbereich
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
W/B	Wasser-Bindemittel



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Textilbeton ermöglicht die Herstellung äußerst schlanker Betonbauteile, die jene des Stahlbetons bei gleichen Bauteilabmessungen übertrifft. Dies wird durch die spezifischen Abmessungen und Materialeigenschaften der verwendeten Fasern in der Bewehrung erreicht. Im Gegensatz zu Betonstahl besitzen textile Bewehrungen deutlich kleinere Querschnitte und weisen zudem eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf. Dadurch ist eine große Betonüberdeckung der Bewehrung, die normalerweise erforderlich ist, um ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten, nicht notwendig. Für Textilbeton ist lediglich eine dünnere Betondeckung im Millimeterbereich erforderlich, um den notwendigen Verbund sicherzustellen.

Durch die Weiterentwicklung von Textilbeton eröffnen sich neue Möglichkeiten im Bereich des Gestaltens und Konstruierens. Textilbeton weist im Vergleich zu herkömmlichem Stahl- und Faserbeton eine Vielzahl von Vorteilen auf und birgt ein großes Potenzial für zukünftige Entwicklungen. Es eignet sich für den Einsatz in Bereichen, in denen aus Gründen des Eigengewichts schlanke Bauteile unumgänglich sind. Darüber hinaus ermöglicht Textilbeton die Realisierung außergewöhnlicher Formen, da bestimmte textile Bewehrungen eine hohe Flexibilität aufweisen und sich gut an räumliche Gegebenheiten anpassen lassen.

In der innovativen Erfindung mit dem Titel „Betonkern für einen Schi“ wird darauf aufbauend die Idee verfolgt, Textilbeton in der Skiproduktion einzusetzen. Konkret handelt es sich um einen Ski, der in Sandwichbauweise hergestellt ist und je nach gewünschten Eigenschaften wie Härte, Radius und Dämpfung entweder als Pistenski oder Geländeski verwendet werden kann. Die Besonderheit dieser Erfindung liegt in der Wahl des Kernmaterials, das aus hochfestem Beton mit einer Verstärkung aus Textilbewehrung besteht (siehe Abb. 1.1) und als Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit dient. Für weitere Informationen über die Erfindung sei auf das Technology Offer [35] verwiesen.

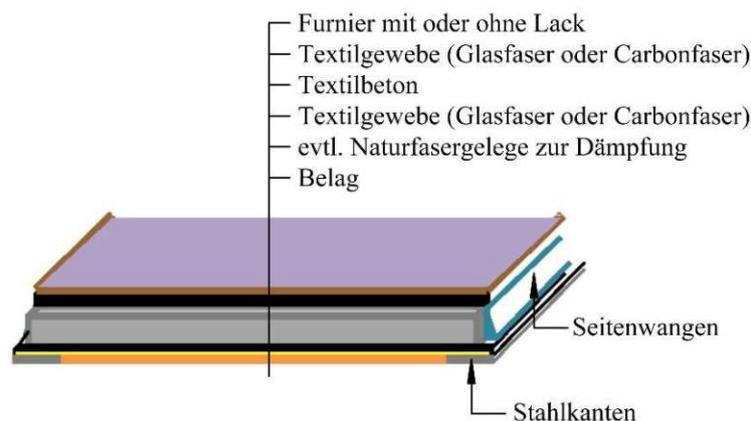


Abb. 1.1: Neuartiger Skiaufbau [35]

Im herkömmlichen Skikern wird üblicherweise Holz verwendet. Im Vergleich dazu weist hochfester Beton eine Biegetragfähigkeit auf, die rund siebenmal höher ist. Zusätzlich zeichnet sich Textilbeton durch eine hohe Dauerhaftigkeit aus, was ihn im Vergleich zu anderen Baustoffen mit ähnlichen Festigkeitseigenschaften zu einer wirtschaftlich attraktiven Option über die gesamte Lebensdauer macht. Der Einsatz von Textilbeton bietet zahlreiche Vorteile an, darunter die

Möglichkeit den Skikern aus einem schlanken Betonquerschnitt mit hoher Tragfähigkeit herzustellen (Abb. 1.2). Aufgrund der hohen Anfälligkeit von Bauteilen mit großer Schlankheit gegenüber Schwingungen ist es von großer Bedeutung, dynamische Untersuchungen durchzuführen. In diesem Kontext spielt die Dämpfung als wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Schwingungseigenschaften eine entscheidende Rolle. Vor diesem Hintergrund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, das Dämpfungsverhalten von Textilbeton zu untersuchen.



Abb. 1.2: Vergleich von Ski und Textilbetonkörper mit hoher Schlankheit (Foto: Susanne Gmainer, 2021)

1.2 Zielsetzung

Die dynamische Untersuchung von Bauteilen beinhaltet wesentliche Bestandteile wie die Erfassung der Eigenfrequenzen sowie die Berechnung von Verformungen und Beanspruchungen infolge dynamischer Kräfte. Die Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffs haben dabei einen erheblichen Einfluss auf die Schwingungsamplituden und Beanspruchungen. Zum Beispiel können insbesondere bei geringer Dämpfung die durch dynamische Kräfte erzeugten Beanspruchungen ausreichend sein, um plastische Verformungen in der Konstruktion hervorzurufen. Bisher sind systematische Untersuchungen zur Dämpfung von Textilbetonkonstruktionen dem Verfasser der vorliegenden Arbeit nicht bekannt. Es gibt vereinzelte Veröffentlichungen über grundlegende Erkenntnisse zur Dämpfung von Stahlbeton, wie z.B. von DIETERLE (1981) und BÜTTNER (1992). Das Dämpfungsverhalten schwingender Textilbetonkörper ist daher bislang wenig erforscht.

Die dynamischen Eigenschaften von Textilbeton zu untersuchen, insbesondere das Dämpfungsverhalten unter Berücksichtigung der Rissbildung, ist das Ziel dieser Arbeit. Die Motivation dieser Arbeit basiert auf der zuvor beschriebenen Erfindung mit dem Titel "Betonkern für einen Schi" in Kapitel 1.1. Die erlangten Erkenntnisse sollen dazu beitragen, den Einsatz von Textilbeton als Alternative zu anderen Kernmaterialien wie Holz in Skikernen zu verifizieren. Das Dämpfungsmaß ζ wurde als entscheidende Kenngröße verwendet, um die Werkstoffdämpfung von Textilbeton zu bewerten. Die präsentierten Forschungsergebnisse stellen einen wichtigen Schritt dar, um ein besseres Verständnis dieses wesentlichen Phänomens des Werkstoffs zu erlangen.

1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der gewählten methodischen Vorgehensweise (Abb. 1.3), die darauf abzielt, die Forschungsfrage zu beantworten und die gesetzten Ziele zu erreichen. Die Gliederung ist wie folgt aufgebaut:

i) Einführung

In diesem Kapitel wird die Problemstellung erörtert und die Zielsetzung formuliert. Darüber hinaus wird die wissenschaftliche Methodik und die Abgrenzung des Themenfelds beschrieben.

ii) Stand des Wissens zu Textilbeton

Dieses Kapitel widmet sich einer Literaturrecherche zum Thema Textilbeton, um einen umfassenden Einblick in den aktuellen Forschungsstand zu geben. Es werden verschiedene Aspekte behandelt, darunter die Herstellungsmethoden und spezifischen Anforderungen der einzelnen Komponenten des Werkstoffs sowie das Trag- und Verbundverhalten des Textilbetons.

iii) Grundlagen der Dämpfung

Das dritte Kapitel behandelt die Grundlagen der Dämpfung. Nach einer Erläuterung der Funktionsweise verschiedener Dämpfungsarten werden verschiedene Modelle zur Berechnung der Dämpfung präsentiert. Des Weiteren werden Erkenntnisse zum Dämpfungsverhalten von Stahlbeton vorgestellt.

iv) Experimentelle Untersuchungen

Das vierte Kapitel befasst sich mit den experimentellen Untersuchungen, in denen die Fragestellung dieser Arbeit durch dynamische und statische Versuche behandelt wird. Es werden die Dämpfungsmaße von Betonkörpern mit verschiedenen Textilien bei fortschreitender Laststufe ermittelt und dabei der Einfluss der Rissbildung untersucht.

v) Zusammenfassung

Im letzten und sechsten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Versuche und eine Interpretation der Ergebnisse. Darüber hinaus wird ein Ausblick gegeben, der auf bestehende oder neu aufgeworfene Wissenslücken hinweist.

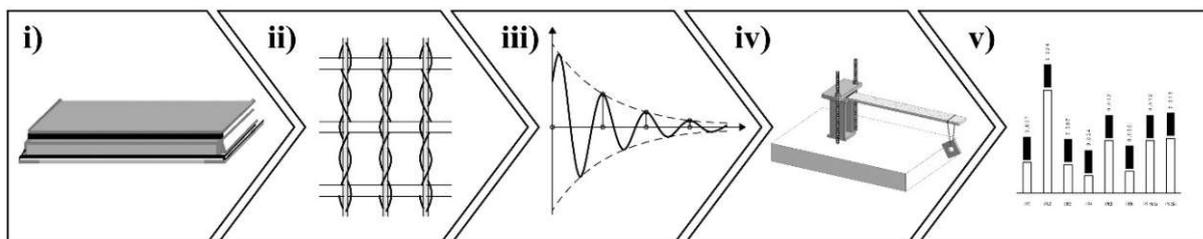


Abb. 1.3: Vorgehensweise der wissenschaftlichen Arbeit

1.4 Abgrenzung

Für die Ermittlung der Dämpfungsmaße werden ausschließlich Ausschwingversuche durchgeführt. Die Schwingungen werden dabei durch eine einheitliche Anfangsanregung ausgelöst, wodurch die Dämpfungsmaße unter gleicher Spannung ermittelt werden. Diese Untersuchung basiert auf einer makroskopischen Betrachtung, bei der die Dämpfungen der einzelnen Werkstoffkomponenten zusammengefasst werden. Die Beton-Probekörper haben alle dieselbe Zusammensetzung und werden den hochfesten Betonen zugeordnet. Die verwendeten Textilien beschränken sich auf flächige Gelege mit Epoxidharz als Tränkungsmaterial.

2 Textilbeton – Stand des Wissens

2.1 Einleitung

Textilbeton ist ein Verbundwerkstoff, der aus zwei Komponenten - Beton und Textil - besteht. Dabei stellt der Beton den Grundwerkstoff, die sogenannte Matrix, dar, in die Textilien bestehend aus gebündelten Endlosfasern aus Hochleistungsmaterialien als Bewehrung, vorzugsweise kraftflussgerecht eingebettet sind. Die Faserbündel bilden eine gitterartige und flächige Struktur, ein weitmaschiges Textil, die hervorragende physikalische und chemische Werkstoffeigenschaften besitzt. Durch die Kombination der beiden Materialien werden, analog zum Stahlbeton, die vorteilhaften Eigenschaften der einzelnen Bestandteile miteinander verbunden: Der Beton dient der Abtragung von Druckkräften und die Textilfasern nehmen die Zugkräfte auf, wenn die Betonzugfestigkeit im Bauteil überschritten wird. Mit Textilbeton ist im Vergleich zum Stahlbeton die Herstellung von sehr schlanken Betonbauteilen bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit möglich.

Im Gegensatz zum Betonstahl besitzen textile Bewehrungen deutlich kleinere Querschnitte auf und weisen in den Umgebungsbedingungen des Betons eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf. Somit kann auf eine große Betonüberdeckung der Bewehrung verzichtet werden, welche für einen ausreichenden Schutz vor Korrosion notwendig wäre. Beim Textilbeton ist lediglich die für den Verbund notwendige Betondeckung, welche im Millimeterbereich liegt zu gewährleisten. Nicht zuletzt besitzen die eingesetzten Hochleistungsfasern, wie zum Beispiel Carbonfaser (Kapitel 2.2.4), Glasfaser (Kapitel 2.2.5) und Aramidfaser eine um ein Vielfaches höhere Festigkeit als Beton- und Spannstahl. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von AR-Glas-, Carbon- und Aramidfasern sind in Tab. 2.1 mit den Eigenschaften von Betonstahl verglichen.

Tab. 2.1: Mechanische Eigenschaften von verschiedenen Bewehrungsmaterialien aus [9] und [10]

Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Bruchdehnung [‰]	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]
AR-Glasfaser	2.80	2500	80000	35	9,1
Carbonfaser (HT)	1.80	4200	240000	18	-0.1
Aramidfaser (HM)	1.44	2760	146000	24	-3.5
Betonstahl BSt550	7.85	550	200000	50	12

Textilbeton ist im Vergleich zu anderen zementgebundenen Verbundwerkstoffen noch ein junger Baustoff, der seit den 1990er Jahren erforscht wird [8]. Ein erster Einsatz von Faserbewehrung in Bauteilen waren Asbestfasern in Asbestzement, der 1899 in Österreich zum Patent angemeldet wurde, aber aufgrund seiner Gesundheitsschädlichkeit mittlerweile nicht mehr verwendet wird. Ab 1970 kamen kurze Stahl- und Glasfasern in Anwendung und wurden schließlich zu Faserbeton verarbeitet [41].

Bei Faserbeton werden Kurzfasern verwendet, die zufällig im Beton verteilt sind. Im Vergleich dazu bestehen Textilbewehrungen aus Endlosfasern und ermöglichen eine gezielte Orientierung der Fasern, was sich günstig auf die Tragfähigkeit auswirkt. Als Vorbild für den Einsatz von

Bewehrungen aus technischen Textilien in Betonbauteilen dienen die hochleistungsfähigen Faserbundwerkstoffe. Diese spielen seit Längerem in vielen technischen Gebieten eine wichtige Rolle, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie sowie in der Raum- und Luftfahrt.

Seit 1994 gibt es eine enge Zusammenarbeit der Institute für Tragwerke und Baustoffe und für Textil- und Bekleidungstechnik der Technischen Universität Dresden bei der Herstellung von textilen Bewehrungen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Textilbewehrung für die Herstellung von Betonbauteilen geeignet ist [8]. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG förderte zwischen 1999 und 2011 die beiden Sonderforschungsbereiche 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der Technischen Universität Dresden und 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Im Zuge dieser Forschungen wurde an der Entwicklung von Textilbeton intensiv gearbeitet und eine Vielzahl an Publikationen veröffentlicht. Der erzielte Kenntnisstand der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 528 kann dem ersten Ergebnisbericht in [8] und dem Abschlussbericht [12] entnommen werden.

Durch die Entwicklung von Textilbeton erweiterte sich der Einsatzbereich von Beton. Textilbeton bietet aufgrund seiner speziellen Merkmale zahlreiche Vorteile gegenüber dem üblichen Stahl- und Faserbeton und besitzt ein hohes Entwicklungspotential. Textilbeton erlaubt die Gestaltung von außergewöhnlichen Formen, da Textilbewehrungen eine hohe Drapierbarkeit besitzen und sich räumlich gut anpassen lassen. Weiters ist es sinnvoll Textilbeton bei Bauteilen einzusetzen, die aufgrund der Dauerhaftigkeit hohe Betondeckungen aufweisen müssen. Die kleinen Durchmesser und Abstände der Textilfaserbündel wirken sich sehr günstig auf das Rissbild von Betonoberflächen aus. Textilbewehrungen sind feingliedriger als Stabstahlbewehrungen und haben deshalb eine größere Oberfläche. Es kommt zu einer feineren Rissverteilung mit geringen Rissbreiten und engen Abständen. Außerdem verkürzen sich die erforderlichen Verankerungslängen, da aufgrund der großen Oberfläche des textilen Bewehrungsnetzes hohe Verbundkräfte übertragen werden können [10].

Die durch Textilbewehrung erzielbare Betoneinsparung kann einen großen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten: Der feinkörnige Hochleistungsbeton, der bei Textilbetonbauteilen eingesetzt wird, enthält zwar anteilmäßig mehr Zement als Normalbeton, aber insgesamt wird in vielen Fällen pro Bauteil weniger Zement eingebaut [16]. Dies führt zu einer Schonung von Ressourcen und einer Reduktion der CO₂-Emissionen. Beispielhaft ist die Fußgängerbrücke in Albstadt, die aufgrund einer Kombination aus Textilbeton und Spannbeton 150 Tonnen leichter hergestellt werden konnte als bei einer Stahlbetonbauweise. Der geringe Materialverbrauch und der niedrige Treibstoffbedarf beim Transport ermöglichten hier eine Einsparung von 30% bei den CO₂-Emissionen [22]. Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass Stahlbetonbauteile wie Platten und Balken mit Textilbeton effektiv verstärkt werden können. Somit bietet sich Textilbeton besonders bei der Sanierung und Verstärkung von bestehenden Tragwerken an, da die erzielbaren dünnen Verstärkungsschichten das Eigengewicht der Konstruktion nicht erheblich gesteigert wird [11]. Diesbezüglich konnten praktische Anwendungen erfolgreich umgesetzt werden, wie zum Beispiel bei der Textilbetonverstärkung eines Schalentragwerks in Schweinfurt [24]. Aus technologischer Sicht ist Textilbeton für flächige Strukturen am besten geeignet. Zahlreiche Praxisbeispiele aus der Fertigteilindustrie zeigen anhand von filigranen Fassadenplatten eine materialgerechte Anwendung. Durch den Einsatz von Textilbewehrung kommt es zu einer Reduktion des Eigengewichts der Fassadenelemente, was die Montage erleichtert und die abzutragenden Kräfte erheblich senkt. Durch die leichte Verformbarkeit der eingesetzten Textilien ist es zudem möglich, komplexe Bauteilgeometrien wie beispielsweise Betonschalen zu bewehren. Auch dafür

gibt es bereits Ausführungsbeispiele aus der Praxis, welche die Eignung von Textilbetonschalen für schlanke Dachkonstruktionen demonstrieren [18].

Bis dato fehlten Normen und Richtlinien, die das Konstruieren mit Textilbeton regeln. Zur Realisierung von Betonbauteilen mit Textilbewehrungen in Deutschland wurden bisher Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) benötigt [32]. Für die Zustimmung im Einzelfall sind umfangreiche Untersuchungen an einem für Experimente hergestellten Bauteil durchzuführen und hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bis zu seiner Zerstörung zu überprüfen. Erst nach Bestätigung der rechnerischen Nachweise darf das tatsächliche Bauteil hergestellt werden. Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung ist ein Anwendbarkeitsnachweis für ein neues Bauprodukt. Die erste Erteilung solch einer Zulassung für Textilbeton erhielt die Marke „Tudalit“. Dadurch wurde eine wesentliche Grundlage für den praktischen Einsatz von Textilbeton geschaffen [24]. Das derzeit größte Forschungsprojekt im deutschen Bauwesen ist das Projekt „C³ - Carbon Concrete Composite“. Das vom deutschen Bundesforschungsministerium geförderte Forschungskonsortium hat das Ziel die Voraussetzungen zu schaffen, um bei zukünftigen Bauprojekten 20 Prozent der Stahlbewehrung durch Bewehrungen aus Carbonfasern zu ersetzen [16]. Die erste Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ wurde im Jahr 2022 im Gelbdruck vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) veröffentlicht. Abbildung 2.1 zeigt einen Vergleich der Abmessungen von Stabstahl, Stahlmatte und Textilbewehrung.

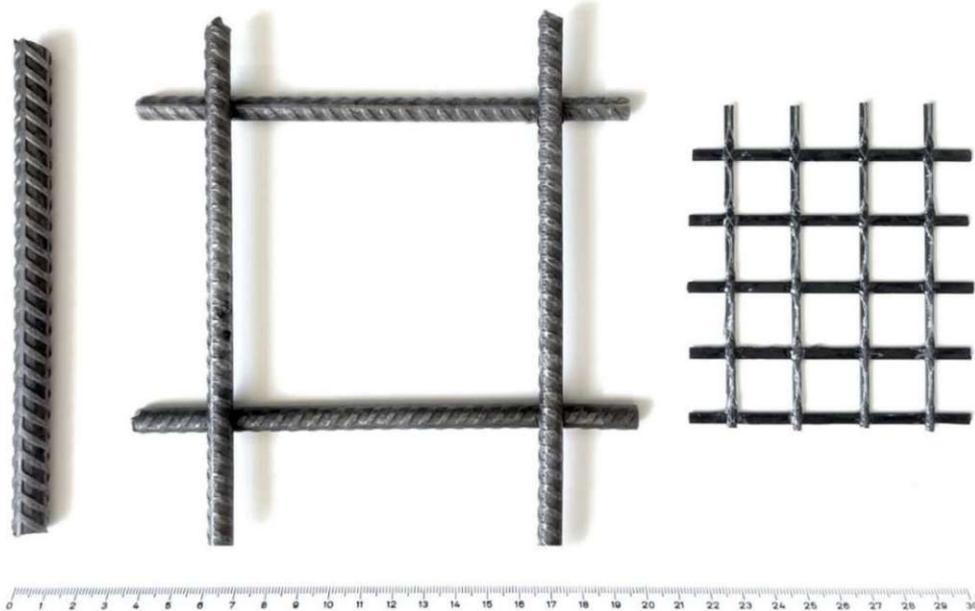


Abb. 2.1: Vergleich Stabstahl ($\varnothing 10\text{mm}$, Querschnittsfläche Einzelstab $A_s=79\text{mm}^2$), Stahlmatte (AQ76, Querschnittsfläche Einzelstab $A_s=45\text{mm}^2$) und Textilbewehrung aus Carbonfasern (Querschnittsfläche Einzelstrang $A_T=1,81\text{mm}^2$)

Der hohen Tragfähigkeit schlanker Betonbauteile, die durch textile Bewehrungen erreichbar ist, stehen allerdings große Durchbiegungen gegenüber. Die zulässigen Verformungen von Bauteilen mit einer hohen Schlankheit können auch mit Textilbeton nicht eingehalten werden. Was daher die Gebrauchstauglichkeit betrifft, sind bei Textilbetonbauteilen dieselben Querschnittsabmessungen erforderlich, die bei der Stahlbetonbauweise üblich sind [10]. Derzeit stehen dem Textilbeton einige kostenrelevante Faktoren im Weg, um den Stahlbeton zu ersetzen: Beispielsweise die Umstellung der Herstellungsmethoden und die teurere Textilbewehrung. Deshalb wird der Stahlbetonbau bei Bauteilen, die nicht schlank ausgeführt werden können, auch in Zukunft die wirtschaftlichere Bauweise sein [9]. Generell stellt Textilbeton immer dann eine Alternative dar,

wenn dicke Schichten aus Beton zur Vorbeugung von Stahlkorrosion eingebaut werden müssen. Textilbeton sollte daher eher als eine ergänzende Alternative zu Stahlbeton betrachtet werden, anstatt ihn vollständig zu ersetzen. Textilbeton besitzt aber das enorme Potential den Einsatzbereich von Beton zu erweitern.

2.2 Textile Bewehrung

2.2.1 Einleitung und Begriffe

Ein Textil ist ein ebenes oder räumliches Gefüge, das mittels unterschiedlicher Produktionsverfahren, aus textilen Fasern hergestellt wird. Die textile Faser ist das elementare linienförmige Gebilde, welches aus einem Faserstoff (Kapitel 2.2.2) besteht und bestimmte Eigenschaften besitzt, die für die textile Verarbeitung notwendig sind. Sie weisen im Verhältnis zu ihrem Querschnitt eine große Länge auf, sind stark biegeweich und besitzen eine für ihre Anwendung ausreichende Festigkeit [14]. Im Folgenden werden einige wichtige Begriffe bezüglich Textilbewehrungen erläutert:

- **Filament:** Textilfasern werden in Spinnfasern und Endlosfasern unterteilt. Die Endlosfasern sind im Gegensatz zu Spinnfasern in ihrer Länge unbegrenzt und werden im Fachjargon auch Filamente genannt. Diese können ausschließlich nur durch die Primärspinnerei (Kapitel 2.2.3) synthetisch hergestellt werden [7].
- **Garn:** Bei der Bildung eines Textils kommen die Filamente in Form von Einzelfasern (Monofilamente bzw. Einzelfilamente) und/oder Garnen in Anwendung. Garne bestehen aus Textilfasern, die zufolge Drehung formschlüssig (z.B. Zwirne) oder durch Hilfsstoffe (z.B. Multifilamentgarne) stoffschlüssig miteinander verbunden sind [7]. Ein Garn ist somit ein Zwischenprodukt, welches zu einem Textil verarbeitet werden kann.
- **Multifilamentgarn bzw. Roving:** Multifilamentgarne, auch Rovings genannt, bestehen aus einem Bündel mit mehreren gestreckten und parallelen Filamenten ohne Drehung. Ein Multifilamentgarn kann dabei bis zu einige tausend Filamente beinhalten.

Vor der Einführung von textilen Bewehrungen kamen Faserstoffe in Beton hauptsächlich als Kurzfasern zur Anwendung, die zufällig im Bauteil angeordnet sind. Fortschrittliche Entwicklungen in der Textiltechnologie ermöglichten es Textilien herzustellen, die den Einbau von Endlosfasern in planmäßigen Richtungen gewährleisten [7]. Dafür eignen sich besonders Multifilamentgarne, da diese im Vergleich zu anderen Typen wie beispielsweise Zwirnen eine geringe strukturbedingte Dehnung besitzen [27]. Das bedeutet, dass die Fasern nicht erst stark gedehnt werden müssen, bevor sie in der Lage sind, Lasten aufzunehmen. Die Garne der Textilbewehrung können belastungskonform ausgerichtet werden, was zu einer höheren Ausnutzung der Faserfestigkeit führt. Somit ist gegenüber Faserbeton bei gleicher Tragfähigkeit eine geringe Menge an Fasern erforderlich [19].

Gewöhnliche Textilbreiten beginnen bei linienförmigen Strukturen wie Bändern und Geflech-ten im Zentimeterbereich. Flächenförmige Strukturen (Kapitel 2.2.7) wie Gewebe, Gewirke, Gele- gen und Gestricke hingegen erreichen in der Breite mehrere Meter. Die Strukturdicke hängt von der Garndicke ab und liegt für gewöhnlich im Milimeterbereich [13]. In Abbildung 2.2 sind die grundlegenden Herstellungsschritte von Textilbewehrungen in vereinfachter Form dargestellt.

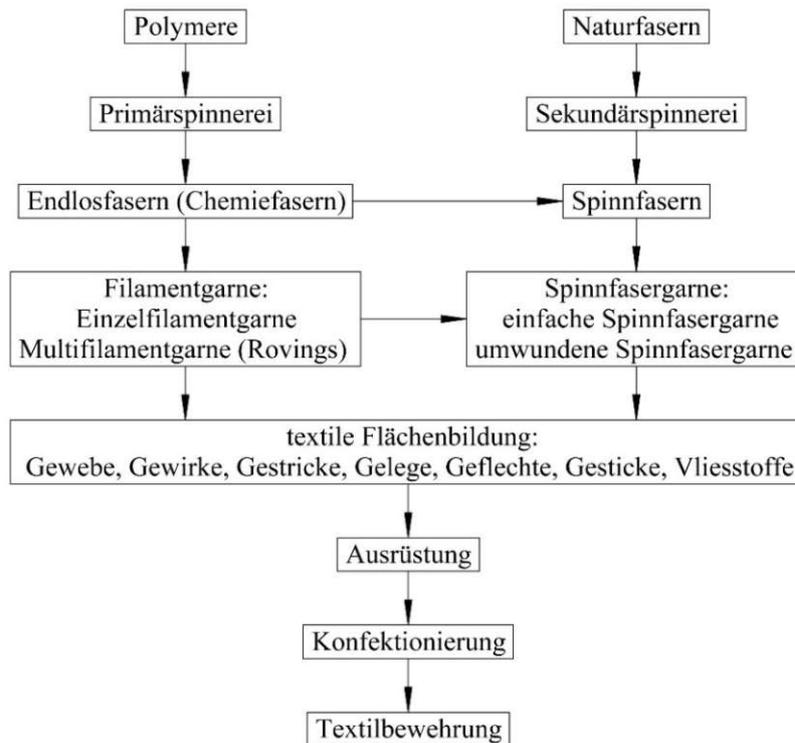


Abb. 2.2: Überblick über den Textilprozess (in Anlehnung an [7])

Die Textilien müssen einige Anforderungen erfüllen, damit sie für eine Anwendung im Beton geeignet sind. Die eingesetzten Textilien müssen eine gitterartige Struktur mit großen Öffnungen besitzen, damit sie der Beton durchdringen kann, um einen guten Verbund zu gewährleisten. Außerdem ist eine ausreichende Festigkeit gegen ein Verschieben der textilen Strukturen erforderlich, damit eine gute Handhabbarkeit gegeben ist [9]. Das Fasermaterial muss im alkalischen Milieu des Betons resistent gegen Korrosion sein. Um einem hohen Steifigkeitsverlust durch Rissbildung entgegenzuwirken, muss das Elastizitätsmodul der Textilfasern deutlich über dem des Betons liegen. Des Weiteren müssen die Fasern eine hohe Festigkeit sowie eine ausreichend große Bruchdehnung haben. Um eine gleichmäßige Beteiligung aller Textilfasern an der Lastaufnahme zu ermöglichen, ist ihre parallele und gestreckte Anordnung zu gewährleisten [7].

Hochleistungsfasern aus AR-Glas, Aramid, Basalt und Carbon sind mit ihrer Alkaliresistenz, guten mechanischen Eigenschaften und der guten Verarbeitbarkeit für die Bewehrung von Beton am besten geeignet. Vor allem imprägnierte Filamentgarne (Kapitel 2.2.6) weisen zudem ein gutes Verbundverhalten mit der Betonmatrix auf und haben eine bessere Faserausnutzung zur Folge, was sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften des Garns auswirkt. Es gibt eine Vielzahl an möglichen industriellen Herstellverfahren zur Bildung von textilen Flächenstrukturen (Kapitel 2.2.7). Für Betonbewehrungen kommen jedoch nur jene in Betracht, welche Strukturen zu den oben genannten Kriterien ermöglichen [13]. Für die Anwendung als Betonbewehrung sind laut dem Sonderforschungsbereich 528 in Dresden Textilien aus Gelegen (Kapitel 2.2.7) am besten geeignet, da sie bezüglich der Eigenschaften sehr flexibel sind und somit eine hohe Anzahl an Einsatzmöglichkeiten bieten [9]. Gelege weisen aufgrund ihrer gestreckten Garnlagen eine geringe strukturelle Dehnung auf. Die Anzahl und die Winkel der Lagen können dabei nach Belieben eingestellt werden. Durch die Auswahl der Fasern, die Art der Bindung und den verwendeten Nähfäden lassen sich die Eigenschaften des Textils entsprechend dem Verwendungszweck anpassen.

2.2.2 Textile Faserstoffe

Textile Faserstoffe sind das Grundelement der textilen Bewehrungen. Die Eigenschaften der Textilbewehrungen werden von den Faserstoffeigenschaften maßgebend beeinflusst. Die Faserstoffe werden generell in Natur- und Chemiefasern unterteilt, wobei erstere aus pflanzlichen, tierischen oder mineralischen Stoffen gewonnen werden (Abb. 2.3). Diese sind derzeit für den Betonbau weniger relevant. Chemiefasern hingegen werden aus natürlichen oder synthetischen Polymeren hergestellt. Für Textilbewehrungen spielen die anorganischen Stoffe aus den natürlichen Polymeren eine Rolle [7].

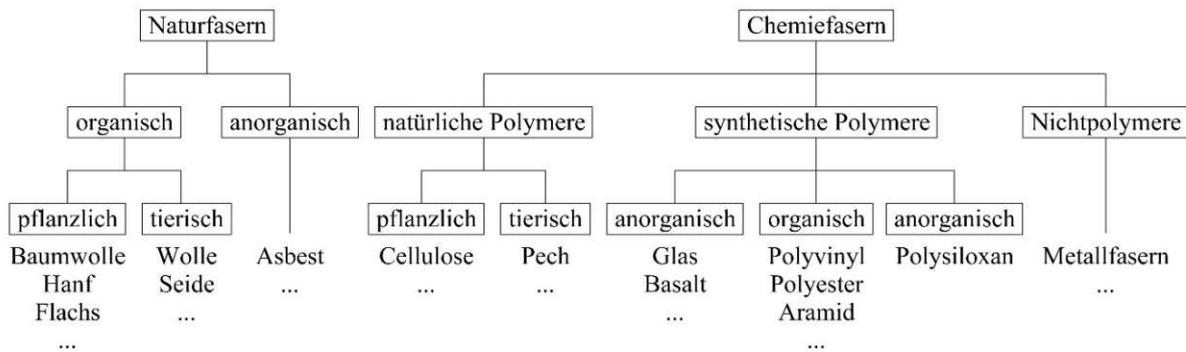


Abb. 2.3: Einteilung der Faserstoffe in Anlehnung an [7]

Fasern aus Polymeren bestehen aus großen, kettenartigen Makromolekülen, die aus einer großen Anzahl an gleichartigen Atomen oder Atomgruppen, den sogenannten Monomeren zusammengesetzt sind. Synthetische Polymere werden künstlich erzeugt, in dem ihre Kettenmoleküle durch das Aneinanderreihen der Monomere gebildet werden. Dabei kann die Polymerbildung durch drei verschiedene Reaktionsmechanismen geschehen: Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition. Im Gegensatz zu dem synthetischen Polymeren liegen die Kettenmoleküle der natürlichen Polymere bereits in der Natur vor. Der atomare Aufbau der Polymere bestimmt die mechanischen Eigenschaften der Faserstoffe [13].

2.2.3 Herstellung von Chemiefasern

Die erste Stufe der textilen Prozesskette ist das Herstellen bzw. Erspinnen von endlosen Chemiefasern und wird als Primärspinnen bezeichnet. Dabei wird das polymere Ausgangsmaterial in Form von Granulat oder Pulver in einen fließfähigen Zustand, der Spinnmasse überführt. Diese wird anschließend von einer Pumpe durch die kleinen Öffnungen einer Spinndüse herausgepresst. Durch das Austreten kommt es zur Formgebung der Spinnfaser, welche anschließend verfestigt wird. Der Ausgangsstoff wird in Abhängigkeit der Polymereigenschaften entweder durch Schmelzen oder einem Lösemittel verflüssigt (Abb. 2.4). Daher kann die Herstellung von Chemiefasern in folgende Verfahren unterteilt werden [13]:

- Schmelzspinnverfahren
- Lösemittelverfahren: Nassspinnen, Trockenspinnen

Das Lösemittelverfahren wird wiederum je nach der Art der Verfestigung in Nassspinn- und Trockenspinnverfahren unterteilt. Nach der Formgebung muss zur Faserverfestigung das Lösemittel entfernt werden. Daher durchläuft beim Trockenspinnverfahren die ersponnene Spinnmasse einen Warmluftschacht, damit das Lösemittel verdampfen kann. Beim Nassspinnverfahren tritt die durch die Spinndüse herausgepresste Spinnfaser in ein Chemikalienbad aus. Hier kommt es durch die chemische Neutralisation des Lösemittels zur Verfestigung der Fasern. Mit den Lösemittelverfahren werden Filamente z.B. aus Polyacrylnitril (PAN) und Polyvinylchlorid (PVC)

hergestellt. Das Lösemittelverfahren wird bei Polymeren angewendet, deren Schmelzpunkt oberhalb ihres Zersetzungspunktes liegt [7].

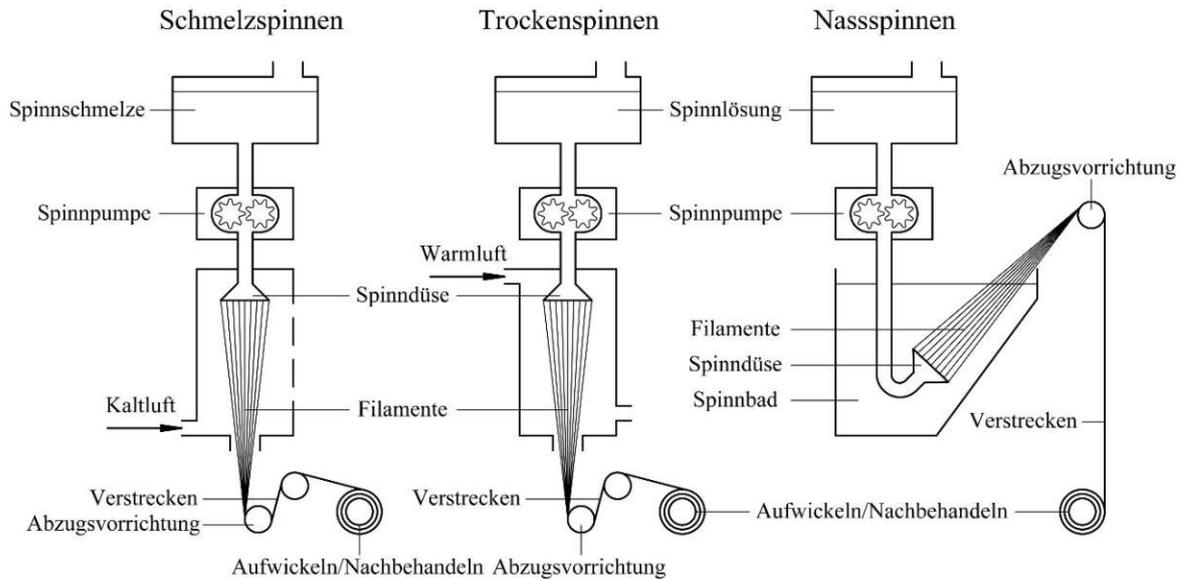


Abb. 2.4: Verfahren für die Erzeugung von Chemiefasern (in Anlehnung an [7])

Das Schmelzspinnen hat gegenüber dem Lösemittelspinnen den Vorteil, dass das eingesetzte Lösemittel nicht aufgefangen und wiederverwendet werden muss. Außerdem entfallen sämtliche Reinigungsprozesse für die Entfernung von Lösemittelrückständen an den Filamenten. Das Schmelzspinnen wird bei polymeren Ausgangsstoffen angewendet, die sich in einem Extruder in hochviskose Flüssigkeiten aufschmelzen lassen. Die daraus gewonnenen Fasern werden in einem Kaltluftschacht abgekühlt und dadurch verfestigt. Mit dem Schmelzspinnverfahren werden Filamente aus z.B. Polyester (PES) und Polyamid (PA) ersponnen [7].

Die weiteren Stufen der textilen Prozesskette sind das Verstrecken und die Nachbehandlung der Filamente. Letzteres ist ein thermischer Prozess, in dem vorhandene innere Spannungen herabgesenkt werden. Beim Verstrecken werden die im unverstreckten Zustand beliebig angeordneten Moleküle gezielt in Faserlängsachse ausgerichtet und dadurch die Steifigkeit und Festigkeit erhöht. BERGER ET AL. [2] geben folgende Vorgänge an, die während dem Verstrecken vonstattengehen:

- Verlängerung der Faser bei Verkleinerung des Querschnitts
- Orientierung der Kettenmoleküle in Krafrichtung
- Ausziehen von verschlauften Kettenmoleküle
- Annäherung der Kettenmoleküle zueinander
- Erhöhung der kristallinen Bereiche (periodisch und dreidimensional angeordnete Strukturen) durch Nachkristallisation (Erhöhung der Ordnung von Kettenmolekülen)
- Reduzierung der Inhomogenität in der Verteilung von Spannungen entlang der Orientierungsrichtung, die durch die unterschiedlich starken kovalenten Bindungskräfte in Kettenrichtung und der intermolekularen nebensvalenten Wechselwirkungskräfte senkrecht dazu hervorgerufen werden

2.2.4 Carbonfaser

Je nach Verfahren können Carbonfasern aus den Ausgangsstoffen Polyacrylnitril (PAN), Pech sowie im geringen Umfang auch aus Viskose gewonnen werden. Carbonfasern aus Pech sind für den Einsatz im Beton unbedeutend. Im Wesentlichen werden für die Erzeugung von Carbonfilamenten Ausgangsfasern aus Polyacrylnitril verwendet. Dabei wird durch thermischen Abbau eine Umwandlung von PAN zu Carbon hervorgerufen (Abb. 2.5). Polyacrylnitril-Fasern werden hauptsächlich nach dem in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Lösemittelverfahren hergestellt. PAN-Fasern, die zu Carbonfasern umgewandelt werden sollen, erfahren eine hohe Verstreckung nach dem Erspinnen. Dadurch wird ein Grundstein für die guten mechanischen Eigenschaften der späteren Carbonfilamente gelegt [13].

In einem weiteren Schritt erfolgt die Oxidation der Polyacrylnitril-Fasern. Es kommt zu einer Farbveränderung von weiß nach schwarz und die Dichte nimmt zu. Bei der Oxidation werden die Fasern bei Temperaturen zwischen 200°C und 300°C in einem sauerstoffhaltigen Ofen thermisch stabilisiert. Das heißt, dass die Fasermoleküle in eine unschmelzbare Struktur überführt werden. Dies ist für den anschließenden zweiten Herstellungsschritt, die Carbonisierung wichtig. Hier werden die Fasern in einer inerten Umgebung aus Stickstoff bis 1500°C erhitzt. Dabei kommt es zu einer Abspaltung von Nicht-Kohlenstoffatomen und einem Aufbau von Kohlenstoffringen in Form von Graphitschichten, welche die Grundbausteine der Carbonfaser darstellen. Es erhöht sich der Kohlenstoffanteil bis zu 95%. Außerdem kommt es während der Carbonisierung zu einem Masseverlust und einer weiteren Zunahme der Dichte.

Die mechanischen Eigenschaften der dadurch erhaltenen Carbonfasern können durch eine dritte Stufe der thermischen Behandlung, der Graphitierung weiter verbessert werden. Dabei werden die durch Carbonisierung entstandenen Graphitschichten stärker parallel zur Faserachse ausgerichtet. Diese Verarbeitungsstufe geschieht ebenfalls in einer inerten Atmosphäre z.B. aus Argon, jedoch bei noch höheren Temperaturen zwischen 2000°C und 3000°C. Eine zusätzliche Verstreckung während der Graphitierung erhöht den Orientierungsgrad der Moleküle, was zu einer weiteren Steigerung der Materialkennwerte führt [7].

Durch die Wahl der Verfahrensparameter bei der Faserherstellung können die Materialeigenschaften gezielt gesteuert werden. Je nach Elastizitätsmodul und Festigkeit können die Fasern zu Carbonfaser-Typen zugeordnet werden. Die am weitest verbreiteten Fasertypen sind:

- Hochfeste Carbonfasern (HT)
- Hochsteife Carbonfasern (HS)
- Intermediate-Modul Carbonfasern (IM)
- Hochmodul Carbonfasern (HM)
- Ultrahochmodulige Carbonfasern (UHM)

Für Textilbewehrung eignen sich HT-Fasern mit hoher Zähigkeit und HS-Fasern mit hoher Festigkeit. Diese sind preiswerter als höhermodulige Fasern und in großen Mengen erhältlich [9].

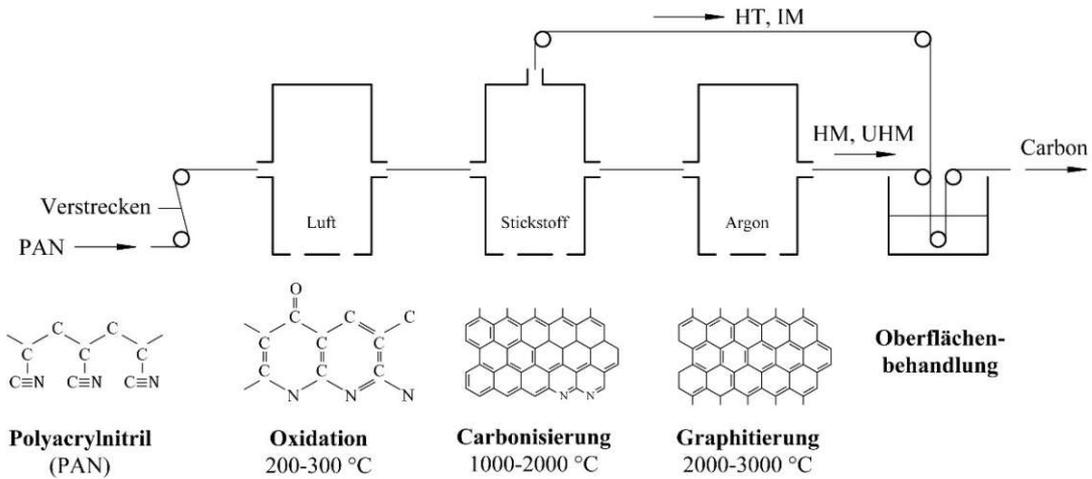


Abb. 2.5: Herstellung von Carbonfasern aus PAN (in Anlehnung an [7])

Die in Faserlängsrichtung ausgerichteten Graphitschichten haben einen bedeutenden Einfluss auf den Elastizitätsmodul. Die hohe Zugfestigkeit der Carbonfasern ist auf die innerhalb der Schichten in Längsrichtung wirkenden kovalenten Bindungskräfte der Kohlenstoffatome zurückzuführen (Abb. 2.6). Die Schichten senkrecht zueinander werden durch die schwächeren van-der-Waal'schen Kräfte zusammengehalten. Daher weisen Carbonfasern eine geringe Querfestigkeit und somit eine Druckempfindlichkeit quer zur Faserachse auf. Die unterschiedlichen Eigenschaften in Längs- und Querrichtung ergeben sich dennoch durch den anisotropen Aufbau der Graphitkristalle [7].

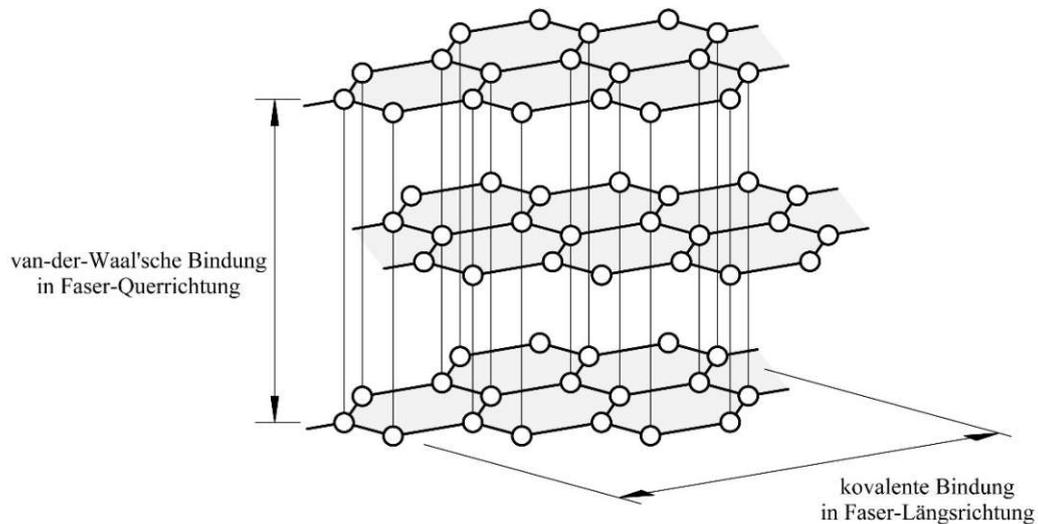


Abb. 2.6: Aufbau von Graphit (in Anlehnung an [9])

Carbonfasern zeigen sowohl unter statischen Beanspruchungen als auch unter Ermüdungsbeanspruchungen eine hohe Festigkeit und weisen ein durchgehend linear elastisches Verhalten auf. Die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft linear bis zum Sprödbbruch ohne Vorankündigung. Carbonfasern haben eine hohe Beständigkeit gegenüber Säuren, Laugen und Alkalien. Sie sind somit auch beständig im alkalischen Milieu von Beton.

Filamente aus Carbon haben im Vergleich zu anderen Hochleistungsfasern eine niedrige Dichte von 1.8 g/cm^3 [13]. Weitere für technische Anwendungen besondere Eigenschaften sind die geringe Kriechneigung, die gute Schwingungsdämpfung, die geringe Wärmeausdehnung, die geringe

Wärmeleitfähigkeit und die gute elektrische Leitfähigkeit. Erst ab einer Temperatur von 400°C nimmt bei Carbonfilamenten die Festigkeit und der Elastizitätsmodul deutlich ab. Die Oxidation der Fasern beginnt unter normalen Umgebungsbedingungen aber schon ab Temperaturen von 300°C [9].

2.2.5 Glasfaser

Glaserfasern gehören zu den anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen. Der Glaszustand entsteht durch das Einfrieren einer unterkühlten Flüssigkeit bzw. Schmelze. Eine Flüssigkeit ist unterkühlt, wenn derart schnell unter die Schmelztemperatur abgekühlt wird, so dass die Moleküle in ihrer Beweglichkeit beschränkt werden und ein Kristallwachstum dadurch unterbunden wird. Bei fortschreitender Abkühlung friert die Flüssigkeit ein und wird zum Glas [37].

Als Glasfaser werden in textilen Anwendungen Silikatgläser verwendet. Bei der Herstellung werden ihre Moleküle gehindert, geordnete Kristallgitter zu bilden, wie dies z.B. bei Carbon der Fall ist. Glasfasern weisen eine für den Glaszustand typische ungeordnete Netzwerkstruktur auf. Diese wird aus Tetraedern aus Siliciumdioxid gebildet, welche über die Sauerstoffatome miteinander verbunden sind (Abb. 2.7). Durch Einlagerungen von Metalloxiden kann das Netzwerk modifiziert und die Glaseigenschaften bestimmt werden [13].

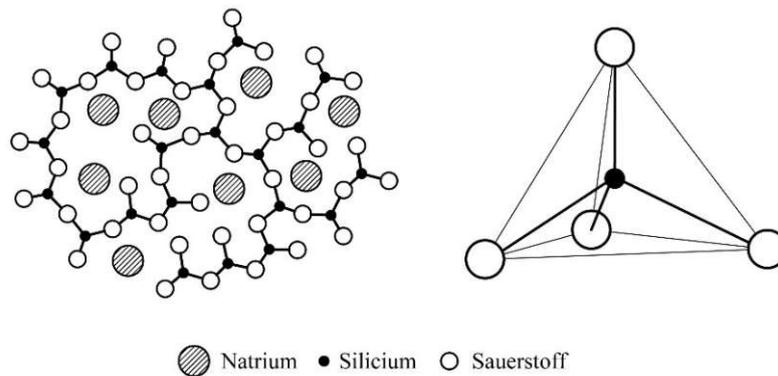


Abb. 2.7: Netzwerkstruktur Natrium-Silikat-Glas und Tetraeder aus Siliciumdioxid (in Anlehnung an [37])

Für die Glasfasererzeugung existieren mehrere Methoden des Schmelzspinnverfahrens. Um Endlosfilamente zu erhalten, bedient man sich grundsätzlich dem Düsenziehverfahren (Abb. 2.8). Die Grundstoffe bei der Herstellung sind unter anderem Quarzsand, Kalkstein, Borat, Kaolin sowie verschiedene Oxide. Diese werden je nach Glasfasertyp dosiert und bei 1400°C aufgeschmolzen und vermischt. Anschließend wird die Schmelze über Rinnen in die Spindüsen befördert, die eine Temperatur von 1200°C aufweisen. Die schwerkraftbedingt durch die Düsenöffnungen austretende Schmelze wird abgekühlt und erstarrt zu Glasfilamenten. Diese werden mittels einer rotierenden Vorrichtung aus den Düsen gezogen und in einem weiteren Prozess mit einer sehr feinen Schlichte benetzt [7].

Die Schlichte besteht aus einer wässrigen Dispersion mit mehrheitlich organischem Anteil aktiver Substanzen. Sie überdeckt Oberflächendefekte und schützt die empfindlichen Glasfasern vor Abrieb während der weiteren Verarbeitung. Außerdem verbessert die Schlichte den Zusammenhalt der Filamente untereinander und den Verbund zur Betonmatrix. Nach dem Spinnprozess werden die Glasfasern zu einem Filamentgarn zusammengefasst und aufgewickelt [9].

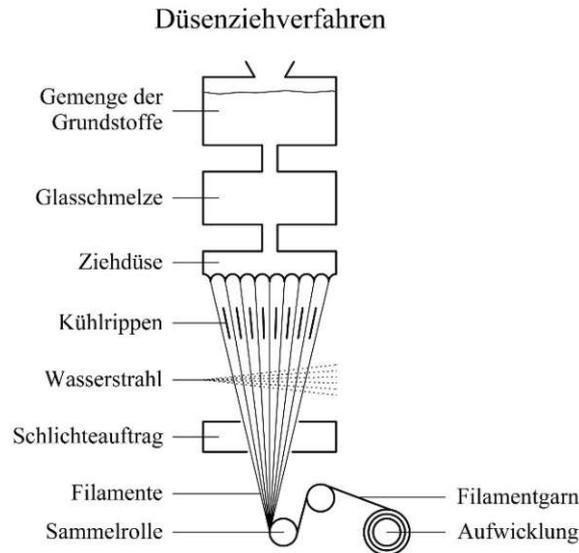


Abb. 2.8: Herstellung von Glasfasern mittels Düsenziehverfahren (in Anlehnung an [13])

Textilglasfasern weisen im Vergleich zu Carbon ein geringeres, aber dennoch günstiges Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit auf [13]. Die hohe Festigkeit ist durch die starke kovalente Bindung zwischen den Silizium- und Sauerstoffatomen begründet. Aufgrund der ungeordneten Anordnung der Moleküle in einer Netzwerkstruktur, besitzen die Glasfasern ein isotropes Werkstoffverhalten. Die Festigkeiten sind somit in Längs- und Querrichtung annähernd gleich groß. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist bis zum Sprödbbruch linear elastisch ohne plastische Verformungen. Des Weiteren ist die Kriechneigung sehr gering [37].

Als mineralischer Werkstoff sind Glasfasern unbrennbar und setzen unter Temperatureinwirkung keine Gase frei. Ab einer Temperatur von 200°C beginnt aber ein erhöhter Festigkeitsverlust. Sie können zudem mit einer hohen Beständigkeit gegen Säuren und Laugen hergestellt werden. Aufgrund der vielen Einsatzmöglichkeiten von Glasfasern gibt es mehrere Glasfasertypen, die sich in der Zusammensetzung der Bestandteile unterscheiden [13]. Dadurch lassen sich auch die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Für die Anwendung als Bewehrung im alkalischen Milieu des Betons wurden alkaliresistente Glasfasern, kurz AR-Glasfasern, entwickelt. Diese besitzen einen hohen Zusatz an Zirkonoxid und weisen daher eine hohe Beständigkeit gegen alkalische Angriffe des Zementsteins auf. Alle anderen Glasfasertypen werden im Beton innerhalb kürzester Zeit aufgelöst und verlieren ihre Festigkeit. Der Temperaturdehnungskoeffizient liegt nahe an den Werten von Beton. Im Vergleich zu anderen Faserstoffen ist der niedrige Preis der wichtigste Vorteil von Glasfasern [9].

2.2.6 Beschichtung bzw. Imprägnierung

JESSE hat in [8] gezeigt, dass sich die Tragfähigkeit textiler Bewehrungen erheblich steigern lässt, wenn der Verbund der einzelnen Fasern im Garn untereinander erhöht wird. Dies lässt sich durch die Beschichtung des Faserbündels mit einer wässrigen Polymerdispersion oder mit Harz-Imprägnierungen realisieren. Da während der Herstellung bereits eine primäre Beschichtung an den Fasern mittels einer Schlichte stattfindet, wird der in diesem Kapitel beschriebene Prozess auch Tränkung genannt. Dabei werden die einzelnen Fasern mit dem Tränkungsmittel umhüllt und miteinander verbunden, wodurch die Zwischenräume aufgefüllt werden [9]. Dieses Auffüllen des Querschnitts mit Beschichtungsmaterial entspricht einer Imprägnierung und unterscheidet sich von nur einer oberflächlichen Beschichtung des Garns.

Das Imprägnieren der Garne kann während der Verarbeitung zum Textil oder nachher in einem separaten Prozess erfolgen. Für optimale Ergebnisse ist ersteres von Vorteil, da hier die Fasern gestreckt und optimal ausgerichtet sind. Das Tränkungsmedium muss sowohl auf die Primärschichtung als auch auf die Betonmatrix angepasst werden [13].

Durch den verbesserten Verbund der Filamente untereinander kommt es zu einer Homogenisierung im Querschnitt. Anders als bei ungetränkten Garnen, bei denen sich bei einer Belastung zuerst hauptsächlich die Randfilamente an der Lastabtragung beteiligen (siehe Kapitel 2.4), wird durch die Imprägnierung eine gleichmäßige Aktivierung aller Fasern ermöglicht. Man erhält dadurch eine annähernd gleichmäßige Spannungsverteilung im Garnquerschnitt und verhindert das vorzeitige Versagen der Randfilamente (Abb. 2.9) [43].

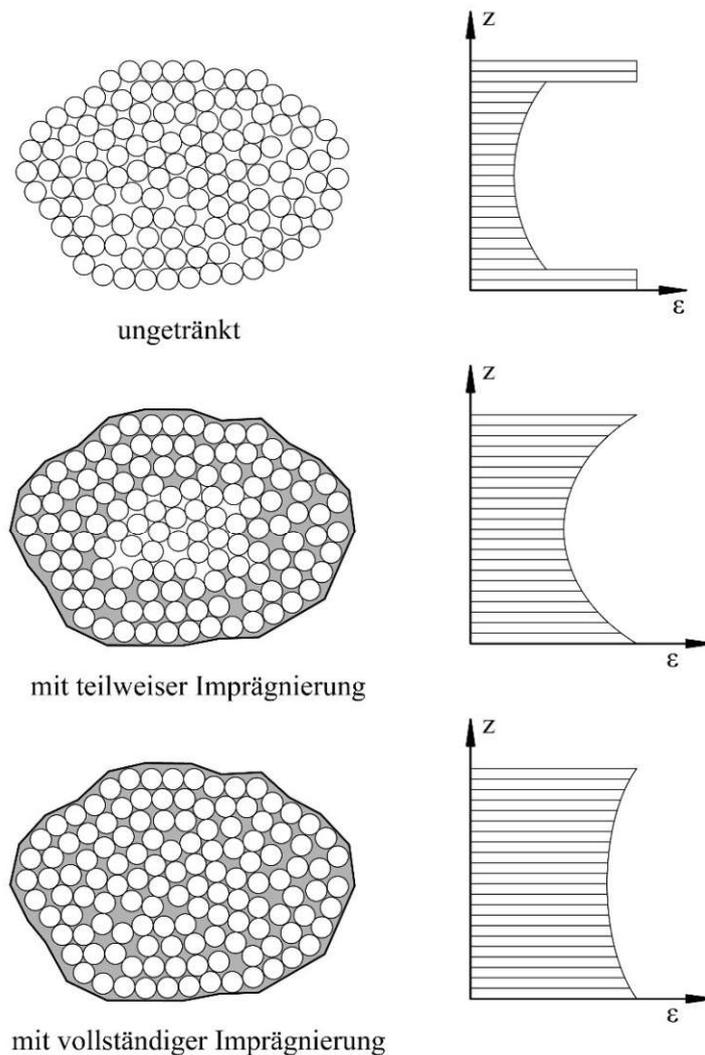


Abb. 2.9: Dehnungen im Filamentgarn in Abhängigkeit des Beschichtungsgrads (in Anlehnung an [7])

Durch eine Imprägnierung lässt sich nicht nur die Tragfähigkeit verbessern, sondern auch der Verbund von Faser zu Betonmatrix. Des Weiteren erhält das Textil eine zusätzliche Stabilisierung der Gitterstruktur. Außerdem erhöht eine Imprägnierung die Verschiebefestigkeit und erleichtert die Handhabung während dem Einbau des Textils. Neben den genannten Vorteilen wird durch die Imprägnierung auch die Wasseraufnahme der Textilebewehrung durch kapillares Saugen verringert und der Widerstand gegen den Gastransport durch die Garne erhöht, was sich positiv auf das Langzeitverhalten auswirkt [9].

2.2.7 Flächengebilde

Es gibt eine Vielzahl an Verfahren Garne zu flächigen, aber auch zu räumlichen Textilien weiter zu verarbeiten. Je nach Bindung und Anordnung der Garne gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, um ein textiles Flächengebilde herzustellen. Derzeit werden industrielle Web-, Wirk-, Strick- und Stick- sowie Gelegetechniken verwendet [13]. Für die Erzeugung von textilen Betonbewehrungen kommen nur einige der genannten Verfahren in Frage, welche in diesem Kapitel näher erläutert werden. Die Hauptanforderung an Betonbewehrungen sind möglichst große Öffnungsweiten zwischen gestreckt angeordneten Garnen bei gleichzeitig hoher Verschiebefestigkeit der textilen Struktur. Dadurch soll eine ausreichende Einbettung in die Betonmatrix ermöglicht und die Handhabung der Bewehrung erleichtert werden. Durch den gestreckt eingebauten Zustand können sich die Fasern direkt an der Lastabtragung beteiligen, ohne zuvor strukturbedingt gedehnt werden zu müssen [9]. Außerdem entstehen durch gekrümmt eingebaute Garne Umlenkkräfte, die zu zusätzlichen Belastungen am Bauteil führen. Des Weiteren sollen die Filamente nicht durch das flächenbildende Fertigungsverfahren geschädigt werden, um die erzielte volle Tragfähigkeit auch erreichen zu können [7].

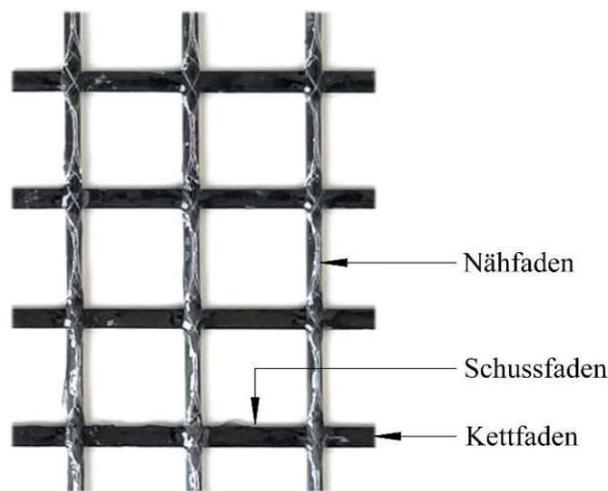


Abb. 2.10: Carbon-Gelege mit Trikot-Bindung (gegenlegig)

Den größten Anteil der verwendeten Textilbewehrungen in Betonbauteilen haben die Gelegestrukturen. Diese werden durch das Aufeinanderlegen von gestreckten, parallelen Fadensystemen mit unterschiedlicher Ausrichtung gebildet und erfüllen die oben erwähnten Kriterien am besten [9]. Bei zwei Garnscharen entsteht ein biaxiales Gelege. Werden mehrere unterschiedlich orientierte Lagen aufeinandergelegt, spricht man von einem multiaxialen Gelege. Bei Betonbewehrungen werden Gelegeformen verwendet, die an den Kreuzungspunkten formschlüssig fixiert werden [13]. Die Lagen werden dabei mit einer Maschenfadenstruktur aus Polypropylen- oder Polyethylenfasern, dem Gewirk, vernäht und miteinander verbunden. Die Garne, die in Produktionsrichtung verlaufen, werden Kettfäden genannt und die in die anderen Richtungen Schussfäden (Abb. 2.10). Der Nähfaden bzw. Wirkfaden wird entlang den Kettfäden geführt und verbindet diese an den Kreuzungspunkten mit den Schussfäden (Abb. 2.11). Je nach Bindungstechnik bestimmen die Wirkfäden die Querschnittsform der Kettfäden: Die Trikotbindung führt zu einem flachen, die Fransenbindung zu einem runden Querschnitt [20].

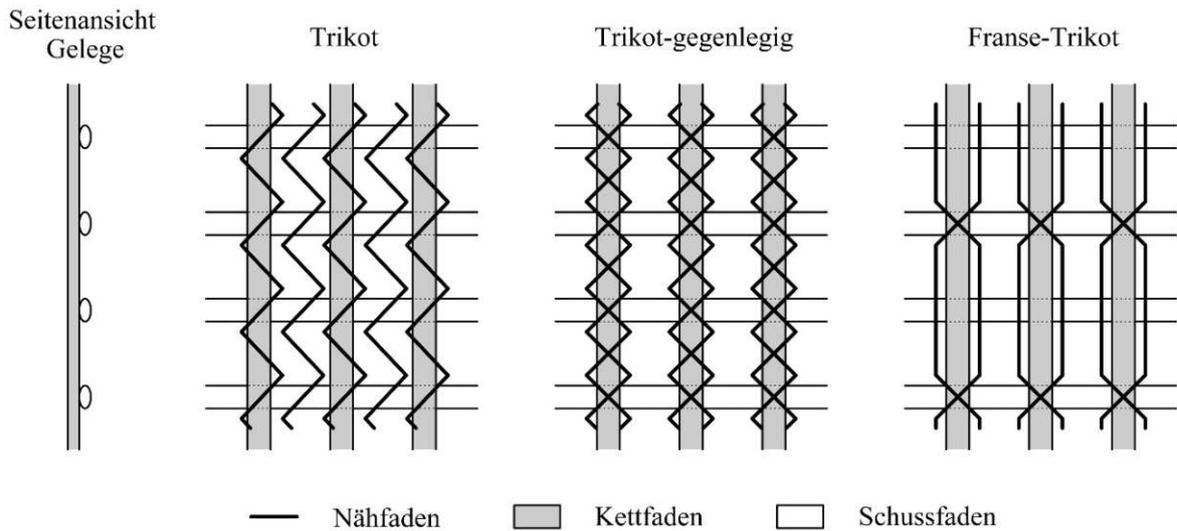


Abb. 2.11: Bindungsarten für Gelege (in Anlehnung an [20])

Des Weiteren werden die Kriterien an Betonbewehrungen auch durch Textilien erfüllt, die mittels speziellen Webtechniken hergestellt werden. Das daraus entstehende Flächengebilde, das Gewebe, wird aus sich rechtwinklig kreuzenden parallelen Fadensystemen, den Kett- und Schussfäden gebildet. Diese werden an den Kreuzungspunkten kraftschlüssig miteinander verbunden, in dem die Kettfäden abwechselnd über und unter den Schussfäden verlaufen (Abb. 2.12) [7].

Je nachdem, wie die Garne miteinander verkreuzt werden, gibt es unterschiedliche Gewebevarianten. Als Betonbewehrung können offenmaschige Flachgewebe mit einer Dreherbindung eingesetzt werden. Diese besitzen höchstens eine Gewebelage mit mindestens zwei Kettfadensystemen, welche sich nach jeder Kreuzung des Schussfadenschaars untereinander umschlingen. Der wellige Verlauf der Kettfäden kann dadurch verringert werden, in dem zwei Garne mit unterschiedlichen Dicken eingebaut werden. Dabei übernimmt das stärkere Garn die Funktion der Bewehrung in Querrichtung und das andere Garn die Rolle des Bindefadens. Textilien mit Drehergeweben kommen für Armierungen von Verputzen erfolgreich zum Einsatz.

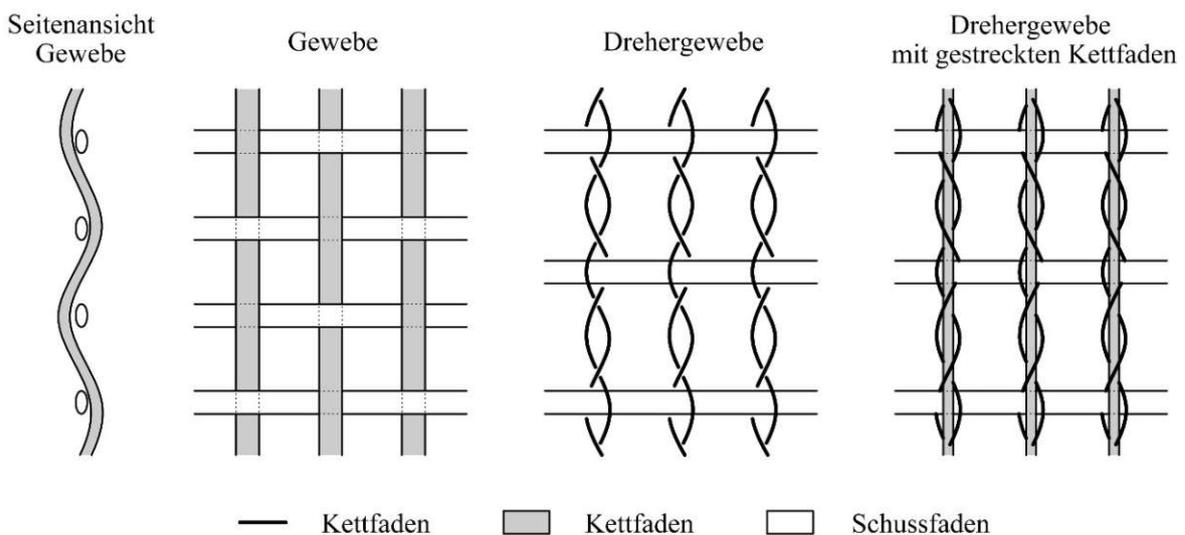


Abb. 2.12: Bindungsarten für Gelege (in Anlehnung an [20])

Der Nachteil von gewöhnlichen Geweben sind die sich ondulierenden Fäden. Es lassen sich keine vollständig gestreckten Fadenlagen ermöglichen, wie es bei Gelegen der Fall ist. Daher

erfordern Gewebe hohe strukturelle Dehnungen, bis sie die Zugkräfte im Beton aufnehmen können. Neben den herkömmlichen Gewebearten existieren auch spezielle Varianten mit gestreckt eingearbeiteten Kettfäden. Hier werden die Kettfäden durch zusätzlich umwickelte Bindefäden mit den Schussfäden verbunden. Gewebestrukturen haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu Gelegen maschengerecht gebildet werden. Das bedeutet, dass die Fäden bei der Verarbeitung nicht angenäht bzw. angestochen werden und es somit zu keiner Schädigung der Fasern kommt [9].

Im Anschluss zu den textilen Flächenbildungsverfahren ist für die meisten Anwendungen eine Strukturverfestigung durch die bereits beschriebenen Beschichtungen bzw. Imprägnierungen (Kapitel 2.2.6) notwendig. Dadurch werden nicht nur die Bindungen der Textilien dauerhaft fixiert, sondern auch die Verbundeigenschaften der Fasern verbessert [10].

2.3 Beton

Durch die Einführung von neuartigen Bewehrungen aus Textilien, werden neue Ansprüche an die Betontechnologie gestellt. Für den Verbundwerkstoff Textilbeton kommt vorrangig eine feinkörnige Betonmatrix, der sogenannte Feinbeton oder Feinkornbeton zur Anwendung. Es handelt sich dabei um einen Beton mit einem Größtkorn von maximal 4mm.

Die Feinbetonmatrix hat die Aufgabe die textile Bewehrung kraftschlüssig und dauerhaft einzuschließen und erreicht aufgrund ihrer Zusammensetzung die Festigkeiten von hochfestem Beton. In Kombination mit den Hochleistungstextilien resultiert daraus ein Hochleistungswerkstoff. Im Folgenden wird die Literatur zu Feinbeton zusammengefasst.

2.3.1 Anforderungen

Der Beton muss bestimmte Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit, der chemischen Kompatibilität, der Rheologie und des Ansteifverhaltens des Frischbetons erfüllen, um mit textilen Bewehrungen verträglich zu sein. Zudem muss der Beton besondere Verbundeigenschaften aufweisen und hinreichende Festigkeiten besitzen [23].

Für einen guten Verbund zwischen Bewehrung und Beton ist eine andere Bindemittel- und Feinkornzusammensetzung in der Betonrezeptur erforderlich als beim Stahlbetonbau. Dabei ist eine kompakte Ummantelung der Textilbewehrung durch die Betonmatrix und im Falle von nicht imprägnierten Garnen eine tiefe Durchdringung der Filamentgarne durch den Zementleim zu gewährleisten. Gleichzeitig ist aufgrund der Gitterweite des Textils und der erforderlichen Betondeckung die Kornzusammensetzung anzupassen [9].

Je nach Anwendung des Textilbetons gibt es unterschiedliche Herstellungsmöglichkeiten, die verschiedene Anforderungen an den Beton stellen. Dabei soll die Konsistenz des Frischbetons zwischen weichem und fließfähigem Bereich variierbar sein. Während bei Verstärkungsschichten aus Textilbeton bei bestehenden Bauteilen spritzfähiger Beton mit guter Klebefähigkeit erwünscht ist, bevorzugt man bei neuen, filigranen Bauteilen eine fließfähige Rezeptur. Beim Einbau an bestehenden, vertikalen Flächen muss der Frischbeton ausreichend steif sein, damit er haften kann. Zudem muss der Feinbeton für das Verarbeiten mit üblichen Baumaschinen geeignet sein [23].

Der hohe Bindemittelanteil im Feinbeton kann im Gegensatz zum konventionellen Beton zu erhöhten Kriech- und Schwindmaßen führen und muss daher beachtet werden. Auch aufgrund der Exposition des Betonbauteils entstehen je nach Nutzung zusätzliche Ansprüche, die zu berücksichtigen sind. Zusammenfassend werden folgende Anforderungen an den Feinbeton gestellt:

- Beschränkung der Konzentration der Alkaliionen
- Abstimmung der Konsistenz auf das Herstellverfahren
- Gute Umhüllung und Durchdringung des Textils
- Gute Verbundeigenschaften
- Hohe Festigkeit

2.3.2 Betonrezeptur

Die Betonrezeptur wird unter Berücksichtigung der Verarbeitbarkeit, Dauerhaftigkeit und mechanischer Eigenschaften zusammengesetzt, welche wiederum von der Verwendung des Betons abhängen. Dabei ist die Kornzusammensetzung das wichtigste Merkmal. Aus den Abmessungen der Bauteilgeometrie und der Bewehrung ergibt sich der Durchmesser des Größtkorns. Da es sich

bei Textilbeton um Bauteile mit sehr schlanken Dimensionen handelt und sich die Gitterweiten und Durchmesser der Textilbewehrungen im Millimeterbereich befinden, muss die Kornverteilung dementsprechend angepasst werden. Außerdem werden geringe Betondeckungen und Bewehrungslagenabstände angestrebt. Die kleinste Bauteilabmessung muss mindestens dem dreifachen Größtkorndurchmesser entsprechen [10]. Eine weitere Regel besagt, dass der Durchmesser des Größtkorns auf maximal $1/5$ des minimalen Gitterabstands bzw. $1/3$ der Öffnungsweite zwischen den Verstärkungsfäden begrenzt werden sollte. Dies entspricht bei schlanken Bauteilen mit Abmessungen bis zu wenigen Zentimetern einem Größtkorn von zirka 1 bis 4 Millimeter [23]. In Abbildung 2.13 ist das Verhältnis zwischen Größtkorn, Gitterweite und Garnabmessung anhand einer praktischen Anwendung von Textilbeton erkennbar.



Abb. 2.13: In Feinbeton eingebettete Textilbewehrung aus Carbon

Aufgrund der großen Benetzungsoberfläche des feinen Zuschlagstoffs ist ein hoher Bindemittelanteil erforderlich, was wiederum mit hohen Betonfestigkeiten einhergeht. Bei für Textilbeton geeigneten Feinbetonen liegt das Massenverhältnis von Zuschlag zu Bindemittel zwischen etwa 1,3:1 und 1:1. Die Zusammensetzung des Bindemittels hängt von den expositions- und verarbeitungsbedingten Anforderungen sowie vom Faserstoff ab. Je nach Faserstoff muss ein geeignetes Bindemittel gewählt werden. Bei alkaliresistenten Glasfasern werden ausschließlich Zemente der Klasse CEM II (Compositzemente) und CEM III (Hochofenzement) verwendet, weil sie geringe Mengen an Portlandklinker aufweisen. Portlandklinker führt im Beton zu einer hohen Alkalität und somit zur Korrosion von Glasfasern [23]. Im Stahlbetonbau hingegen schützt das alkalische Milieu des Zementsteins die Stahlbewehrung vor Korrosion. Carbonfasern sind alkaliresistent und bedürfen keiner speziellen Maßnahme. Jedoch sollte hier aus ökologischen Gründen auch auf reinen Portlandklinkerzement (CEM I) verzichtet werden.

Puzzolanische Zusatzstoffe wie Mikrosilika und Flugasche werden der Betonrezeptur beigegeben, um die mikroskopisch kleinen Hohlräume zu befüllen und das Korngefüge zu verdichten. Außerdem bewirken die Puzzolane eine vermehrte Bildung von Calciumsilikathydrat-Phasen, welche tief in die Hohlräume der Filamentbündel eindringen können und für einen guten Verbund sorgen. Höhere Anteile an Mikrosilika und Flugasche können das von Portlandzement freigesetzte Portlandit binden und zu einer Senkung der Alkalität sorgen. Außerdem verbessern Puzzolane die Verarbeitungseigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons [23].

Eine weitere Maßnahme den Porenanteil zu senken ist es, den Wassergehalt zu verringern. Das Wasser wird bei Hochleistungsbetonen bis auf die für die Hydratation benötigte Menge beschränkt, weil ein Wasserüberschuss nach dem Verdunsten Poren hinterlässt und somit die Festigkeit vermindern würde. Die Wasser-Bindemittel-Werte liegen gewöhnlich zwischen 0,3 und 0,4. Dies führt zu einem viskosen Verhalten des Frischbetons und verschlechtert die Verarbeitung. Je nach Verarbeitungsart (siehe Kapitel 2.3.3) muss der einzubringende Beton eine bestimmte Konsistenz besitzen. Um diese zu erhalten, kommen bei Feinbetonrezepturen geeignete Fließmittel zum Einsatz. Hier haben sich Hochleistungsfließmittel auf Basis von Naphtalinsulfonat und Polycarboxylatheter bewährt [9]. Aufgrund der filigranen Bauweise mit Textilbeton ist der Einsatz von Rüttlern zur Verdichtung des Frischbetons nur begrenzt möglich. Daher müssen je nach Anwendungsfall Betonrezepturen verwendet werden, die ohne das Zuführen von hoher Verdichtungsenergie eine ausreichende Verdichtung gewährleisten. Obwohl Feinbetone hohe Festigkeiten besitzen und zu hochfesten Betonen gezählt werden, liegt der Elastizitätsmodul unter den für Normalbetone ermittelten Werten. Dies ist auf den hohen Bindemittelgehalt zurückzuführen [10].

Tab. 2.2: Beispiel für eine Feinbetonrezeptur aus dem Sonderforschungsbereich 528 [23]

Bestandteile	Einheit	Wert
Wasser	l/m ³	214,6
Fließmittel FM30, BASF	l/m ³	10,5
Zement CEM III/B 32,5	kg/m ³	628,0
Mikrosilika	kg/m ³	100,5
Flugasche	kg/m ³	265,6
Gesteinskörnung Sand 0-1	kg/m ³	942,0
Wasserbindemittelwert	-	0,33

Tab. 2.3: Mechanische Eigenschaften der Beispielrezeptur aus Tab. 2.2 [23]

Eigenschaft	Einheit	Wert
Druckfestigkeit	N/mm ²	76
Biegezugfestigkeit	N/mm ²	7,1
Elastizitätsmodul	N/mm ²	28500
Rohdichte	kg/dm ³	2,17

2.3.3 Herstellung

Es gibt für die Herstellung von Textilbeton mehrere Verfahren, die je nach Anwendungsfall unterschiedlich gut geeignet sind. Die größtenteils aus dem Stahlbetonbau bekannten Applikationen wurden unter Beachtung der speziellen Eigenschaften der beiden Komponenten des Verbundwerkstoffes, Textilbewehrung und Feinkornbeton, modifiziert. Im Folgenden werden die in [4] genannten Produktionsverfahren nach BRAMESHUBER ET AL. zusammengefasst:

- Das Laminierverfahren eignet sich besonders gut für schlanke flächige Bauteile. Es handelt sich dabei um die schlichteste Herstellungsmethode und wird von Hand ausgeführt. Es werden dünne Schichten aus Feinbeton und Textil abwechselnd lagenweise in eine Schalung oder auf den Untergrund eingebaut, bis die gewünschte Bauteilstärke erreicht wird. Dabei wird Beton mit einer Kelle händisch verteilt und unmittelbar danach die Textilbewehrung leicht hineingedrückt. Durch die Schichtstärken der Betonlagen kann die Position der Bewehrungslagen eingestellt werden, wobei nur zweidimensionale Bewehrungsstrukturen verlegt werden. Der Bewehrungsgrad kann beim Verlegen beliebig variiert werden. Es wird eine plastische Konsistenz für das Laminieren benötigt [10].
- Beim Spritzverfahren wird bei der Herstellung von Textilbeton das Nassspritzen bevorzugt. Dabei werden die Betonbestandteile in einem Mischer verrührt und anschließend durch einen Schlauch an die Spritzdüse gepumpt. Beim Spritzvorgang wird die fertige Feinbetonmischung an der Spritzdüse mit Treibluft beschleunigt und im gewünschten Bereich aufgetragen. Beim Spritzen ist eine Konsistenz notwendig, die sowohl das Pumpen und Spritzen des Betons als auch das Haften an vertikalen Flächen zulässt. Deshalb sind beim Spritzverfahren eine höhere Thixotropie und Klebrigkeit des Betons gefragt. Ähnlich wie beim Laminieren wird lagenweise betoniert und bewehrt. Es wird zunächst eine Lage Spritzbeton aufgetragen und im nächsten Arbeitsschritt die Bewehrung hineingedrückt. Da die Textilien empfindlich auf Querdruck sind, muss im Vergleich zu Stahlbeton mit einem geringeren Spritzdruck gearbeitet werden, um Schäden zu vermeiden. Außerdem soll dadurch verhindert werden, dass die gewünschte Position der Bewehrung gestört wird. Ein weiterer Vorteil der niedrigen Aufprallenergie ist der geringe Rückprallanteil des Spritzgutes. Dies führt zu einer Verminderung des Materialverbrauchs. Trotz der niedrigen Spritzenergie kommt es durch die spezielle Zusammensetzung des Feinbetons zu einem homogenen und verdichteten Betongefüge [9].
- Beim Gießverfahren wird, wie beim konventionellen Stahlbetonbau, die Bewehrung vor dem Vergießen in einer Schalung eingebracht, wo die Bewehrung unbedingt in der Lage gesichert werden muss. Im Anschluss wird in einem Arbeitsgang der Feinbeton vergossen. Damit die Schalung vollständig betoniert werden kann, sind fließ- oder injizierfähige Konsistenzen notwendig. Das Gießen eignet sich generell für die stehende Herstellung eckiger dreidimensionaler Strukturen, wie z.B. Hohlkastenquerschnitte, sowie für freie Formen. Dieses Verfahren erfordert aufwendige und formstabile Schalungen, die entsprechend dicht ausgeführt werden müssen [4].
- Das Schleuderverfahren wird durchgeführt, indem die Schalung mit einem fließfähigen Beton gefüllt und anschließend um die Längsachse rotiert wird. Dabei wird der Beton durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit der Schleuderbank zum Schalungsrand geschleudert und dort verdichtet, wodurch sich in der Mitte des Bauteilquerschnitts ein Hohlraum bildet. Daher eignet sich dieses Verfahren ideal für die Herstellung von Rohren, Masten und Pfählen. Es gibt zwei Möglichkeiten das Bewehrungstextil zu verlegen. Da Textilien mit geringer Steifigkeit während dem Schleudern wenig lagestabil sind, muss der Schleuderprozess angehalten werden, um im Anschluss die Bewehrung einlegen zu können. Schleuderbetonbauteile

mit steiferen Textilien können hingegen in einem Arbeitsschritt hergestellt werden, wenn die Lage der Bewehrung mit Abstandhaltern ausreichend gesichert werden kann [4].

2.4 Tragverhalten

Das Tragverhalten von Verbundwerkstoffen lässt sich nicht vollständig aus dem Verhalten der einzelnen Werkstoffkomponenten beschreiben, da der Verbund zwischen Beton und Bewehrung das Materialverhalten entscheidend beeinflusst. Bis auf die plastischen Verformungen der Bewehrung ähneln die Verformungseigenschaften von Textilbeton unter Zugbeanspruchung denen von Stahlbeton. Da die eingesetzten Textilien kein plastisches Arbeitsvermögen besitzen, kommt es hier nicht zum Fließen wie bei einer Stahlbewehrung, sondern zu einem spröden Versagen - allerdings mit einer ausreichenden Vorankündigung. JESSE beschreibt in [8] die Arbeitslinie (Spannungs-Dehnungsverhältnis) von Textilbeton unter einer einaxialen Zugbeanspruchung anhand von drei Zustands-Bereichen (Abb. 2.14) mit unterschiedlichen Eigenschaften:

- Zustand I

Hier weist der Betonquerschnitt keine Risse unter der auftretenden Belastung auf und verhält sich linear-elastisch. Die Steifigkeit hängt von den beiden Materialien des Verbundwerkstoffs ab, wobei die Bewehrung aufgrund des geringen Flächenanteils wenig dazu beiträgt. Die Lasten werden daher überwiegend vom Beton aufgenommen. Mit dem Erreichen der Zugfestigkeit des Betons geht der Verbundwerkstoff in den Zustand II über.

- Zustand IIa

Dieser Zustand liegt vor, wenn mit steigender Belastung die Betonzugfestigkeit überschritten wird und es im Betonquerschnitt zum Erstriss kommt. Im Riss wird die Last über die Bewehrung aufgenommen. Wenn bei weiterer Erhöhung der Belastung zusätzliche Kräfte in den Beton eingeleitet werden, bis wieder die Betonzugfestigkeit überschritten ist, entstehen neue Risse. Die Bedingung dabei ist, dass die Länge zwischen zwei Rissen ausreicht, um über den Verbund zwischen Textil und Beton, eine ausreichende Kraftübertragung auf den Beton zu gewährleisten. Die Spannungs-Dehnungslinie verläuft im Zustand IIa annähernd horizontal. Die Rissbildung dauert so lange an, bis der Beton durch die aufgetretenen Risse in so viele Abschnitte unterteilt wird, dass die Rissabstände keine weitere Kraftübertragung mehr ermöglichen, die die Betonzugfestigkeit überschreiten würden. Rissabstände und Rissbreiten hängen von der Bewehrung und deren Verbundeigenschaften ab [19].

- Zustand IIb

Dies ist der Zustand, in dem das fertige Rissbild eingestellt ist und keine Risse mehr entstehen können. Mit steigender Belastung öffnen sich die bestehenden Risse und es dehnt sich nur noch die Bewehrung. Die Arbeitslinie verläuft bis zu einem spröden Bruch annähernd linear und theoretisch parallel zur Arbeitslinie des verwendeten Textils.

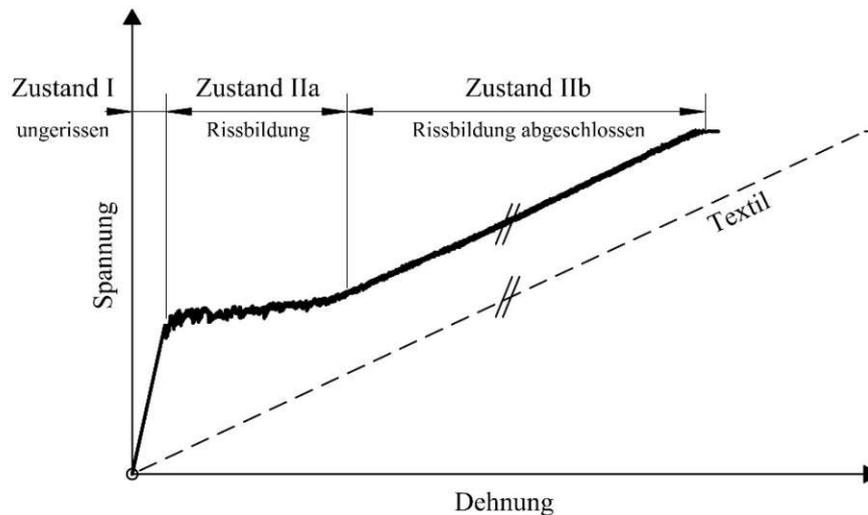


Abb. 2.14: Arbeitslinie von Textilbeton unter einaxialer Zugbeanspruchung (in Anlehnung an [20])

Untersuchungen in [8] haben gezeigt, dass die Zugfestigkeit der Textilbewehrung, anders als bei der Stahlbewehrung, im Zustand IIb nicht zur Gänze ausgenutzt wird. Dies wird auf die Inhomogenität der Spannungsverteilung im Faserbündel zurückgeführt, da die äußeren Fasern aufgrund des höheren Verbunds stärker gedehnt werden als die Inneren. Daher kommt es im Zustand IIa teilweise zum vorzeitigen Versagen der äußeren Textilfaser. Weitere Gründe für den Festigkeitsverlust werden Faserschäden während der Erzeugung und die Oberflächenbeschaffenheit genannt. Mit zunehmender Anzahl an Fasern in einem Bündel verstärkt sich dieser Effekt.

Auch wenn die Bewehrung kein Fließvermögen besitzt und es zu einem Sprödbbruch kommt, ist ein vorzeitiges Erkennen des Bauteilversagens aufgrund der ausreichenden Verformungsfähigkeit von Textilbeton möglich.

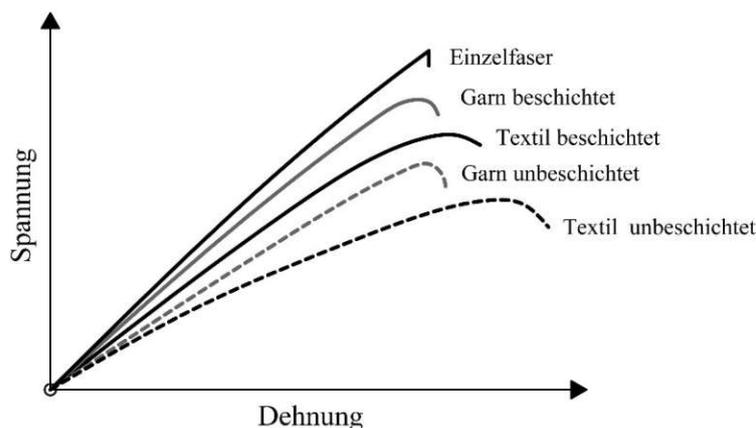


Abb. 2.15: Arbeitslinie von Textilbeton unter einaxialer Zugbeanspruchung (in Anlehnung an [20])

Die Tragfähigkeit einer textilen Verstärkung wird erheblich durch das Fasermaterial, dem Grad der maschinellen Verarbeitung sowie durch die Beschichtung bzw. Imprägnierung beeinflusst. Abbildung 2.15 zeigt, dass bei einem Vergleich von Einzelfaser, Garn und Textil die volle Zugfestigkeit der Einzelfaser in einer textilen Struktur nicht zur Gänze ausgenutzt werden kann [7]. Die Festigkeit eines Einzelfilaments ist höher als die eines Filamentgarns, die wiederum höher ist als die des Textils. Da die Zugfestigkeit auf die gesamte Querschnittsfläche des Filamentbündels bezogen wird und die Einzelfilamente aufeinanderfolgend versagen, ist die Garnfestigkeit immer geringer als die Festigkeit eines Einzelfilaments im Bündel.

Weitere Gründe für die Festigkeitsverluste sind die herstellungsbedingten Schädigungen an den Fasern während der Textilerzeugung (Filamentbrüche, Garnabrieb, Querpressungen etc.) und das Verbundverhalten der Filamentbündel im Beton. Eine Imprägnierung der Textilien führt, wie in Kapitel 2.2.6 beschrieben zu einer Verbesserung der Verbundeigenschaften der Fasern im Garn, so dass die Faserausnutzung erhöht wird. Die Tragfähigkeit von imprägnierten Textilien ist somit deutlich höher als bei nicht imprägnierten Textilien.

2.5 Verbundverhalten

Sobald unter Zugbeanspruchung die Betonmatrix reißt, kommt es aufgrund des Verbundes zur Übernahme der Zugspannungen durch die Bewehrung. Da es sich bei Textilien nicht um homogene Bewehrungsquerschnitte handelt, weist das Verbundverhalten komplexe Eigenschaften auf, welche von vielen Einflussfaktoren bestimmt wird. In diesem Kapitel wird auf die wesentlichen Merkmale eingegangen. Es werden grundsätzlich drei Arten von Verbundmechanismen unterschieden:

- Haftverbund

Zwischen der Bewehrung und der Matrix besteht aufgrund von Adhäsionskräften ein elastischer Haftverbund. Dieser ist bis zum Auftreten von Relativverschiebungen zwischen den beiden Verbundwerkstoffen wirksam.

- Scherverbund

Durch Profilierung der Bewehrungsoberfläche kann ein Formschluss bzw. eine Verzahnung zwischen Matrix und Bewehrung erzeugt werden, die den Scherverbund ermöglicht. Im Vergleich zu Stahlbewehrungen besitzen Textilbewehrungen eine glatte Oberfläche und können nur unter bestimmten Umständen einen Formschluss gewährleisten. Durch die Imprägnierung von Textilbewehrungen mit steifen Materialien und Profilierung der Bewehrungsoberfläche kann ähnlich zum Stahlbetonbau ein formschlüssiger Verbund hergestellt und das Verbundverhalten verbessert werden [31].

- Reibungsverbund

Nach Überschreitung der Haftverbundspannungen bewegen sich Matrix und Bewehrung im gerissenen Zustand gegeneinander. Es kommt zu Relativverschiebungen bzw. zum Schlupf, so dass der Reibungsverbund wirksam wird. Außerdem bildet sich innerhalb der Textilbewehrung ein bestimmter Grenzbereich, an der sich Teile des Faserbündels gegeneinander bewegen [20]. Dieses Schlupfphänomen wird im Folgenden näher beschrieben.

Das Verbundverhalten von ungetränkter, textiler Bewehrung hängt maßgeblich vom Eindringen des Betons in das Faserbündel ab, da die einzelnen Elemente in einem Textilfaserbündel sehr unterschiedlich mit der umgebenden Betonmatrix verbunden sind. Es spielt aber nicht nur das Verbundverhalten der Bewehrung zum Beton eine bedeutende Rolle, sondern auch der Verbund innerhalb der Bewehrung. Die Fasern am Rand des Bündelquerschnitts besitzen eine andere Verbundwirkung als die Fasern im Inneren.

Um das Verbundverhalten vereinfacht beschreiben zu können, unterscheiden OHNO und HANNANT in [28] in Rand- und Kernfaser. Während die Randfasern einen direkten Verbund zum Beton haben, besitzen die Kernfasern nur einen Kontakt zueinander und zu den Randfasern. Daher beteiligen sich die Kernfasern an der Lastaufnahme bei Rissbildung in der Betonmatrix lediglich über einen inneren Reibungsverbund, welcher aufgrund der glatten Faseroberfläche geringer ausfällt als der äußere Reibungsverbund zwischen Randfaser und Betonmatrix. Daraus resultieren größere Dehnungen bzw. Spannungen in den Fasern am Rand als im Bündelinneren. Diese

versagen somit früher und leiten den Bruch des gesamten Faserbündels ein. Die Zugfestigkeit der Faser im Bündel kann deshalb nicht maximal ausgenutzt werden.

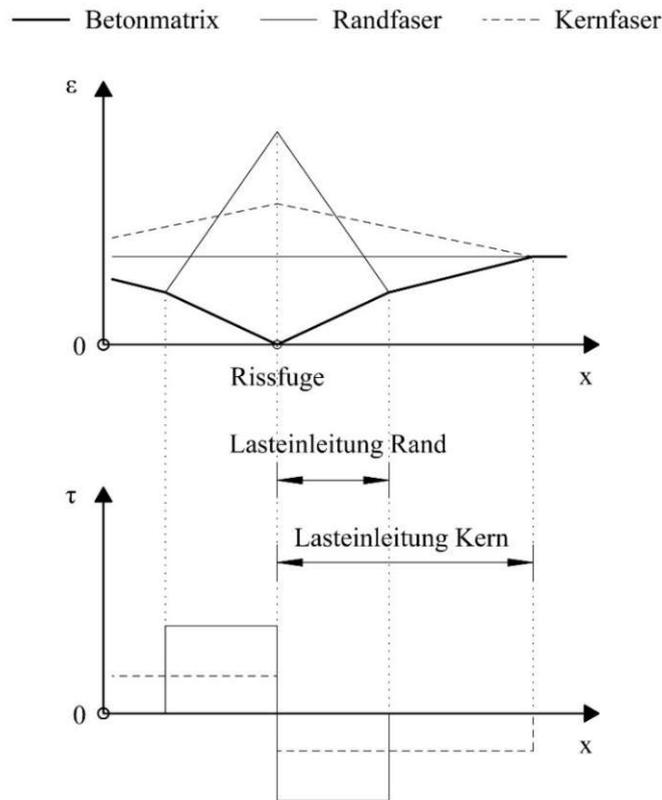


Abb. 2.16: Verlauf der Dehnungen (oben) und Verbundspannungen (unten) bezogen auf die Bauteilachse (in Anlehnung an [20])

Die Dehnungen im Verbundquerschnitt nach der ersten Rissbildung können Abbildung 2.16 entnommen werden. Die Lasteinleitungslänge zum Übertragen der Verbundspannungen in der Rissfuge sind bei Randfasern kürzer als bei Kernfasern, weil letztere einen schlechteren Verbund aufweisen. Am Ende der Lasteinleitungslängen der Kernfasern besitzen alle Fasern und die Betonmatrix dieselben Dehnungen. Mit zunehmender Faserfeinheit bzw. Bündelquerschnittsfläche verschlechtert sich die Festigkeit der Textilbewehrung. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Umfang zu Fläche, gibt es anteilmäßig mehr Kernfasern als Randfasern im Bündel. Um dem Festigkeitsverlust entgegenzuwirken, werden die Faserbündel in der Regel imprägniert (siehe Kapitel 2.2.6). Dafür kommen steife Polymere in Anwendung, zum Beispiel Epoxidharz. Dadurch kommt es zu einer Homogenisierung des Bündelquerschnitts, was eine bessere Aktivierung aller Fasern ermöglicht und zur Strukturstabilisierung des Textils beiträgt.

3 Grundlagen der Dämpfung

3.1 Einleitung

Für das bessere Verständnis der vorliegenden Arbeit werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Dämpfung von schwingfähigen Systemen angegeben. Die genauen Hintergründe der Wirkungsweise der Dämpfung sind vielfältig und nicht exakt erfasst. Es handelt sich überwiegend um Reibungsvorgänge im Werkstoff, bei denen Wärme erzeugt und irreversibel abgeführt wird. Die Dämpfungsmechanismen können anhand geschickt gewählter Modelle und Parameter realitätsnah beschrieben werden. Um das mechanische Verhalten eines Systems quantitativ beschreiben zu können ist man aber angewiesen experimentelle Versuche durchzuführen.

Für die Untersuchung des Dämpfungsverhaltens eines Systems wird in der Regel das Dämpfungsmaß bzw. der Dämpfungswert ζ herangezogen. Dieser ist die am häufigsten verwendete Rechengröße, die als repräsentativ für die meist nicht genauer bekannten Dämpfungsmechanismen gilt. Das Dämpfungsmaß ζ ist definiert als das Verhältnis der während eines vollständigen Schwingungszyklus dissipierten Energie zur maximalen Formänderungsenergie bzw. kinetischen und potenziellen Energie des Systems. Es handelt sich dabei um eine dimensionslose Kenngröße, die sich aufgrund des geringen Berechnungsaufwands für dynamische Versuche eignet [15]. Sofern nur eine Eigenform schwingt und eine kleine Dämpfung auftritt, kann das Dämpfungsmaß z.B. durch einen Ausschwingversuch direkt ermittelt werden. Das Dämpfungsmaß entspricht somit einem prozentuellen Anteil der Formänderungsenergie, welcher durch die Dämpfung pro Schwingungsperiode dissipiert wird.

3.1.1 Definition

Auf jedes schwingungsfähige System, welches nach einem Bewegungsvorgang zur Ruhe kommt, wirkt ein die Auslenkungen abklingen lassender Mechanismus. Dieser Vorgang wird als Dämpfung bezeichnet. Die mechanische Energie des Systems wird durch Energiedissipation so weit abgemindert, so dass die Schwingungsamplituden allmählich reduziert werden und es zum Stillstand kommt. In der VDI-RICHTLINIE 3830 [39] wird die Dämpfung als die in mechanischen Systemen irreversible Umwandlung der mechanischen Energie in andere Energieformen, hauptsächlich in thermische Energie definiert.

Die Dämpfung kann auch durch die Abgabe der Energie an ein umliegendes Medium entstehen, wenn die umgewandelte oder abgegebene Energie dem System nicht zurückgeführt wird. Wird dem mechanischen System von außen Energie eingeführt, stellt sich ein stationärer Schwingungszustand ein, bei dem ein Gleichgewicht zwischen eingepprägter und dissipierter Energie herrscht [39].

3.1.2 Dämpfungsarten

Aus physikalischer Sicht kann die Dämpfung in einem Bauteil durch verschiedene Prozesse hervorgerufen werden. Die Dämpfungsarten werden nach den Ursachen der Dämpfung unterschieden. Die gängige Unterteilung der Dämpfungsarten ist in Abb. 3.1 aufgezeigt und beinhaltet in erster Linie die innere und äußere Dämpfung. Die Energiedissipation kann sowohl vom schwingenden System selbst als auch von der Umgebung hervorgerufen werden.

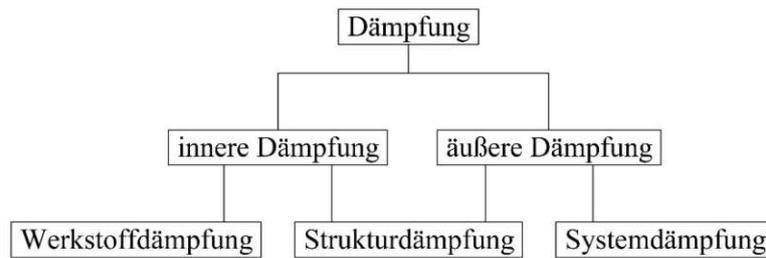


Abb. 3.1: Dämpfungsarten (in Anlehnung an [15])

Zur inneren Dämpfung gehört insbesondere die Werkstoffdämpfung bzw. Materialdämpfung. Sie ist eine durch die Verformung bewirkte Energiedissipation im Inneren eines Körpers, wobei unterschiedliche Einflüsse miteinander wirken. DIETERLE gibt in [15] folgende maßgebliche Einflussfaktoren an:

- Art des Werkstoffs
- Innerer Spannungszustand
- Aufgebrachter Spannungszustand

Bei der Materialdämpfung handelt es sich also um keine Stoffkonstante, da neben den Werkstoffkennwerten die Beanspruchung auch einen wichtigen Einfluss auf die Dämpfung hat. Mit zunehmenden Spannungsamplituden treten erhöhte plastische Verzerrungen auf, welche zu einer Steigerung der Werkstoffdämpfung führen. In Tabelle 3.1 sind die Werkstoffdämpfungswerte verschiedener Materialien aufgeführt. Zu den physikalischen Ursachen der Materialdämpfung zählen laut [39] unter anderem:

- Verformungsinduzierte Wärmeströme
- Gleitvorgänge
- Mikroplastische Verformungen

Tab. 3.1: Werkstoffdämpfung bei mittleren Schwingungsamplituden (umgerechnet aus PETERSEN [30])

Werkstoff	Dämpfungsmaß ζ
Stahlbeton, Zustand I	0,48 %
Stahlbeton, Zustand II	0,72 %
Stahl, ferritisch	0,13 %
Nadelholz	0,72 %
Glasfaserverstärkter Kunststoff	0,64 %

Die Strukturdämpfung stellt die Dämpfungsmechanismen dar, die an den Kontaktflächen von unterschiedlichen Materialien entstehen können. Die Strukturdämpfung kann innerhalb und/oder außerhalb eines Bauteils auftreten, z.B. durch Reibung bei Relativverschiebungen zwischen Stahl und Beton. Bei der Systemdämpfung wird die Schwingungsenergie außerhalb der Systemgrenzen, d.h. in Wechselwirkung mit der näheren Umgebung dissipiert, z.B. Baugrund, Lager etc. [1].

Je nach Festlegung der Systemgrenzen und Betrachtung können die verschiedenen Dämpfungsarten im untersuchten System zugeordnet werden. Wenn z.B. ein Textilbetonkörper als homogen angenommen wird, wird die Dämpfung im Verbundbereich von Textilbewehrung und Beton nicht der Strukturdämpfung, sondern der Werkstoffdämpfung zugerechnet.

Falls die Inhomogenität eines Verbundwerkstoffs berücksichtigt werden soll, werden die Werkstoffdämpfungen der einzelnen Materialien getrennt voneinander betrachtet und der Dämpfungsmechanismus an der Kontaktfläche der Strukturdämpfung zugeordnet. In der vorliegenden Arbeit werden alle Dämpfungserscheinungen innerhalb des untersuchten Textilbeton-Bauteils der Werkstoffdämpfung zugewiesen. Alle Versuchsauswertungen sind demnach auf die Werkstoffdämpfung bezogen.

3.2 Geläufige Dämpfungsmodelle

Für die meisten Werkstoffe ist es schwierig die Dämpfungseigenschaften realitätsnah mathematisch zu erfassen. Aufgrund der genannten Vielfältigkeit der Dämpfungsarten und deren Ursachen ist es erforderlich, ein passendes Dämpfungsmodell einzuführen. Folgend werden häufig verwendete Grundmodelle zur Erfassung von gedämpften Systemen behandelt.

3.2.1 Rheologische Modelle

Rheologische Modelle beschreiben das Fließ- und Verformungsverhalten eines Materials bei äußeren Einwirkungen. Bei Festkörpern handelt es sich um die plastischen Verformungen. Die Elemente von rheologischen Modellen sind masselose Federn, Dämpfer und Reibungselemente. Sie beschreiben die drei idealisierten Materialeigenschaften Elastizität, Viskosität und Plastizität. Um ein Schwingungsverhalten nachzubilden, können die rheologischen Elemente einzeln oder auch kombiniert eingesetzt werden.

Sie werden üblicherweise in Reihe oder parallel geschaltet und ergeben weitere rheologische Modelle (Abb. 3.2): Maxwell-Modell, Voigt-Kelvin-Modell etc. Diese Kombinationen verfügen somit über elastische als auch viskose Eigenschaften. Der einfache Aufbau der rheologischen Modelle ermöglicht eine anschauliche mathematische Erfassung des Schwingungsverhaltens. Je exakter das gewählte Modell die Wirklichkeit abbildet, desto zuverlässiger sind die Berechnungsergebnisse.

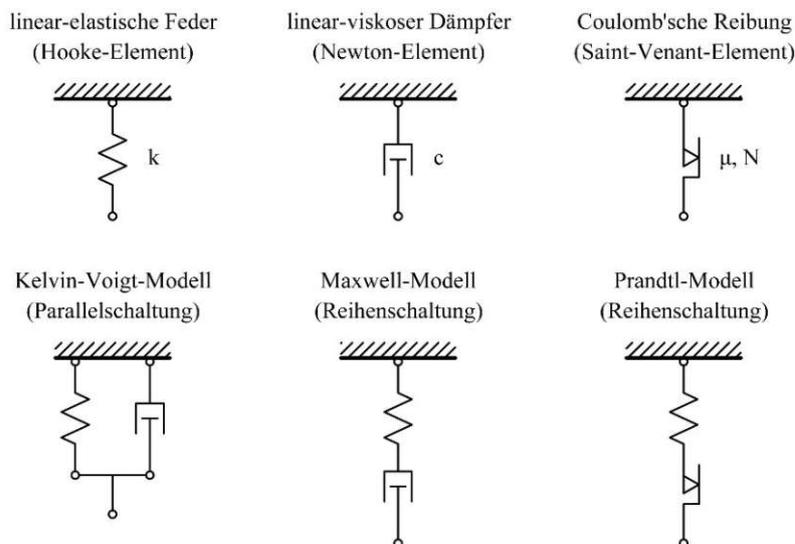


Abb. 3.2: Rheologische Elemente und Modelle (in Anlehnung an [30])

Das Dämpfungsverhalten eines Materials kann vereinfacht auf einem Kraft-Verformungs-Diagramm dargestellt werden (Abb. 3.3). Bei idealem elastischem Verhalten (Hook-Modell bzw. linear-elastische Feder), ergibt sich für eine harmonische Belastung des Werkstoffs eine lineare Kennlinie. Das bedeutet, dass zwischen Kraft und Verschiebung eine lineare Beziehung besteht. Beim Hook-Modell liegen Kraft und Verformung in Phase, d.h. es gibt keine zeitliche Verschiebung zwischen den Maxima von Kraft und Verformung. Die Energie, die bei der Belastung des Systems zugeführt wird, wird bei Entlastung vollständig zurückgewonnen. Beim viskosen Verhalten (Newton-Modell) hingegen erhält man eine Kurve. Die geschlossene Kurve im Falle einer zyklischen Belastung und Verschiebung wird Hysterese genannt und stellt eine Ellipse dar. Die Hysterese oder auch Nachwirkung beschreibt die Phasenverschiebung von Kraft und Verformung, d.h. die Verschiebung läuft der Belastung hinterher.

Die von der Hysterese eingeschlossene Fläche ist die Dämpfungsarbeit pro Schwingungsperiode. Die viskose Dämpfung ist eine Näherung, da bei realen Werkstoffen die Hysterese von der elliptischen Form abweicht. Je stärker ein Material dämpft, desto höher ist die Abweichung. Schwach gedämpfte Systeme haben hingegen eine sehr schmale Hysterese [25].

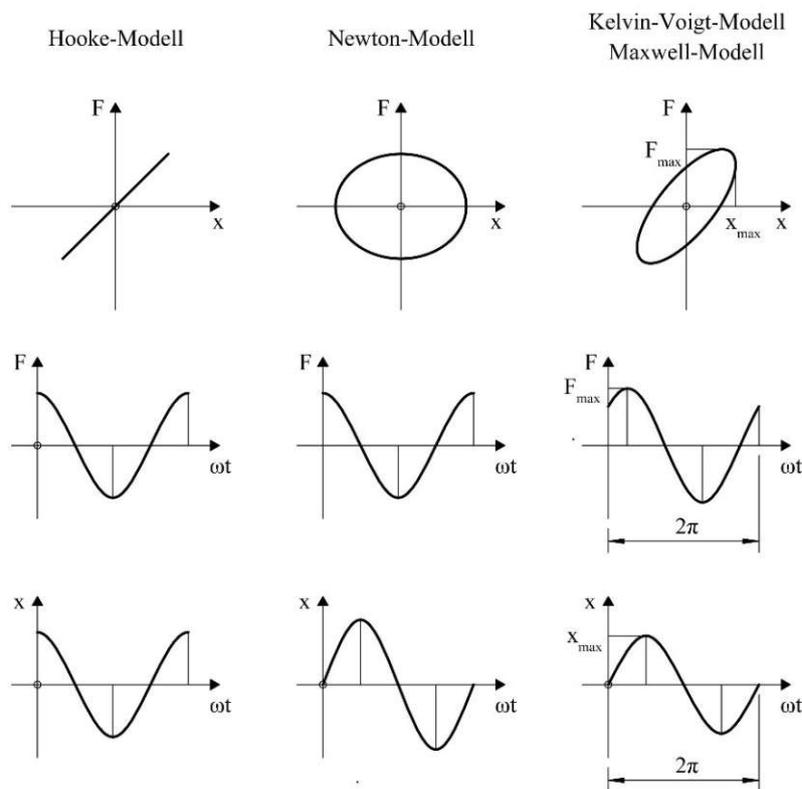


Abb. 3.3: Hysterese und Phasenverschiebung der rheologischen Modellen (in Anlehnung an [25], [30])

3.2.2 Viskose Dämpfung

Die viskose, d.h. zur Geschwindigkeit proportionale Dämpfung folgt einem linearen Dämpfungsgesetz und somit der Dämpfung durch dynamische Hysterese. Werkstoffe mit dynamischer Hysterese folgen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, die vorwiegend durch lineare Differentialgleichungen beschrieben werden, welche Spannungen, Dehnungen und die zeitlichen Ableitungen derselben enthalten [15]. Je höher die Viskosität ist, desto steifer ist ein schwingungsfähiges Modell.

Durch den Ansatz der viskosen Dämpfung wird die analytische Lösung von dynamischen Berechnungen stark vereinfacht. Daher wird bei Baukonstruktionen meistens von einer viskosen Dämpfung ausgegangen. Der lineare Dämpfungsansatz gilt so lange keine hohe Dämpfung vorhanden ist [21]. Das viskose Dämpfungs-Modell wird besonders bei der Energiedissipation durch flüssige Reibung im Werkstoff eingesetzt. Materialien wie z.B. Kunststoffe, Beton etc. weisen teilweise linear viskoelastische Eigenschaften auf. Im Beton geschieht die flüssige Reibung durch molekulare Diffusion des im Zementgel absorbierten Wassers [15]. Sofern für das dämpfende Modell das linear-viskose Gesetz gilt (Newton-Modell), hat die resultierende Hysterese stets eine elliptische Form.

3.2.3 Hysteresis-Dämpfung

Das Modell der Hysteresis-Dämpfung dient in erster Linie dazu, die Plastifizierungseffekte des Werkstoffs zu berücksichtigen, die durch irreversible Verformungen in Erscheinung treten. Dabei entsteht eine Energiedissipation durch innere Reibung. Der Beitrag der Plastifizierungseffekte zur Materialdämpfung wird erst bei hohen Beanspruchungen relevant, da das nichtlineare Materialverhalten erst hier maßgeblich wird. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Materialien mit Hysteresis-Dämpfung sind überwiegend nichtlinear und unabhängig von der zeitlichen Ableitung der Spannungen und Dehnungen. Der Verlust an Schwingungsenergie beruht auf der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung [15]. Um den hohen Rechenaufwand einer nichtlinearen Analyse zu vermeiden, kann bei einer vorhandenen schwachen Dämpfung eine Linearisierung vorgenommen werden. Die Dämpfung des nicht linearen Systems wird durch eine äquivalente viskose Dämpfung ersetzt. Das Ersatzsystem muss dieselbe Periode und Energiedissipation des ursprünglichen Systems aufweisen. Dadurch wird die tatsächliche Hysterese durch eine elliptische Hysterese approximiert, vorausgesetzt, dass die Nichtlinearität und die Dämpfung gering sind [30].

3.2.4 Coulomb-Dämpfung

Mit der Coulomb-Dämpfung kann die trockene Reibung in einem Bauteil modelliert werden. Trockene Reibung entsteht, wenn Gleitbewegungen zwischen benachbarten Bestandteilen hervorgerufen werden. Die Reibung wirkt u.a. zwischen Bauteilrissen oder Grundstoffen im Verbund. Die Energiedissipation erfolgt durch eine der Bewegungsrichtung entgegengesetzte Reibungskraft, die entsteht, wenn ein Körper über eine trockene Fläche bewegt wird. Die Reibungskraft stellt die schwingungshemmende Dämpfungskraft dar. Sie hängt von der Normalkraft, der Gleitfläche und vom Reibungskoeffizienten zwischen den bewegten Körpern ab. Die daraus aufgestellte Schwingungsgleichung ist nichtlinear. Die Coulomb-Dämpfung wird erst wirksam, wenn die einwirkenden Kräfte die an der Gleitfläche entstehenden Haftreibungskräfte überschreiten und die Flächen aneinander bewegt werden. Dabei wird mechanische Energie in Wärme umgewandelt. Beim Ausschlagen des Systems nehmen die Amplituden bei konstanter Reibungskraft um den gleichen Wert ab. Somit verläuft die Einhüllende im Gegensatz zur viskosen Dämpfung linear und nicht exponentiell.

3.3 Dämpfungsverhalten von Stahlbeton

3.3.1 Einleitung

Vorkenntnisse über das Dämpfungsverhalten von Stahlbeton sind aufgrund der zahlreichen Gemeinsamkeiten eine wichtige Voraussetzung für die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten textilbewehrte Betonbauteile. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse über die dynamischen Eigenschaften von Stahlbeton von DIETERLE [15] zusammengefasst. Diese umfangreichen Arbeiten gewähren einen guten Einblick in das dynamische Verhalten von schwingenden Stahlbetonbauteilen. Es wurden diesbezüglich auch einige frühere Versuche durchgeführt. DIETERLE verweist in [15] auf Arbeiten von z.B. BOCK, EHLERS und PENZIEN und deutet auf die weite Streuung der ermittelten Messwerte hin. Die Dämpfungseigenschaften hängen von vielen Parametern ab, wobei bestimmte Einflussfaktoren noch nicht ganz erforscht sind. Für die genannten Streuungen werden vor allem folgende zwei Phänomene genannt:

- Der Dämpfungswert eines Bauteils hängt nicht nur von der Materialdämpfung ab, sondern auch von der Systemdämpfung, d.h. vom Einfluss der Bauteilumgebung auf das Dämpfungsverhalten. Da der Dämpfungsanteil eines Systems entscheidend groß sein kann, kann für denselben Bauteil in einer anderen Umgebung ein unterschiedlicher Dämpfungswert ermittelt werden.
- Die Materialdämpfung von Stahlbetonbauteilen hängt stark vom Risszustand ab. Ungerissene Bauteile ergeben hinsichtlich des Dämpfungsverhaltens ähnliche Werte, wobei der Einfluss des gerissenen Zustands auf die Dämpfung in vielen Untersuchungen unterschiedlich ausfällt.

Es kann behauptet werden, dass die Dämpfungseigenschaften von Stahlbeton schwer zu beschreiben sind. Diesbezüglich wurden bereits verschiedene Modelle entwickelt, siehe z.B.: DIETERLE [15] und RENKER [33]. Dennoch besteht aufgrund der Aktualität und Anzahl der bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet noch weiterhin Forschungsbedarf.

3.3.2 Ursachen für die innere Dämpfung von Beton

Die innere Dämpfung in Beton ist aus mehreren Komponenten zusammengesetzt. Allerdings ist es nicht möglich zu bestimmen, in welchem Maße sich die einzelnen Mechanismen an der Energiedissipation beteiligen. Die Dämpfung tritt dabei wie ein makroskopisch pauschaler Vorgang auf. Für DIETERLE wird die innere Dämpfung hauptsächlich von den Effekten der flüssigen Reibung, Plastifizierungseffekte und der trockenen Reibung bestimmt. Im Folgenden sind alle bekannten Ursachen der Materialdämpfung von Beton aufgelistet:

- Bei der flüssigen Reibung wird die Dämpfung durch die molekulare Diffusion der im Zement gebundenen Wassermoleküle verursacht. Dies dürfte einen großen Anteil der Materialdämpfung ausmachen.
- Auf mikroskopischer Ebene entstehen aufgrund von Plastifizierungseffekten irreversible Verformungen, welche zur Dissipation der Schwingungen führen. Der Anteil der Plastifizierung an der Materialdämpfung wird erst bei höheren Lasten relevant.
- Die Schwingungen verursachen periodisch wechselnde Biegespannungen im Querschnitt, was eine periodische Abkühlung und Aufwärmung im Beton hervorruft. Dieses Phänomen wird thermoelastischer Effekt genannt und führt bei mittleren Frequenzen durch Wärmefluss zum Energieverlust.

- Bei der Energiedissipation zufolge interkristallinen Schlupf wird durch das Schwingen ungeordnetes Material an den Korngrenzen des Zementsteins geordnet und ein Beitrag zur inneren Dämpfung geleistet.
- Beim intrakristallinen Schlupf kommt es zudem durch das Gleiten von Kristallen im Zementstein oder im Zuschlagstoff zur Energiedissipation.
- Zum Energieverlust im Kapillarwasser kommt es durch die Phasenverschiebung zwischen der Bewegung des Kapillarwassers und der Bewegung des umgebenden Betons während dem Schwingen.
- Dämpfung wird auch durch das Diffundieren des chemisch nicht gebundenen Anmachwassers hervorgerufen. Das Wasser versucht von den Stellen mit hoher Spannung zu den wenig beanspruchten Bereichen zu gelangen.
- Bei der chemischen Diffusion versuchen gelöste Salze des Gelwassers vom Zement von Stellen mit geringer Löslichkeit zu den Stellen mit hoher Löslichkeit zu diffundieren, wobei Schwingungsenergie dissipiert wird. Da es zu verschiedenen Spannungszuständen im Beton kommt, kann dies die Löslichkeit verändern.

Folgende Vorgänge führen zur Strukturdämpfung:

- Der Bruch zwischen benachbarten Betonbestandteilen, der zu einer Rissbildung an den Haftflächen führt, kann zur Strukturdämpfung beitragen.
- Die trockene Reibung oder Coulomb-Reibung entsteht durch das Gleiten zwischen benachbarten Bestandteilen. Der Anteil an der Materialdämpfung hängt vom Spannungszustand im Querschnitt ab.

3.3.3 Dämpfungseigenschaften von unbewehrtem Beton

Arbeiten von z.B. BAKER/KESSLER (1961), COLE/SPONER (1965), RICHARDS/RADJY (1966) und SWAMY in [34] liefern wichtige Kenntnisse über das Schwingungsverhalten von Zementmörtel. Das Dämpfungsmodell der viskosen Dämpfung ist zur Beschreibung des Dämpfungsverhalten von Zementmörtel geeignet und liefert realitätsnahe Werte. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Dämpfung von Zementmörtelproben weitestgehend frequenzunabhängig ist. Allein bei Frequenzen kleiner 2,5 Hz konnte ein Anstieg der Dämpfung bestimmt werden. Bei Erhöhung der Belastung und Zunahme der Spannungen konnte ebenfalls nur ein geringer Dämpfungsanstieg des Zementmörtels beobachtet werden. Es kann somit behauptet werden, dass die Dämpfung von Zementmörtel im elastischen Bereich weitestgehend konstant ist.

Den größten Einfluss auf die Dämpfung von Zementmörtel hat der Wassergehalt. Es konnte festgestellt werden, dass die Dämpfung mit zunehmendem Wassergehalt ansteigt. Bei Körpern mit geringem Wassergehalt ist dessen Einfluss weniger relevant. Die Dämpfung von Zementmörtel nimmt zudem mit zunehmendem Mörtelalter ab. Nach ungefähr vier Wochen Erhärtung ist der Einfluss des Mörtelalters auf die Dämpfung nicht mehr vorhanden. Der Grund dafür dürfte die fortschreitende Austrocknung des Zementmörtels sein.

Die Dämpfung von unbewehrten Betonprüfkörpern fällt geringer aus als diejenige von Zementmörtel. Wenn dem Zement der Zuschlagstoff beigemischt wird, wird feiner Zement durch grobkörnigere Bestandteile ausgetauscht. Da dadurch der wassergefüllte Porenanteil reduziert wird, sinkt damit auch der Dämpfungswert. Grundsätzlich verhält sich die Dämpfung von unbewehrtem Beton bezüglich der Frequenzunabhängigkeit, des Spannungszustands und des Wassergehalts aber ähnlich zum Zementmörtel.

Mit sinkendem Wassergehalt und steigendem Alter nimmt die Dämpfung von Beton ab (Abb. 3.4). Da Betone mit niedriger Festigkeit einen höheren Wasserbindemittelwert besitzen, ist ihre Dämpfung höher als bei höherfesten Betonen. Oben genannte Autoren nennen keine klaren Ergebnisse über den Einfluss des Zementgehalts. Im Vergleich zum Wassergehalt des Betons dürfte der Zementanteil aber eine geringe Rolle spielen.

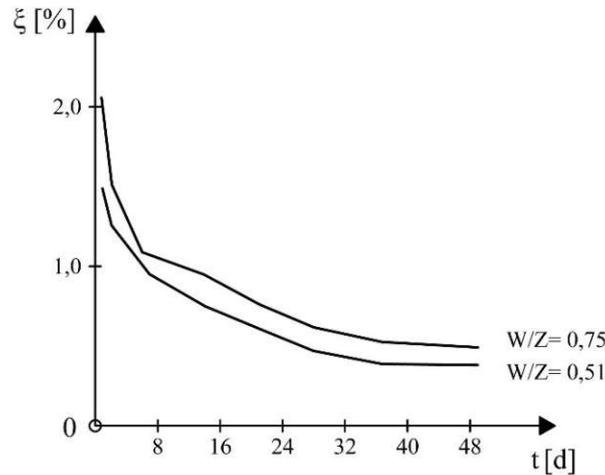


Abb. 3.4: Dämpfungswert von unbewehrten Betonproben mit unterschiedlichen Wasser-Zement-Werten in Abhängigkeit des Betonalters (in Anlehnung an [34])

Es wird angenommen, dass es eine Wechselwirkung zwischen den Dämpfungseigenschaften und den Kriecheigenschaften von Beton gibt. Beide Eigenschaften weichen vom ideal-elastischen Materialverhalten ab und besitzen dieselben inneren Strukturmechanismen. Einige Materialparameter, die einen Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften haben, bestimmen auch das Kriechverhalten von Beton. Wenn angenommen wird, dass der Beton sich wie ein lineares viskoelastisches Modell verhält, kann zwischen der Dämpfung und dem Kriechen ein mathematischer Zusammenhang hergeleitet werden, siehe z.B. [36].

3.3.4 Dämpfungseigenschaften von Stahlbeton

Die Schwingungseigenschaften von Stahlbeton werden sowohl von den Einzeleigenschaften beider Komponenten aber auch im großen Maße von der Interaktion beider Werkstoffe beeinflusst. Die Dämpfung von Stahlbeton hängt erheblich von der Rissbildung im Beton und dem Verbund zwischen Stahl und Beton ab. Im gerissenen Zustand ist die Dämpfung von Stahlbeton in einem bestimmten Beanspruchungsbereich höher als im ungerissenen Zustand. PENZIEN stellt erstmals in [29] fest, dass die Dämpfung auch von der Beanspruchung und von der Belastungsgeschichte abhängig ist. Demnach können die Dämpfungswerte nach anfänglichem Anstieg bei zunehmender Belastung wieder stark abfallen.

Dasselbe Ergebnis erhält DIETERLE in [15] bei seinen Versuchen mit zwei Belastungsabschnitten (Abb. 3.5). Im ersten Abschnitt kommt es zu einer Belastung der Versuchskörper bis zur Bildung von Erstrissen. Dabei steigt während der Bildung der ersten Risse der Dämpfungswert mit zunehmender Stahlspannung bzw. Auslenkung. Bei weiter steigender Belastung nimmt der Dämpfungswert kurz vor dem Abschluss des Rissbilds jedoch wieder ab. Im zweiten Belastungsabschnitt wurden die Schwingungsversuche bei vollständig über die gesamte Bauteillänge ausgebildetem Rissbild durchgeführt. Diesmal wurden bei denselben geringen Beanspruchungen höhere Dämpfungswerte als im ersten Belastungsabschnitt gemessen. Aufgrund der Mikro- und Makrorisse kommt es zu einer strukturellen Änderung des Bauteils und offensichtlich zu einer Änderung des

3.3 Dämpfungsverhalten von Stahlbeton

Dämpfungsverhaltens. Bei weiterer Spannungssteigerung fallen die Dämpfungswerte wieder stark ab. Diese erreichen sogar kleinere Dämpfungswerte als im ersten Belastungsabschnitt.

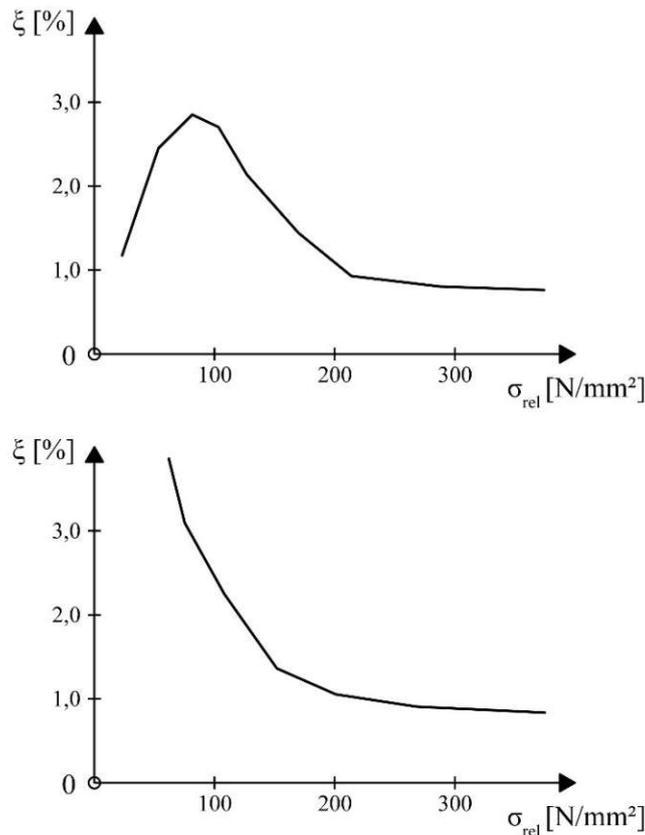


Abb. 3.5: Dämpfungswerte in Abhängigkeit der relativen Stahlspannungen für erstmalig belastete (oben) und vorbelastete (unten) Betonbalken (in Anlehnung an [15])

Die hohen Dämpfungswerte bei gerissenen Stahlbetonbauteilen mit geringen dynamischen Beanspruchungen bzw. Schwingungen ist auf die im Verbundbereich zwischen Beton und Stahl auftretenden Reibungen zurückzuführen. Ungerissene Bauteile oder gerissene und mit großen Amplituden schwingende Bauteile hingegen werden durch die genannten Reibungen im Verbundbereich wenig beeinflusst. Dies führt dazu, dass diese Bauteile kleine Dämpfungswerte besitzen. Die Dämpfung von Stahlbeton im Zustand I ist von der Spannung unabhängig, da hier praktisch keine Reibung zwischen Stahl und Beton auftritt. Von den in Kapitel 3.3.2 genannten Phänomenen tragen die viskose Reibung, der Plastifizierungseffekt sowie die trockene Reibung bzw. Coulomb-Reibung am stärksten zur Dämpfung von Beton und Stahlbeton bei. Die Energiedissipation im Zustand II geschieht vorrangig durch Coulomb-Reibung bzw. trockene Reibung zwischen Stahl und Beton. Wenn Energie durch Reibung dissipiert werden soll, müssen Reibungskräfte an den Kontaktflächen von Stahl und Beton entstehen. Im Zustand II sind die Rissufer im Beton normalspannungsfrei, während der Stahl gedehnt wird und einen hohen Anteil der Formänderung speichert. Zwischen Stahl und Beton entsteht im Bereich der Risse eine Relativverschiebung, was zur Dämpfung zufolge Reibung führt.

Um dies im Schwingungsverhalten berücksichtigen zu können, entwickelte DIETERLE für die Dämpfung ein zusammengesetztes Modell aus viskoser Dämpfung in der Betondruckzone und Coulomb-Dämpfung in der Betonzugzone, welche die trockene Reibung im Verbundbereich nachbildet (Abb. 3.6). Dieser Ansatz beinhaltet ein zur Feder parallel geschaltetes Reibelement, das einen hyperbelartigen Dämpfungsverlauf über die Amplitude besitzt. Der mit steigender

Beanspruchung entstehende Abfall der Dämpfung entspricht der Abnahme einer Coulomb-Dämpfung mit steigender Schwingungsauslenkung. Das viskose Element stellt die Restdämpfung bei großen Verformungen dar.

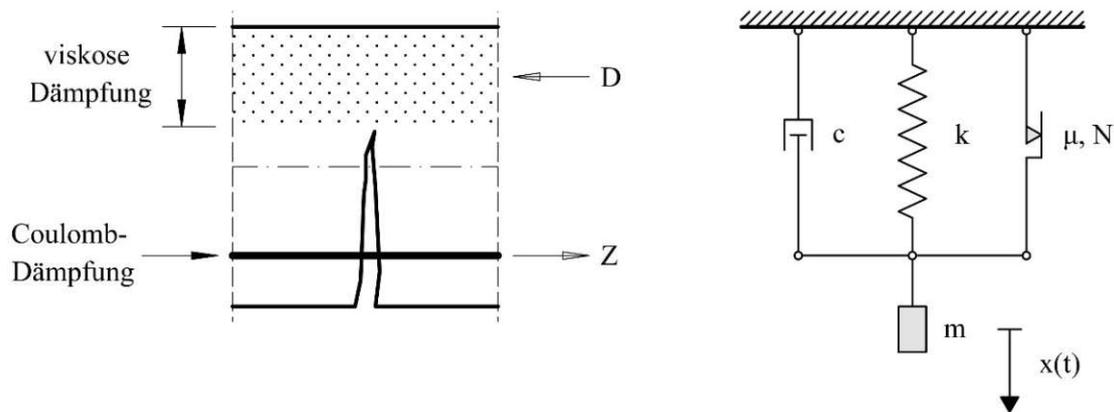


Abb. 3.6: Dämpfungsmodell für Stahlbetonbauteile nach DIETERLE (in Anlehnung an [15])

Weiters wird das Dämpfungsverhalten auch vom Bewehrungsgrad beeinflusst. Der Dämpfungswert erhöht sich mit steigendem Bewehrungsgrad, weil dadurch auch die Kontaktfläche vergrößert wird, über die Energie durch Reibung dissipiert werden kann. Bei gleichem Bewehrungsgrad wird in Bauteilen mit kleinerem Stabdurchmesser mehr Energie über Coulomb-Reibung abgebaut als in Bauteilen mit großem Stabdurchmesser. Da viele dünnere Bewehrungsstäbe eine größere Kontaktfläche für Reibung bieten als wenige dickere Bewehrungsstäbe, erhöht sich dadurch der Dämpfungswert. Diese Feststellung von DIETERLE wurde durch Versuche von BÜTTNER [6] bestätigt. Bereits in diesem Kapitel vorgestellte Arbeiten stellten außerdem fest, dass die Dämpfung von Stahlbeton wie im Fall von unbewehrtem Beton frequenzunabhängig ist.

Die beschriebenen Mechanismen gelten für einen Bereich mit geringen bis mittleren Belastungen. Bei weiterer Erhöhung der Spannungen treten andere Mechanismen in Erscheinung (Abb. 3.7). Maßgeblich ist hier die Plastifizierung des Stahls, was bis zum vollständigen Versagen wieder zu einer Steigerung der Dämpfung führt [26].

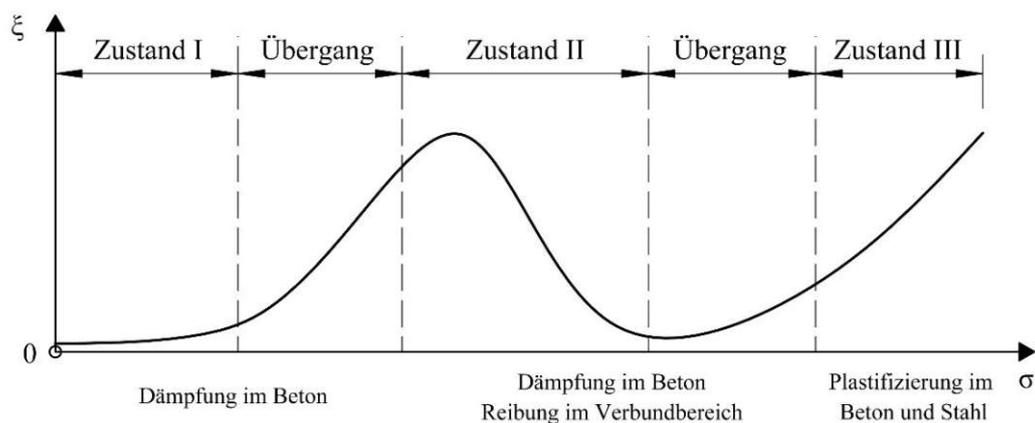


Abb. 3.7: Dämpfungsmechanismen bei verschiedenen Zuständen (in Anlehnung an [6])

4 Experimentelle Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von Textilbeton

4.1 Einleitung

Dieses Kapitel widmet sich den experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit. Für die Analyse des Schwingungsverhaltens von balkenförmigen Versuchskörpern bieten sich unterschiedliche Methoden an. Einer der üblichen und verbreiteten Versuchsarten zur Bewertung der dämpfenden Eigenschaften von Werkstoffen und Bauteilen ist der sogenannte Ausschwingversuch. Dieser wurde für die Versuche der vorliegenden Arbeit im Labor des Instituts für Tragkonstruktion (Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau) an der Technischen Universität Wien durchgeführt.

Nachdem die Grundlagen des Ausschwingversuches umrissen werden, werden in diesem Kapitel die Probekörper aus Textilbeton beschrieben. Beginnend mit der Vordimensionierung der Proben, werden die Bestandteile des gewählten Verbundwerkstoffs ausführlich besprochen. Des Weiteren werden Aufbau und Ablauf des entwickelten Versuchsprogramms vorgestellt. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen zur Ermittlung der dynamischen Kenngrößen beschrieben. Darauf aufbauend schließt das Kapitel mit der Auswertung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des Dämpfungsverhaltens der untersuchten Textilbetonproben ab.

4.1.1 Ausschwingversuch

Der Ausschwingversuch ist ein praktisches Experiment, bei dem das Ausschwingverhalten über einen Zeitbereich nach einer Anfangsanregung ausgewertet wird. Für die Anfangsanregung gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder wird das System gezielt zum Schwingen gebracht oder es wird statisch ausgelenkt und anschließend freigesetzt. Laut PETERSEN [30] ist die erste Variante günstiger, da sich das System, während dem Anschwingen in der Eigenform bewegt und ebenso ausschwingt. Somit werden allfällige Störungen im Schwingungsvorgang eliminiert. Da bei der zweiten Variante der Anregung die Biegeform der Anfangsauslenkung nicht der Eigenform des Ausschwingens entspricht, kann es hier zu Beginn zu Störungen kommen. Nichtsdestotrotz wird der Ausschwingversuch üblicherweise mit der statischen Anfangsauslenkung durchgeführt, da diese Variante einfacher zum Ausführen ist und die dabei entstehenden Schwingungen für die meisten Untersuchungen ausreichend groß sind.

Ausschwingversuche können bei einseitig oder beidseitig eingespannten Balken durchgeführt werden. Im Ausschwingversuch können nicht nur die Auslenkungen, sondern auch Schwinggeschwindigkeiten und Schwingbeschleunigungen gemessen werden. Beschleunigungen können über Beschleunigungssensoren, die auf dem Probekörper positioniert werden, gemessen werden. Allerdings können die Ergebnisse durch die zusätzlich angebrachte Masse dieser Sensoren oder deren Verkabelungen verfälscht werden. Daher sollten die Schwingungen möglichst berührungsfrei, zum Beispiel mittels Laser, gemessen werden, um Fremdeinwirkungen auf das Schwingungsverhalten zu unterbinden.

Bei der Auswertung des Ausschwingversuches ist es für die Berechnungen wichtig, dass die Anteile höherer Eigenschwingungen vernachlässigbar klein sein müssen. Dies ist der Fall, wenn schwache Dämpfungen vorhanden sind (nach Petersen $\zeta < 0,1$) und das System in der Grundform bzw. ersten Eigenform schwingt. Wenn die höheren Anteile der Eigenformen durch deren

stärkeren Dämpfung schneller abklingen und das System in seiner ersten Eigenform ausschwingt, liefert der Ausschwingversuch sehr genaue Ergebnisse [38].

Sofern zum Großteil nur die erste Eigenform schwingt, entsteht für schwach gedämpfte Systeme eine abklingende Schwingungskurve. Die Abnahme der Amplituden dieser Schwingungskurve folgt einer, unter anderem von der Dämpfung abhängigen, mathematisch beschriebenen Funktion, die exponentiell abnimmt. Beim Ausschwingversuch wird der Dämpfungswert unter Annahme einer viskosen Dämpfung und einer linearen Schwingung aus den zeitlich abnehmenden Schwingungsamplituden berechnet. Aus zwei beliebig aufeinander folgenden Amplituden lässt sich zunächst das logarithmische Dekrement und damit anschließend der Dämpfungswert der ersten Eigenform ermitteln. Aus dem Ausschwingversuch können grundlegende Schwingungsparameter ohne großen Rechenaufwand schnell bestimmt werden.

Beim Ausschwingversuch handelt es sich um eine indirekte Messung. Hier werden die inneren und äußeren Dämpfungseigenschaften im Gesamten erfasst. Es kann nur die Dämpfung des Gesamtsystems gemessen werden. Die einzelnen Komponenten der Dämpfung (siehe Kapitel 3.1.2) können nur mit direkten Messungen getrennt bestimmt werden. Bei direkten Messungen handelt es sich um isolierte Versuchskörper, bei denen die Werkstoffdämpfungen mittels Ausmessens der Hystereseschleife (Kraft-Weg-Kurve infolge zyklischer Belastung) oder des Phasenwinkels ermittelt werden. Diese Untersuchungen lassen sich jedoch nur mit hohem experimentellem Aufwand durchführen und gehören nicht zum Inhalt dieser Arbeit.

4.1.2 Vorversuche

Im Zuge der Vorbereitungen für die Ausschwingversuche wurden Vorversuche durchgeführt, um mögliche Fehler in der Konfiguration der Hauptuntersuchungen zu minimieren. Dafür wurden sechs Probekörper aus Textilbeton mit den Abmessungen von 360/120/20mm hergestellt und in einem Dreipunkt-Biegeversuch geprüft. Als Bewehrung wurden einlagige Carbon- und AR-Glasfaserprodukte der Firma solidian GmbH mittig im Querschnitt verlegt. Der eingebaute Feinkornbeton wurde von der Firma Franz Oberndorfer GmbH & Co KG im Werk in Gars am Kamp bereitgestellt. Es handelte sich um einen selbstverdichtenden Beton mit einem W/B-Wert von 0,51 und Größtkorn von 4mm. Druckversuche an Probewürfeln mit einer Seitenlänge von 150mm ergaben eine mittlere Druckfestigkeit von 81 N/mm². Dies entspricht einem hochfesten Beton (HPC).

Für die Herstellung der Probekörper wurde ursprünglich das Laminier-Verfahren gewählt. Die Schalform wurde so gewählt, dass der Beton über die breite Seite eingebracht wurde. Es hat sich aber herausgestellt, dass das Betonierverfahren für diese schlanke Probekörpergeometrie ungeeignet war und zu unzufriedenstellenden Ergebnissen geführt hat, da die geringen Abmessungen die Verarbeitung der Betonschichten erschwert und zu Ungenauigkeiten bei der Einhaltung der Betondeckung bzw. der Höhenlage des Textils und der Probekörper-Höhe geführt haben. Auch das Größtkorn von 4 mm war für die gewünschten Abmessungen zu groß gewählt. Im durchgeführten Dreipunkt-Biegeversuch wurde bei fast allen Probekörpern ein Versagen in Form von Biegedruck- oder Biegeschubbruch festgestellt.

Die aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Herstellung der Probekörper für die Hauptversuche berücksichtigt. Als Konsequenz wurde ein feinkörnigerer Beton mit einer höheren Druckfestigkeit mithilfe des klassischen Gießverfahrens eingebracht. Die folgenden Kapitel erläutern den genauen Aufbau der Hauptversuche, die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften sowie den Ablauf der Versuchsdurchführung.

4.2 Probekörper

4.2.1 Dimensionierung der Betonprobekörper für die Versuche

Die Dimensionen der Probekörper aus Beton wurden analog zu den Abmessungen eines Ski-Kerns gewählt. Das bedeutete, dass die Höhe kleiner als die Breite zu dimensionieren war und es sich dabei um ein längliches Versuchsobjekt handelte. Die Höhe der Probekörper musste so gering wie möglich sein, aber dennoch ausreichend Platz für zwei textile Bewehrungslagen bieten. Die Herstellung der Probekörper sollte auch nicht durch einen zu schmal gewählten Querschnitt zusätzlich erschwert werden. Daher entschied man sich für eine Gesamthöhe h von 20mm, wobei die Betondeckungen mit 5mm angesetzt wurden. Somit blieb den Bewehrungslagen ein Abstand von 10mm zueinander. Des Weiteren sollten sich mehrere Stränge von den verwendeten Textilbewehrungsmatten in der gewählten Querschnittsbreite ausgehen. Bei einem Strangabstand von 21mm entschied man sich für eine Breite b von 120mm, wodurch sich fünf Stränge über die Breite ergaben.

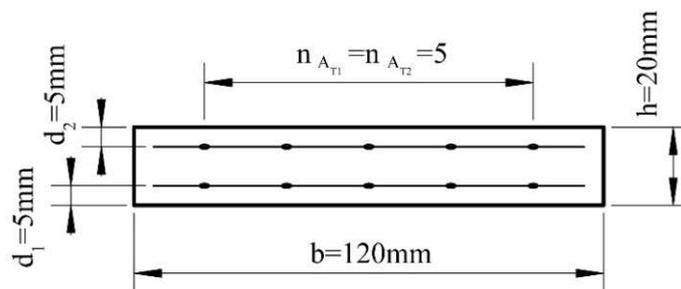


Abb. 4.1: Querschnitt Betonprobekörper

Aufgrund des Messbereiches des Beschleunigungssensors, mussten die Probekörper so vordimensioniert werden, dass ihre Schwingungsfrequenz den Wert von circa 15 Hz nicht übersteigt. Die Wahl der Probekörperlänge erfolgte demnach auf Basis dynamischer Überlegungen. Um Frequenzwerte für den prismatischen Probekörper zu ermitteln, wurde auf die Schwingungen von kontinuierlichen Systemen zurückgegriffen. Im folgenden Abschnitt wird die Ermittlung der Schwingungsfrequenz durch die Lösung der Bewegungsgleichung der Durchbiegung $w(x,t)$ näher erläutert [5] und anschließend eine Formel für die Vordimensionierung der Probekörper-Länge gegeben.

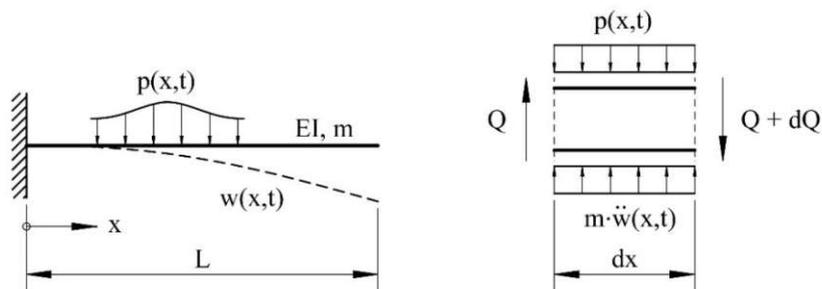


Abb. 4.2: Eingespannter Biegeträger (links) und infinitesimales Element (rechts)

Das dynamische System wird als ein eingespannter Biegeträger mit konstanter Biegesteifigkeit EI und Masse m modelliert, welcher mit einer allgemeinen Linienlast $p(x,t)$ belastet ist. Gesucht ist zunächst die Bewegungsgleichung für die Durchbiegung $w(x,t)$, welche einer partiellen Differentialgleichung entspricht. Wird aus dem Balken ein infinitesimal kleines Element herausgeschnitten (Abb. 4.2), kann folgende Gleichgewichtsbedingung quer zur Trägerachse formuliert werden (Gleichung 4.1):

$$Q - (Q + dQ) + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dx = p(x, t) dx \quad (4.1)$$

Die infinitesimale Größe dQ ist die Zu- oder Abnahme der Querkraft entlang der Trägerachse x bei fester Zeit und kann auch wie in Gleichung 4.2 angeschrieben werden:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (4.2)$$

Weiters ist aus den Differentialbeziehungen der klassischen Biegelehre folgender Zusammenhang von Biegemoment, Krümmung und Querkraft bekannt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (4.3)$$

Da es sich bei den Ausschwingversuchen um den Fall der freien Schwingung handelt, wird die Linienlast $p(x,t)$ als Nächstes gleich Null gesetzt. Gleichungen 4.1 und 4.2 in Gleichung 4.3 eingefügt, ergibt nach mathematischen Vereinfachungen eine partielle Differentialgleichung für die Bewegungsgleichung der Durchbiegung $w(x,t)$:

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (4.4)$$

Diese kann mit Hilfe des Separationsansatzes für partielle Differentialgleichung gelöst werden:

$$w(x, t) = \phi(x) \cdot T(t) \quad (4.5)$$

Nach partiellen Ableitungen dieses Lösungsansatzes nach den zugehörigen Variablen kann die Bewegungsgleichung aus 4.4 in folgender Form dargestellt werden:

$$m\phi(x)\ddot{T}(t) + EI\phi^{IV}(x)T(t) = 0 \quad (4.6)$$

Trennt man die Terme von Gleichung 4.6 nach den Variablen der Zeit und des Weges (Gleichung 4.5), erkennt man, dass die Gleichung nur dann erfüllt ist, wenn deren beide Seiten einen konstanten Wert C haben. Die Konstante C beinhaltet die Eigenkreisfrequenz ω , woraus sich die Frequenz f des Kragträgers bestimmen lässt.

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = -\frac{EI \phi^{IV}(x)}{m \phi(x)} = C = -\omega^2 \quad (4.7)$$

Bedient man sich der wegabhängigen Seite aus Gleichung 4.7 und führt den Term λ zur Substituierung der konstanten Terme ein mit

$$\lambda^4 = \frac{m}{EI} \omega^2 \quad (4.8)$$

kann folgende Gleichung zur Lösung der Eigenkreisfrequenz ω verwendet werden:

$$\phi^{IV}(x) - \lambda^4 \phi(x) = 0 \quad (4.9)$$

Der Lösungsansatz für die Differentialgleichung aus Gleichung 4.9 lautet

$$\phi(x) = B_1 \sinh(\lambda x) + B_2 \cosh(\lambda x) + B_3 \sin(\lambda x) + B_4 \cos(\lambda x) \quad (4.10)$$

Die Konstanten B_i sind so zu wählen, dass folgende kinematischen und dynamischen Randbedingungen für den untersuchten Kragträger eingehalten werden:

$$\begin{aligned} w(x=0) &= 0 \\ w'(x=0) &= 0 \\ w''(x=L) &= 0 \\ w'''(x=L) &= 0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Die oben genannten Randbedingungen und der Lösungsansatz von Gleichung 4.10 ergeben die Gleichungen

$$\begin{aligned} B_2 &= -B_4 \\ \lambda B_1 &= -\lambda B_3 \end{aligned} \tag{4.12}$$

sowie

$$\begin{aligned} \lambda^2 B_1 (\sinh(\lambda L) + \sin(\lambda L)) + \lambda^2 B_2 (\cosh(\lambda L) + \cos(\lambda x)) &= 0 \\ \lambda^3 B_1 (\cosh(\lambda L) + \cos(\lambda L)) + \lambda^3 B_2 (\sinh(\lambda L) - \sin(\lambda x)) &= 0 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Löst man die Gleichungen in 4.13 nach der Konstanten B_2 auf, erhält man die Gleichung 4.14

$$B_2 (1 + \cosh(\lambda L) \cos(\lambda x)) = 0 \tag{4.14}$$

Um eine von Null verschiedene nicht triviale Lösung für die Konstanten zu bekommen, darf nicht die Konstante B_2 gleich Null sein, sondern der Ausdruck in der Klammer von Gleichung 4.14. Aus dieser Bedingung heraus kann der Substitutionsterm λ ermittelt werden. Die kleinste positive Lösung für $1 + \cosh(\lambda L) \cos(\lambda L) = 0$ lautet somit

$$\lambda = \frac{1,875104}{L} \tag{4.15}$$

Dies in Gleichung 4.8 eingesetzt, liefert die Formel für die Eigenkreisfrequenz ω des untersuchten Kragträgers:

$$\omega = \sqrt{\frac{12,362EI}{mL^3}} \tag{4.16}$$

Durch das Einsetzen der Formel der Eigenkreisfrequenz in die folgende Beziehung mit der Frequenz f

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \tag{4.17}$$

kann nach der Kraglänge L aufgelöst werden. Gleichung 4.18 gibt die Formel für die Vordimensionierung der Länge L des Versuchskörpers bei bekannter Biegesteifigkeit EI , Masse m und vorgegebener Frequenz f an:

$$L = \sqrt[3]{\frac{12,362EI}{m(2\pi f)^2}} \tag{4.18}$$

Für die in Tab.4.1 angenommenen Kennwerte ergibt die Formel in Gleichung 4.18 eine Länge L von 0.98m. Vereinfacht wurde für die Herstellung der Probekörper eine Kraglänge von 1,0m gewählt. Für die Länge, über die der Träger eingespannt wurde, wurden zusätzlich zur Kraglänge 12cm hinzugefügt. Somit wurden die Probekörper aus Beton mit einer Gesamtlänge l von 1,12m produziert (Abb. 4.3). In Abbildung 4.4 ist ein untersuchter Textilbeton-Probekörper dargestellt.

Tab. 4.1: Angenommene Kennwerte für Dimensionierung der Probekörper

E_{cm}	44000 N/mm ²
ρ_{ct}^1	2200 kg/m ³
b	120 mm
h	20 mm

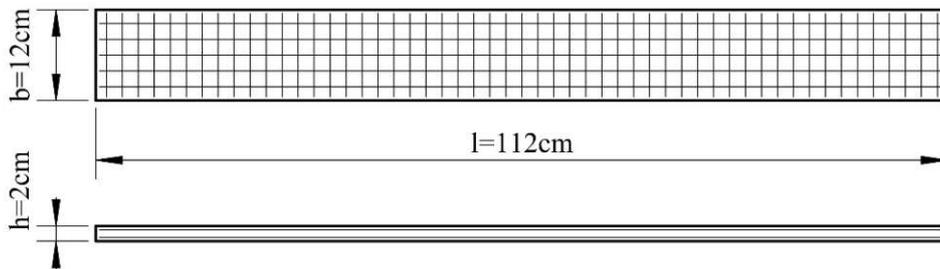


Abb. 4.3: Skizze der Beton-Probekörper

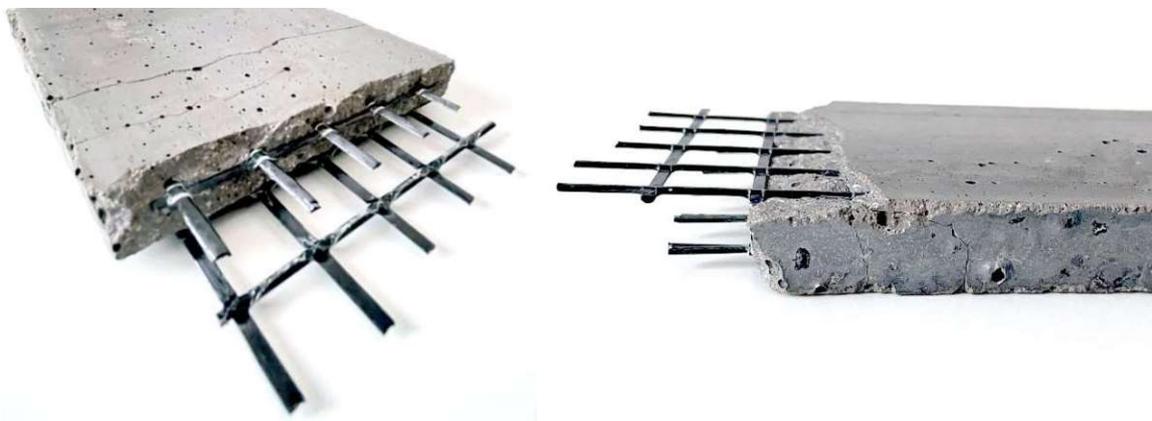


Abb. 4.4: Lage der textilen Bewehrung im Probekörper

¹ in Anlehnung an CURBACH und JESSE [9].

4.2.2 Beton

Für die Probekörper der Hauptversuche wurde ein feinkörniger Hochleistungsbeton gewählt (Abb. 4.5). Gründe waren neben den bereits genannten ungewollten Abweichungen bei größeren Korngrößen, die so kleine Betondeckungen verunmöglichen, die Erzielung einer hohen Druckfestigkeit und ein guter Verbund mit der textilen Bewehrung. Für eine gute Verarbeitbarkeit war es erforderlich, dass der Frischbeton fließfähig war. Die Mischungsverhältnisse des Betons beruhen auf einer Feinbeton-Standardrezeptur (Tab. 4.2) und den Erfahrungswerten des Forschungsbereichs für Baustofflehre der Technischen Universität Wien, die auch die notwendige Betoniermenge zu Verfügung gestellt hatte.

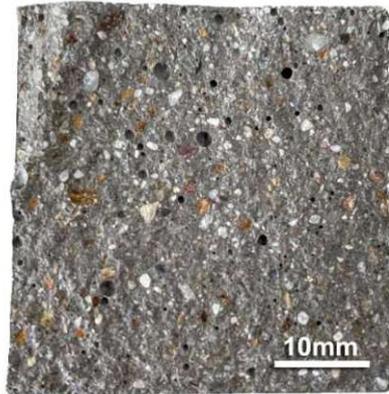


Abb. 4.5: Feinbeton-Matrix der Probekörper

Der W/B-Wert² der Rezeptur liegt bei 0,32, wobei als Bindemittel ein tricalciumaluminat-freier Portlandzement verwendet wurde. Bei der Gesteinskörnung wurde ein Größtkorn von höchstens 1mm gewählt. Um die gewünschte hohe Druckfestigkeit des Festbetons zu erreichen und einen guten Verbund zu erhalten wurden Mikrosilika und Kalksteinmehl als Zusatzstoffe verwendet. Weiters weist die Zusammensetzung Zusatzmittel wie Schwindreduzierer, Konsistenzhalter und Fließmittel auf, da ein niedriger W/B-Wert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verschlechtert. Um während des Mischvorgangs Luft aus der Mischung entweichen zu lassen, wurde ein flüssiger Entlüfter eingesetzt. Eine genaue Angabe zur Zusammensetzung kann Tabelle 4.2 entnommen werden.

Bei den Vorversuchen wurde für die Herstellung der Probekörper das Laminier-Verfahren angewendet. Jedoch konnte mit den gewählten Randbedingungen die Lagesicherheit der Bewehrung nicht gewährleistet werden. Für das Betonieren der Hauptprobekörper wurde deshalb das klassische Gießverfahren angewendet. Bei dieser Methode ist besondere Achtsamkeit erforderlich, um die Sicherung der textilen Bewehrungslagen zu gewährleisten. Um ungewünschten Auftrieb entgegenzuwirken wurde die Schalung der Versuchskörper hochkant hergestellt, wobei die Einbringöffnung sich auf einer der schmalen Seiten befand (Abb. 4.6). Die beiden Bewehrungslagen wurden zuvor außerhalb der Schalung miteinander verbunden und mit Abstandhaltern versehen. Die Distanz der beiden Lagen zueinander wurde über Sechskant-Verbindungsmuttern, die punktuell mit Heißkleber befestigt wurden, sichergestellt. Als Abstandhalter wurden 15mm lange Senkkopf-Nägeln mit 1mm Durchmesser verwendet, die auf die Querlagen der Bewehrungsmatten geklebt wurden. Die Nägel gewährleisteten den erforderlichen Abstand der Bewehrungslagen zur gegenüberliegenden Schalungsoberfläche. Um ein Aufschwimmen der Bewehrung zu verhindern, wurde nach dem Einbringen des Frischbetons die Öffnung mit Schalplatten abgedeckt.

² Wasser mit den Flüssigkeitsanteilen der Zusatzmittel bezogen auf Zement und Mikrosilika

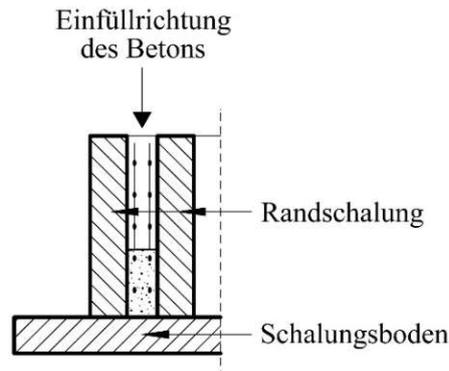


Abb. 4.6: Schnitt durch die Schalung

Für den Ausschwingversuch wurden sechs Probekörper hergestellt. Für die Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens wurden zudem sechs Probekörper für den Dreipunkt-Biegeversuch hergestellt. Zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit des Betons wurden zusätzlich sechs Prismen nach ÖNORM EN 196-1 mit den Abmessungen 40/40/160mm betoniert. Die Druckfestigkeit wurde mittels Druckversuchs an sechs Würfeln mit einer Seitenlänge von 100mm bestimmt. Alle Versuchskörper wurden nach vier Tagen ausgeschalt und in einer Klimakammer für 51 Tage bei 20°C und 60% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert, bevor sie den Versuchen unterzogen wurden. Die Druckversuche ergaben eine gemittelte Betonwürfeldruckfestigkeit von 129,2 N/mm². Somit kann der in die Probekörper eingebaute Beton als hochfester Beton klassifiziert werden. Weiters wurde aus den Dreipunkt-Biegeversuchen eine gemittelte Biegezugfestigkeit von 14,9 N/mm² bestimmt.

Tab. 4.2: Betonzusammensetzung der Prüfkörper

Bestandteile	Gehalt [kg/m ³]
Wasser	177,3
Fließmittel ACE 430	23,9
Konsistenzhalter Sky 911	12,0
Schwindreduzierer Mapei SRA	6,0
Entlüfter DCC	1,0
Zement CEM I 42,5 R C3A-frei	598,5
Zusatzstoff reaktiv Elkem 940 U	53,9
Zusatzstoff inert KSM H100	179,5
Gesteinskörnung Sand 0-1 Bad Fischau	1309,9

4.2.3 Bewehrung

Die Probekörper wurden mit dem Carbon-Textil GRID Q85/85-CCE-21 des Herstellers solidian GmbH bewehrt. Es handelt sich dabei um ein zweiachsig verwirktes Gelege, welches aus

aufeinanderliegenden parallelen Fasersträngen aus Multifilamentgarnen bzw. Rovings besteht, die im rechten Winkel zueinander ausgerichtet sind. Das Textil war mit Epoxidharz getränkt und in einer Konfiguration zusätzlich besandet. Bei diesen imprägnierten Bewehrungen handelte es sich um sehr steife Produkte mit glatter und besandeter Oberfläche. Die vom Hersteller zusammengefassten Kennwerte sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Die Kennwerte zeigen, dass die gewählte Carbon-Matte in Schussrichtung höheren Belastungen ausgesetzt werden kann als in Kettrichtung. Daher wurde die Bewehrung so verlegt, dass die Stränge in Schussrichtung parallel zur Längsachse der Probekörper verlaufen. Es wurden Streifen mit jeweils fünf Strängen aus einer Bewehrungsmatte passend zur Schalung zugeschnitten. Die bewehrten Betonprobekörper für die Ausschwingversuche wurden jeweils mit einer oberen und einer unteren Bewehrungslage hergestellt. Weiters sind in Tabelle 4.4 die von YANIK in [42] aus Zugversuchen experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte der Bewehrungen angegeben. Hier sind die Kennwerte der gewählten Bewehrung mit glatter und besandeter Oberfläche gesondert angeführt. Man kann erkennen, dass die Bewehrung mit besandeter Oberfläche eine um rund 15% höhere Bruchlast aufweist als das Textil mit der glatten Oberfläche.

Tab. 4.3: Kennwerte für GRID Q85/85-CCE-21 Carbon-Bewehrungsmatte (solidian GmbH 2019)

Kennwerte	Kettrichtung	Schussrichtung
Achsabstand	21 mm	21 mm
Querschnittsfläche Einzelstrang	1,81 mm ²	1,81 mm ²
Querschnittsfläche Flächenbewehrung	85 mm ² /m	85 mm ² /m
Mittelwert der Bruchspannung	3300 N/mm ²	3550 N/mm ²
E-Modul	> 220000 N/mm ²	> 205000 N/mm ²

Tab. 4.4: Kennwerte in Schussrichtung für GRID Q85/85-CCE-21 Carbon-Bewehrungsmatte [42]

Kennwerte	glatte Oberfläche	besandete Oberfläche
Mittelwert der Bruchspannung	4156 N/mm ²	4714 N/mm ²
Mittelwert der Bruchlast	7523 N	8532 N
Mittelwert der Bruchdehnung	1,72 %	1,70 %

Weiters wurde ein Probekörper mit einer unbeschichteten textilen Bewehrung unbekannter Herkunft hergestellt. Über das Fasermaterial und den mechanischen Eigenschaften liegen keine Informationen vor. Die Steifigkeit der unbeschichteten Bewehrung ist sehr gering, was das Verarbeiten hinsichtlich der Positionierung in der Schalung deutlich erschwert hat. Hier konnte die in Kapitel 4.2.2 beschriebene Methode zur Sicherung der Bewehrungslagen nicht angewendet werden. Weiche textile Bewehrungen müssen in der gewünschten Höhenlage aus der Schalung herausragen und während dem Betonvorgang von außen leicht gespannt werden, um die angestrebte Lage im Querschnitt zu gewährleisten.

4.2.4 Probekörperbezeichnung

Für einen besseren Überblick werden alle untersuchten Probekörper folgend zusammengefasst. Sie lassen sich grob nach der Art der durchgeführten Versuche unterteilen. Zusätzlich zu den im Kapitel 4.2 beschriebenen Probekörpern für den dynamischen Ausschwingversuch (Kapitel 4.1.1) wurden auch welche zur Untersuchung der Last-Verformungseigenschaften (Kapitel 4.3.3) hergestellt. Für die dynamischen Versuche wurden sechs Beton-Probekörper hergestellt, wobei einer unbewehrt und die restlichen mit Textilien bewehrt waren. Die textilbewehrten Probekörper können nach der Oberflächenbeschaffenheit und nach der Imprägnierung noch weiter untergliedert werden. Um das dynamische Verhalten der Probekörper aus Beton mit anderen Werkstoffen und Objekten vergleichen zu können, wurde auch ein Holz-Probekörper und ein Ski dem Ausschwingversuch unterzogen. Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 geben die Bezeichnung aller Probekörper wieder. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erhielt jeder Versuchskörper eine eigene Bezeichnung: um die Zuordnung bei den Versuchen und der Auswertung zu erleichtern, wurden die Probekörper mit Buchstaben, die auf Ihre Hauptmerkmale hinweisen gekennzeichnet.

Tab. 4.5: Bezeichnung der Probekörper für Ausschwingversuch

Bezeichnung	Eigenschaften
PK1-S	Prüfkörper-Nummer 1: Besandete Oberfläche der Bewehrung
PK2-S	Prüfkörper-Nummer 2: Besandete Oberfläche der Bewehrung
PK3-G	Prüfkörper-Nummer 3: Glatte Oberfläche der Bewehrung
PK4-G	Prüfkörper-Nummer 4: Glatte Oberfläche der Bewehrung
PK5-O	Prüfkörper-Nummer 5: Bewehrung ohne Beschichtung
PK6-U	Prüfkörper-Nummer 6: Unbewehrt
PK7-H	Prüfkörper-Nummer 7: Holz
PK8-S	Prüfkörper-Nummer 8: Ski

Tab. 4.6: Bezeichnung der Probekörper für Dreipunkt-Biegeversuch

Bezeichnung	Eigenschaften
PK9-S-1L	Prüfkörper-Nummer 9: Besandete Oberfläche der Bewehrung; einlagig
PK10-S-2L	Prüfkörper-Nummer 10: Besandete Oberfläche der Bewehrung; zweilagig
PK11-G-1L	Prüfkörper-Nummer 11: Glatte Oberfläche der Bewehrung; einlagig
PK12-G-2L	Prüfkörper-Nummer 12: Glatte Oberfläche der Bewehrung; zweilagig
PK13-O-1L	Prüfkörper-Nummer 13: Bewehrung ohne Beschichtung; einlagig
PK14-O-2L	Prüfkörper-Nummer 14: Bewehrung ohne Beschichtung; zweilagig

4.3 Versuch

4.3.1 Versuchsaufbau

Für die experimentelle Untersuchung des Dämpfungsverhaltens von textildbewehrten Betonbauteilen wurden Ausschwingversuche durchgeführt. Dafür wurden die Probekörper einseitig an einem Ende eingespannt, so dass aus mechanischer Sicht ein Kragträger geschaffen wurde. Dieser wurde bei der Auswertung der Versuche als ein Ein-Massen-Schwinger modelliert. Für die Einspannung der Probekörper wurden Stahlbauteile verwendet. Die Probekörper wurden auf der Kopfplatte eines Stahlträgers mit einem I-Profil aufgelegt und über eine Länge von 12 cm zwischen dieser und einer weiteren Stahlplatte eingespannt. Zwischen der Stahlplatte und der Probekörper-Oberseite wurde ein Elastomer-Lager eingelegt. Die Gewindestangen wurden in Löcher der Stahl-Bodenplatte eingeschraubt, um neben der Einspannung der Probekörper auch die gesamte Versuchsvorrichtung in der Lage zu sichern (Abb. 4.7).

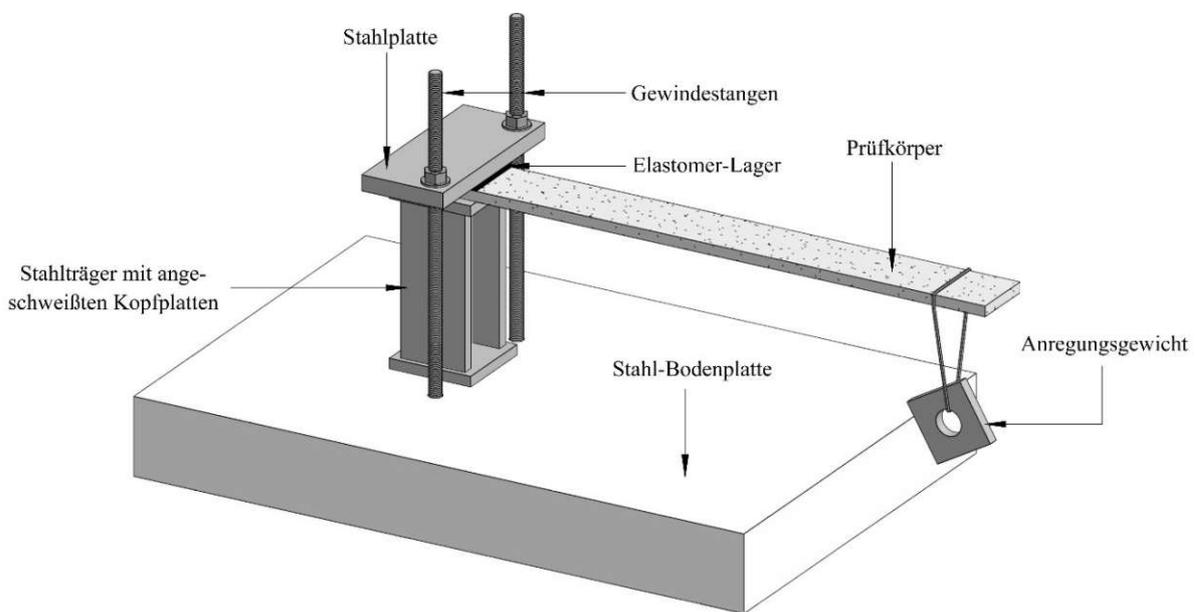


Abb. 4.7: Schema Versuchsaufbau

Aufgrund der Probengeometrie ließen sich die für die dynamische Untersuchung erforderlichen Schwingungen am einfachsten durch eine Anfangsauslenkung erzielen. Dafür wurden die Probekörper am Anfang der Messungen statisch ausgelenkt und anschließend freigesetzt. Für die Auslenkung der Probekörper wurde ein Anregungsgewicht - eine gelochte Stahlplatte mit einer Masse von 2,015 kg - mit einem Garn am Kragende aufgehängt. Durch eine Durchtrennung des Garns wurden die Probekörper aus der Auslenkungsposition gelöst und dadurch die Schwingungen erzeugt. Für die Aufnahme der Schwingungen wurde am Kragende des Probekörpers ein Beschleunigungssensor mittels einer Klemme befestigt. Da das Eigengewicht des Sensors im Vergleich zum Probekörper klein war, kann davon ausgegangen werden, dass es durch das Zusatzgewicht zu keiner Beeinflussung des Schwingungsverhaltens kam. Des Weiteren wurden die Schwingungen auch mit einem Laser-Wegmessers berührungsfrei aufgezeichnet, um die Messwerte untereinander zu vergleichen. Dabei wurde während des Ausschwingens der Abstand vom Lasersensor zur Unterkante des Probekörpers aufgezeichnet. Gleichzeitig stellte die zweifache Aufnahme der Schwingungen auch eine Sicherheit bei einem möglichen Ausfall eines der beiden Messgeräte dar. Die Ausschwingversuche wurden in mehreren Stufen durchgeführt, wobei vor jeder Stufe eine ansteigende Vorbelastung aufgebracht wurde, um den Einfluss der Rissbildung zu untersuchen. Um die für die Laststufen erforderlichen Belastungen am Kragende messen

und aufzeichnen zu können, wurde eine Kraftmessdose zwischen der Oberkante der Prüfkörper und der Belastungsplatte positioniert. Während der Durchführung der Ausschwingversuche wurde die Kraftmessdose entfernt, um die schwingende Masse der Probekörper nicht zu beeinflussen.

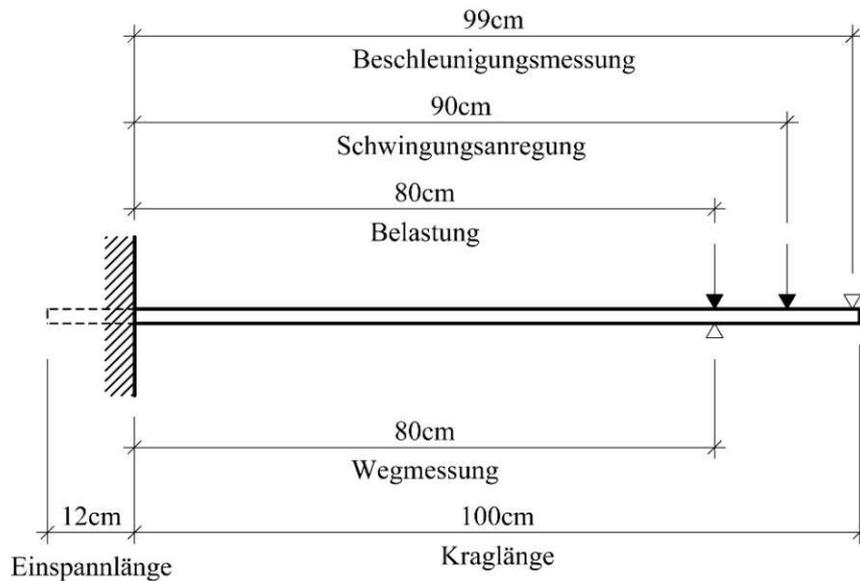


Abb. 4.8: Messprinzip und Abmessungen

4.3.2 Versuchsablauf

Insgesamt wurden sechs Probekörper aus Beton mit Ausschwingversuchen auf ihre dynamischen Eigenschaften analysiert, wobei ein Probekörper unbewehrt war und die restlichen eine Textilbewehrung beinhaltet haben. Darüber hinaus wurden zusätzlich ein Holz- und ein Ski-Probekörper einem Ausschwingversuch unterzogen. Die Versuche mit den Textilbeton-Probekörpern wurden in einer Vorbelastung Laststufen unterzogen, wobei die Laststufen repräsentativ für die Rissanteile im Querschnitt sind. In der ersten Laststufe „LS0“ wurden die Ausschwingversuche im ungerissenen Zustand bzw. ohne Vorbelastung durchgeführt. In der nächsten Laststufe „LS1“ wurden die Probekörper bis zu einer vordefinierten Kraft statisch vorbelastet und anschließend dynamisch untersucht. Bei jeder weiteren Laststufe wurde die Belastung erhöht, sodass sich der gerissene Bereich im Prüfkörper erweitert hat. Es waren vier Laststufen mit jeweils einem zugehörigen Ausschwingversuch vorgesehen. Bei einigen der Probekörper konnte aufgrund von vorzeitigem Bruch nicht alle Laststufen durchgeführt werden. Die Vorbelastung der Versuche erfolgte über ein Gewicht aus Stahl, welches händisch gegen die Probekörper gedrückt wurde, bis die gewünschte Laststufe erreicht wurde. Die Kraftmessung erfolgte über eine Kraftmessdose, die zwischen dem Prüfkörper und dem Gewichtstück positioniert wurde.

Die Kräfte, welche den Laststufen zugewiesen worden sind, wurden über angenommene Material- und Querschnittswerte abgeschätzt. Für den Beton wurde die Festigkeitsklasse C90/105 angenommen, da zum Zeitpunkt der Vorbereitungen die Druckfestigkeit des Betons nicht geprüft worden war. Der Berechnung der Laststufenobergrenzen wurden für die Textilbewehrung generell die Materialkennwerte der Carbon-Matte Q85/85-CCE-21 (Produzent: solidian GmbH) zugrunde gelegt. In Tabelle 4.7 sind die angenommenen Kennwerte aufgelistet.

Die Kraft für die Laststufe „LS1“ wurde über die Berechnung des Rissmoments M_{cr} an der Einspannstelle bestimmt, in dem die mittlere Zugfestigkeit des Betons f_{ctm} in die Gleichung für die Biegespannung eingesetzt (Gleichung 4.19) und umgeformt wurde (Gleichung 4.20).

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (4.19)$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot W = f_{ctm} \cdot \frac{bh^2}{6} \quad (4.20)$$

Das Rissmoment M_{cr} mit 0,04 kNm dividiert durch den Abstand zwischen Einspannstelle und Krafteinleitungspunkt (0,8 m, siehe Abb. 4.8) ergibt die Kraft, bei der die ersten Risse zu erwarten sind. Diese liegt beim vorgegebenen statischen System und Querschnitt bei 0,05 kN. Um sicher eine Rissbildung zu initiieren, wurde die Lastobergrenze für die Laststufe „LS1“ mit 0,06 kN festgelegt.

Tab. 4.7: Angenommene Kennwerte für Beton, Textilbewehrung und Querschnitt

f_{ck}	90 N/mm ²
f_{ctm}	5 N/mm ²
ϵ_{cu2}	2,6 ‰
f_{Tt}	3100 N/mm ²
E_T	220000 N/mm ²
A_{T1}	1,81 mm ² (5 Stränge 9,05 mm ²)
b	120 mm
h	20 mm
d	15 mm

Für die beiden verbleibenden Laststufen wurde die Bruchlast F_E , die über das maximal aufnehmbare Moment M_E abgeschätzt wurde, gleichmäßig aufgeteilt. Da es sich um einen Versuch handelt, wurden bei der Abschätzung der Bruchlast Mittelwerte der Materialeigenschaften (Tab. 4.7) verwendet und die Teilsicherheitsbeiwerte vernachlässigt. Das größte aufnehmbare Moment, das durch eine untere Bewehrungslage A_{T1} aufgenommen werden kann, wurde analog zum Stahlbetonquerschnitt über das Parabel-Rechteck-Diagramm und das Formulieren von Gleichgewichtsbedingungen im Querschnitt berechnet (Abb. 4.9).

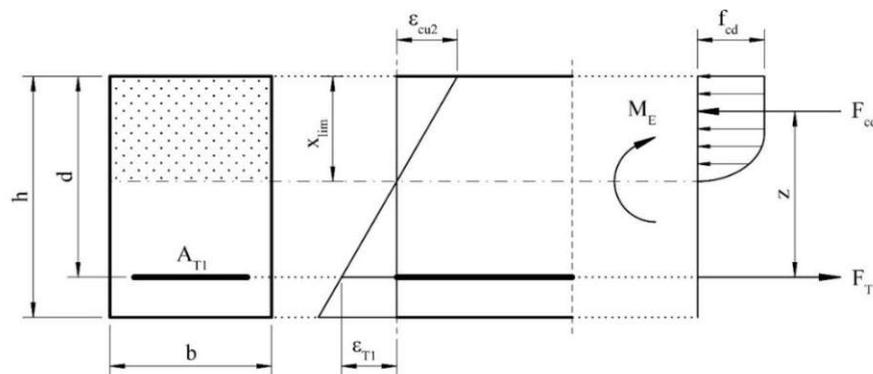


Abb. 4.9: Kräftegleichgewicht bei reiner Biegung

Es wurde angenommen, dass die Dehnung der Bewehrung der Streckgrenze entspricht und der Beton voll ausgenutzt wird. Das bedeutet, dass die Dehnung am Druckrand der maximalen Dehnung ε_{cu2} der angenommenen Betonfestigkeitsklasse entspricht. Mit diesen Annahmen lässt sich die maximale Betondruckzonenhöhe x_{lim} bei voller Betonausnutzung in Abb. 4.9 mittels Gleichung 4.21 bestimmen.

$$x_{lim} = \frac{|\varepsilon_{cu2}| \cdot d}{|\varepsilon_{cu2}| + \varepsilon_{T1}} = \frac{|\varepsilon_{cu2}| \cdot d}{|\varepsilon_{cu2}| + \frac{f_{Tt}}{E_T}} \quad (4.21)$$

Aus dem Momentengleichgewicht um die Bewehrung wurde das maximal aufnehmbare Moment M_E aus Abb. 4.9 laut Gleichung 2.2 ermittelt.

$$M_E = \kappa \cdot x_{lim} \cdot b \cdot f_{ck} \cdot (d - \lambda \cdot x_{lim}) \quad (4.22)$$

Die Beiwerte des Parabel-Rechteck-Diagramms κ und λ lassen sich aus Gleichung 4.23 und 4.24 bestimmen.

$$\kappa = \frac{3 \cdot |\varepsilon_{cu2}| - 2}{3 \cdot |\varepsilon_{cu2}|} \quad (4.23)$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot \varepsilon_{cu2}^2 - 4 \cdot |\varepsilon_{cu2}| + 2}{6 \cdot \varepsilon_{cu2}^2 - 4 \cdot |\varepsilon_{cu2}|} \quad (4.24)$$

Diese Vorgehensweise ist eine Vereinfachung, die das Normalkraftgleichgewicht außer Acht lässt. Für eine erste Abschätzung wird diese Vorgehensweise als ausreichend genau beurteilt. Das maximal aufnehmbare Moment M_E wurde mit 0,26 kNm berechnet. Dividiert durch den Abstand zwischen Einspannstelle und Krafteinleitungspunkt (0,8 m, siehe Abb. 4.8) ergibt sich die abgeschätzte Bruchlast. Diese liegt beim vorgegebenen statischen System und Querschnitt bei rund 0,3 kN. Somit wurde die Lastobergrenze für die Laststufe „LS2“ mit 0,15 kN und für die Laststufe „LS3“ mit 0,30 kN festgelegt (Abb. 4.10).

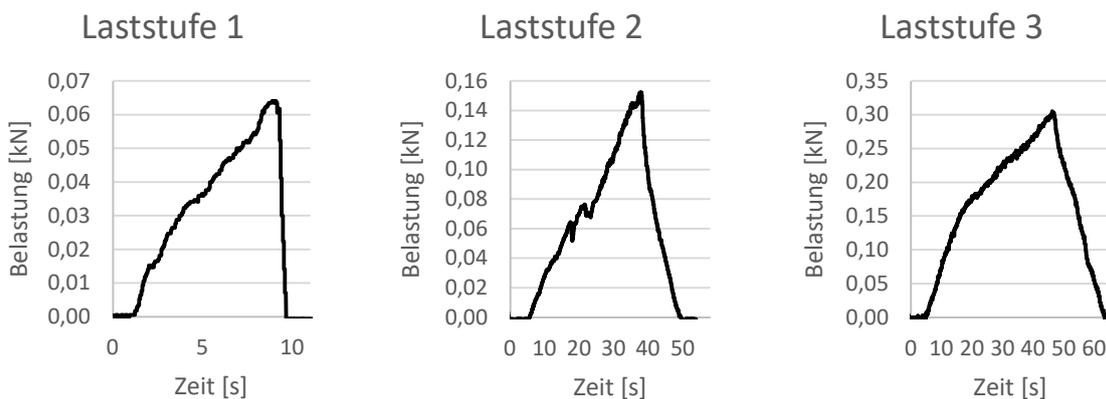


Abb. 4.10: Zeitlicher Verlauf der Belastung für Prüfkörper PK2

Im weiteren Verlauf wurden die Ausschwingversuche durchgeführt. Nach der Durchtrennung des Garns und Entfernung des Gewichts am Kragarm hat der Probekörper begonnen um seine statische Ruhelage zu schwingen. Aufgrund der im dynamischen System auftretenden Dämpfungen ist es zu einer Dissipation der Schwingungsenergie und somit zu einem Abklingen der Schwingungsausschläge mit fortschreitender Zeit gekommen. Die durch die Bewegungen erzeugten

Beschleunigungen während des Ausschwingvorgangs wurden vom Beschleunigungssensor aufgenommen, der am Probekörper befestigt war. Des Weiteren wurden die Ausschläge der Schwingungen mittels Lasersensoren gemessen und aufgezeichnet. Sämtliche Messungen wurden über einen Computer aufgenommen und gespeichert. Es handelte sich dabei um die zeitlichen Verläufe der Beschleunigung, Weg und Belastung. Die aufgezeichneten Signale stellten unbearbeitete Rohdaten dar, die für eine Aussage über die dynamischen Eigenschaften der Probekörper erst aufbereitet und ausgewertet werden mussten.

4.3.3 Last-Verformungsverhalten

Zusätzlich zu den dynamischen Hauptversuchen wurde das Last-Verformungsverhalten der Textilkonfigurationen mithilfe eines Drei-Punkt-Biegeversuchs untersucht. Die Probekörper hatten eine Länge von 400mm, eine Breite von 120mm und eine Höhe von 20mm. Für den Versuch wurden die Proben mittig auf zwei Auflagerrollen aus Stahl platziert, die sich innerhalb einer Materialprüfmaschine (Hersteller ZwickRoell GmbH & Co KG) befanden. Die Stützweite betrug 30cm. Die Proben wurden weggesteuert mit einem Druckstempel gleichmäßig und kontinuierlich bis zum Bruch belastet.

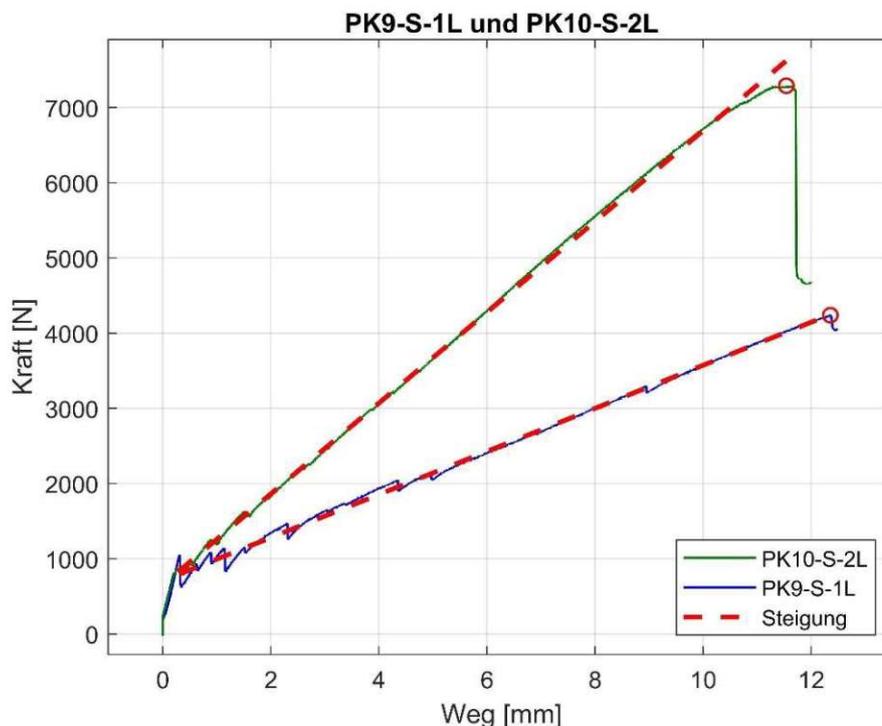


Abb. 4.11: Kraft-Maschinenweg-Diagramm für PK9-S-1L und PK10-S-2L

In Abbildung 4.11 ist beispielhaft das Kraft-Verschiebungsdiagramm der beiden Prüfkörper mit besandeter Textiloberfläche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Zustand IIa (vgl. Kapitel 2.4) nicht so stark ausgeprägt ist und daher die Rissbildung rasch abgeschlossen war. Die maximale Anzahl von Rissen wird schnell erreicht, was auf die kurze Stützweite des Bauteils zurückzuführen ist. Die Bruchlast der zweilagig bewehrten Probekörper ist vor allem aufgrund der größeren statischen Nutzhöhe deutlich höher. Bei diesen Probekörpern wurden die Bewehrungen randnah platziert, während sie bei den einlagig bewehrten Probekörpern mittig verlegt wurden.

In Tabelle 4.8 sind die Ergebnisse der statischen Versuche zusammengefasst. Im Anhang sind sämtliche Kraft-Verformungsdiagramme und Ergebnisse angeführt. Der Elastizitätsmodul des Betons wurde im elastischen Spannungszustand anhand der Kraft-Verformungs-Beziehung eines

Biegebalkens auf zwei Auflagern mit mittiger Einzellast ermittelt. Der Mittelwert aller ermittelten Elastizitätsmodule beträgt rund 33000 N/mm^2 . Die Risslast der Probekörper variiert im Bereich von etwa 900 N bis 1100 N, wobei der Mittelwert bei etwa 1050 N liegt. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Textilien zeigt die Textilbewehrung mit besandeter Oberfläche eine höhere Tragkraft. Dies kann durch die spezielle Oberflächenprofilierung des Textils erklärt werden, die zu einer verbesserten mechanischen Verzahnung mit der Betonmatrix führt und somit zu einer erhöhten Kraftübertragung in die Bewehrung. Darüber hinaus weist das Textil mit besandeter Oberfläche gemäß Tabelle 4.4 die höchste Bruchlast auf. Die Bewehrung ohne Beschichtung zeigte die geringste Tragfähigkeit.

Alle Probekörper mit beschichteter Textilbewehrung versagten aufgrund eines Biegeschubbruchs, ohne die Biegetragfähigkeit zu erreichen. Es wurde beobachtet, dass bei fortschreitender Laststeigerung geneigte Schubrissse vermehrt in die Betondruckzone eindringen und dort zum Versagen führten. Die geringe Querkrafttragfähigkeit der Proben wird durch das Fehlen einer Schubbewehrung und die hohe Schubschlankheit interpretiert. Das Versagen der Probekörper mit unbeschichteten Textilien erfolgte durch Biegezugversagen, bei dem es zum Bruch der Faserbündel kam.

Die Steifigkeitswerte im gerissenen Zustand der Probekörper mit zweilagiger Bewehrung lagen ungefähr doppelt so hoch wie jene der einlagig bewehrten Probekörper innerhalb derselben Serie. Die zweite Textilschicht ermöglicht eine effizientere Verteilung von Spannungen und Belastungen im Beton, was zu einer verstärkten Widerstandsfähigkeit gegenüber Verformungen und Rissbildung führen kann. Die Steifigkeit wurde anhand der Steigung der durch die Messdaten im Zustand II gelegten Regressionsgerade ermittelt. Auch hinsichtlich der Bruchenergie zeigte sich eine Verdopplung bei den Probekörpern, die mit zweilagigen Textilien bewehrt waren, was auch in Verbindung mit der erhöhten Steifigkeit steht.

Tab. 4.8: Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeversuche

Bezeichnung Prüfkörper	Risslast [N]	Bruchlast [N]	Elastizitäts- modul [N/mm²]	Steifigkeit Zustand II [N/mm]	Bruch- energie [Nmm]
PK9-S-1L	1056	4239	28706	287	31077
PK10-S-2L	880	7291	36574	604	50342
PK11-G-1L	1086	2126	33282	127	24462
PK12-G-2L	1149	5978	35695	456	44640
PK13-O-1L	883	1050	28737	132	3577
PK14-O-2L	1070	2145	34523	293	8732

4.4 Grundlagen zur Ermittlung der Dämpfung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen, die für die Auswertung der Ausschwingversuche relevant sind, näher erläutert. Es wird gezeigt, wie für eine ausreichend genaue Untersuchung eines dynamischen Systems ein einfaches schwingungsfähiges Modell herangezogen werden kann. Dadurch ist es möglich, Schwingungen mathematisch zu erfassen, um daraus folgende dynamische Kenngrößen abzuleiten:

- Schwingungsdauer T
- Dämpfungsmaß ζ
- Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0
- Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems ω'

4.4.1 Aufstellung der Bewegungsgleichung

Ein schwingungsfähiges System lässt sich am einfachsten durch den Ein-Massen-Schwinger beschreiben. Dieser besteht aus einer Masse, einer Feder und einem Dämpfer (Abb. 4.12). Anhand dieser Elemente lassen sich die wesentlichen Systemeigenschaften wie Steifigkeit und die Energiedissipation modellieren [44].

Der Ein-Massen-Schwinger besitzt nur die Richtung x , in die er sich bewegen kann. Im Allgemeinen Fall wird seine Masse durch eine von der Zeit abhängige äußere Erregerkraft in Bewegung gesetzt. Die zeitliche Bewegung der Masse wird schließlich durch die Funktion $x(t)$ definiert [25].

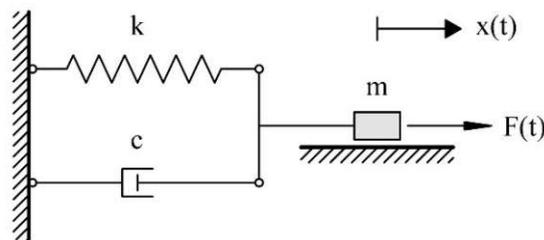


Abb. 4.12: Ein-Massen-Schwinger

Um ein solches dynamisches System zu analysieren ist es erforderlich eine mathematische Gleichung, die Bewegungsgleichung, aufzustellen, welche die räumliche und zeitliche Entwicklung des Systems beschreibt. Die Bewegungsgleichung lässt sich am anschaulichsten ermitteln, in dem das System zu einem beliebigen Zeitpunkt, analog zur Statik, freigeschnitten wird und das Kräftegleichgewicht bestimmt wird [44].

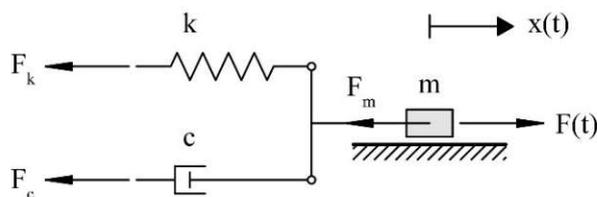


Abb. 4.13: freigeschnittenes System

Die Masse m wird im allgemeinen Fall durch die Erregerkraft $F(t)$ in Richtung x aus der statischen Ruhelage ausgelenkt. Es wird somit die Trägheitskraft F_m der Masse aktiviert, die gemäß dem zweiten Newtonschen Gesetz in entgegengesetzter Richtung wirkt. Genauso wirken die

Federkraft F_k und die Dämpfungskraft F_c als Rückstellkräfte der Bewegungsrichtung entgegen. Formuliert man die Gleichgewichtsbedingung erhält man Gleichung 4.25 [44].

$$F_m + F_c + F_k - F(t) = 0 \quad (4.25)$$

Die Federkraft F_k lässt sich aus dem Produkt von Federkonstante k und dem Weg bzw. Auslenkung x aus der Ruhelage bestimmen:

$$F_k = kx \quad (4.26)$$

Die Dämpfungskraft F_c erhält man, bei Annahme eines viskosen Dämpfers, durch das Produkt von Dämpfungskonstante c und Geschwindigkeit (erste Ableitung der Auslenkung x nach der Zeit):

$$F_c = c\dot{x} \quad (4.27)$$

Die Trägheitskraft F_m ist das Produkt von Masse und Beschleunigung (zweite Ableitung der Auslenkung x nach der Zeit) [44]:

$$F_m = m\ddot{x} \quad (4.28)$$

Werden die obigen Gleichungen in Gleichung 4.25 eingesetzt und umgeformt, erhält man schließlich die Bewegungsgleichung des Ein-Massen-Schwingers. Es handelt sich dabei um eine inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung mit der unbekanntem Funktion $x(t)$ [25]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (4.29)$$

Die Lösung dieser Gleichung nach der Funktion $x(t)$ beschreibt, wie man sehen wird, eine harmonische Schwingung. Das bedeutet, dass der zeitliche Verlauf der Schwingung mittels Winkel-funktionen dargestellt werden kann [17].

4.4.2 Lösung der Bewegungsgleichung

Mechanische Schwingungen können nach der Art der Schwingungserregung, in „freie Schwingungen“ und „erzwungene Schwingungen“, unterteilt werden. Es wird nun der für die vorliegende Arbeit relevante Fall der „freien Schwingung“ näher untersucht. Hierbei werden Schwingungen induziert, indem der Körper aus der Ruhelage ausgelenkt und sich dann selbst überlassen wird. Da es keine äußere Erregerkraft $P(t)$ gibt, wie es bei der erzwungenen Schwingung der Fall ist, kann das System frei ausschlagen. Somit kann die Bewegungsgleichung in 4.29 folgendermaßen vereinfacht werden [17]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.30)$$

Somit erhält man eine homogene Differentialgleichung 2. Ordnung. Die Koeffizienten der Differentialgleichung sind konstant, weil dem untersuchten Modell ein lineares Schwingungssystem zugrunde gelegt wird [25]. Durch das Lösen der Bewegungsgleichung nach der Funktion $x(t)$ kann, wie bereits erwähnt, der zeitliche Verlauf der Schwingung beschrieben werden. Dafür sind einige mathematische Umformungen erforderlich, die im Folgenden genauer erläutert werden. Man bedient sich zunächst dem Exponential-Lösungsansatz der Form

$$x(t) = Ae^{\lambda t} \quad (4.31)$$

4.4 Grundlagen zur Ermittlung der Dämpfung

mit den unbekannt Konstanten A und λ [44]. Die 1. und 2. Ableitung der Auslenkung $x(t)$ nach der Zeit t lauten

$$\dot{x}(t) = \lambda A e^{\lambda t} \quad (4.32)$$

$$\ddot{x}(t) = \lambda^2 A e^{\lambda t} \quad (4.33)$$

Die oben genannten Ausdrücke in Gleichung 4.32 und 4.33 werden in die Bewegungsgleichung eingesetzt und man erhält

$$m\lambda^2 A e^{\lambda t} + c\lambda A e^{\lambda t} + k A e^{\lambda t} = 0 \quad (4.34)$$

Durch das Dividieren der Ausdrücke durch die Masse m und durch die gemeinsamen Faktoren vereinfacht sich die Gleichung 4.34 zu

$$\lambda^2 + \lambda \frac{c}{m} + \frac{k}{m} = 0 \quad (4.35)$$

und man erhält eine sogenannte charakteristische Gleichung [25]. Sie ist eine quadratische Gleichung in ihrer Normalform und wird verwendet, um die Lösung der Differentialgleichung bzw. Bewegungsgleichung zu berechnen. Die Lösungen der quadratischen Gleichung lauten nach der kleinen Lösungsformel (p-q-Formel) [21]

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (4.36)$$

Wenn die Terme unter der Wurzel auf einen gleichen Nenner gebracht werden, lautet die Lösungsformel

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2 - 4mk}{4m^2}} \quad (4.37)$$

und es kann je nach dem Wert des Ausdrucks unter der Wurzel in drei Fälle unterschieden werden [25]. Jeder Fall steht für ein eigenes Schwingungsverhalten, das von der Dämpfung des Systems abhängt:

- i) kritische Dämpfung
- ii) überkritische Dämpfung
- iii) unterkritische Dämpfung

Im Fall der kritischen Dämpfung ist der Wurzelausdruck in Gleichung 4.37 gleich Null. Dafür muss der Zähler des Ausdrucks unter der Wurzel gleich Null werden (Gleichung 4.38):

$$c^2 - 4mk = 0 \quad (4.38)$$

Die obere Gleichung 4.38 gilt, wenn die Dämpfungskonstante c der neu eingeführten Vergleichsgröße der kritischen Dämpfung c_c entspricht [21]:

$$c = c_c \quad (4.39)$$

mit

$$c_c = 2\sqrt{mk} \quad (4.40)$$

Ist der Ausdruck unter der Wurzel gleich Null existiert genau eine reelle Lösung. Die kritische Dämpfung c_c ist die kleinste Dämpfung einer freien Schwingung und ist ein Grenzwert zwischen starker und schwacher Dämpfung. Bei einem kritisch gedämpften System tritt keine klassische Schwingung mit Perioden auf, sondern ein asymptotischer Rückgang der Auslenkung zur Ausgangslage (Abb. 4.14) [44].

Im Fall der überkritischen Dämpfung ist der Wurzelausdruck in Gleichung 4.40 positiv. Dies geschieht, wenn die Dämpfungskonstante c größer als die kritische Dämpfung c_c ist [21]

$$c > c_c \quad (4.41)$$

und somit

$$c > 2\sqrt{mk} \quad (4.42)$$

Ist der Ausdruck unter der Wurzel positiv, hat die Lösungsformel in Gleichung 4.40 zwei reelle Lösungen. Wie im Fall der kritischen Dämpfung, tritt bei der überkritischen Dämpfung ebenfalls ein aperiodischer Rückgang der Auslenkung zur Ausgangslage auf [44]. Das heißt, dass es sich um eine starke Dämpfung handelt. Für die meisten baupraktischen Aufgaben sind die oben genannten Fälle unbedeutend [25].

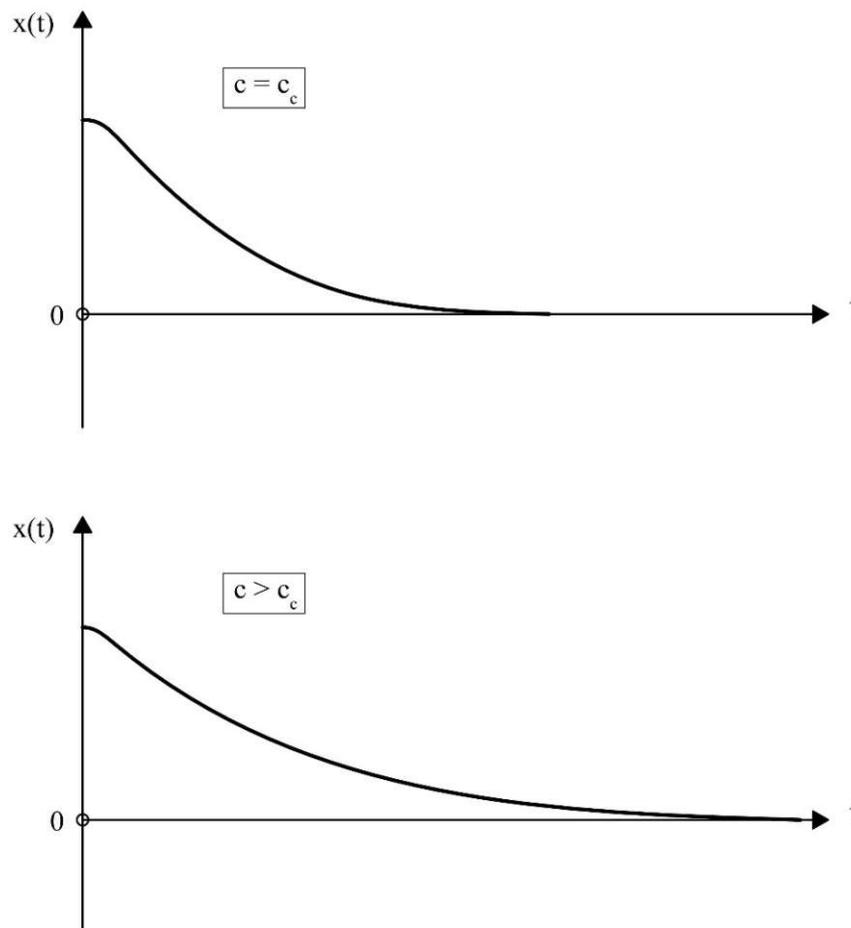


Abb. 4.14: Schwingung mit kritischer Dämpfung (oben) und überkritischer Dämpfung (unten) (in Anlehnung an [40])

4.4 Grundlagen zur Ermittlung der Dämpfung

Für die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit ist der Fall der unterkritischen Dämpfung relevant, da eine schwache Dämpfung erwartet wird. Im Gegensatz zu den ersten zwei Fällen liegt hier eine periodische, mit der Zeit abklingende Schwingung vor, weil die Dämpfungskonstante c kleiner als die kritische Dämpfung c_c ist (Abb. 4.15) [21]:

$$c < c_c \quad (4.43)$$

somit

$$c < 2\sqrt{mk} \quad (4.44)$$

Für eine negative Diskriminante ist die Wurzel der Gleichung 4.40 für reelle Zahlen \mathbb{R} nicht definiert. Das heißt, dass keine reelle Lösung existiert. Hier muss der Berechnung die komplexe Zahlenmenge \mathbb{Q} zugrunde gelegt und die Lösungsformel (Gleichung 4.37) mit der imaginären Zahl i (Gleichung 4.45) erweitert werden.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm i \sqrt{-\left(\frac{c}{2m}\right)^2 + \frac{k}{m}} \quad (4.45)$$

$$i = \sqrt{-1} \quad (4.46)$$

Für die weitere Berechnung der Lösung ist es von Vorteil die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 und den Dämpfungsgrad ζ (Lehrsches' Dämpfungsmaß) einzuführen [44]. Die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 wird wie folgt definiert:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.47)$$

Das Dämpfungsmaß ζ ist das Verhältnis der Dämpfungskonstante c zur kritischen Dämpfung c_c [21]

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (4.48)$$

und somit

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (4.49)$$

Durch eine Umformung im Nenner von Gleichung 4.49 kann zwischen dem Dämpfungsmaß ζ und der Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 folgender Zusammenhang hergestellt werden

$$\zeta = \frac{c}{2m\sqrt{\frac{k}{m}}} = \frac{c}{2m\omega_0} \quad (4.50)$$

Somit gilt

$$\omega_0 \zeta = \frac{c}{2m} \quad (4.51)$$

Gleichung 4.49 und 4.50 eingesetzt in die Lösungsformel von Gleichung 4.45 liefert

$$\lambda_{1,2} = -\omega_0\zeta \pm i\sqrt{-(\omega_0\zeta)^2 + \omega_0^2} = -\omega_0\zeta \pm i\omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.52)$$

An dieser Stelle wird folgender Ausdruck als Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems definiert [44]

$$\omega' = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.53)$$

und man erhält schließlich zwei Lösungen, die konjugiert komplex zueinanderstehen:

$$\lambda_{1,2} = -\omega_0\zeta \pm i\omega' \quad (4.54)$$

$$\lambda_1 = -\omega_0\zeta + i\omega' \quad (4.55)$$

$$\lambda_2 = -\omega_0\zeta - i\omega' \quad (4.56)$$

Die Lösungen werden in den Lösungsansatz von Gleichung 4.31 eingesetzt und ergeben die zwei linear unabhängigen Lösungsfunktionen

$$x_1(t) = A_1 e^{(-\omega_0\zeta + i\omega')t} \quad (4.57)$$

$$x_2(t) = A_2 e^{(-\omega_0\zeta - i\omega')t} \quad (4.58)$$

Somit kann eine allgemeine Lösung als Linearkombination der beiden Lösungen von Gleichung 4.57 und 4.58 dargestellt werden [25]

$$x(t) = A_1 e^{(-\omega_0\zeta + i\omega')t} + A_2 e^{(-\omega_0\zeta - i\omega')t} \quad (4.59)$$

Mit Hilfe der Euler'schen Formel

$$e^{\pm i\varphi} = \cos \varphi \pm i \sin \varphi \quad (4.60)$$

und Herausheben der gemeinsamen Faktoren kann die Lösung der Bewegungsgleichung folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$x(t) = e^{-\omega_0\zeta t} [A_1 (\cos \omega' t \pm i \sin \omega' t) + A_2 (\cos \omega' t \pm i \sin \omega' t)] \quad (4.61)$$

Um eine physikalisch sinnvolle, also eine reelle Lösung zu erhalten müssen die imaginären Terme aus der Gleichung 4.61 verschwinden [25]. Dafür ist es hilfreich, die Konstanten A_1 und A_2 in der algebraischen Form

$$z = a \pm ib \quad (4.62)$$

komplex konjugiert zueinander darzustellen (Gleichung 4.63 und 4.64) [40]:

$$A_1 = a + ib \quad (4.63)$$

$$A_2 = a - ib \quad (4.64)$$

Gleichungen 4.63 und 4.64 eingesetzt in Gleichung 4.61 liefert:

$$x(t) = e^{-\omega_0\zeta t} [(a + ib)(\cos \omega' t \pm i \sin \omega' t) + (a - ib)(\cos \omega' t \pm i \sin \omega' t)] \quad (4.65)$$

4.4 Grundlagen zur Ermittlung der Dämpfung

Durch das Ausmultiplizieren der Terme in der eckigen Klammer von Gleichung 4.65 vereinfacht sich die Lösungsformel zu

$$x(t) = e^{-\omega_0 \zeta t} (2a \cos \omega' t + 2b i^2 \sin \omega' t) \quad (4.66)$$

Setzt man die Definition der imaginären Zahl i von Gleichung 4.46 in die obere Gleichung 4.66 ein, verschwinden die komplexen Ausdrücke schließlich aus der Lösung der Bewegungsgleichung und man erhält ein reelles Schwingverhalten. Durch das Einführen der beiden neuen Konstanten

$$A = 2a \quad (4.67)$$

$$B = 2b \quad (4.68)$$

erhält man für den zeitlichen Verlauf einer gedämpften Schwingung die allgemein übliche Formel in der Fachliteratur:

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_0 t} (A \cos \omega' t + B \sin \omega' t) \quad (4.69)$$

Die Gleichung 4.69 beschreibt den zeitlichen Verlauf einer gedämpften freien Schwingung. Der Ausdruck in der Klammer kann als eine freie ungedämpfte Schwingung aufgefasst werden. Der Term vor der Klammer ist für die exponentielle Abnahme der Schwingung verantwortlich. Somit kommt es bei einem schwach gedämpften System zu einer abklingenden, periodischen Schwingung mit einer Schwingungszeit, die von der Dämpfung abhängt [44].

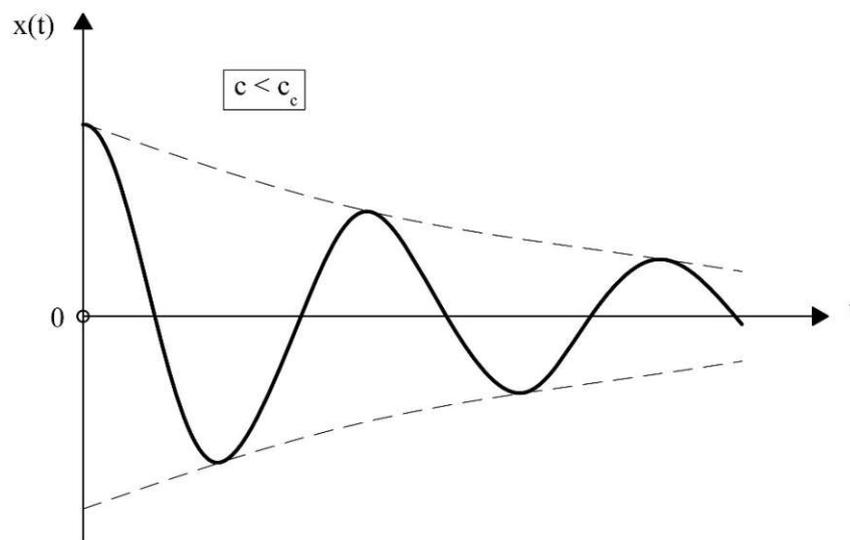


Abb. 4.15: Schwingung mit unterkritischer Dämpfung (in Anlehnung an [40])

4.4.3 Herleitung des Dämpfungsmaßes

Eine weitere wichtige Größe der gedämpften Schwingungen ist die Schwingungszeit T . Sie ist die Dauer einer Periode und ist definiert als

$$T = \frac{2\pi}{\omega'} \quad (4.70)$$

Zur Ermittlung der Dämpfung wird das logarithmische Dekrement Λ verwendet. Es ist als der natürliche Logarithmus des Verhältnisses der Amplituden zweier beliebig aufeinanderfolgenden Perioden definiert (Abb. 4.16) [25].

$$\Lambda = \ln \frac{x(t)}{x(t+T)}. \quad (4.71)$$

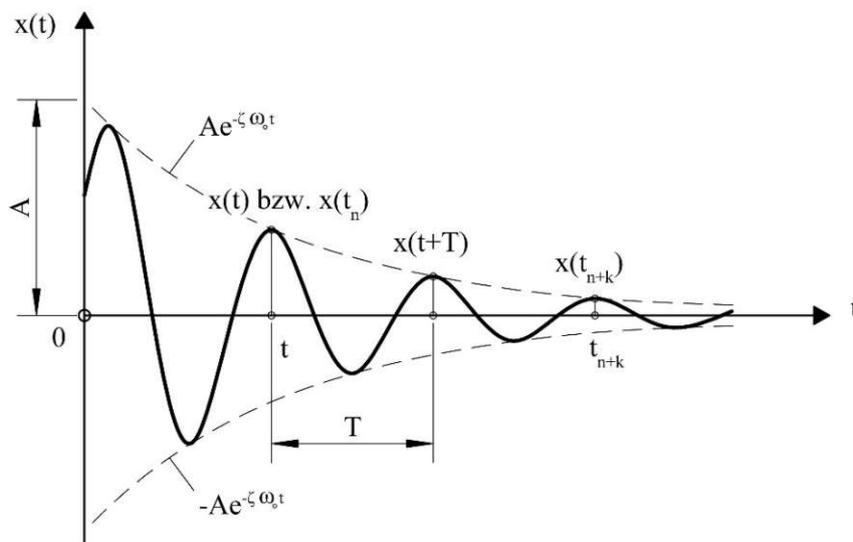


Abb. 4.16: Schwingung mit unterkritischer Dämpfung (in Anlehnung an [25])

Gleichung 4.69 eingesetzt in Gleichung 4.71 liefert

$$\Lambda = \ln \frac{e^{-\zeta\omega_0 t} (A \cos(\omega' t) + B \sin(\omega' t))}{e^{-\zeta\omega_0 (t+T)} \{A \cos[\omega'(t+T)] + B \sin[\omega'(t+T)]\}}. \quad (4.72)$$

Multipliziert man die Terme in den Klammern der trigonometrischen Funktionen aus und bedient man sich dem Zusammenhang

$$T\omega' = 2\pi \quad (4.73)$$

erhält man

$$\Lambda = \ln \frac{e^{-\zeta\omega_0 t} (A \cos(\omega' t) + B \sin(\omega' t))}{e^{-\zeta\omega_0 (t+T)} (A \cos(\omega' t + 2\pi) + B \sin(\omega' t + 2\pi))}. \quad (4.74)$$

Wendet man das Gesetz der Periodizität (Gleichungen 4.75 und 4.76)

$$\sin x = \sin(x + 2n\pi) \quad n \in \mathbb{Z} \quad (4.75)$$

$$\cos x = \cos(x + 2n\pi) \quad n \in \mathbb{Z} \quad (4.76)$$

an, können die trigonometrischen Funktionen gekürzt werden und die Gleichung 4.74 vereinfacht sich zu

$$\Lambda = \ln \frac{e^{-\zeta\omega_0 t}}{e^{-\zeta\omega_0(t+T)}} \quad (4.77)$$

Durch eine weitere Kürzung und das Einsetzen von Gleichung 4.70 in Gleichung 4.77, erhält man die Formel für das logarithmische Dekrement der einfachen Form

$$\Lambda = \ln(e^{\zeta\omega_0 \frac{2\pi}{\omega'}}) = \zeta\omega_0 \frac{2\pi}{\omega'} \quad (4.78)$$

Setzt man in Gleichung 4.78 die Definition der Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems ω' (Gleichung 4.53) ein, kann nach dem Dämpfungsmaß ζ aufgelöst werden (Gleichung 4.79) [25]:

$$\zeta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad (4.79)$$

Setzt man in Gleichung 4.70 die Gleichung 4.53 ein und bedient sich dabei der Formel für das Dämpfungsmaß (Gleichung 4.79), kann die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 mit dem logarithmischen Dekrement Λ und der Schwingungsdauer T berechnet werden [3]:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}{T} \quad (4.80)$$

Liegt nun ein Schwingungsdiagramm aus einem Ausschwingversuch vor, kann somit aus zwei beliebigen aufeinanderfolgenden Ausschlägen der Schwingung das Dämpfungsmaß ζ berechnet werden. Das logarithmische Dekrement Λ kann auch aus dem Verhältnis zwischen einem beliebigen Maximum und dem nach k Perioden folgenden Maximum nach Gleichung 4.81 ermittelt werden. Dadurch können bei sehr schwach gedämpften Systemen genauere Werte ermittelt werden [40]:

$$\Lambda = \frac{1}{k} \ln \frac{x(t_n)}{x(t_{n+k})} \quad (4.81)$$

Die Schwingungszeit kann aus einem Schwingungsdiagramm abgeschätzt werden, in dem die zeitliche Differenz zwischen den beiden gewählten Amplituden gebildet und durch die Anzahl der Perioden k dividiert wird (Gleichung 4.82) [3]:

$$T = \frac{t_k - t_n}{k} \quad (4.82)$$

4.5 Auswertung der Messgrößen

4.5.1 Vorgehen bei der Auswertung

Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen bei der Auswertung der Messgrößen am Prüfkörper PK2-B exemplarisch beschrieben. Wie in Kapitel 4.3.2 dargestellt, wurde bei den durchgeführten Versuchen einerseits die Beschleunigung und andererseits die Auslenkung der Prüfkörper während des Ausschwingvorgangs gemessen. Beide Zustandsgrößen wurden in Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen, um den zeitlichen Verlauf der Schwingung darstellen zu können (Abb. 4.17).

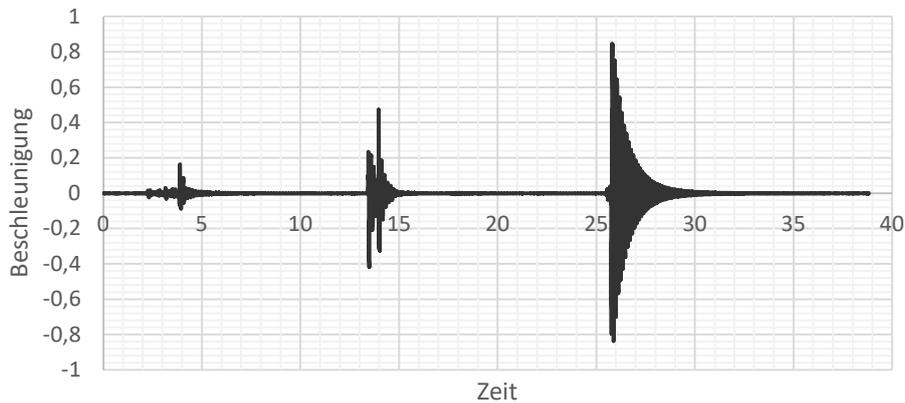


Abb. 4.17: Beispiel für aufgezeichnete Rohdaten der gesamten Messung

Die gesamte Datenmenge wurde vor der Auswertung von den nicht zum Ausschwingversuch gehörenden, unbrauchbaren Daten bereinigt, um den Rechen- und Programmieraufwand der anschließenden Analyse zu reduzieren. Das Schwingungsverhalten des Prüfkörpers wurde mit Hilfe der Mathematik-Software MATLAB und der zusätzlichen Software-Komponente SIGNAL PROCESSING TOOLBOX näher untersucht. Dafür wurde ein eigener Programmcode entwickelt (siehe Anhang). Aus dem bereinigten Datensatz konnten die beiden Schwingungsdiagramme in Abb. 4.18 und Abb. 4.19 abgebildet werden.

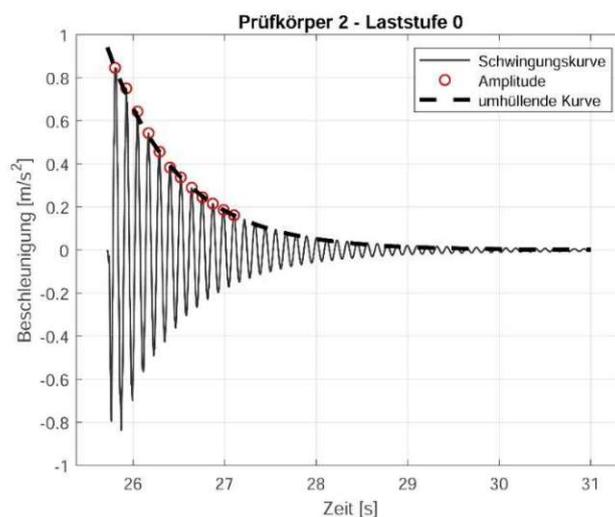


Abb. 4.18: Beschleunigungsmessung pro Zeit für PK2-B – Laststufe 0

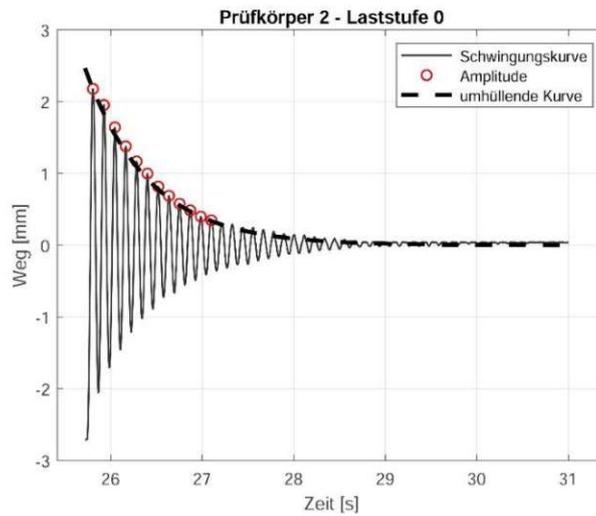


Abb. 4.19: Wegmessung pro Zeit für PK2-B – Laststufe 0

Der Berechnung der dynamischen Kenngrößen wurden die in Kapitel 4.4 hergeleiteten Formeln zugrunde gelegt. Demzufolge ist es zunächst erforderlich die Werte der Amplituden zu finden. Dies geschieht über die Ermittlung der lokalen Maxima der Schwingungskurve (Abb. 4.18 und Abb. 4.19). Um hinreichend genaue Ergebnisse zu erhalten, reicht es $n > 10$ aufeinanderfolgende Perioden zu untersuchen. Über das logarithmische Dekrement Λ (Gleichung 4.78), das sich aus dem Verhältnis zwischen den gefundenen Amplituden errechnen lässt, wurde das Dämpfungsmaß berechnet (Gleichung 4.79). Die Frequenz wurde über den Kehrwert der Schwingungszeit bestimmt, welche über die Differenz zweier aufeinanderfolgenden Amplituden der Abklingkurve bestimmt wurde (Gleichung 4.82). In Kapitel 4.4.1 wurde gezeigt, dass die Schwingungskurven und deren Amplituden exponentiell abnehmen. Das heißt es existiert eine Exponentialkurve, welche die Schwingungskurve umhüllt (Abb. 4.16) und unter anderem vom ermittelten Dämpfungswert abhängt. Diese Hüllkurve kann durch das Auftragen in das Schwingungsdiagramm als optische Kontrolle bei der Berechnung der dynamischen Kenngrößen dienen. Tabelle 4.9 demonstriert exemplarisch die Ergebnisse aus der Beschleunigungs- und Wegmessung für Probekörper PK2-B. Die Gegenüberstellung der Auswertungen zeigt, dass die Messungen der unterschiedlichen Zustandsgrößen nur sehr gering voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Dies deutet auf eine zuverlässige Ausführung der Messungen hin. Folgende Kenngrößen wurden für beide Messarten separat berechnet und verglichen:

- Eigenfrequenz f
- Dämpfungsmaß ζ
- Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 und des gedämpften Systems ω'

Tab. 4.9: Ergebnisse für Prüfkörper PK2-B – Laststufe 0

Beschleunigungsmessung					Wegmessung				
T	f	ζ	ω_0	ω'	T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0.11	9.27	0.022	58.26	58.24	0.11	9.34	0.025	59.75	59.73

4.5.2 Zusammenfassung der Messergebnisse

Im Folgenden wurde für jede Laststufe der Mittelwert der berechneten Kenngrößen aus der Beschleunigungs- und Wegmessung gebildet. Die berechneten Werte aus dem Ausschwingversuch sind in Tabelle 4.10 aufgelistet.

Tab. 4.10: Auflistung der Messergebnisse

Bezeichnung Prüfkörper	Laststufe		Mittelwert aus Beschleunigungs- und Wegmessung				
	F	T	f	ζ	ω_0	ω'	
	[kN]	[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
PK1-S	LS0	0	0.08	12.10	0.007	76.01	76.00
	LS1	0.06	0.13	7.99	0.035	50.20	50.17
PK2-S	LS0	0	0.11	9.31	0.024	59.01	58.99
	LS1	0.06	0.11	8.93	0.028	56.13	56.11
	LS2	0.15	0.13	7.93	0.033	49.83	49.81
	LS3	0.30	0.13	7.98	0.030	50.15	50.13
PK3-G	LS0	0	0.09	10.69	0.007	67.14	67.14
	LS1	0.06	0.16	6.14	0.022	38.59	38.58
	LS2	0.15	0.17	5.80	0.025	36.48	36.47
PK4-G	LS0	0	0.08	12.71	0.004	79.85	79.85
	LS1	0.06	0.09	11.01	0.007	69.20	69.19
	LS2	0.15	0.12	8.75	0.021	55.46	55.45
	LS3	0.30	0.12	8.60	0.021	54.03	54.02
PK5-O	LS0	0	0.09	11.06	0.012	69.48	69.48
	LS1	0.06	0.13	7.52	0.042	47.27	47.23
PK6-U	LS0	0	0.08	12.10	0.005	76.01	76.01
PK7-H	LS0	0	0.07	13.91	0.012	87.42	87.42
PK8-S	LS0	0	0.13	7.94	0.013	49.87	49.87

4.5.3 Gegenüberstellung der Dämpfungswerte

In Abbildung 4.20 werden die ermittelten Dämpfungsmaße aller Probekörper für die zugehörigen Laststufen gegenübergestellt.

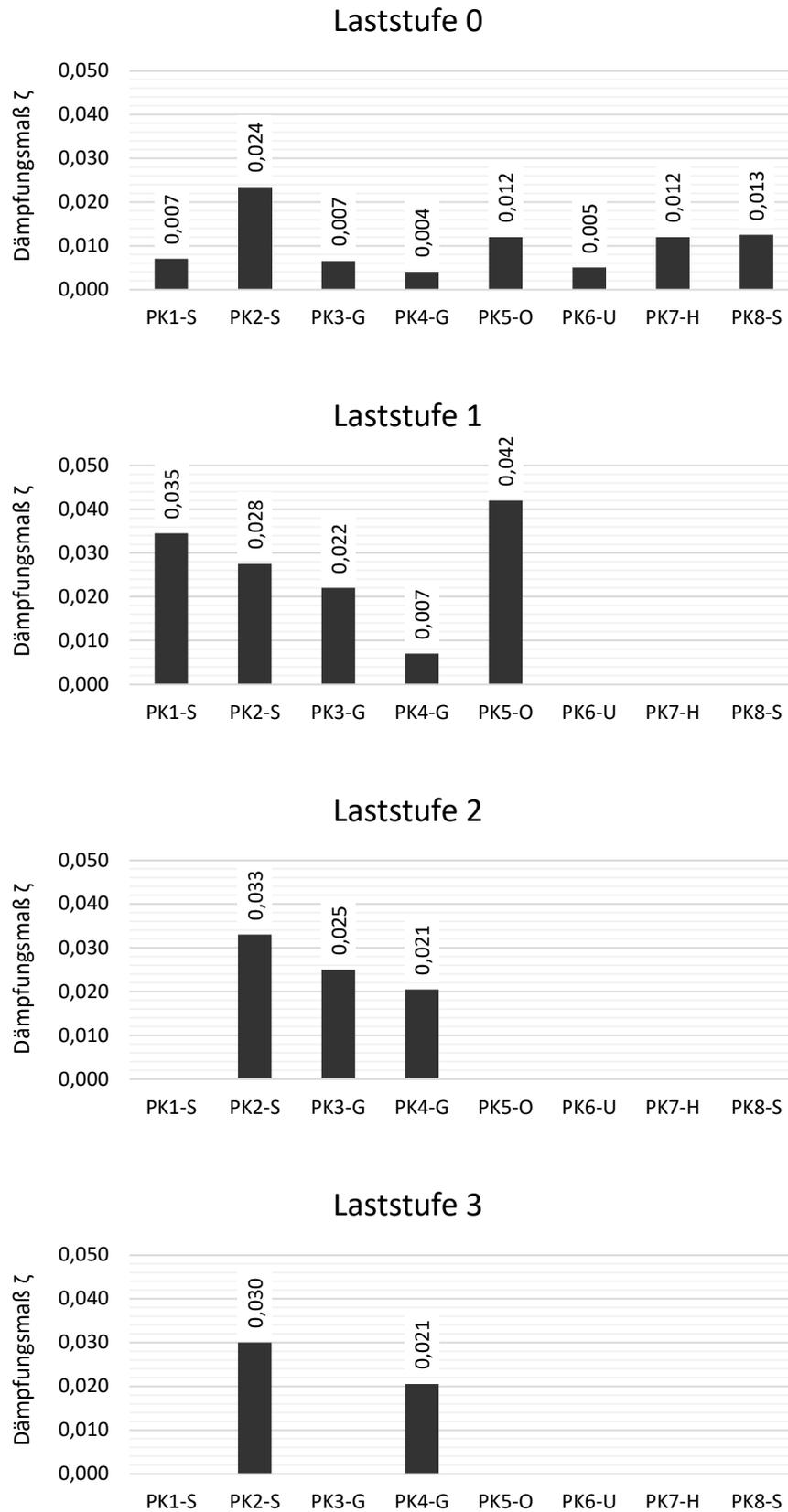


Abb. 4.20: Dämpfungsmaß ζ für Laststufe 0 bis 3

4.5.4 Gegenüberstellung der Frequenzwerte

Folgend werden in Abbildung 4.20 die ermittelten Frequenzwerte sämtlicher Probenkörper für die Laststufen von 0 bis 3 miteinander verglichen.

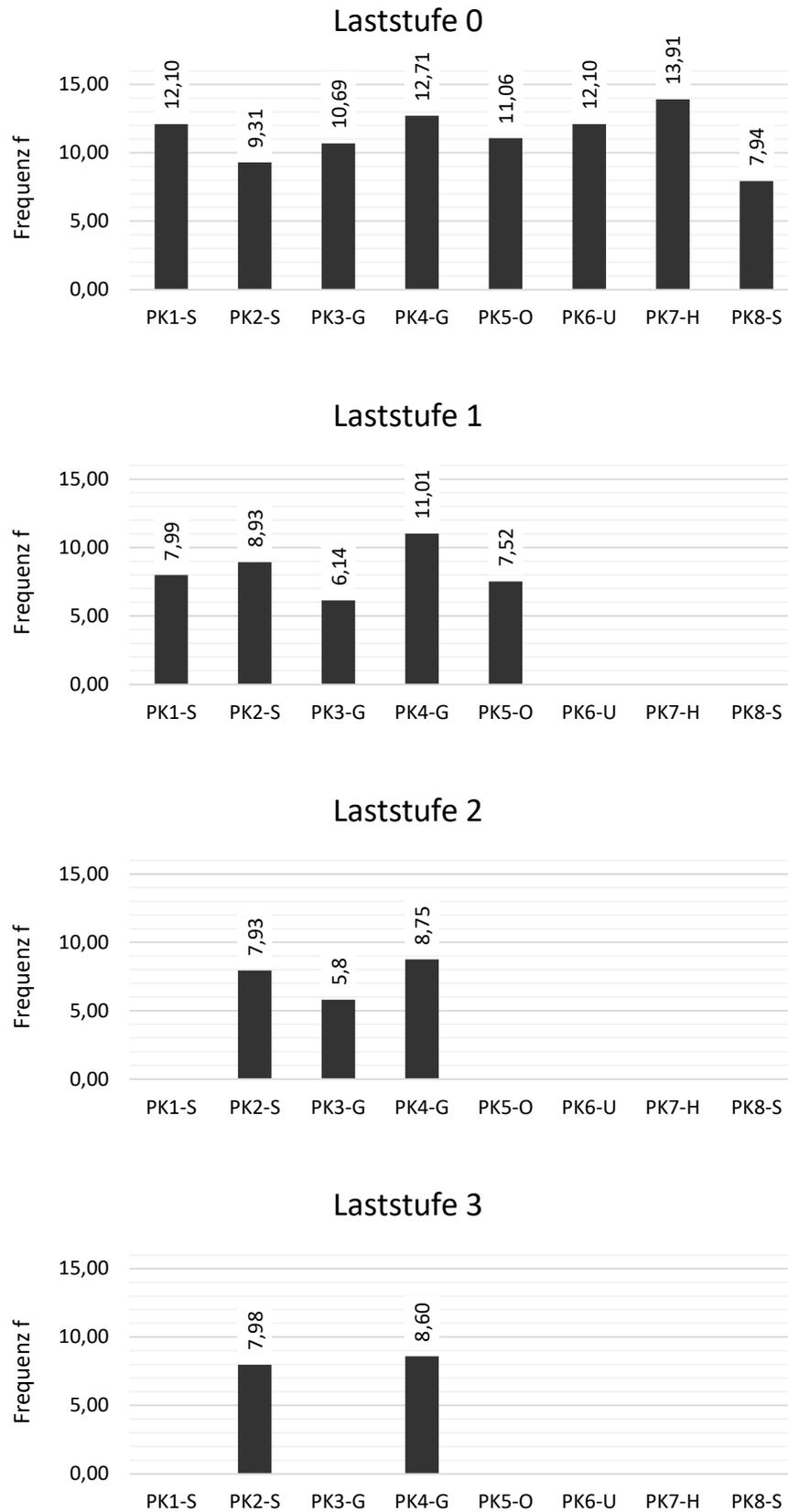


Abb. 4.21: Frequenz f für Laststufe 0 bis 3

4.6 Zusammenfassung der Auswertung

4.6.1 Dämpfung

Im ungerissenen Zustand wurde bis auf PK2-S bei allen Betonprüfkörpern ein Dämpfungsmaß zwischen 0,004 und 0,01 berechnet. Der Mittelwert der Auswertungen beträgt hier 0,007. Bei PK2-S ist der Dämpfungswert deutlich höher, da es während den Vorbereitungen zu den Messungen ungewollt zu einem Riss im Betonquerschnitt kam. Der Ski- und Holzversuchskörper besitzen einen knapp über 0,01 liegenden Dämpfungswert, bei weit auseinander liegenden Frequenzen. Die Messungen in der Laststufe 0 zeigen, dass sich die Betonprüfkörper im ungerissenen Zustand steifer verhalten als die Ski- und Holzprüfkörper.

In der Laststufe 1 wurden die Prüfkörper bis zu einer definierten Kraft belastet. Bei allen bewehrten Bauteilen bildeten sich die ersten Risse, wobei es wie zuvor erwähnt, beim unbewehrten Probekörper PK6-U zum Versagen kam. Wie zu erwarten war, steigen die Dämpfungswerte der Betonprüfkörper aus Beton in der Laststufe 1 deutlich und erreichen je nach Rissanteil ungefähr den Faktor 3 bis 5 zur Laststufe 0. Der höchste Dämpfungswert wurde mit 0,042 beim Prüfkörper PK5 ermittelt. In den weiteren Laststufen 2 und 3, kann man bei den Probekörpern, bei denen es zufolge der Laststeigerung nicht zu einem Versagen gekommen ist, erkennen, dass das Dämpfungsmaß, trotz weiterer Rissbildung, im Vergleich zur Laststufe 1 nicht weiter anstieg. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Mittelwert der Dämpfung der Textilbeton-Prüfkörper im gerissenen Zustand 0,025 beträgt. In Abbildung 4.22 sind die ermittelten Dämpfungsmaße in Abhängigkeit der Belastung dargestellt.

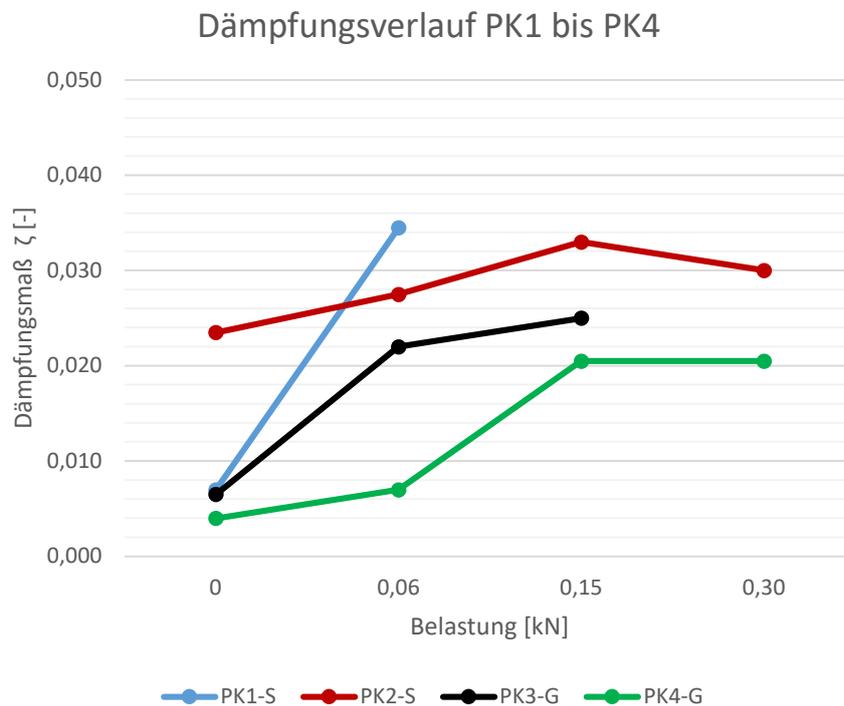


Abb. 4.22: Dämpfungsmaße in Abhängigkeit der Belastung

4.6.2 Frequenz

Im unbelasteten Zustand, also in der Laststufe 0, besitzen alle Versuchskörper aus Textilbeton, bis auf PK2-S, Frequenzwerte, die nah um den bei der Vordimensionierung ermittelten Wert von 12 Hz schwanken. Zwischen den bewehrten und unbewehrten Probekörpern ist kein großer Unterschied erkennbar. Da der Prüfkörper PK2-S zum Kalibrieren des Schwingungserregers genutzt wurde, kam es hier wohl ungewollt zu einem Riss und somit zu einer deutlichen Abweichung gegenüber den Messergebnissen der anderen Prüfkörper. Die Frequenz des Holz-Probekörpers PK7-H beträgt im Lastniveau 0 um 15% mehr als bei den Beton-Probekörpern. Beim Ski-Probekörper PK8-S ist die Frequenz um circa 35% geringer als bei den Beton-Probekörpern. Für den Ski- und Holzprobekörper endeten hier die Messungen.

In der Laststufe 1 kam es zur erstmaligen Belastung und Rissbildung in den Probekörpern. Der unbewehrte Probekörper PK6-U versagte bei 15 N, noch bevor das für alle Versuchskörper definierte erste Lastniveau erreicht wurde. Bei allen anderen Probekörpern kann man eine deutliche Senkung der Frequenz erkennen. Dies ist damit zu begründen, dass es durch die ersten Rissbildungen zu einer Steifigkeitsabnahme im Probekörper gekommen ist. Bildet man den Mittelwert der Versuchsreihen, kann man zusammenfassend behaupten, dass in der Laststufe 1 die Frequenz bei circa 8 Hz liegt. Das ist gegenüber der Frequenz im ungerissenen Zustand eine Abnahme von 35% und gleichzeitig eine Annäherung an die Frequenz des Ski-Probekörpers. In den weiteren Laststufen 2 und 3, kann man bei den Probekörpern, bei denen es zufolge der Laststeigerung nicht zu einem Versagen gekommen ist, erkennen, dass die Frequenz im Vergleich zur Laststufe 1 nur sehr gering abgenommen hat. Es lässt sich lediglich eine Abnahme um 5% ermitteln.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden am Institut für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien dynamische Versuche (vgl. Kapitel 4.4.1) an schlaff bewehrten Textilbetonbauteilen durchgeführt. Die Versuche hatten das Ziel, das Schwingungsverhalten von Textilbeton zu erforschen. Sie wurden durchgeführt, um zu eruieren, ob Textilbeton in Skikernen als Alternative zu anderen Kernmaterialien wie z.B. Holz eingesetzt werden kann. Um Aussagen über die Werkstoffdämpfung textildawehrter Probekörper treffen zu können, wurde bei der Auswertung der Versuche das Dämpfungsmaß ζ (vgl. Kapitel 4.4.2 Verhältnis der vorhandenen Dämpfung zur kritischen Dämpfung) als Kenngröße herangezogen.

Es kann hervorgehoben werden, dass die Bestimmung der Dämpfungsparameter ein komplexer Vorgang ist, da die realen Dämpfungsmechanismen meist von einem linearen Verhalten abweichen und nicht genau erfasst werden können. Aus praktischen Gründen wurden daher folgende Annahmen für die Ermittlung der Kenngrößen getroffen:

- Linear-elastisches Ein-Massen-Schwinger-System
- Rheologisches Dämpfungsmodell (Kelvin-Voigt-Modell)
- Viskoses Dämpfungsverhalten
- Makroskopische Betrachtung des Verbundwerkstoffs
- Vernachlässigung von möglichen Fremddämpfungen

Dadurch wurde die tatsächliche Energiedissipation durch ein möglichst äquivalentes Dämpfungsmaß angenähert, unabhängig davon, ob es den nichtlinearen Anteilen des Dämpfungsverhaltens zur Gänze entsprach oder nicht. Bei der Untersuchung von Festkörpern mit hohem Elastizitätsmodul genügt für kleine Schwingungen in der Regel eine Modellierung nach Kelvin-Voigt [39]. Der dabei erhaltene lineare Ein-Massen-Schwinger mit geschwindigkeitsproportionalem Dämpfungsansatz ermöglicht eine vereinfachte rechnerische Behandlung der Bewegungsgleichung.

Es wurden Ausschwingversuche bei verschiedenen Laststufen durchgeführt, um die dynamischen Kenngrößen zu bestimmen (siehe Kapitel 4.5.2). Dazu wurden Betonkörper mit drei unterschiedlichen Textilien verwendet. Zunächst wurden die Prüfkörper im ungerissenen Zustand untersucht. In weiterer Folge wurden die Prüfkörper vor den Ausschwingversuchen einer Vorbelastung unterzogen. Bei jeder weiteren Laststufe wurde die Belastung erhöht, um die Auswirkungen der Rissbildung auf das dynamische Verhalten zu beobachten. Dabei wurden die Schwingungen stets von der gleichen Anregung ausgelöst. Anhand der in Kapitel 4.5.2 angeführten Versuchsergebnisse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- i) Im linear-elastischen Spannungszustand bzw. ungerissenen Zustand wurde für alle Probekörper ein annähernd gleiches Dämpfungsmaß ermittelt. Der gebildete Mittelwert der Ergebnisse beträgt $\zeta = 0,007$ und stimmt gut mit den in der Literatur angegebenen Werten für ungerissenen Stahlbeton überein. Unabhängig von der Beanspruchungshöhe gibt DIETERLE in [15] für vorwiegend auf Biegung beanspruchte Stahlbetonteile einen unteren Grenzwert von $\zeta \geq 0,006$ für das Dämpfungsmaß an. PETERSEN empfiehlt in [30] für mittlere Schwingungsamplituden den Dämpfungswert von $\zeta = 0,0048$.
- ii) Der Vergleich der Dämpfungswerte der Textilbetonproben mit den anderer Betonwerkstoffe gemäß Punkt i) und mit den anderen Versuchskörpern untereinander zeigt, dass die Dämpfung im elastischen Bereich als konstant angesehen werden kann. Im Zustand I, in dem ein idealer Verbund zwischen Textil und Beton besteht, kommt es nicht zu Reibungsdämpfung im Verbundbereich. Dadurch ergeben sich spannungsunabhängige und ähnliche Dämpfungswerte.
- iii) Für den Zustand I kann ein unterer Grenzwert von $\zeta \geq 0,004$ angegeben werden. Die im Vergleich zu Stahlbeton leicht geringeren Dämpfungsmaße des Textilbetons können auf den geringen Wasser-Bindemittel-Wert von $W/B = 0,32$ des eingesetzten Betons zurückgeführt werden.
- iv) Im Zustand II weist Textilbeton etwas höhere Dämpfungswerte im Vergleich zu Stahlbeton auf. Mit fortschreitender Laststeigerung und der damit verbundenen Rissbildung kam es nach jeder Laststufe zu einem Steifigkeitsverlust des Versuchskörpers. Die damit einhergehende Zunahme der Dämpfung konnte wie erwartet erfasst werden. Ein so signifikanter Anstieg der Dämpfung wie zwischen der nicht vorbelasteten Laststufe und der ersten Laststufe war jedoch zwischen den weiteren höheren Laststufen nicht erkennbar. Der gebildete Mittelwert der Dämpfungswerte im gerissenen Zustand beträgt $\zeta = 0,025$, was nahe an dem von DIETERLE in [15] für gerissene Stahlbetonbauteile bestimmten Wert von $\zeta = 0,02$ liegt. Diese Angabe gilt für kleine Schwingungsamplituden. Für höhere Schwingungsamplituden gibt DIETERLE ein kleineres Dämpfungsmaß von $\zeta = 0,006$ an. Mit steigender Schwingung bzw. Stahlspannung sinkt der Dämpfungswert (vgl. Kapitel 3.3.4). PETERSEN gibt in [30] für den Zustand II den oberen Grenzwert mit $\zeta \leq 0,0087$ an.
- v) Die leicht erhöhten Dämpfungswerte (oberer Grenzwert $\zeta \leq 0,035$) von Textilbeton im Vergleich zu Stahlbeton dürften auf die kleineren Durchmesser der Rovings zurückzuführen sein. Die Feingliedrigkeit des Textils führt zu einer größeren Ober- bzw. Reibungsfläche bei gleichbleibendem Bewehrungsquerschnitt und somit zu einer höheren Energiedissipation durch Coulomb-Dämpfung (vgl. Kapitel 3.3.2) bzw. Reibungsdämpfung im gerissenen Zustand.
- vi) Beim Vergleich der Ergebnisse der Textilbetonkörper untereinander erreichen die Proben mit der besandeten und somit rauen Textiloberfläche höhere Dämpfungswerte (Mittelwert $\zeta = 0,032$) als die glatten (Mittelwert $\zeta = 0,022$). Dies lässt sich durch die Aktivierung von größeren Reibungskräften und somit höherer Coulomb-Dämpfung erklären.
- vii) Streng genommen beziehen sich die im Versuch ermittelten Dämpfungswerte speziell auf den untersuchten Bauteil, wobei laut [38] eine Übertragung auf andere ähnliche Bauteile möglich ist. Eine Verallgemeinerung auf alle Bauteile ist aufgrund der Komplexität der Dämpfung jedoch fraglich. Die ermittelten Dämpfungswerte berücksichtigen nicht alle Dämpfungseinflüsse und können daher keine uneingeschränkte Gültigkeit beanspruchen.

Die genannten Annahmen zur Vereinfachung können sich kumuliert unterschiedlich stark auf die Mess- und Berechnungsergebnisse auswirken. Da sich die Arbeit nur auf die Ermittlung der Dämpfung durch das logarithmische Dekrement (vgl. Kapitel 4.4.3) bzw. den Ausschwingversuch beschränkt, wären Ergebnisse anderer Methoden von Interesse. Aufgrund des Zeitrahmens und Umfangs der vorliegenden Arbeit wurden aber keine weiteren experimentellen Methoden angewendet. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Dämpfung wäre beispielsweise der Resonanzversuch. Da in allen Ausschwingversuchen (vgl. Kapitel 4.1.1) jeweils ein ganzheitliches Dämpfungsmaß (vgl. Kapitel 3.1) bestimmt wurde, sind die individuellen Anteile der verschiedenen Dämpfungsarten (vgl. Kapitel 3.1.2) nicht erfasst. Da von einem homogenen, nicht zusammengesetzten Bauteil ausgegangen wurde, wird aus makroskopischer Sicht kein Unterschied zwischen der Dämpfung des Textils und des Betons gemacht. In diesem Sinne wird eine strukturelle Dämpfung (vgl. Kapitel 3.1.2) in den untersuchten Probekörpern ausgeschlossen. Je nach Aufbau der Versuchsvorrichtung kann neben der Werkstoffdämpfung auch eine unterschiedlich hohe Systemdämpfung (vgl. Kapitel 3.1.2) hinzukommen. Mögliche Systemdämpfungen, die in den ermittelten Dämpfungswerten der Probekörper noch enthalten sein könnten, sind:

- Luftreibung
- Lagerreibung an der Einspannstelle
- Fremddämpfungen, insbesondere durch das Beschleunigungsmessgerät

Um allgemein gültige Werkstoffdämpfungswerte zu erhalten, sollten während der Versuchsdurchführung überwiegend innere Dämpfungsmechanismen wirken. Das bedeutet, dass die Systemdämpfungen so weit wie möglich minimiert werden sollten. Der Luftreibung kann entgegengewirkt werden, indem die Versuche im Vakuum durchgeführt werden. Die Lagerreibung kann reduziert werden, wenn die höchsten Querschnittsspannungen nicht in der Einspannstelle liegen. Dies kann durch eine Voute im Einspannungsbereich gewährleistet werden. Eine weitere Möglichkeit sind hohe Spannkraften in der Einspannvorrichtung [38]. Fremddämpfungen sind vermeidbare äußere Einflüsse, welche das Schwingungsverhalten verfälschen, in dem sie sich an der Energiedissipation beteiligen. An dieser Stelle können die auf den Probekörpern angebrachten Messgeräte erwähnt werden (vgl. Kapitel 4.3.1). Daher sollte bei Versuchen zur Dämpfungsermittlung möglichst den berührungslosen Messungen der Vorzug gegeben werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden interessante Erkenntnisse über das Dämpfungsverhalten von Textilbeton gewonnen. Die festgestellten Zusammenhänge und Mechanismen bieten wertvolle Einblicke in das hier bearbeitete Themenfeld. Dennoch bleiben einige der Ergebnisse aber unvollständig und erfordern weitere Analysen. Die gewonnenen Ergebnisse stellen eine solide Grundlage dar und können als Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen dienen. Im Folgenden wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsbereiche sowie offene Fragen und Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Thema der vorliegenden Arbeit dargelegt:

- Da die Ausschwingversuche ausschließlich mit derselben Schwingungsanregung durchgeführt wurden, konnte das spannungsabhängige Dämpfungsverhalten nicht untersucht werden. Eine bedeutende Forschungsfrage im Zusammenhang mit Textilbeton betrifft das Dämpfungsmaß bei unterschiedlichen Spannungen, die durch verschiedene Schwingungsamplituden erzeugt werden. Eine solche Untersuchung kann ein vertiefendes Verständnis der Dämpfungseigenschaften liefern. Es stellt sich die Frage, ob die Dämpfung von Textilbeton ähnliche Verhaltensweisen in Bezug auf den Spannungszustand wie Stahlbeton (vgl. Kapitel 3.3.4) aufweist.

- In weiterführenden Untersuchungen könnte an der Entwicklung von rheologischen Modellen gearbeitet werden, die das tatsächliche Dämpfungsverhalten von Textilbeton präziser darstellen und dabei sowohl die Nichtlinearitäten als auch die Coulomb-Dämpfung berücksichtigen. Insbesondere bei der Beschreibung von Schwingungen mit großen Amplituden spielt dies eine besondere Rolle und trägt somit zur Verbesserung der dynamischen Untersuchungen von Textilbeton bei.
- Ein weiterer Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von textilen Betonbewehrungen. Eine genaue Kenntnis darüber, wie verschiedene textile Materialien auf Schwingungen reagieren, ermöglicht eine präzisere Beschreibung der Dämpfungseigenschaften von Textilbeton bei mikroskopischer Betrachtung und deren Einflusses auf die Strukturdämpfung.

Literaturverzeichnis

- [1] BACHMANN, H.: Erdbebensicherung von Bauwerken, 2. Auflage. Basel 2002
- [2] BERGER, W.; FAULSTICH, H.; FISCHER, P.; HEGGER, A.; JACOBASCH, H. J.; MALLY, A.; MIKUT, I.: Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften. Berlin 1993
- [3] BOWER, A.: Free vibration of a damped, single degree of freedom, linear spring mass system. URL: https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En4/Notes/vibrations_free_damped/vibrations_free_damped.htm (Abgerufen am 26.05.2023). 2021
- [4] BRAMESHUBER, W.; MOTT, R.; HEGGER, J.; VOSS, S.; GRIES, T.; BARLÉ, M.; BÖHM, S.; HARTUNG, I.; Serielle Stückfertigung von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 2 2008, S. 64-72. DOI: 10.1002/best.200700597
- [5] BUCHER, C.: Mechanik für Ingenieurinnen und Ingenieure. Wien 2021
- [6] BÜTTNER, A.: Beitrag zur Beschreibung des Dämpfungsverhaltens von Stahlbetonbalken - Dissertation Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar. Weimar 1992
- [7] CHERIF, C. (Hg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Berlin Heidelberg 2011
- [8] CURBACH, M.: Sonderforschungsbereich 528 -Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999-I/2002. Dresden 2001
- [9] CURBACH, M.; JESSE, R.: Verstärken mit Textilbeton; In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörmer, J.-D. (Hg.): Beton-Kalender 2010: Brücken - Betonbau im Wasser. Berlin 2010. S. 459-585
- [10] CURBACH, M.; JESSE, R.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 1 2009, S. 9-16. DOI: 10.1002/best.200800653
- [11] CURBACH, M.; JESSE, R.: Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit textilbewehrtem Beton - Kurzer Bericht zu aktuellen Entwicklungen. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2005, S.78-81
- [12] CURBACH, M.; ORTLEPP, R. (Hg.): Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung; Abschlussbericht 2008/2-2011/1. Dresden 2012
- [13] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E.V. (Hg.): Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. Berlin 1998
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hg.): DIN 60000 - Textilien. Berlin 1969
- [15] DIETERLE, R.: Modelle für das Dämpfungsverhalten von schwingenden Stahlbetonträgern im ungerissenen und gerissenen Zustand. Bericht Nr. 111 / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich. Zürich 1981
- [16] FORSCHUNGSKURATORIUM TEXTIL E.V. (Hg.): Bauen mit Fasern - Textilbeton und -membranen für die Architektur des 21. Jahrhunderts (Broschüre). Berlin 2014
- [17] GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHRÖDER, J.; WALL, W. A.: Technische Mechanik 3. Berlin 2015
- [18] HEGGER, J.; HORSTMANN, M.; VOSS, S.; WILL, N.: Textilbewehrter Beton - Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 6 2007, S. 362-370. DOI: 10.1002/best.200700552
- [19] HEGGER J.; WILL, N.; CURBACH, M.; JESSE, F.: Tragverhalten von textilbewehrtem Beton - Verbund, Rißbildung und Tragverhalten. Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 6 2004, S. 452-455
- [20] JESSE, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix - Dissertation Technische Universität Dresden. Dresden 2004
- [21] KRAMER, H.: Angewandte Baudynamik - Grundlagen und Praxisbeispiele, 2. Auflage. Berlin 2013
- [22] KULAS, C.; GORALSKI, C.: Die weltweit längste Textilbetonbrücke - Technische Details und Praxiserfahrungen. Beton- und Stahlbetonbau 109, Heft 11 2014, S. 812-817. DOI: 10.1002/best.201400066
- [23] LIEBOLDT, M.: Feinbetonmatrix für Textilbeton - Anforderungen - baupraktische Adaption - Eigenschaften. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015, S. 22-28. DOI: 10.1002/best.201400100
- [24] LORENZ, E.; SCHÜTZE, E.; WEILAND S.: Textilbeton - Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015, S. 29-41. DOI: 10.1002/best.201400114
- [25] MATHIAK, F. U.: Strukturdynamik diskreter Systeme. München 2010
- [26] MEYER, I.-F.: Ein werkstoffgerechtes Schädigungsmodell und Stababschnittelement für Stahlbeton unter zyklischer nichtlinearer Beanspruchung - Dissertation Universität Bochum. Bochum 1988
- [27] OFFERMANN, P.; ENGLER, T.; GRIES, T.; ROYE, A.: Technische Textilien zur Bewehrung von Betonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 6 2004, S. 437-443

- [28] OHNO, S.; HANNANT, D. J.: Modelling the Stress Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. In: ACI Materials Journal 91. Farmington Hills 1994
- [29] PENZIEN, J.: Damping Characteristics of Prestressed Concrete. In: ACI Journal Proceedings Vol. 61 1964, p. 1125-1148
- [30] PETERSEN, C.; WERKLE, H.: Dynamik der Baukonstruktionen, 2. Auflage. Wiesbaden 2017
- [31] PREINSTORFER, P.: Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton – Dissertation Technische Universität Wien. Wien 2019
- [32] REMPEL, S.; RICKER, M.; HEGGER, J.: Zuverlässigkeitsanalyse für biegebeanspruchte Textilbetonbauteile – Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten. Beton- und Stahlbetonbau 115, 2020, S. 1- 13. DOI: 10.1002/best.201900090
- [33] RENKER, G.; WALLER, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von Stahlbetonkonstruktionen. Forschung im Ingenieurwesen Band 57, 1991
- [34] SWAMY, R. N.: Damping Mechanics in Cementitious Systems. In: Dynamic Waves in Civil Engineering, Chapter 30. John Wiley Interscience, London 1971, p. 521-542
- [35] TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN: Technology Offer: High-Tech Concrete-Core Skis. URL: https://www.inits.at/startup_portfolio/high-tech-concrete-core-skis (Abgerufen am 26.05.2023). 2023
- [36] TEICHEN, K.-T.: Über die innere Dämpfung von Beton - Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart 1968
- [37] TESCHNER, R.: Glasfasern, 2. Auflage. Würzburg 2019
- [38] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HG.): VDI-Richtlinie VDI 3830 / Blatt 5 – Versuchstechniken zur Ermittlung von Dämpfungskenngrößen. Berlin 2005
- [39] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HG.): VDI-Richtlinie VDI 3830 / Blatt 1 – Werkstoff- und Bauteildämpfung – Einteilung und Übersicht. Berlin 2004
- [40] WESTERKAMP-FREITAG, C.; WÖRNER, J.-D.: Baudynamik; In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörmer, J.-D. (Hg.): Beton-Kalender 2015: Bauen im Bestand, Brücken. Berlin 2010, S. 461-493
- [41] WIETEK, B.: Faserbeton im Bauwesen, 2. Auflage. Sistrans bei Innsbruck 2014
- [42] YANIK, S.: Einfluss der Überdeckung auf die Rissbildung von Hochleistungsbeton mit Carbonbewehrung unter Zugbeanspruchung – Diplomarbeit Technische Universität Wien. Wien 2021
- [43] YOUNES, A.; SEIDEL, A.; RITTNER, S.; CHOKRI, C.; THYROFF, R.: Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015, S. 16-21. DOI: 10.1002/best.201400101
- [44] ZIEGLER, A.: Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. Zürich 2017

Anhänge

Matlab-Code Drei-Punkt-Biegeversuch

```
% Drei-Punkt-Biegeversuch und Bestimmung der Parameter (PK9 und PK10)
clear

load versuch1_pk9.mat %Messdaten PK9
load versuch2_pk10.mat %Messdaten PK10

b= 120
h= 20
L= 300

weg1= Versuchsergebnisse1(:, 2);
kraft1= Versuchsergebnisse1(:, 3);

maxF1= max(kraft1) %Bruchlast
index_maxF1= find(kraft1 == maxF1, 1)
weg_maxF1= weg1(index_maxF1)

n1= length(weg1(weg1 < .1))
maxF_lin1= max(kraft1(1 : n1)) %beliebige Kraft in Zustand I
index_maxF_lin1= find(kraft1 == maxF_lin1, 1)
weg_maxF_lin1=weg1(index_maxF_lin1) %zugehörige Durchbiegung

E1= maxF_lin1 * L^3 / (4 * b * h^3 * weg_maxF_lin1) %E-Modul

m1= length(weg1(weg1 < .5))
maxF_riss1= max(kraft1(1 : m1)) %Risslast
index_maxF_riss1= find(kraft1 == maxF_riss1, 1)

weg_lin1= weg1(index_maxF_riss1 : index_maxF1); %Durchbiegung in Zustand II
kraft_lin1= kraft1(index_maxF_riss1 : index_maxF1); %Kraft in Zustand II
mweg1= mean(weg_lin1);
mkraft1= mean(kraft_lin1);
k1= sum((weg_lin1 - mweg1) .* (kraft_lin1 - mkraft1)) ./ sum((weg_lin1 - mweg1).^2); %Steifigkeit; durch Steigung der lineare Regression
d1= mkraft1 - k1 * mweg1;
x1= weg1(index_maxF_riss1) : .01 : weg1(index_maxF1);
y1= d1 + k1 * x1;

J1= trapz(weg1, kraft1) %Bruchenergie

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

weg2= Versuchsergebnisse2(:, 2);
kraft2= Versuchsergebnisse2(:, 3);

maxF2= max(kraft2); %Bruchlast
index_maxF2= find(kraft2 == maxF2, 1);
weg_maxF2= weg2(index_maxF2);

n2= length(weg2(weg2 < .1));

maxF_lin2= max(kraft2(1 : n2)); %beliebige Kraft in Zustand I
index_maxF_lin2= find(kraft2 == maxF_lin2, 1);
```

```

weg_maxF_lin2=weg2(index_maxF_lin2); %zugehörige Durchbiegung

E2= maxF_lin2 * L^3 / (4 * b * h^3 * weg_maxF_lin2); %E-Modul

m2= length(weg2(weg2 < .3));
maxF_riss2= max(kraft2(1 : m2)); %Risslast
index_maxF_riss2= find(kraft2 == maxF_riss2, 1);

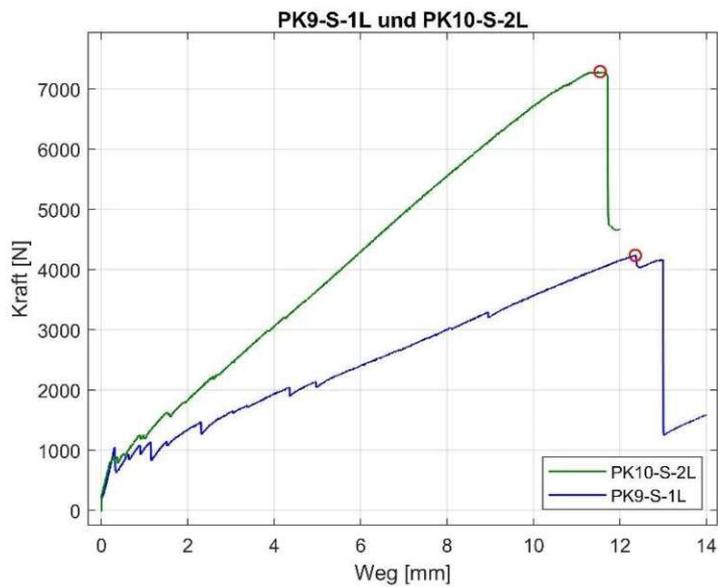
weg_lin2= weg2(index_maxF_riss2 : index_maxF2); %Durchbiegung in Zu-
stand II
kraft_lin2= kraft2(index_maxF_riss2 : index_maxF2); %Kraft in Zustand
II
mweg2= mean(weg_lin2);
mkraft2= mean(kraft_lin2);
k2= sum((weg_lin2 - mweg2) .* (kraft_lin2 - mkraft2)) ./ sum((weg_lin2
- mweg2) .^2); %Steifigkeit; durch Steigung der lineare Regression
d2= mkraft2 - k2 * mweg2;
x2= weg2(index_maxF_riss2) : .01 : weg2(index_maxF2);
y2= d2 + k2 * x2;

J2= trapz(weg2, kraft2) %Bruchenergie

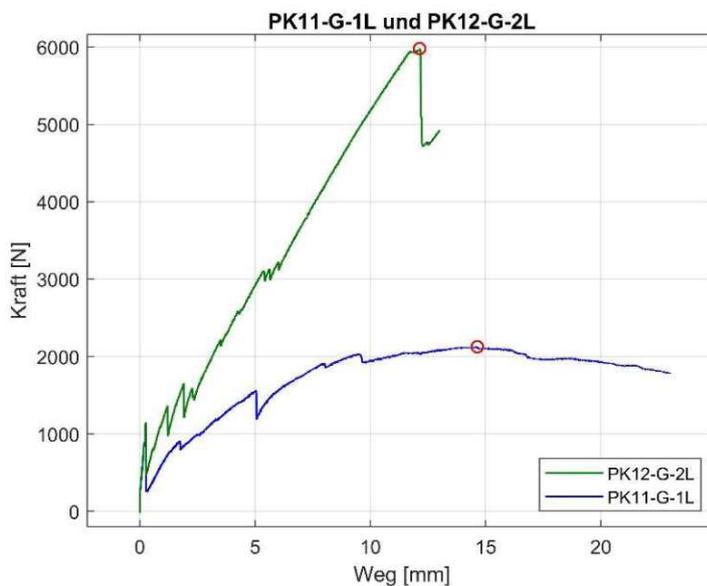
figure(1)
f1= plot(weg1, kraft1, 'b', 'LineWidth', 1)
hold on
f2= plot(weg2, kraft2, 'Color', [0, 0.5, 0], 'LineWidth', 1)
hold on
plot(weg_maxF1, maxF1, 'ro', 'LineWidth', 1)
plot(weg_maxF2, maxF2, 'ro', 'LineWidth', 1)
hold on
grid
title("PK9-S-1L und PK10-S-2L")
xlabel("Weg [mm]")
ylabel("Kraft [N]")
hold on
f3= plot(x1, y1, 'r--', 'LineWidth', 2)
hold on
f3=plot(x2, y2, 'r--', 'LineWidth', 2)
hold on
legend([f2 f1 f3], 'PK10-S-2L','PK9-S-1L', 'Steigung', 'Location',
'SouthEast')
hold off

```

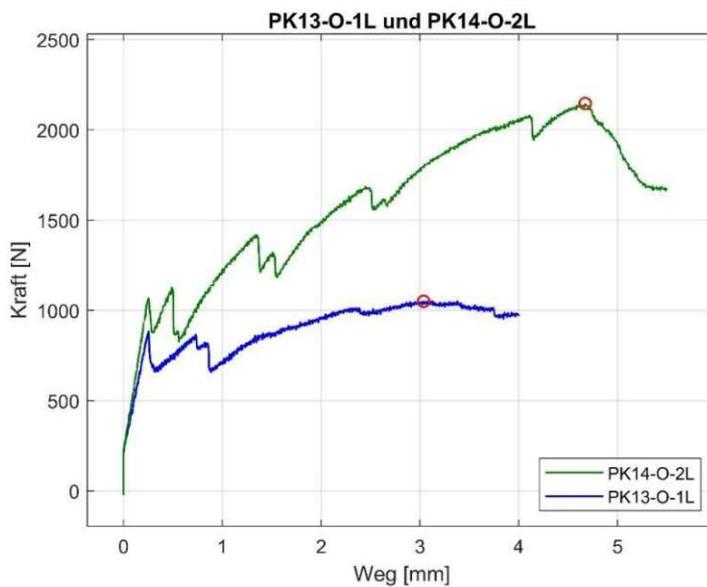
Messungen Drei-Punkt-Biegeversuche



Bezeichnung Prüfkörper	Risslast [N]	Bruchlast [N]	E-Modul [N/mm ²]	Steifigkeit Zust. II [N/mm]	Bruchenergie [Nmm]
PK9-S-1L	1056	4239	28706	287	31077
PK10-S-2L	880	7291	36574	604	50342



Bezeichnung Prüfkörper	Risslast [N]	Bruchlast [N]	E-Modul [N/mm ²]	Steifigkeit Zust. II [N/mm]	Bruchenergie [Nmm]
PK11-G-1L	1086	2126	33282	127	24462
PK12-G-2L	1149	5978	35695	456	44640



Bezeichnung Prüfkörper	Risslast [N]	Bruchlast [N]	E-Modul [N/mm ²]	Steifigkeit Zust. II [N/mm]	Bruchenergie [Nmm]
PK13-O-1L	883	1050	28737	132	3577
PK14-O-2L	1070	2145	34523	293	8732

Matlab-Code Ausschwingversuche

```
% Ausschwingversuch PK1-S - Laststufe 0

clear

load ausschwingversuch_pk1_ls0.mat

zeit= Ausschwingversuch_PK1_LS0(:, 1); %Zeitmessung

beschleunigung= Ausschwingversuch_PK1_LS0(:, 2); %Beschleunigungsmes-
sung

weg= Ausschwingversuch_PK1_LS0(:, 3) - mean(Ausschwingver-
such_PK1_LS0(:, 3)); %Wegmessung

[pks_b, locs_b]= findpeaks(beschleunigung, 'MinPeakProminence', 0.3);
%Ermittlung Amplituden

perioden_b= length(locs_b) - 1; %Wahl Periodenanzahl k

periodendauer_b= (zeit(locs_b(perioden_b)) - zeit(locs_b(1))) / perio-
den_b %Schwingungszeit T

frequenz_b= 1 / periodendauer_b %Frequenz f

delta_b= (1 / perioden_b) * log(pks_b(1) / pks_b(perioden_b)) %loga-
rithmische Dekrement Delta

zeta_b= delta_b / ((4 * pi()^2 + delta_b^2)^(1/2)) %Dämpfungsgrad zeta

omega_b_0= ((4 * pi()^2 + delta_b^2)^(1/2)) / periodendauer_b %Eigen-
kreisfrequenz omega0 ungedämpft

omega_b_d= omega_b_0 * (1 - zeta_b^2)^(1/2) %Eigenkreisfrequenz omega'
gedämpft

umhüllende_f_b= beschleunigung(locs_b(1)) .* exp(-zeta_b * omega_b_0
.* (zeit - zeit(locs_b(1)))); %Umhüllende Kurve

[pks_w, locs_w]= findpeaks(weg, 'MinPeakProminence', 0.7); %Ermittlung
Amplituden

perioden_w= length(locs_w) - 1; %Wahl Periodenanzahl k

periodendauer_w= (zeit(locs_w(perioden_w)) - zeit(locs_w(1))) / perio-
den_w %Schwingungszeit T

frequenz_w= 1 / periodendauer_w %Frequenz f

delta_w= (1 / perioden_w) * log(pks_w(1) / pks_w(perioden_w)) %loga-
rithmische Dekrement Delta

zeta_w= delta_w / ((4 * pi()^2 + delta_w^2)^(1/2)) %Dämpfungsgrad zeta

omega_w_0= ((4 * pi()^2 + delta_w^2)^(1/2)) / periodendauer_w %Eigen-
kreisfrequenz omega0 ungedämpft

omega_w_d= omega_w_0 * (1 - zeta_w^2)^(1/2) %Eigenkreisfrequenz omega'
gedämpft
```

```
umhullende_f_w= weg(locs_w(1)) .* exp(-zeta_w * omega_w_0 .* (zeit -
zeit(locs_w(1)))); %Umhüllende Kurve

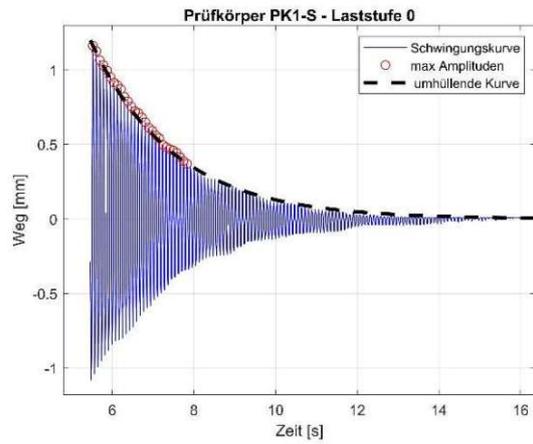
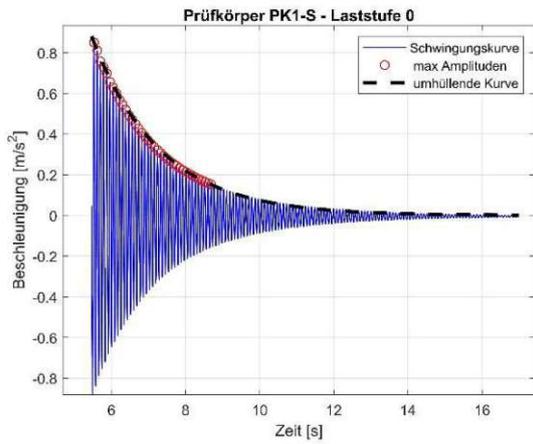
figure(1)
plot(zeit, beschleunigung, 'b', 'LineWidth', .7)
hold on
plot(zeit(locs_b), pks_b, 'ro', 'LineWidth', .7)
hold on
plot(zeit, umhullende_f_b, 'k--', 'LineWidth', 2.5)
grid
title("Prüfkörper PK1-S - Laststufe 0")
xlabel("Zeit [s]")
ylabel("Beschleunigung [m/s^2]")
hold off
legend('Schwingungskurve',' max Amplituden',' umhüllende Kurve')

figure(2)
plot(zeit, weg, 'b', 'LineWidth', .7)
hold on
plot(zeit(locs_w), pks_w, 'ro', 'LineWidth', .7)
hold on
plot(zeit, umhullende_f_w, 'k--', 'LineWidth', 2.5)
grid
title("Prüfkörper PK1-S - Laststufe 0")
xlabel("Zeit [s]")
ylabel("Weg [mm]")
hold off

legend('Schwingungskurve','max Amplituden',' umhüllende Kurve')
```

Messungen Ausschwingversuche

Prüfkörper PK1-S, Laststufe 0



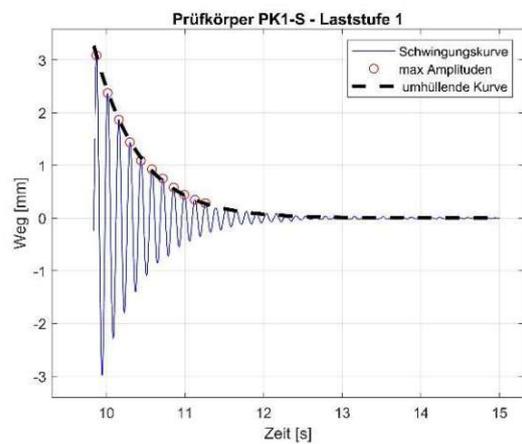
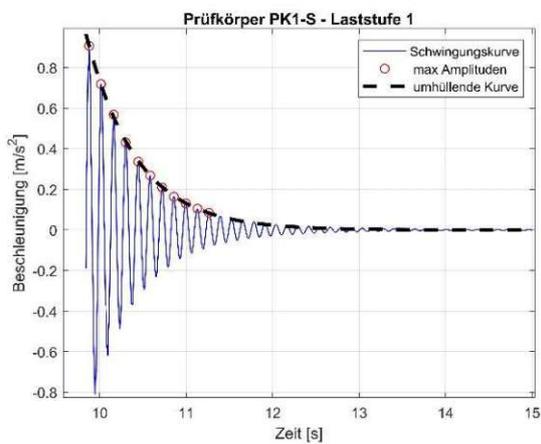
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,08	12,04	0,007	75,65	75,64

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,08	12,15	0,007	76,36	76,36

Prüfkörper PK1-S, Laststufe 1



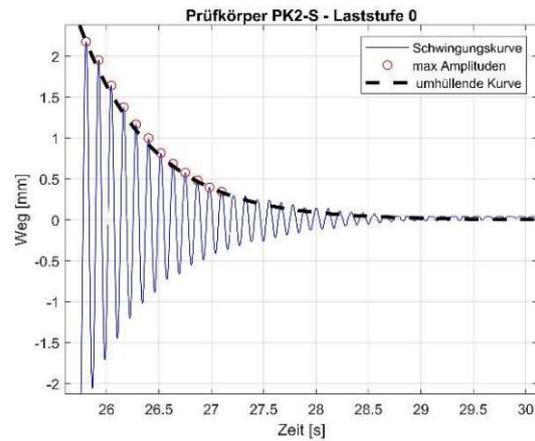
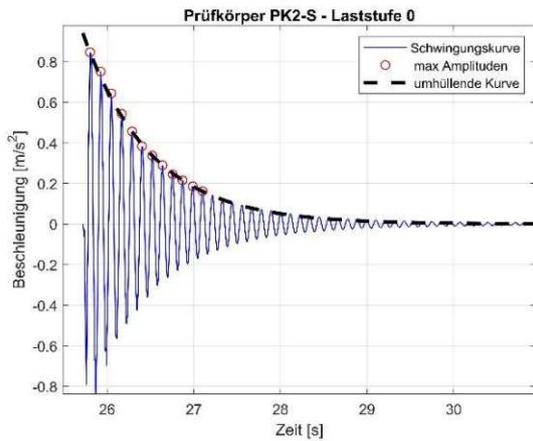
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,98	0,034	50,16	50,13

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,99	0,035	50,23	50,20

Prüfkörper PK2-S, Laststufe 0



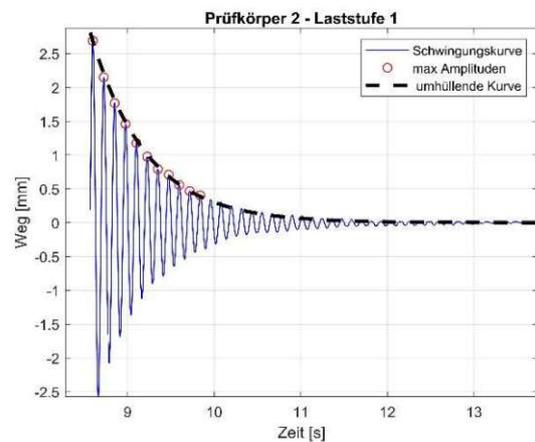
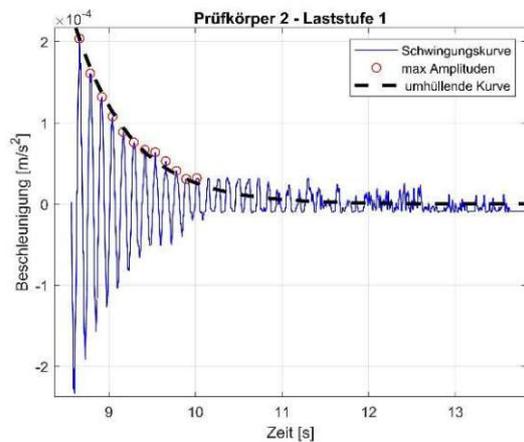
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,11	9,27	0,022	58,26	58,24

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,11	9,34	0,025	59,75	59,73

Prüfkörper PK-S, Laststufe 1



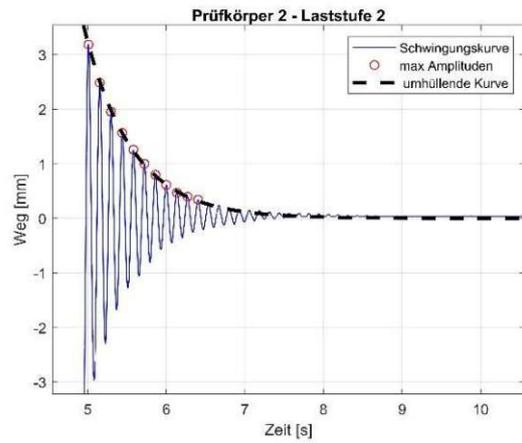
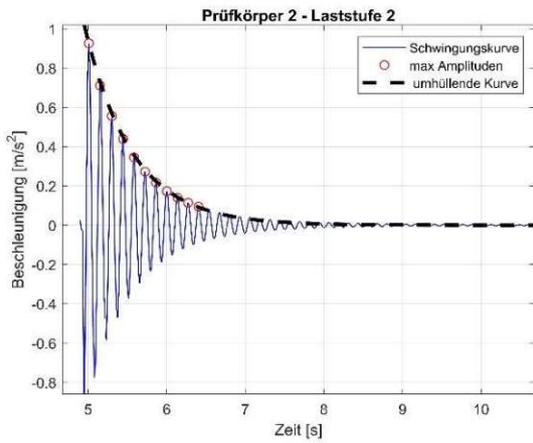
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,11	8,93	0,027	56,14	56,12

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,11	8,93	0,028	56,12	56,10

Prüfkörper PK2-S, Laststufe 2



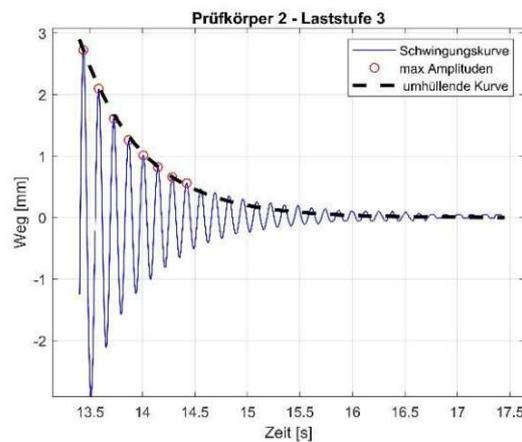
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,92	0,033	49,76	49,74

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,94	0,033	49,89	49,87

Prüfkörper PK-S, Laststufe 3



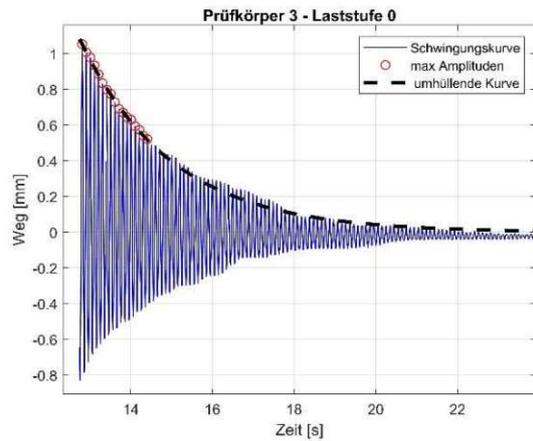
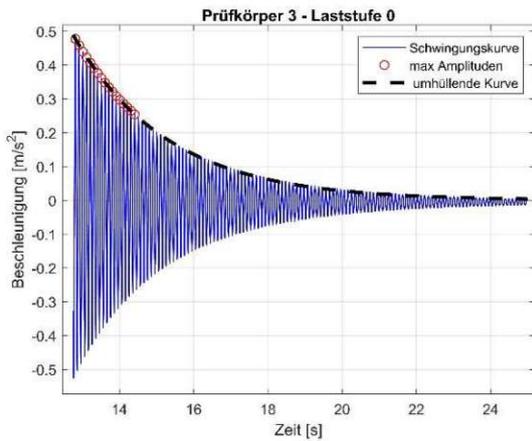
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,98	0,030	50,15	50,13

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,13	7,98	0,030	50,15	50,13

Prüfkörper PK3-G, Laststufe 0



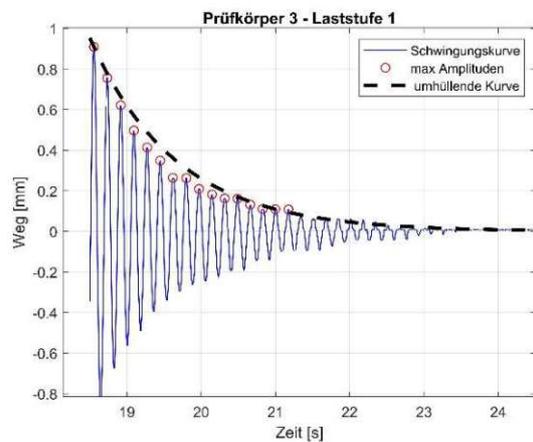
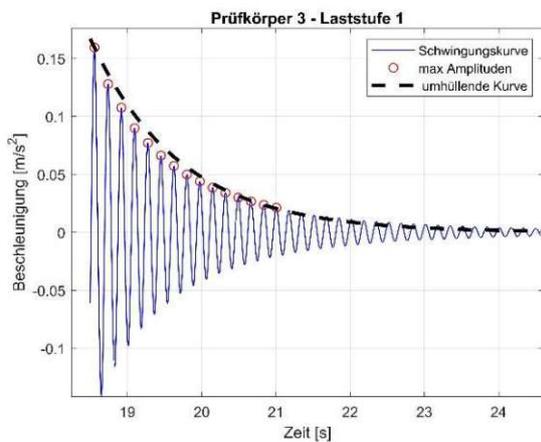
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	10,68	0,006	67,10	67,10

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	10,69	0,007	67,17	67,17

Prüfkörper PK3-G, Laststufe 1



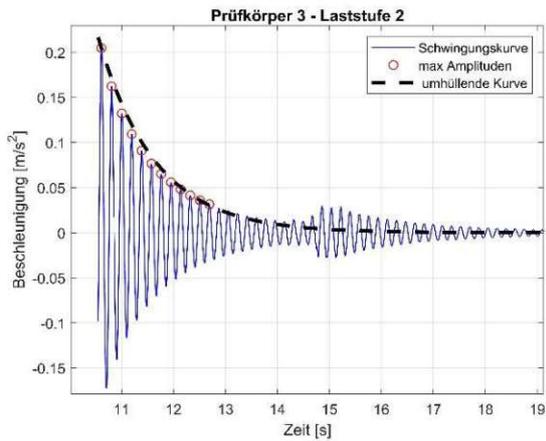
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,16	6,14	0,022	38,59	38,58

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,16	6,14	0,022	38,58	38,57

Prüfkörper PK3-G, Laststufe 2



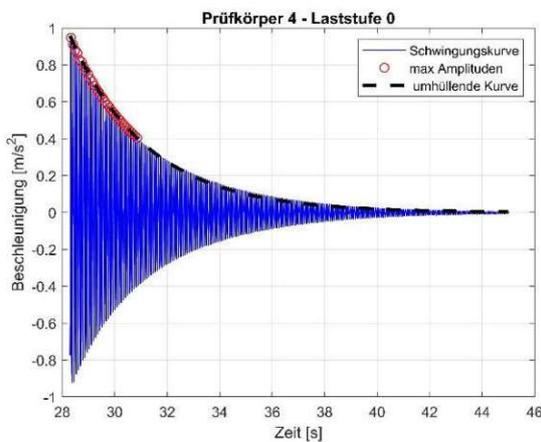
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,17	5,8	0,025	36,48	36,47

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

Prüfkörper PK4-G, Laststufe 0



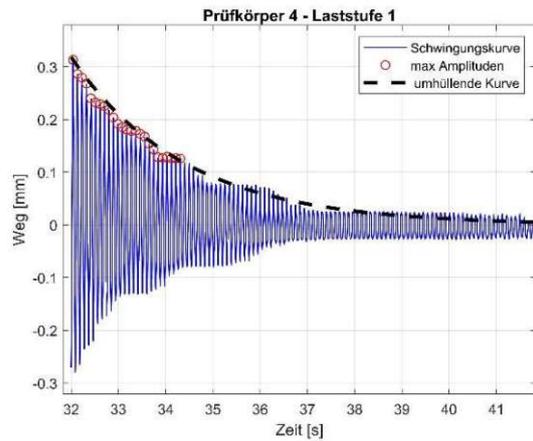
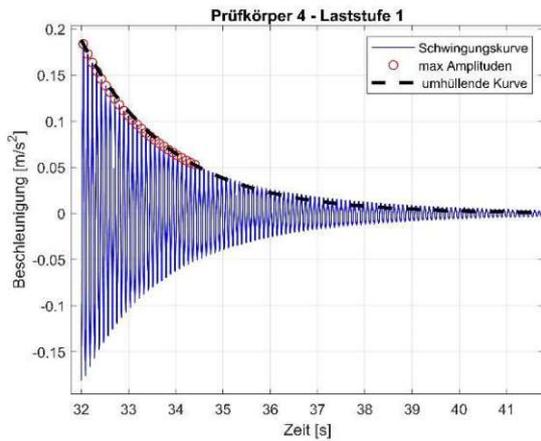
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,08	12,70	0,004	79,83	79,83

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,08	12,71	0,004	79,87	79,87

Prüfkörper PK4-G, Laststufe 1



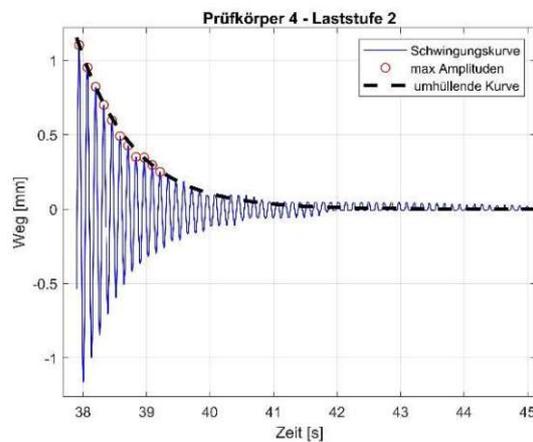
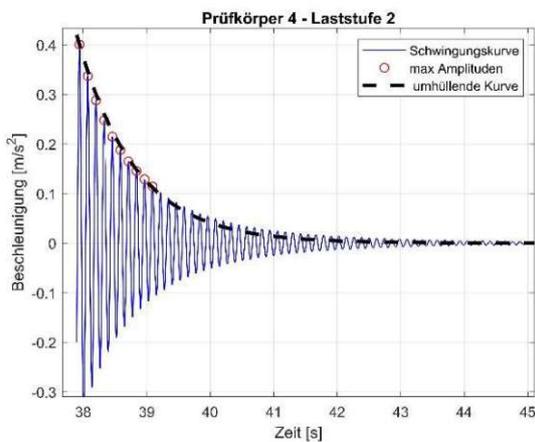
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	11,01	0,008	69,16	69,15

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	11,01	0,006	69,23	69,23

Prüfkörper PK4-G, Laststufe 2



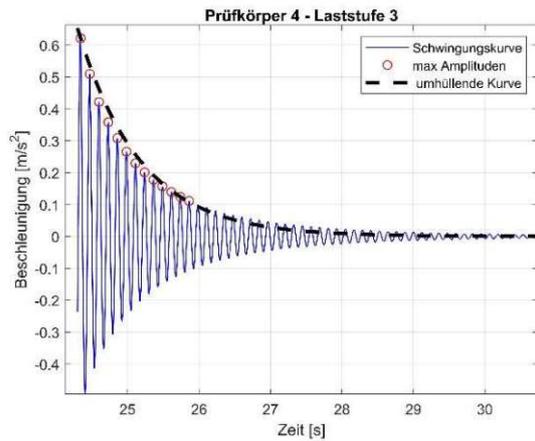
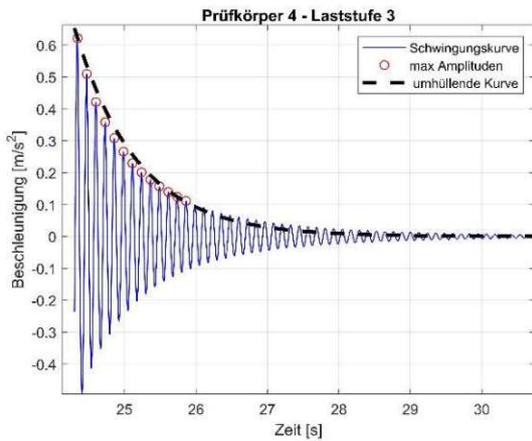
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,11	8,79	0,020	55,27	55,26

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,12	8,70	0,021	55,65	55,64

Prüfkörper PK4-G, Laststufe 3



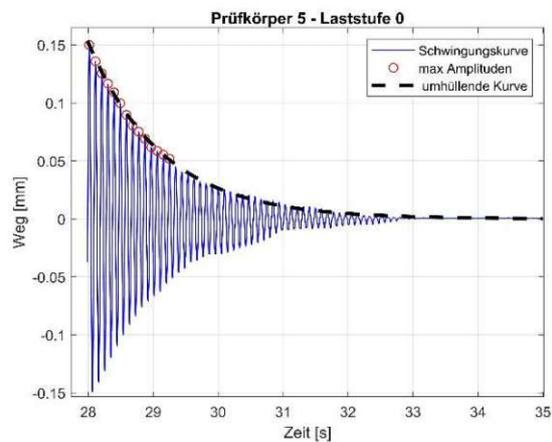
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,12	8,60	0,021	54,06	54,05

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,12	8,59	0,020	54,00	53,98

Prüfkörper PK5-O, Laststufe 0



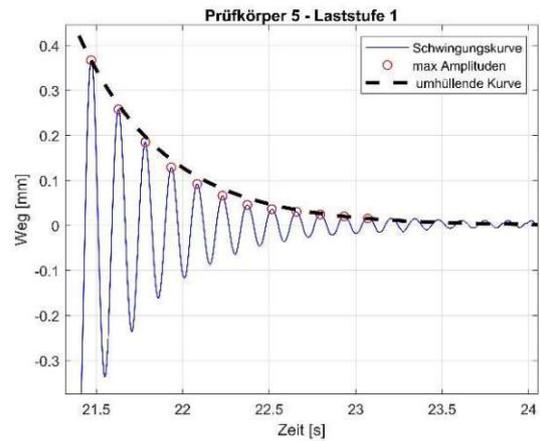
Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	11,06	0,012	69,48	69,48

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
0,09	11,06	0,012	69,48	69,48

Prüfkörper PK5-O, Laststufe 1



Beschleunigungsmessung

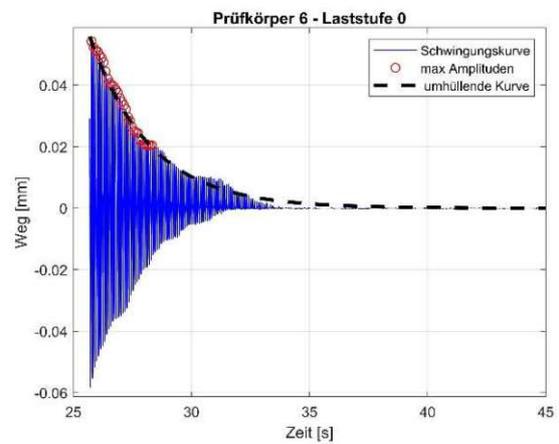
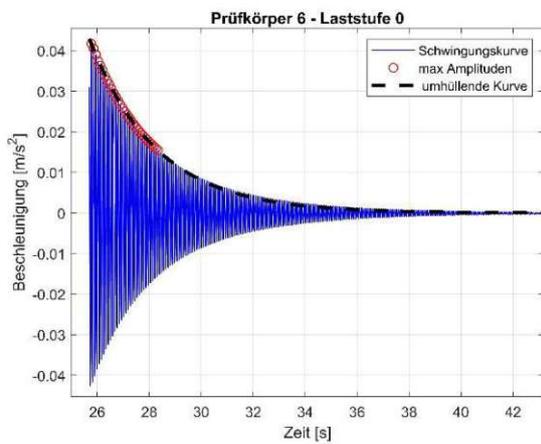
T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

0,13	7,52	0,042	47,27	47,23
------	------	-------	-------	-------

Prüfkörper PK6-U, Laststufe 0



Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

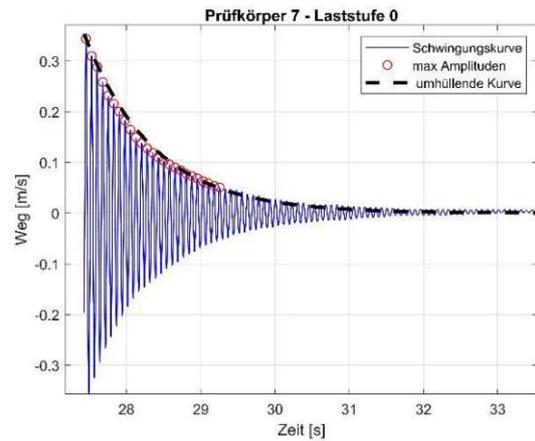
Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

0,08	12,10	0,005	76,01	76,01
------	-------	-------	-------	-------

0,08	12,10	0,005	76,01	76,01
------	-------	-------	-------	-------

Prüfkörper PK7-H, Laststufe 0



Beschleunigungsmessung

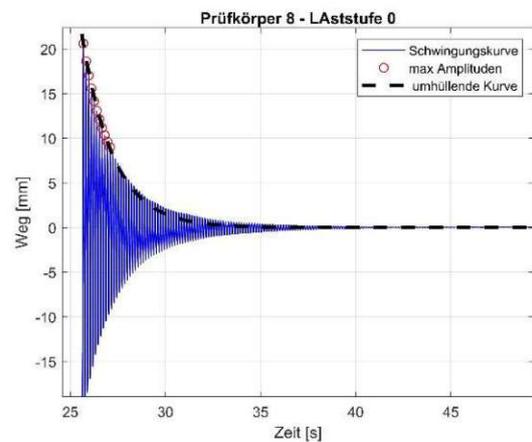
T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

0,07	13,91	0,012	87,42	87,42
------	-------	-------	-------	-------

Prüfkörper PK8-S, Laststufe 0



Beschleunigungsmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

Wegmessung

T	f	ζ	ω_0	ω'
[s]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]

0,13	7,93	0,012	49,80	49,80
------	------	-------	-------	-------