Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Marc Thiele
geb. in Potsdam

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Geißler
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna
Gutachter:	Dr.-Ing. A. Rogge (Dir. und Prof.)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 4. November 2015

Berlin 2015
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde vorwiegend durch die generell zunehmende Bedeutung der Ermüdungsthematik im Bauwesen sowie die auch heute noch bestehenden vielen offenen Fragstellungen im Hinblick auf das Ermüdungsverhalten des Betons motiviert. Sie soll einen kleinen Beitrag dazu leisten, das Verständnis über das Ermüdungsverhalten des Betons zu verbessern und zugleich Motivation sowie Anregungen für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet liefern.

Die Arbeit entstand in den Jahren 2009 bis 2015 während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. Dieser bin ich zu generellem Dank verpflichtet, da sie sowohl durch die Finanzierung als auch durch die Bereitstellung umfangreicher technischer Ausstattungen diese ausgedehnten Untersuchungen ermöglicht hat.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna für seine fortwährend intensive sowie interessierte Betreuung dieser Arbeit. Durch seine stete Bereitschaft hat er in unzähligen Diskussionen in immer freundschaftlicher Atmosphäre sowie in außerordentlich konstruktiver, motivierender und inspirativer Weise entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Dr.-Ing. A. Rogge danke ich für die Eröffnung der Möglichkeit, diese Arbeit an der BAM durchführen zu können. Besonders bin ich ihm für sein Interesse an der Thematik sowie für seine Geduld dankbar, diese zeitintensiven Untersuchungen fortwährend zu unterstützen. Für seine Bereitschaft das Zweitgutachten zu übernehmen, bin ich ebenfalls sehr dankbar.

Wesentliches Fundament dieser Arbeit sind die zahlreichen Kollegen der BAM, die sowohl durch ihre tatkräftige Unterstützung als auch durch ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Ratschläge die Entstehung dieser Arbeit erst ermöglicht haben. Dies betrifft vor allem die Kollegen des Fachbereiches 7.2 Ingenieurbau aber auch die mitwirkenden Kollegen der Fachbereiche 7.1 Baustoffe, 7.4 Baustofftechnologie sowie der Abteilung 8 Zerstörungsfreie Prüfung. Weiterhin sind natürlich die vielen Studenten mit eingeschlossen, die als studentische Hilfskräfte sowie im Rahmen von Bachelor- und Studienarbeiten wesentliche Beiträge zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. All diese Mitwirkenden hier zu benennen würde den Rahmen sprengen, ihnen allen sei an dieser Stelle aber ganz herzlich gedankt.

Abschließend möchte ich mich natürlich herzlich bei meiner Familie für ihre stetige Unterstützung, ihren Zuspruch sowie ihre Geduld bedanken. Besonderer Dank gilt meiner Mutter, die mich intensiv bei der Korrektur dieser Arbeit unterstützt hat.

Kurzfassung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht das Ermüdungsverhalten von Beton unter hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen. Der aktuelle Wissensstand bezüglich des Ermüdungsverhaltens ist nach wie vor sehr lückenhaft. Ganz besonders trifft das auf den eigentlichen Ermüdungsprozess zu, der dem abschließenden Ermüdungsversagen vorausgeht. Dem Defizit im Wissen um das Ermüdungsverhalten steht allerdings eine zunehmende Bedeutung der Thematik in der Baupraxis gegenüber. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine systematische Untersuchung des Ermüdungsprozesses vorgenommen. Damit wird ein Beitrag geleistet, um einen tieferen Einblick und ein besseres Verständnis für den Schädigungsprozess und die damit verbundenen Vorgänge innerhalb des Betons zu gewinnen.

Die experimentellen Untersuchungen bestehen im Wesentlichen aus einstufigen Dauerschwingversuchen im Druckschwellbereich an zylindrischen Probekörpern aus Normalbeton. Verwendet wurden zwei verschiedene Ermüdungslastniveaus, die Bruchlastzyklen zwischen 10^6 und 10^7 sowie zwischen 10^3 und 10^4 erzeugten. Die Untersuchung des Ermüdungsvorgangs erfolgte durch den Einsatz verschiedener ZfP- und ZP-Methoden, wie der Dehnungsmessung, der Messung flächiger Oberflächenverformungen, der Ultraschallmessung, der Schallemissionsmessung, der Lichtmikroskopie und des Rasterelektonenmikroskops. Zur Bewertung einiger Einflussgrößen im Zusammenhang mit dem Ermüdungsverhalten fanden zudem ergänzende Versuche zum Kriecheinfluss sowie zum Einfluss der Probengröße statt.

Es konnte festgestellt werden, dass es sich bei dem Ermüdungsvorgang um eine von Beginn an einsetzende Schädigungsevolution innerhalb des Betons handelt. Diese beeinflusst die verschiedenen Materialeigenschaften des Betons in vielfältiger und sehr unterschiedlicher Weise. Die wesentlichste Feststellung in diesem Zusammenhang ist, dass die ermüdungsbedingte Materialschädigung zu einer Veränderung der gesamten Spannungs-Dehnungs-Beziehung führt, die sich ebenfalls in einem fortlaufenden Evolutionsprozess äußert.

Aus den Untersuchungen konnten als entscheidende Ursache für die beobachteten Veränderungen im makroskopischen Materialverhalten Veränderungen in der Mikrorissstruktur nicht festgestellt werden. Vielmehr weisen die Ergebnisse der Untersuchungen darauf hin, dass die ermüdungsbedingten Veränderungen speziell in den Phasen I und II vorrangig das Resultat von viskosen Prozessen innerhalb des Zementsteins sind. Darüber hinaus geht aus den Versuchen hervor, dass auch das Kriechen zu relativ ähnlichen, aber weniger stark ausgeprägten Veränderungen im Material führt. Ein Einfluss der Probengröße auf das resultierende Verhalten konnte sowohl im statischen als auch im zyklischen Fall beobachtet werden.

Aus den gewonnenen experimentellen Erkenntnissen wird eine Beschreibung der Vorgänge abgeleitet, die während des Ermüdungsprozesses im Materialgefüge ablaufen und zu den beobachteten makroskopischen Veränderungen führen. In diesem Zusammenhang hat sich herausgestellt, dass eine Erfassung der ermüdungsbedingten Schädigung anhand einer skalaren Größe über die Steifigkeit der tatsächlichen Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung nicht gerecht wird. Eine Betrachtung im Hinblick auf einen zuverlässigen Schädigungsindikator im Zusammenhang mit den gemessenen Größen liefert zudem einen Überblick über die Eignung verschiedener Größen zur Erfassung des Ermüdungsschädigungsgrades im Beton. Abschließend wird ein Ansatz vorgestellt, der die beobachteten Entwicklungen entscheidender Größen im Ermüdungsvorgang abzubilden vermag.

Stichwörter: Ermüdung, Beton, hochzyklisch, Schädigungsevolution

Abstract

The main objective of this thesis is the fatigue behavior of concrete under high-cycle compressive loadings. Current knowledge about fatigue behavior of concrete is still incomplete. This concerns especially the process of fatigue which is preceding the fatigue failure. The leak of knowledge about fatigue behavior is opposed to the steady growing importance of this topic within the practice in civil engineering. Therefore, within this thesis a systematic and comprehensive investigation of the process of fatigue itself was done. This contributes to the better understanding of the progression of damage and the corresponding processes within the material.

The experimental investigation consisted mainly of experiments with constant amplitude loadings in compression with cylindrical specimen made of normal strength concrete. Two differed load levels were used which resulted in numbers of cycles to failure of 10^6 and 10^7 as well as 10^3 and 10^4. The experiments were done in combination with different types of nondestructive and destructive testing methods like strain measuring, deformation of surface, ultrasonic signals, acoustic emissions, optical microscopy and also scattering electron microscopy. To access some parameters of influence in relation to the fatigue behavior additional creep tests and also several tests with different scales of specimen were done.

The fatigue process of concrete is determined as an evolution of damage that starts from the beginning of the loading process. This evolution has manifold and different influences on the different material properties of concrete. In this relation a major finding was that fatigue related damage leads to a transformation of the complete stress-strain-relationship. This relationship is also subjected to an evolution process.

Due to the authors observations it could not be determined that the investigated changes in macroscopic material behavior are caused by a development of micro cracks within the material structure. The results of the investigation indicated that rather the fatigue related changes in material behavior are mainly a result of viscous processes in cement stone especially in phase I and II of the fatigue process. Furthermore, it was observed that creep in concrete leads to similar but lesser changes in material behavior of concrete. Beside this, tests with different scales of specimens have shown an appreciable effect of size on the resulting material behavior under static and cyclic loadings respectively.

From these experimental findings a detailed description was derived about the processes which take place within the material structure during the fatigue loading and also leads to the observed macroscopic changes in material behavior. In this context, the tests have shown that relating to stiffness reduction a scalar value could not capture the damage effect on the stress-strain-relationship caused by fatigue. A following consideration gives an overview about applicability of the different measured parameters for the detection of the degree of fatigue damage with regard to a reliable damage indicator. Finally an approach is presented which is able to describe the investigated developments of significant values within the observed fatigue process.

Keywords: Fatigue, Concrete, High-Cycle, Damage Evolution

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ..... **III**

Abstract ..... **V**

Inhaltsverzeichnis ..... **VII**

Symbolverzeichnis ..... **XI**

1 Einleitung **1**

1.1 Einführung und Motivation 1

1.2 Zielstellung der Arbeit 3

1.3 Gliederung der Arbeit 6

2 Grundlagen zur Materialermüdung **7**

3 Stand der Erkenntnisse zur Ermüdung von Beton **15**

3.1 Betonverhalten unter monotoner Beanspruchung 15

3.1.1 Einaxiale Zugbeanspruchungen 15

3.1.2 Einaxiale Druckbeanspruchungen 17

3.1.3 Mehraxiale Beanspruchungen 20

3.2 Zur Ermüdung von Beton allgemein 22

3.2.1 Aktuelle Schwerpunkte und Relevanz der Thematik 22

3.2.2 Allgemeines zum Ermüdungsverhalten von Beton 24

3.3 Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchungen 29

3.3.1 Die Ermüdungsfestigkeit 29

3.3.2 Der Ermüdungsvorgang 31

3.3.3 Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten 39

3.4 Modelle und Theorien zur Betonermüdung 43

3.5 Schlussfolgerungen zum Stand der Erkenntnisse 52

4 Experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsverhalten von Beton **55**

4.1 Zielstellung, Versuchskonzepte und Versuchsprogramm 55

4.1.1 Zielstellung der Versuche 55

4.1.2 Versuchsprogramm 58

4.2 Probenmaterial und Probekörper ... 66
4.2.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung ... 66
4.2.2 Probekörperform ... 67
4.2.3 Herstellung und Lagerung ... 69
4.2.4 Frisch- und Festbetoneigenschaften ... 71
4.3 Versuchs- und Messtechnik ... 72
4.3.1 Versuchstechnik ... 72
4.3.2 Messtechnik ... 73
4.4 Versuchsdurchführung ... 84
4.4.1 Monotone Versuche ... 84
4.4.2 Kriechversuche ... 84
4.4.3 Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) ... 87
4.4.4 Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC) ... 90
4.4.5 Versuche an Großproben ... 94

5 Analyse und Vergleich der Versuchsergebnisse ... 97
5.1 Hochzyklisches Ermüdungsverhalten (UHC) ... 97
5.1.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene) ... 98
5.1.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene) ... 105
5.1.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene) ... 112
5.2 Hochzyklisches Verhalten und Kriechen ... 124
5.3 Ermüdungsverhalten im unteren und oberen hochzyklischen Bereich (LHC – UHC) ... 129
5.3.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene) ... 129
5.3.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene) ... 133
5.3.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene) ... 138
5.3.4 Schlussfolgerungen ... 139
5.4 Vergleich von statischem und zyklischem Verhalten ... 141
5.5 Ermüdungsverhalten von Klein- und Großproben ... 150
5.5.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene) ... 150
5.5.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene) ... 153
5.5.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene) ... 155
5.5.4 Schlussfolgerungen ... 156

6 Die Schädigungsevolution im Beton ... 159
6.1 Prinzipielle experimentelle und theoretische Erkenntnisse zum Ermüdungsvorgang im Beton ... 159

6.2 Der Schädigungsprozess im Beton unter Ermüdungsbeanspruchung 165
6.2.1 Phase 0 – Der Ausgangszustand 165
6.2.2 Phase I – Die ausgleichende Entwicklung 166
6.2.3 Phase II – Die stabile Entwicklung 172
6.2.4 Phase III – Die instabile Entwicklung 175
6.2.5 Schlussfolgerungen und abschließende Bemerkungen 179
6.3 Die Ermüdungsschädigung im Beton 181
6.4 Indikatoren und Messbarkeit der Ermüdungsschädigung 186
6.5 Ansätze zur Abbildung der Schädigungsevolution 195

7 Zusammenfassung und Ausblick 199
7.1 Zusammenfassung 199
7.2 Ausblick 202

Literaturverzeichnis 207

Abbildungsverzeichnis 217

Tabellenverzeichnis 225

Anhang A – Experimentelle Untersuchungen 227
A1 – Ausgangsstoffe 227
A2 – Versuchs- und Messtechnik 227
A3 – Versuchsdurchführung 229

Anhang B – Versuchsergebnisse 231
B1 – Versuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC) 231
B2 – Kriechversuche 250
B3 – Versuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) 251
B4 – Statische Versuche 259
B5 – Versuche an Großproben 262

Anhang C – Empirische Ansätze 265
C1 – Evolutionskurven für den oberen hochzyklischen Bereich (UHC) 265

Symbolverzeichnis

Kleine lateinische Buchstaben

d	Tage	Zeit
f	Hz	Frequenz
f	N/mm²	Festigkeit allgemein
f_c	N/mm²	Charakteristische Druckfestigkeit
$f_{c,w}$	N/mm²	Druckfestigkeit Würfel
$f_{c,cyl}$	N/mm²	Druckfestigkeit Zylinder
f_{cm}	N/mm²	Mittelwert der Druckfestigkeit
s	-	Standardabweichung
s^2	-	Varianz
t	s	Zeit
v	m/s	Ultraschallgeschwindigkeit
$v_{f,0}$	m/s	Ultraschallgeschwindigkeit bei Grundlast S_0
$v_{f,min}$	m/s	Ultraschallgeschwindigkeit bei Unterlast S_{min}
$v_{f,max}$	m/s	Ultraschallgeschwindigkeit bei Oberlast S_{max}
v_{var}	-	Variationskoeffizient
bez. v_{var}	-	Bezogener Variationskoeffizient
w	N/mm²	Energiedichte
w_{el}	N/mm²	Elastischer Anteil Energiedichte
$w_{f,d}$	N/mm²	Gesamtenergiedichte aus Hysteresen
$w_{f,d1}$	N/mm²	Plastischer Anteil Energiedichte aus Hysteresen
$w_{f,d2}$	N/mm²	Anteil aus Änderung der Form der Hysteresen
$w_{f,tot}$	N/mm²	Gesamtenergiedichte aus Hysteresen bis Versagen
$w_{fs,tot}$	N/mm²	Gesamtenergiedichte aus Hysteresen und Nachprüfung
$w_{s,d}$	N/mm²	Anteil Energiedichte statisch
$w_{s,1,0}$	N/mm²	Anteil Energiedichte statisch bis Bruch
$w_{s,0,825}$	N/mm²	Anteil Energiedichte statisch bis 0,852 Nachbruchlast
$w_{s,0,75}$	N/mm²	Anteil Energiedichte statisch bis 0,75 Nachbruchlast
$w_{s,tot}$	N/mm²	Gesamtbruchenergiedichte

Große lateinische Buchstaben

A	mV	Amplitude
$A_{f,0}$	mV	Amplitude bei Grundlast S_0
$A_{f,max}$	mV	Amplitude bei Oberlast S_{max}
D	-	Skalare Schädigungsvariable
E	N/mm²	E-Modul
$E_{1/3}$	N/mm²	Sekantenmodul im statischen Fall bis $S_{1/3}$
$E_{cr,1/3}$	N/mm²	Sekantenmodul beim Kriechen bis $S_{1/3}$
$E_{cr,m}$	N/mm²	Sekantenmodul beim Kriechen von $S_{1/3}$ bis S_m
$E_{f,1/3}$	N/mm²	Sekantenmodul bei Ermüdung von S_0 bis $S_{1/3}$
$E_{f,m}$	N/mm²	Sekantenmodul bei Ermüdung von $S_{1/3}$ bis S_m
$E_{f,max}$	N/mm²	Sekantenmodul bei Ermüdung von S_m bis S_{max}
rel. E	%	Relativer E-Modul
E*	N/mm²	E-Modul aus 1. Ableitung der σ-ε-Beziehung
F	kN	Kraft
F_c	kN	Bruchkraft
F_{cm}	kN	Bruchkraft gemittelt
N	-	Zyklenzahl
N_f	-	Ermüdungslastspielzahl
R	-	Spannungsverhältnis
S	-	Bezogene Beanspruchung
S_0	-	Bezogene Grundlast
$S_{1/3}$	-	Bezogene Drittelslast der stat. Bruchlast
S_{min}	-	Bezogene Unterlast
S_m	-	Bezogene Mittellast
S_{max}	-	Bezogene Oberlast
S_a	-	Bezogene Schwingamplitude
ΔS	-	Bezogene Schwingweite

Griechische Buchstaben

ε	-	Dehnung
ε_0	-	Dehnung bei Grundlast S_0
$\varepsilon_{1/3}$	-	Dehnung bei $S_{1/3}$

ε_a	-	Dehnungsamplitude
ε_{Br}	-	Bruchdehnung
$\varepsilon_{cr,0}$	-	Kriechdehnung bei Grundlast S_0
$\varepsilon_{cr,m}$	-	Kriechdehnung bei Mittellast S_m
ε_{el}	-	Elastischer Dehnungsanteil
ε_f	-	Dehnung zyklisch
ε_{ges}	-	Gesamtdehnung
ε_{min}	-	Dehnung bei Unterlast S_{min}
ε_m	-	Dehnung bei Mittellast S_m
ε_{max}	-	Dehnung bei Oberlast S_{max}
ε_P	-	Dehnung auf Probenoberfläche
ε_{pl}	-	Plastischer Dehnungsanteil
ε_x	-	Dehnung in x-Richtung
ε_y	-	Dehnung in y-Richtung
$\Delta\varepsilon$	-	Dehnungsschwingweite
$\dot{\varepsilon}$	1/s	Dehnungsrate
σ	N/mm²	Spannung
σ_0	N/mm²	Spannung bei Grundlast S_0
$\sigma_{1/3}$	N/mm²	Spannung bei $S_{1/3}$
σ_a	N/mm²	Spannungsamplitude
σ_{min}	N/mm²	Spannung bei Unterlast S_{min}
σ_m	N/mm²	Spannung bei Mittellast S_m
σ_{max}	N/mm²	Spannung bei Oberlast S_{max}
σ_x	N/mm²	Spannung in x-Richtung
σ_y	N/mm²	Spannung in y-Richtung
$\Delta\sigma$	N/mm²	Spannungsschwingweite
$\dot{\sigma}$	N/mm² · s	Spannungsrate

Indizes

cr	-	Kriechen (Creep)
cyl	-	Zylinder (100 x 300 mm)
el	-	Elastisch
f	-	Ermüdung (Fatigue)
ges	-	Gesamt

i	-	Laufindex
m	-	Mittelwert bei zyklischer Beanspruchung
max	-	Maximum bei zyklischer Beanspruchung
min	-	Minimum bei zyklischer Beanspruchung
pl	-	plastisch
w	-	Würfel (150 x 150 x 150 mm)

Sonstige Abkürzungen

CT	-	Computertomographie
DMS	-	Dehnungsmessstreifen
DPA	-	Druckplattenabstand
GV	-	Versuche mit Großproben
HPC/HFB	-	Hochfester Beton
ITZ	-	Interfacial Transition Zone
IWA	-	Induktiver Wegaufnehmer
LCF	-	Low Cycle Fatigue
LHC	-	Lower High Cycle
HCF	-	High Cycle Fatigue
KV	-	Kriechversuche
NSC/NFB	-	Normalfester Beton
REM	-	Rasterelektronenmikroskop
RVE	-	Repräsentative Volumeneinheit
SCC/SVB	-	Selbstverdichtender Beton (Self Compacting Concrete)
SE	-	Schallemissionen
SEA	-	Schallemissionsanalyse
SV	-	Statische Versuche
US	-	Ultraschallmessung
UHC	-	Upper High Cycle
UHPC/UHFB	-	Ultrahochfester Beton
w/z	-	Wasser/Zementwert
ZP	-	Zerstörende Prüfverfahren
ZfP	-	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Die Motivation für die vorliegende Arbeit begründet sich prinzipiell auf dem Phänomen der Materialermüdung. Zwar ist die Ermüdung auch beim Beton schon seit langem bekannt und auch ebenso lange Gegenstand der Forschung, kann aber im Falle des Betons nach wie vor nicht befriedigend erklärt und beschrieben werden.

Die generelle Ursache für das Interesse an der Materialermüdung liegt darin, dass Werkstoffe, die z. B. zur Konstruktion von Maschinen, Anlagen, Bauwerken oder Bauteilen verwendet werden, in der Mehrzahl der Anwendungen nicht ruhenden Belastungen ausgesetzt sind, sondern zeitlich veränderlichen bzw. wiederholenden Beanspruchungen unterliegen. Daher spielt neben der statischen Belastbarkeit der Werkstoffe auch deren Belastbarkeit unter wechselnden bzw. zyklischen Beanspruchungen eine wichtige Rolle. Dabei handelt es sich um die sogenannte Ermüdungsfestigkeit. Deren Hauptcharakteristikum besteht darin, dass bei ausreichend häufiger Wiederholung der Beanspruchung ein Versagen des Materials auch deutlich unterhalb der statischen Belastbarkeit möglich ist. Vor diesem Hintergrund ist die Kenntnis über das Ermüdungsverhalten der Materialien von großer Bedeutung.

Das Phänomen der Ermüdung infolge zyklischer Beanspruchungen sowie die damit einhergehende Veränderung der Materialeigenschaften können in vielen Materialien beobachtet werden, und betreffen somit auch den Beton. Aufgrund der jeweiligen Beanspruchungen sowie der Konstruktionen und Dimensionierungen spielt die Ermüdung allerdings in den meisten Bauwerken mit Beton keine wesentliche Rolle. Aus der Vergangenheit sind auch kaum Schäden oder Unfälle bekannt, die sich nachweislich auf die Ermüdung von Beton zurückführen lassen. Die Dauerhaftigkeit (Lebensdauer) von Betonbauwerken wird meistens eher durch Umwelteinflüsse, wie Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion, und weniger durch die Auswirkungen der mechanischen Beanspruchung begrenzt.

Trotzdem existiert ein relativ kleiner aber stetig zunehmender Anteil an Ingenieurbauwerken, bei denen die Betonermüdung für die Dimensionierung bzw. die Lebensdauer von Bedeutung ist. In diesen Fällen kann die Ermüdung vor allem im Zusammenspiel mit anderen Schädigungsmechanismen, wie z. B. aus Umweltbedingungen, eine wesentliche Rolle spielen. Typische bereits seit langem eingesetzte Bauwerksformen, bei denen dies der Fall ist, sind z. B. Brücken, Fahrbahndecken, Maschinenfundamente, Masten von Funktürmen oder auch Offshore-Bauwerke wie Bohrplattformen aus Beton. Neben diesen Bauwerken entstehen für den Beton auch immer wieder neue Einsatzmöglichkeiten, im Rahmen derer sich auch Anwendungen in Strukturen ergeben, die ebenfalls durch relevante Ermüdungsbeanspruchungen gekennzeichnet sind. Beispiele dafür sind Betonfundamente und Türme von Onshore-Windenergieanlagen (WEA) sowie Schwergewichtsgründungen von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Die *Abbildung 1.1 rechts* zeigt beispielhaft ein solches Schwergewichtsfundament im Bauzustand. Darüber hinaus führen zum Teil auch Veränderungen von Bean-

spruchungen auf existierende und neue Tragwerke im Laufe der Zeit zu einer gesteigerten Bedeutung der Ermüdungsthematik. Dies ist vor allem bei fast allen Bauwerken der Infrastruktur der Fall. Hier hat sich in den letzten Jahrzehnten ein deutlicher Anstieg des Verkehrsaufkommens vollzogen, und es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend weiterhin fortsetzt. In Kombination mit der Erhöhung zulässiger Lasten hat das eine deutliche Steigerung ermüdungsrelevanter Beanspruchungen auf die Infrastrukturbauwerke zur Folge.

Abbildung 1.1: *Filigrane Tragstruktur der Sherbrooke Fußgängerbrücke in Quebec, Kanada, aus vorgespanntem UHPC (links, © DR Médiathèque Lafrage), Schwergewichtsfundament aus vorgespanntem Beton für eine Offshore-Windenergieanlage (rechts, Rainer Kwiotek/© Bilfinger Berger)*

Ein weiterer Faktor ist die Tendenz zu filigraneren Strukturen bei Neubauten, die sowohl in architektonischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten begründet liegt. Dies führt zu einer höheren Ausnutzung von Materialeigenschaften sowie auch zu geringeren Eigenlasten der Strukturen, was sich letztlich in einem höheren Anteil der Lasten mit zyklischem Charakter niederschlägt. Besonders aus der Entwicklung neuer Betone wie z. B. UHPC ergeben sich neue konstruktive Möglichkeiten, die auf diese Weise einen direkten Einfluss auf die Beanspruchungen haben. Ein anschauliches Beispiel dafür ist die aus UHPC gefertigte und in *Abbildung 1.1 links* dargestellte Sherbrooke Fußgängerbrücke aus Kanada.

Das Resultat aus den genannten Entwicklungen im Bereich der Ingenieurbauwerke ist, dass die Ermüdungsthematik sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Tragwerken generell eine zunehmende Bedeutung erfährt. Davon betroffen sind in unterschiedlicher Ausprägung letztlich alle verwendeten Materialien, insbesondere trifft dies jedoch für den Beton zu.

Das Ermüdungsverhalten von Beton ist bereits seit über 100 Jahren Bestandteil der Forschungen an Beton. Erste bekannte Untersuchungen gehen auf [VAN ORNUM 1903] [VAN ORNUM 1907] zurück. Im Laufe der Zeit hat es schließlich eine Vielzahl an experimentellen und theoretischen Arbeiten im Bezug auf die Ermüdung von Beton gegeben. Trotzdem bestehen auch heute noch große Wissenslücken bezüglich der Betonermüdung, wie in Kapitel 3 gezeigt wird. Ganz besonders trifft das auf den ermüdungsbedingten Schädigungsprozess zu, der dem Ermüdungsversagen vorausgeht. Im Gegensatz dazu sind beim Stahl das Ermüdungsverhalten und die damit verbundenen Vorgänge im Material bereits weitgehend erforscht.

Aufgrund der fehlenden Kenntnisse bezüglich der Betonermüdung ist man heute nicht in der Lage, dort wo die Ermüdung eine Rolle spielt, eine entsprechend genaue und wirtschaftliche Bemessung durchzuführen, wie sie für statische Beanspruchungen bei Beton möglich ist oder wie sie im Falle der Ermüdung beim Stahl erzielt werden kann. Es ist aber anzustreben, im Falle der Ermüdung eine vergleichbar hohe Qualität in der Bemessung zu erreichen wie unter statischen Beanspruchungen. Das Ziel sind letztlich wirtschaftliche aber zugleich ressourcen- und energieschonende Konstruktionen.

Ein weiterer Aspekt ist neben der Auslegung neuer Tragwerke vor allem auch die Bewertung bestehender Strukturen. In dem Zusammenhang geht es zum einen um die möglichst genaue Bestimmung und Bewertung von Ist-Zuständen. Zum anderen ist es das Ziel, darauf aufbauend eine Abschätzung und Kalkulation der Restnutzungsdauer der betreffenden Struktur durchzuführen. Das hilft Bauwerke möglichst lange in ihrer Nutzung zu behalten aber auch, um Nutzungsänderungen von Tragwerken zu ermöglichen. Es ist allerdings heute weder möglich, den Ist-Zustand eines Betonbauteils im Hinblick auf ermüdungsbedingte Schädigungen zu erfassen, noch kann vor diesem Hintergrund eine belastbare Prognose für dessen Restlebensdauer getroffen werden[FEHLMANN 2012].

In allen Bereichen der heutigen Zeit kommt außerdem der Ressourcenschonung eine besondere und stetig zunehmende Bedeutung zu. Die verfügbaren Ressourcen werden immer knapper, weshalb ein sorgsamer und verantwortungsvoller Umgang mit den vorhandenen Ressourcen immer mehr in den Mittelpunkt rückt. Daher spielen die effiziente Auslegung von neuen Tragwerken sowie der möglichst lange Betrieb bestehender und neuer Strukturen eine zunehmende Rolle. Aufgrund der zuvor beschriebenen Zusammenhänge führt auch diese Tatsache zu einer steigenden Bedeutung für die Ermüdungsthematik, auch für den Beton.

Im Endergebnis lässt sich feststellen, dass die Ermüdungsthematik im Bauwesen, speziell beim Beton, zunehmend an Bedeutung gewinnt. Dem entgegen steht jedoch ein begrenztes Wissen im Bezug auf sein Ermüdungsverhalten, was besonders für den Ermüdungsprozess gilt. In dem Zusammenhang steht auch das vorhandene Defizit an existierenden Ansätzen und Modellen, die in der Lage sind, das Ermüdungsverhalten realitätsnah abzubilden. Vor diesem Hintergrund hat sich die Motivation für die vorliegende Arbeit ergeben, deren konkrete Zielstellungen im anschließenden Kapitel 1.2 vorgestellt werden.

1.2 Zielstellung der Arbeit

Ausschlaggebend für die Wahl der konkreten Zielstellungen der Arbeit waren folgende Tatsachen. Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen zur Ermüdung von Beton, speziell unter Beanspruchungen im Druckschwellbereich, hat in der Mehrzahl der existierenden Arbeiten der Fokus hauptsächlich auf der Ermüdungsfestigkeit gelegen. Wesentlich seltener dagegen stand der vor dem eigentlichen Ermüdungsversagen während der Lebensdauer stattfindende Ermüdungsprozess im Mittelpunkt der Betrachtung [PETRYNA, PFANNER ET AL. 2002; PETRYNA 2004; HEGGER, ROGGENDORF ET AL. 2014]. Jedoch geht gerade mit diesem Ermüdungsprozess auch eine Veränderung der Materialeigenschaften des Betons über die gesamte Lebensdauer einher, was in *Abbildung 1.2* veranschaulicht ist. Bezüglich dessen ist der derzeitige Erkenntnisstand allerdings noch vergleichsweise gering [KESSLER-KRAMER 2002; PETRYNA, PFANNER ET AL. 2002; PETRYNA 2004; HEGGER, ROGGENDORF ET AL. 2014]. Dies zeigt auch die Auswertung der Literatur in Kapitel 3.

Es ist daher nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit, wie z. B. [KIM & KIM 1996; TUE & MUCHA 2006; WEFER 2010] die Ermüdungsfestigkeit in den Mittelpunkt zu rücken. Vielmehr

liegt die Zielstellung dieser Arbeit darin, den Fokus der Experimente und Auswertungen ausschließlich auf eine möglichst systematische Untersuchung des in *Abbildung 1.2 rechts* veranschaulichten Ermüdungsprozesses in Beton zu legen.

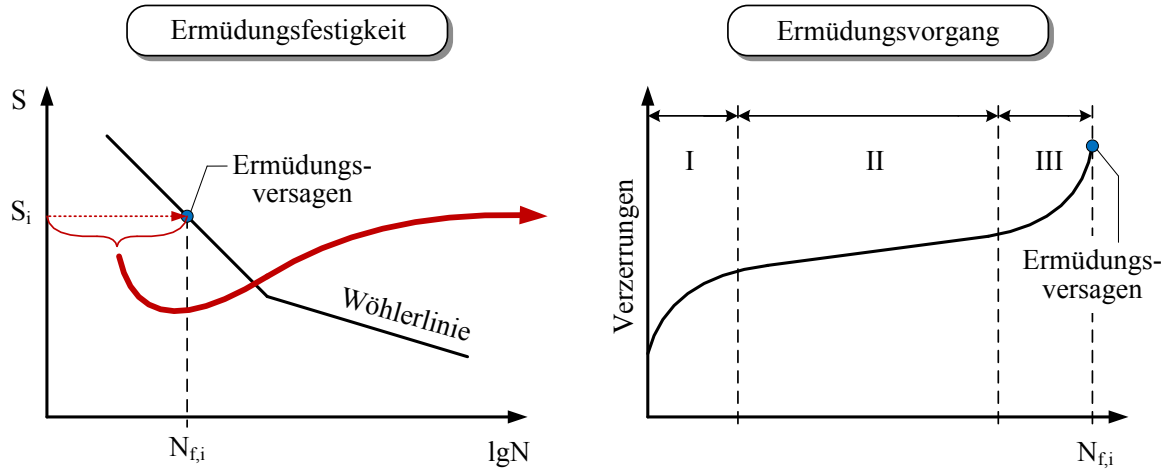

Abbildung 1.2: *Schematische Darstellung der Ermüdungsfestigkeit von Beton anhand einer Wöhlerlinie (links) sowie Veranschaulichung des eigentlich dahinter verborgenen und während der Lebensdauer ablaufenden Ermüdungsvorgangs (rechts)*

Dabei soll speziell der Ermüdungsvorgang unter hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen betrachtet werden. In bisherigen Arbeiten wurde dieser Ermüdungsvorgang zumeist nur sehr vereinzelt und überwiegend nur in Ansätzen nachverfolgt [MEHMEL & KERN 1962; KLAUSEN 1978; HOLMEN 1979; HOHBERG 2004; IBUK 2008]. Unter Berücksichtigung der in den verschiedenen existierenden Arbeiten bisher vereinzelt verwendeten Methoden zur Betrachtung des Schädigungsvorgangs, wird in dieser Arbeit darauf aufbauend und weiterführend eine umfängliche Untersuchung des Ermüdungsvorgangs unter Zuhilfenahme einer möglichst breiten Kombination an Untersuchungsmethoden durchgeführt. Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen soll schließlich ein besseres Verständnis für den eigentlichen Schädigungsvorgang innerhalb des Betons gewonnen werden. In der Tatsache, dass es in den Untersuchungen in erster Linie um den Ermüdungsvorgang an sich geht, liegt auch die Festlegung begründet, nur eine Betonrezeptur und zwei Beanspruchungsniveaus zu betrachten.

Vor diesen Hintergründen werden in der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen drei Kernpunkte behandelt:

1. Die experimentelle Untersuchung des Ermüdungsvorgangs im Beton
2. Die Analyse und Bewertung des zugehörigen Schädigungsprozesses auf Basis der experimentellen Beobachtungen
3. Die empirische Beschreibung der beobachteten Schädigungsentwicklung

Im Zuge dessen wird schließlich im Einzelnen der Klärung der folgenden Fragestellungen nachgegangen:

1. Experimentelle Untersuchung des Ermüdungsvorgangs

- Wie verändern sich die Materialeigenschaften bzw. das Materialverhalten des Betons während des Ermüdungsvorgangs? (*makroskopisch*)
- Welche Auswirkungen hat der Schädigungsvorgang auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons? (*makroskopisch*)
- Welche Veränderungen können während des Ermüdungsvorgangs im Materialgefüge festgestellt werden? (*meso- und mikroskopisch*)
- Welchen Anteil hat das Kriechen an den in den durchgeführten Ermüdungsversuchen beobachteten Veränderungen und welche Ursachen hat dies? (*makroskopisch*)
- Verlaufen die Ermüdungsvorgänge im unteren und im oberen hochzyklischen Beanspruchungsbereich ähnlich bzw. welche Unterschiede gibt es? (*makroskopisch*)
- Welchen Einfluss hat die Skalierung beim Beton auf das Ermüdungsverhalten und den dazugehörigen Schädigungsvorgang? (*makroskopisch*)
- Welche Größe ist am besten als Schädigungs- bzw. Lebensdauerindikator geeignet und welche Messmethode bietet eine praxisgerechte Lösung, um den Zustand zu bestimmen?

2. Analyse und Bewertung des Schädigungsprozesses

- Wie sieht die Schädigung bzw. der Schädigungsprozess auf der Mesoebene (Gefügestruktur) im Beton aus bzw. wie läuft dieser ab?
- Wie führen die Vorgänge auf der Mesoebene (im Gefüge) zu den Veränderungen in den Materialeigenschaften auf der Makroebene?
- Was ist Schädigung im Beton und wie kann sie festgestellt bzw. quantifiziert werden?

3. Empirische Beschreibung der Schädigungsentwicklung

- Wie lässt sich die experimentell beobachtete ermüdungsbedingte Veränderung des makroskopischen Materialverhaltens des Betons über einem Ansatz abbilden?
- Wie kann im Hinblick auf eine Zustandserfassung der oder die aus den Experimenten hervorgegangene geeignete Schädigungsindikator über einen Ansatz abgebildet werden?

Die experimentelle Umsetzung erfolgt unter Einbeziehung verschiedener ZfP- und ZP-Methoden, wie der klassischen Dehnungsmessung, der berührungslosen Messung flächiger Oberflächenverformungen, der Ultraschallmessung, der Schallemissionsmessung, der Lichtmikroskopie und des Rasterelektronenmikroskops. Eine Besonderheit ist die Umsetzung von gezielten Abbrüchen von Ermüdungsversuchen, die nicht auf der Basis von Lastzyklenzahlen erfolgen. Hierbei wird der aktuelle Schädigungszustand der Probe stattdessen anhand der versuchsbegleitenden Beobachtung der Materialeigenschaften und des Materialverhalten individuell bestimmt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im Kapitel 2 werden grundlegende Wissensinhalte vorgestellt, die im Zusammenhang mit der Ermüdungsthematik stehen und im Speziellen für die Inhalte der nachfolgenden Kapitel 3 bis 5 von Bedeutung sind.

Das Kapitel 3 gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der Forschung bzw. der Erkenntnisse im Bezug auf die Betonermüdung. Um einen Vergleich bzw. Bezug zum Material- und Schädigungsverhalten unter monotonen Beanspruchungen herstellen zu können, werden als erstes die charakteristischen Verhaltensweisen von Beton unter monotonen Beanspruchungen zusammengestellt. Anschließend wird kurz auf das Ermüdungsverhalten von Beton im Allgemeinen eingegangen, bevor nachfolgend eine detaillierte Betrachtung der Erkenntnisse speziell zum Ermüdungsverhalten unter Druckschwellbeanspruchungen vorgenommen wird. Dabei wird sowohl auf die Thematik der Ermüdungsfestigkeit, des Ermüdungsvorgangs und der Modellansätze zur Betonermüdung eingegangen.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der Konzeption und Durchführung der experimentellen Untersuchungen. Dazu wird als erstes die Zielstellung der Versuche sowie das daraus abgeleitete Versuchskonzept vorgestellt. Im Anschluss wird auf die Probekörper und deren Herstellung eingegangen sowie die in den Experimenten verwendete Versuchs- und Messtechnik näher beschrieben. Abschließend erfolgt die Erläuterung der Durchführung aller einzelnen Versuchsreihen.

Im Kapitel 5 werden alle Versuchsergebnisse, die aus den in Kapitel 4 vorgestellten Versuchen gewonnen wurden, vorgestellt, analysiert und untereinander vergleichen. Dazu werden in einem ersten Schritt die Ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen im oberen hochzyklischen Bereich vorgestellt und analysiert. Im zweiten Schritt werden diese Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen aus den Kriechversuchen dargestellt, verglichen und bewertet. Nachfolgend finden ein Vergleich und eine Analyse der Ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen im unteren hochzyklischen Bereich zusammen mit den Ergebnissen aus dem oberen hochzyklischen Bereich statt. Auch das in statischen Versuchen untersuchte Materialverhalten wird für einen Vergleich mit den gewonnenen Ergebnissen aus den Ermüdungsversuchen genutzt. Danach werden auch die aus einzelnen Versuchen an großen Probekörpern gewonnenen Ergebnisse vorgestellt, mit den Ergebnissen aus den Ermüdungsversuchen an kleinen Probekörpern verglichen und schließlich bewertet.

Innerhalb des Kapitels 6 wird auf Grundlage der aus allen durchgeführten Versuchen gewonnenen Erkenntnisse schließlich eine Beschreibung des im Beton beobachteten, unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen stattfindenden Ermüdungs- bzw. Schädigungsvorgangs abgeleitet. In diesem Zusammenhang findet nachfolgend auch eine Betrachtung einiger prinzipieller Aspekte zur Ermüdungsschädigung im Beton statt. Anschließend werden sowohl die verwendeten Messtechniken als auch die jeweiligen gemessenen Größen im Hinblick auf ihre Eignung zur Bestimmung der Ermüdungsschädigung bzw. des Lebensdauerzeitpunktes im Beton verglichen und bewertet. Zum Abschluss des Kapitels werden empirische Ansätze vorgestellt, die die wesentlichen Entwicklungen in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung erfassen sowie auch die Entwicklungen geeigneter Schädigungsindikatoren beschreiben.

Die vorliegende Arbeit wird mit dem Kapitel 7 abgeschlossen, in dem noch einmal die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Arbeit zusammengestellt werden. Ebenso findet sich dort ein Ausblick auf mögliche weiterführende und anstrebenswerte Fragestellungen, die im Rahmen der Forschung zur Betonermüdung betrachtet werden sollten.

Kapitel 2

Grundlagen zur Materialermüdung

Dieses Kapitel soll zu Beginn der Arbeit einen prinzipiellen Überblick über die wesentlichen Grundlagen im Bezug auf die Materialermüdung sowie deren experimentelle Untersuchung liefern. Dazu wird als erstes kurz darauf eingegangen, was Materialermüdung eigentlich bedeutet. Anschließend werden die wichtigsten Grundlagen im Hinblick auf die experimentelle Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Materialien mit Hilfe von Dauerschwingversuchen erläutert. In diesem Zusammenhang wird auf die Wöhlerlinien, nieder- und hochzyklisches Ermüdungsverhalten sowie die Dauerfestigkeit eingegangen. Zum Schluss erfolgt schließlich noch eine kurze Erläuterung zur Problematik der Betriebsfestigkeit.

Um die Grundlagen zur Thematik der Materialermüdung darstellen zu können, soll als erstes kurz eine Antwort auf die Frage gegeben werden:

Was bedeutet Materialermüdung?

Materialien, die als Konstruktionswerkstoffe verwendet werden, können einerseits infolge einer einmalig aufgebrachten ruhenden Beanspruchung versagen. Dabei handelt es sich dann um die allgemein bekannte statische Festigkeit der Werkstoffe, welche in statischen Bruchversuchen ermittelt wird.

Andererseits können die Materialien aber auch infolge einer mehrmaligen bzw. einer zeitlich veränderlichen Beanspruchung ihre Tragfähigkeit verlieren. Diese Art der Beanspruchung führt dazu, dass das Material in Abhängigkeit von der Art und der Dauer der jeweiligen zeitlich veränderlichen Beanspruchung unter Lasten versagen kann, die zum Teil deutlich unterhalb deren statischer Festigkeit liegen können. Dieses Phänomen wird als Materialermüdung bezeichnet.

Im Gegensatz zur statischen Festigkeit ist die Ermüdungsfestigkeit von vielen zusätzlichen Einflussgrößen anhängig, wie z. B. die Bauteilgröße, Bauteilgeometrie (z. B. Kerben), die Oberflächengüte, die Spannungsart und die Belastungsdauer. Aus diesem Grund ist die Thematik der Ermüdungsfestigkeit deutlich komplexer als eine Betrachtung ausschließlich ruhender Belastungen. Von der Ermüdung sind eigentlich alle festen Materialien betroffen, wie z. B. Metalle, Beton, Elastomere oder Kunststoffe.

Neben der eigentlichen Ermüdungsfestigkeit muss außerdem berücksichtigt werden, dass bereits der dem Versagen vorangegangene Ermüdungsprozess zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Degradation der meisten Materialeigenschaften führt. Das bedeutet, selbst wenn das Material nicht innerhalb der aufgebrachten Ermüdungsbeanspruchung versagen sollte, wird das Material durch den Ermüdungsprozess bereits geschädigt, was berücksichtigt werden muss.

Die Ermüdung von Materialien spielt in vielen Bereichen der Praxis eine Rolle, wie z. B. im Flugzeugbau, im Maschinen- und Anlagenbau, im Straßen- und Schienenfahrzeugbau, im Kran- und Brückenbau, im Schiffbau sowie in Offshore-Konstruktionen wie Ölplattformen oder Offshore-Windenergieanlagen. Einige Beispiele für Fälle in denen die Ermüdung von Materialien Unglücke mit verheerenden Auswirkungen verursacht hat, sind z. B. das Zugunglück in Eschede 1998, bei dem ein Schwingbruch eines Radreifens zur Entgleisung eines ICE-Zuges geführt hatte. Ein weiteres Beispiel ist die Kenterung der halbtauchenden Bohrplattform „Alexander L. Kielland“ 1980 in der Nordsee. Hier führte ebenfalls ein Schwingbruch in einer Strebe der Tauchkonstruktion zum Bauteilversagen und schließlich zur Kenterung der gesamten Plattform. Ein Beispielbild für die Schwingbruchfläche eines Stahlquerschnittes ist in der *Abbildung 2.1* dargestellt. Darin sind die vom Schwinganrisszentrum oben ausgehenden konzentrischen Risslinien sowie der Gewaltbruch unten zu erkennen.

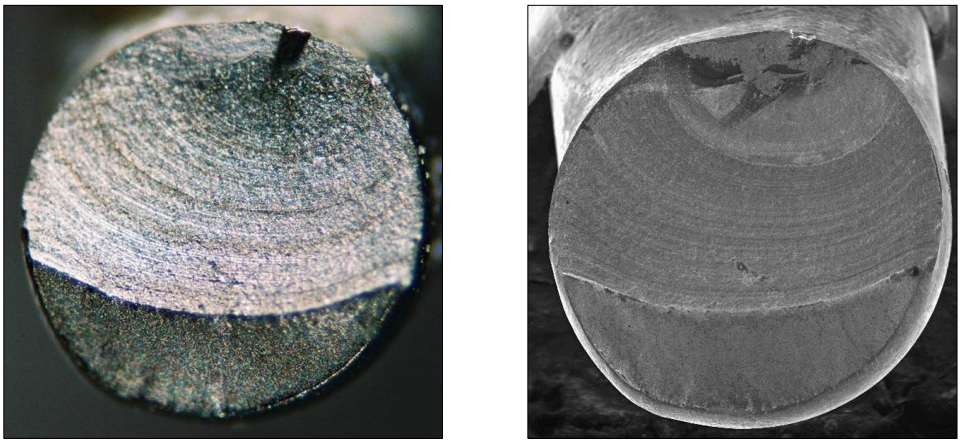

Abbildung 2.1: *Bruchfläche eines ermüdungsbedingten Bruches einer Fahrradspeiche unter dem Lichtmikroskop (links) und dem REM (rechts), Dr. Bettge BAM 5.1 (2005)*

Ermüdungsfestigkeit und Wöhlerversuche

Erste systematische Untersuchungen zur Erforschung des Ermüdungsverhaltens wurden Mitte des 19. Jh. von A. Wöhler für Metalle bzw. an Eisenbahnachsen durchgeführt. Auf diese Untersuchungen gehen auch die heute noch zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Materialien verwendeten Dauerschwingversuche oder auch Wöhler-Versuche genannten Ermüdungsversuche zurück. Dabei handelt es sich prinzipiell um einstufige Ermüdungsversuche mit konstanter Mittelspannung und Schwingamplitude, die bis zum Ermüdungsversagen des Materials gefahren werden.

Nachfolgend werden die wesentlichen Kenngrößen, die im Bezug mit den Wöhler-Versuchen stehen, kurz dargestellt. Ein breiter Überblick zum Thema der Ermüdung von Materialien kann zudem z. B. in [SURESH 1994] gefunden werden. Zum Thema der Betriebsfestigkeit und der damit verbundenen Methoden liefert z. B. [BUXBAUM 1992] oder [HAIBACH 2002] einen umfassenden Überblick. Die wichtigsten Definitionen für die Durchführung von Dauerschwingversuchen hingegen finden sich z. B. in der [DIN50100 1978] wieder. In Anlehnung an die DIN 50100 sind die charakteristischen Kenngrößen der zumeist sinusförmigen zyklischen Beanspruchung in der *Abbildung 2.2* veranschaulicht.

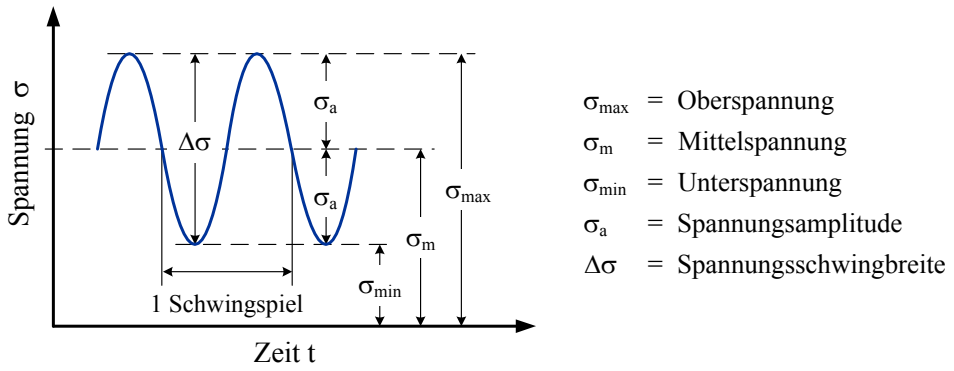

Abbildung 2.2: *Charakteristische Kenngrößen bei zyklischen Beanspruchungen in Anlehnung an [DIN50100 1978]*

Neben den in *Abbildung 2.2* dargestellten Kenngrößen spielt bei der Ermüdung auch das Vorzeichen der einzelnen Spannungsniveaus eine Rolle, das je nach Material einen mehr oder weniger großen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. In diesem Zusammenhang werden entsprechende Beanspruchungsbereiche unterschieden. In Anlehnung an [HAIBACH 2002] und [NAUBEREIT & WEIHERT 1999] sind die verschiedenen Beanspruchungsbereiche in der *Abbildung 2.3* veranschaulicht. Prinzipiell sind dabei Druckschwell-, Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen zu unterscheiden.

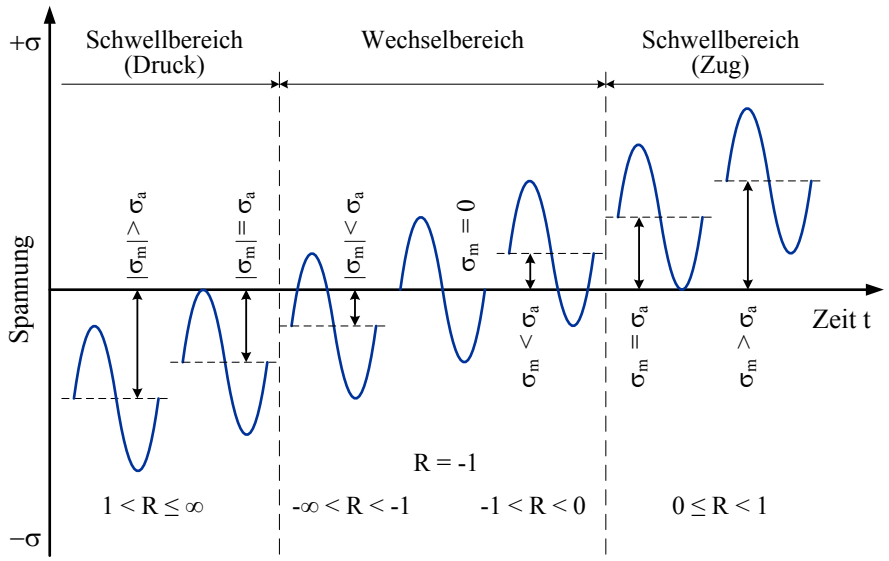

Abbildung 2.3: *Veranschaulichung der Beanspruchungsbereiche mit den zugehörigen Spannungsverhältnissen R für zyklische Belastungen in Anlehnung an [HAIBACH 2002] und [NAUBEREIT & WEIHERT 1999]*

Durch die Definition des Spannungsverhältnisses R können die verschiedenen Arten der Beanspruchung aus den Spannungsniveaus der zyklischen Beanspruchung bestimmt werden.

Spannungsverhältnis $$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \qquad (2.1)$$

Aus den einstufigen Wöhlerversuchen werden für das jeweilige aufgebrachte Beanspruchungsniveau die maximal ertragbaren Lastspielzahlen N_f des geprüften Materials gewonnen. Durch die Auswertung mehrerer Versuchsreihen mit unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus lässt sich der Zusammenhang zwischen der Höhe der aufgebrachten Ermüdungsbeanspruchung und der ertragbaren Lastspielzahl ableiten. Üblicherweise wird als variierende Beanspruchungsgröße die Spannungsamplitude σ_a gewählt. Werden beide Größen im doppeltlogarithmischen Maßstab aufgetragen, erhält man als Regressionsgerade die sogenannte Wöhlerlinie. Häufig wird als Bezeichnung der Beanspruchungsgröße nicht die Spannung σ selbst, sondern die zur Beanspruchung äquivalente Größe S verwendet, siehe auch [HAIBACH 2002]. Diese dient beim Beton sogar dazu, bezogene Lastgrößen zu beschreiben, wie im Kapitel 3.2.2 noch gezeigt wird. Daraus resultiert schließlich die vielfach verwendete Bezeichnung S-N-Kurve für die Wöhlerlinie. Eine schematische Veranschaulichung der typischen Form einer Wöhlerlinie ist in *Abbildung 2.4* wiedergegeben.

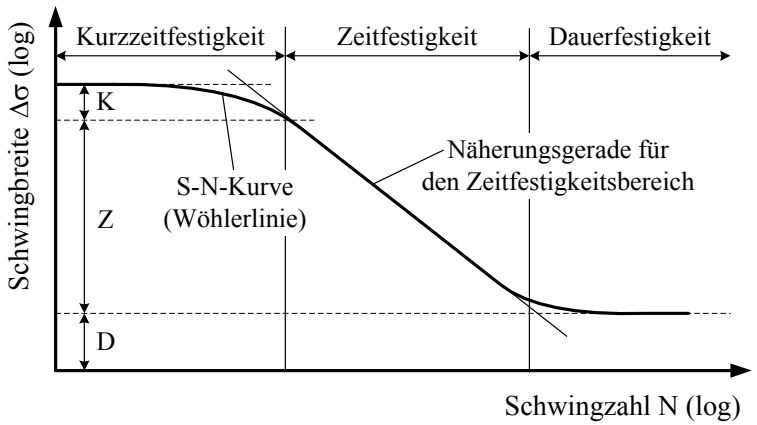

Abbildung 2.4: *Schematische Darstellung einer Wöhlerlinie für einstufige Ermüdungsbeanspruchungen mit Bezeichnung der unterschiedlichen Festigkeitsbereiche in Anlehnung an [HAIBACH 2002] und [MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983]*

Da es sich bei der Ermüdungslastspielzahl N_f zumeist um eine stark streuende Größe handelt, müssen für statistisch abgesicherte Ergebnisse auf jedem Beanspruchungsniveau ausreichend viele Proben geprüft werden. Die notwendige Anzahl hängt vom Material ab und wird in der [DIN50100 1978] prinzipiell mit 6 bis 10 Proben angegeben.

Wie die *Abbildung 2.4* zeigt, kann die Wöhlerlinie in drei charakteristische Bereiche unterteilt werden. Diese werden als Kurzzeitfestigkeits-, Zeitfestigkeits- und als Dauerfestigkeitsbereich bezeichnet. Die Dauerfestigkeit bezeichnet denjenigen Bereich, in dem die Ermüdungsbeanspruchung im Wöhlerversuch theoretisch unendlich oft ohne Versagen des Materials ertragen werden kann. Experimentell nachweisen lässt sich dies allerdings kaum. Lediglich der Übergang der Wöhlerlinie in einen extrem flachen Verlauf kann ermittelt werden. Dieser wird im Stahlbau prinzipiell bei $N \sim 5 \cdot 10^6$ angenommen [PETERSEN 2013]. Führt die aufgebrachte Ermüdungsbeanspruchung hingegen nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielen zum Versagen, spricht man vom Zeitfestigkeitsbereich. In diesem Bereich stellt sich ein linearer Zusammenhang für die Wöhlerlinie ein. Der Bereich der Kurzzeitfestigkeit liegt nahe der statischen Beanspruchbarkeit der Werkstoffe. Die Grenze zur Zeitfestigkeit wird im Allgemeinen in der Literatur mit $N \sim 10^4$ angegeben [MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983; KÖNIG & DANIELEWICZ 1994; ZILCH & ZEHETMAIER 2010]. Für den Ermüdungsnachweis im Rahmen einer Bemessung spielt der Kurzeitfestigkeitsbereich jedoch keine Rolle, da durch die Ge-

brauchstauglichkeitsnachweise dieser Spannungsbereich bereits ausgeschlossen wird [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994; ZILCH & ZEHETMAIER 2010]. Die genaue Lage der einzelnen Übergänge hängt natürlich prinzipiell vom jeweiligen Material ab.

Eine andere häufig verwendete Art der Bezeichnung für die Unterteilung der Ermüdung ist die der niederzyklischen (Low-Cycle-Fatigue = LCF) und hochzyklischen Ermüdung (High-Cycle-Fatigue = HCF). Hierzu finden sich in der Literatur jedoch unterschiedliche Definitionen.

Zum einen wird mit der Wöhlerlinie als Grundlage (*Abbildung 2.4*) der Übergang zwischen Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsbereich zur Unterteilung verwendet. Der Kurzeitfestigkeitsbereich wird mit niederzyklischem (LCF) und der Zeitfestigkeitsbereich mit hochzyklischem Ermüdungsverhalten (HCF) verbunden [MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983; KÖNIG & DANIELEWICZ 1994; ZILCH & ZEHETMAIER 2010]. Der Übergang wird, wie bereits erwähnt, häufig mit $N \sim 10^4$ angegeben.

Zum anderen wird das sich einstellende Verformungsverhalten des Materials als Unterscheidung herangezogen, wobei diese Definition wohl eher auf der Beschreibung metallischer Werkstoffe basiert [LEMAITRE 1992; SURESH 1994]. Als niederzyklische Ermüdung (LCF) wird dabei der Fall bezeichnet, wenn die Beanspruchung hoch genug ist, um neben den elastischen auch nennenswerte plastische Verformungen zu erzeugen, die sich in gleicher Größenordnung wie die elastischen Verformungen bewegen. Hingegen ist die hochzyklische Ermüdung (HCF) durch vorrangige elastische und dagegen vernachlässigbare plastische Verformungen gekennzeichnet. Die Übergänge werden hier mit $N = 10^4$ bzw. $N = 10^5$ benannt, und zumindest für metallische Werkstoffe deckt sich diese mit der vorangegangenen Definition.

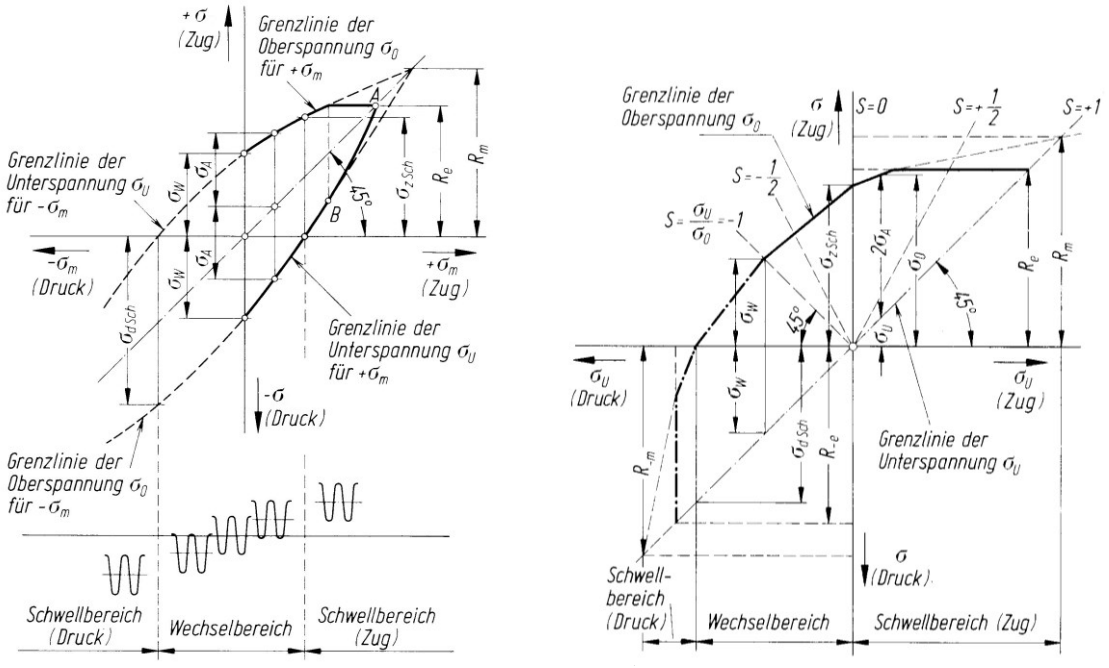

Abbildung 2.5: *Prinzipielle Darstellung der Dauerfestigkeitsschaubilder nach Smith (links) und nach Goodman (rechts) aus [DIN50100 1978]*

Eine etwas andere Unterteilung basiert weniger auf dem Materialverhalten als vielmehr auf den Charakteristiken der Beanspruchungen. In erster Linie für Bauwerke aus Beton abgeleitet,

wird diese von [HSU 1981] wie folgt dargestellt. Vor dem Hintergrund von Erdbebenbeanspruchungen wird der niederzyklische Bereich (LCF) bis $N = 10^3$ Lastzyklen definiert. Der hochzyklische Bereich (HCF) erstreckt sich darüber und entspricht vorrangig Beanspruchungen auf Flugfeldern, Eisenbahn- und Straßenbrücken sowie Bahnschwellen. Über $N = 10^7$ definiert [HSU 1981] sogar einen superhochzyklischen Bereich, der z. B. Offshore-Bauwerke betrifft. Eine entsprechende Darstellung dazu findet sich in Kapitel 3.2.2 in *Abbildung 3.8*.

Während die in der *Abbildung 2.4* beschriebene Wöhlerline nur in der Lage ist, die Dauerfestigkeit eines Materials für eine bestimmte Beanspruchungskonstellation darzustellen, existieren Dauerfestigkeitsdiagramme oder –schaubilder, die dies für ein Material für alle in *Abbildung 2.3* vorgestellten Beanspruchungsbereiche ermöglichen. Sie basieren letztlich auf der Auswertung mehrerer Wöhlerlinien aus verschiedenen Beanspruchungsbereichen. Häufig verwendete Formen der Darstellung sind das Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith (Smith-Diagramm) sowie das nach Goodman (Goodman-Diagramm). Beide sind in ihrer prinzipiellen Form in *Abbildung 2.5* dargestellt und werden in [DIN50100 1978], [MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983] oder [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994] beschrieben. Im Goodman-Diagramm wird die ertragbare Oberspannung σ_{max} in Abhängigkeit von der Unterspannung σ_{min} aufgetragen. Hingegen werden im Smith-Diagramm in Abhängigkeit der Mittelspannung σ_m die zugehörigen Oberspannungen σ_{max} und Unterspannungen σ_{min} dargestellt.

Betriebsfestigkeit

Unter realen Bedingungen werden Bauteile und Materialien in den aller seltensten Fällen durch eine konstante und gleichförmige zyklische Beanspruchung belastet, so wie sie den zuvor beschriebenen Wöhlerlinienen zugrunde liegen. Stattdessen handelt es sich bei tatsächlichen Betriebsbeanspruchungen zumeist um regellose Lasten, die sowohl in ihrer Amplitude, ihrem Spannungsniveau und ihrer Frequenz variieren. Die *Abbildung 2.6* gibt einen beispielhaften Verlauf einer solchen regellosen Betriebsbeanspruchung wieder.

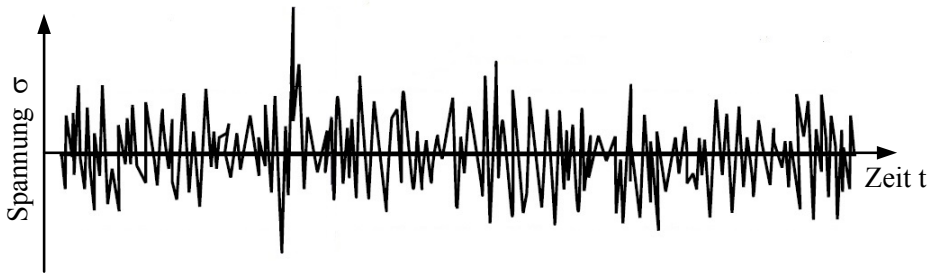

Abbildung 2.6: *Beispielhafter Zeitverlauf einer regellosen variierenden Betriebsbeanspruchung*

Eine experimentelle Ermittlung der jeweiligen Betriebsfestigkeit anhand exakter Beanspruchungsspektren ist jedoch normalerweise nicht realisierbar, besonders im Bauwesen. Die dafür erforderlichen Lastspielzahlen wären viel zu hoch und auch die Anzahl der möglichen Beanspruchungsspektren ist beliebig vielfältig. Um trotzdem eine Bewertung der Betriebsfestigkeit zu ermöglichen, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Diese erlauben es, die Schadensermittlung von realen Belastungsspektren auf die vorhandenen Wöhlerlinien aus einstufigen Ermüdungsversuchen zurückzuführen.

Hierzu werden aus Messungen oder Simulationen gewonnene Beanspruchungsverläufe mit Hilfe von Zählverfahren in einzelne Beanspruchungskollektive zerlegt. Diese lassen sich nach

der Höhe des Beanspruchungsniveaus, der Lastamplitude sowie der Häufigkeit des Auftretens sortieren. Als Beispiel sei hier das Rainflow-Verfahren genannt. Detailliertere und umfangreichere Darstellungen und Erläuterungen zum Thema der Zählverfahren finden sich z. B. in [DIN45667 1969], [BUXBAUM 1992], [NAUBEREIT & WEIHERT 1999], [HAIBACH 2002] oder [KÖHLER, JENNE ET AL. 2012].

Um auf Grundlage der aus einstufigen Ermüdungsversuchen gewonnenen Wöhlerlinien sowie den aus Belastungsspektren gewonnenen Belastungskollektiven eine Aussage über die Lebensdauer machen zu können, verwendet man schließlich Schadensakkumulationshypothesen. Diese erlauben, die durch die einzelnen Belastungskollektive erzeugten Teilschädigungen zu ermitteln und entsprechend zusammenzurechnen. Die einfachste und bekannteste Akkumulationshypothese ist die lineare Schädigungsakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner. Auf sie wird im Kapitel 3.4 noch näher eingegangen. Darüber hinaus soll in diesem Zusammenhang als weiterführende Literatur auf [BUXBAUM 1992], [NAUBEREIT & WEIHERT 1999], [SIEMON 2006] oder [HAIBACH 2002] verwiesen werden.

Kapitel 3

Stand der Erkenntnisse zur Ermüdung von Beton

Dieses Kapitel soll eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung zum Ermüdungsverhalten von Beton speziell mit dem Schwerpunkt auf Druckschwellbeanspruchungen wiedergeben. Es liefert die Grundlagen für die Bewertung der im Kapitel 5 vorgestellten Versuchsergebnisse und macht zugleich die derzeitigen Lücken bzw. offenen Fragestellungen besonders für die Betonermüdung unter Druckbeanspruchungen kenntlich. Um eine bessere Bewertung und Einordnung der Beobachtungen zum Ermüdungsverhalten zu ermöglichen, wird zu Beginn kurz das Verhalten des Betons unter monotonen einaxialen Zug- und Druckbeanspruchungen sowie unter mehraxialen Beanspruchungen dargestellt. Im Anschluss werden zuerst die allgemeinen Charakteristika im Rahmen der Betonermüdung vorgestellt, wobei auch kurz auf Unterschiede zum Ermüdungsverhalten von Metallen eingegangen wird. In dem Zusammenhang werden die wesentlichen Merkmale des Ermüdungsverhaltens von Beton unter Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen beschrieben. Zum Ermüdungsverhalten unter Druckschwellbeanspruchungen wird schließlich in getrennter Form auf die derzeitigen Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit sowie zum Ermüdungsvorgang selbst eingegangen. Abschließend werden in diesem Kapitel noch vorhandene Modelle und Ansätze zur Beschreibung der Betonermüdung vorgestellt, wobei eine Unterteilung nach Ansätzen zur Ermüdungsfestigkeit, zur Schädigungsakkumulation und zum Ermüdungsvorgang vorgenommen wird.

3.1 Betonverhalten unter monotoner Beanspruchung

Im Hinblick auf das Verhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchungen wird im Folgenden als Grundlage zuerst ein kurzer Überblick über die wesentlichen Charakteristika zum Materialverhalten unter monotonen Beanspruchungen gegeben. Auf entsprechend weiterführende Literatur wird im Text verwiesen. Allgemein lässt sich feststellen, dass der Beton im Vergleich zu vielen anderen Baustoffen eine ausgeprägt heterogene Struktur in seinem Materialgefüge aufweist. Diese Heterogenität beeinflusst sein Materialverhalten maßgeblich und ist mit eine wesentliche Ursache dafür, dass sich sein makroskopisches Verhalten im Druckbereich deutlich vom Verhalten im Zugbereich unterscheidet. Prinzipiell ist der Beton durch ein sprödes bzw. spröd-duktiles Materialverhalten gekennzeichnet. Ein allgemeiner Überblick zum Materialverhalten von Beton ist z. B. in [VAN MIER 1997] und [THIENEL 2008] zu finden.

3.1.1 Einaxiale Zugbeanspruchungen

Das Verhalten des Betons unter Zugbeanspruchungen unterscheidet sich deutlich von seinem Verhalten unter Druckbeanspruchungen, was sich in erster Linie in einer wesentlich geringeren Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit äußert. Diese beträgt ca. 1/10 bis 1/8 der

Druckfestigkeit und ist zudem eine stark streuende Größe [VAN MIER 1997; THIENEL 2008; ZILCH & ZEHETMAIER 2010]. Insgesamt ist das Verhalten des Betons unter Zugbeanspruchungen deutlich spröder als das unter Druckbeanspruchungen. Dies ist mit eine Ursache dafür, dass die experimentelle Untersuchung des Verhaltens unter Zugbeanspruchungen deutlich komplizierter ist und höhere Ansprüche an die Versuchstechnik stellt, als dies für Druckbeanspruchungen der Fall ist. Im Bezug auf den Stellenwert der Zugfestigkeit nimmt [VONK 1992] an, dass im Rahmen der Schädigung und des Versagens von Beton die Rissbildung aus Zugspannungen der bedeutendste Vorgang zu sein scheint, weil diese wohl die einzige Ursache für Rissbildung im Beton ist. Andere Typen der Rissbildung wie Schubrisse, Druckrisse oder auch Zerstauchungsrisse sind makroskopische Phänomene, die sich auf Zugrisse in der Mikroebene zurückführen lassen [VONK 1992]. Im Hinblick auf die Schädigung des Betons durch Mikrorisse muss auch berücksichtigt werden, dass der Beton in der Regel schon eine „Vorschädigung" besitzt. Infolge der während der Hydratation ablaufenden Prozesse im Zementstein sowie dem Schwinden, entstehen im Betongefüge bereits vor dem Aufbringen einer äußeren Beanspruchung Eigenspannungszustände bzw. daraus folgend auch ungerichtete Mikrorisse im Gefüge. Diese befinden sich vorrangig in der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein, auch als ITZ bezeichnet (ITZ = interfacial transition zone), sowie auch im Zementstein selbst [VONK 1992; VAN MIER 1997; KUSTERMANN 2005].

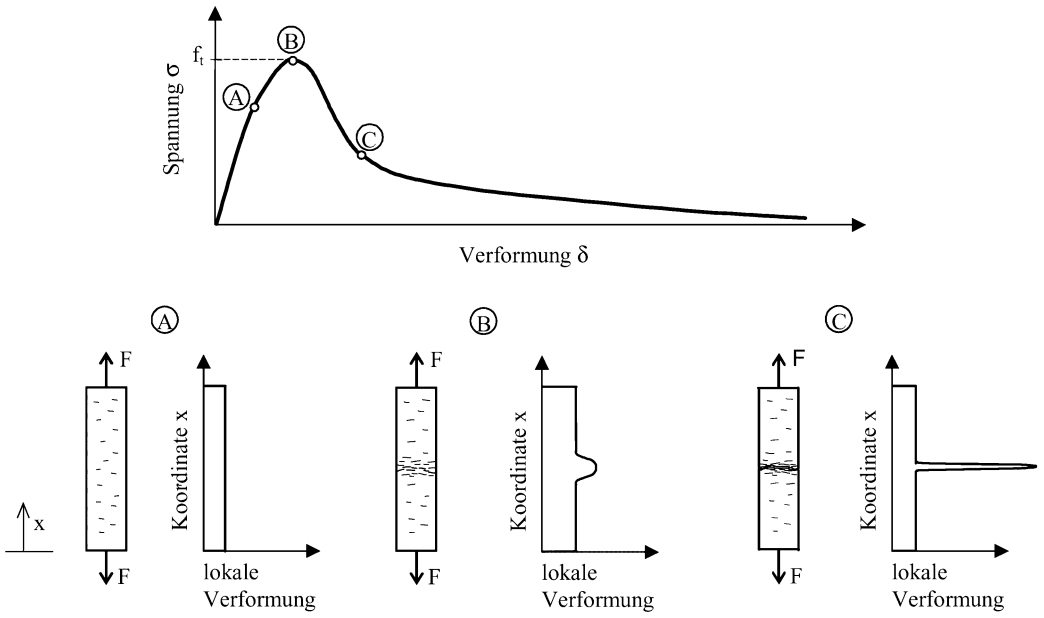

Abbildung 3.1: *Spannungs-Verformungs-Verlauf eines zentrischen Zugversuches an Beton mit den zugehörigen Verteilungen der Mikrorisse und der Dehnungen über die Probenlänge für die verschiedenen Schädigungsstadien aus [KESSLER-KRAMER 2002]*

Die *Abbildung 3.1* zeigt den charakteristischen Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Spannung und der resultierenden Verformung der Probe sowie deren Verteilung über die Probenlänge für einen verformungsgeregelten zentrischen Zugversuch an Beton. Die Beschreibung der während der Beanspruchung ablaufenden Rissbildung lässt sich anhand eines einfachen physikalischen Modells nachvollziehen, das auf [HILLERBORG, MODÉER ET AL. 1976] bzw. [HILLERBORG 1983] zurückgeht und als „fictitious crack model" bezeichnet wird. Dieses spiegelt sich in den verschiedenen Probenzuständen in *Abbildung 3.1* unten wider und geht von einem fiktiven Einzelriss aus. Ein anderes Model mit sehr ähnlichem Charakter ist

das „crack band model“ von [BAZANT & OH 1983], bei dem die Breite der Prozesszone Berücksichtigung findet, weshalb es sich gut für numerische Modellierungen eignet.

Unter Zugbeanspruchung zeigt sich, wie in *Abbildung 3.1* dargestellt, bis kurz vor Erreichen der Zugfestigkeit bei (A) ein nahezu linear elastischer Zusammenhang [DUDA 1991; HORDIJK 1991]. Dabei entstehen Mikrorisse im Gefüge, die gleichmäßig über den gesamten Probekörper verteilt sind sowie eine über die Probenlänge konstante Dehnung. Anschließend beginnt kurz vor Erreichen der Zugfestigkeit bei (A) eine Mikrorissakkumulation im Bereich einer Schwachstelle eines Querschnitts des Probekörpers, der als Bruchprozesszone bezeichnet wird. Damit geht der Spannungs-Verformungs-Verlauf in einen nichtlinearen Zusammenhang mit zunehmend irreversiblen Verformungsanteilen über und erreicht die maximale Spannung. An diesem Punkt versagt der Beton nicht schlagartig, sondern weist über die Bruchspannung hinaus eine Resttragfähigkeit auf, ähnlich dem Verhalten unter Druckbeanspruchung. Dieser abfallende Bereich in der Spannungs-Verformungs-Beziehung wird auch als Entfestigungsbereich bezeichnet und ist auf die Verzahnung von Rissufern bzw. eine Überbrückung der Bruchprozesszone durch Zuschlagkörner zurückzuführen. Im weiteren Verlauf, dem Nachbruchbereich, findet eine zunehmende Lokalisierung der entstehenden Schädigung statt, im Rahmen derer sich ein Makroriss ausbildet, der schließlich zum Versagen der Probe führt. Der übrige Teil der Probe wird dabei nach und nach entlastet, bis er wieder völlig entspannt ist und im Rahmen dessen sich vorhandene Mikrorisse teilweise wieder schließen [DUDA 1991]. Das Resultat dieses lokalisierten Versagensvorgangs ist eine von der Probenlänge unabhängige Bruchenergie [HILLERBORG 1983].

3.1.2 Einaxiale Druckbeanspruchungen

Unter Druckbeanspruchungen besitzt der Beton seine größte Tragfähigkeit. Im Gegensatz zu Zugbeanspruchungen weist er hier ein deutlich duktileres Materialverhalten auf, was sich in einem stärker ausgeprägten nichtlinearen Verhalten im Vorbruchbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung zeigt sowie in wesentlich größeren irreversiblen Verformungen. *Abbildung 3.2* gibt die typische Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Beton unter Druck wieder, mit den zugehörigen Phasen der Rissbildung im Gefüge.

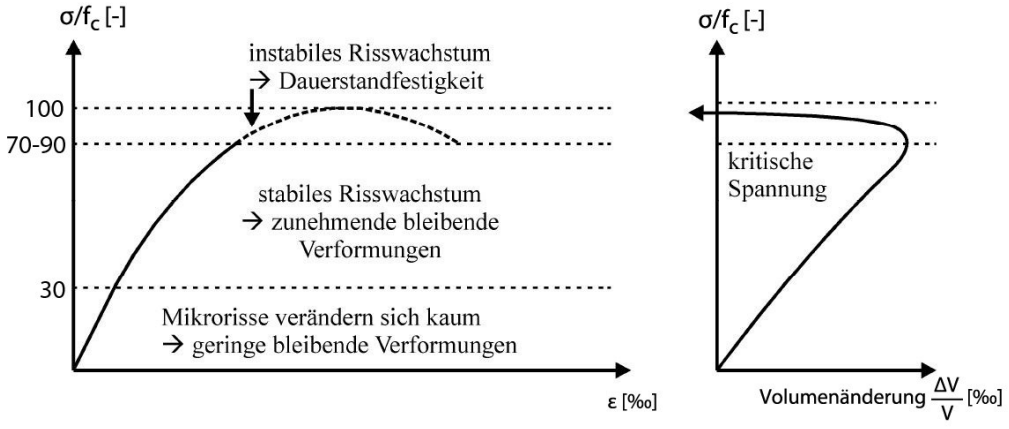

Abbildung 3.2: *Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowie der Spannungs-Volumen-Beziehung mit Veranschaulichung der verschiedenen Bereiche der Gefügeveränderungen unter Druckbeanspruchungen aus [IBUK 2008]*

Darin zeigt sich bis ca. 30 – 40 % der Druckfestigkeit ein nahezu linear-elastisches Materialverhalten, das anschließend in einen nichtlinearen Verlauf bis zum Bruch übergeht [SCHICKERT 1980; VONK 1992; PÖLLING 2000; THIENEL 2008]. Im linearen Bereich öffnen sich vermutlich nur die bereits vorhandenen Mikrorisse aus dem Hydratationsprozess und dem Schwinden. Als Ursache für den Übergang zum nichtlinearen Verhalten wird ein Wachstum der vorhandenen Rissstruktur angenommen. Dieses führt zu irreversiblen Veränderungen in der Gefügestruktur, und infolge dessen kommt es zu plastischen Verformungen sowie auch zu einer Abnahme der Materialsteifigkeit. Kurz vor dem Erreichen der Druckfestigkeit vereinigen sich die Mikrorisse und es formieren sich Makrorisse im Gefüge. Im Gegensatz zum Zugversagen verteilen sich bis hier die irreversiblen Verformungen und Schädigungen über die gesamte Probe und weisen im Vorbruchbereich noch keine ausgezeichnete Lokalisation auf. Bei Erreichen der Druckfestigkeit vereinigen sich schließlich die Makrorisse und es bilden sich Bruchflächen aus, die vorwiegend parallel zur Belastungsrichtung orientiert sind. Im Nachbruchbereich kommt es schließlich ähnlich wie unter Zugbeanspruchung zu einer Lokalisation der Schädigungen [VAN MIER 1984; VONK 1992]. Dies wurde in Experimenten von van Mier bestätigt, bei denen Proben mit unterschiedlicher Höhe unter der Verwendung von Bürsten zur Lasteinleitung geprüft wurden. Dabei zeigte sich für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Nachbruchbereich eine starke Abhängigkeit von der Probenhöhe, während die Spannungs-Verformungs-Kurve nahezu unabhängig von der Probenhöhe war, was in *Abbildung 3.3 links* und *rechts* wiedergegeben ist.

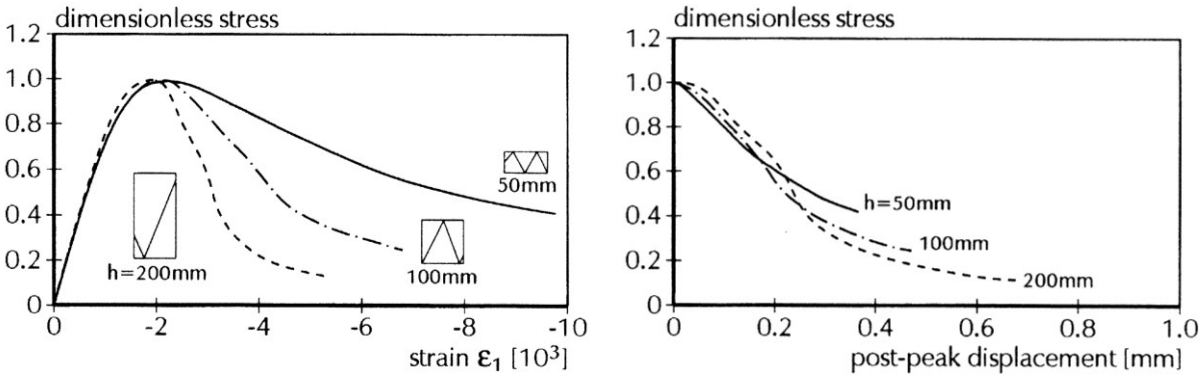

Abbildung 3.3: *Spannungs-Dehnungs-Beziehung (links) und Spannungs-Verformungs-Kurven im Nachbruchbereich (rechts) für unterschiedlich hohe Probekörper unter Druckbeanspruchung aus [VAN MIER 1997]*

Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass unabhängig von der Probenhöhe dieselbe Verschiebung erforderlich ist, um die Probe zu zerstören. Als Grund dafür wird die Lokalisierung der Verformung und Schädigung im Nachbruchbereich innerhalb einer begrenzten Bruchprozesszone angenommen, während der Rest des Probekörpers entlastet wird [VAN MIER 1984; VAN MIER 1997]. Daraus folgt, dass die zur Zerstörung des Probekörpers erforderliche Energie unabhängig von der Probenhöhe ist und damit eine konstante Zerstauchungsenergie für den jeweiligen Beton angegeben werden kann. Eine Bestätigung für die Ergebnisse von van Mier liefern die Versuchsergebnisse von [JANSEN & SHAH 1997].

Bei der Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit bzw. Spannungs-Dehnungs-Beziehung muss berücksichtigt werden, ob sich in der jeweiligen Probe auch tatsächlich ein einachsiger Spannungszustand einstellt. Durch eine Behinderung der Querdehnungen im Kontaktbereich zwischen Druckplatte und Probekörper kommt es in der Regel zu einem mehraxialen Span-

nungszustand im Randbereich der Probe. Aus diesem Grund muss die Probe eine gewisse Schlankheit aufweisen, damit sich in der Mitte ein ungestörter einaxialer Spannungszustand einstellen kann. Eine andere Möglichkeit ist die Verhinderung von Schubkräften in der Kontaktfläche durch die Verwendung von Stahlbürsten oder Gleitflächen. Entsprechende Untersuchungen hierzu wurden z. B. von [VAN MIER 1984] und [VONK 1992] durchgeführt.

Die Form der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons hängt von zahlreichen Parametern ab. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist dabei die Druckfestigkeit. Bis heute wurden Betone in einem sehr breiten Spektrum an Druckfestigkeiten entwickelt, von Normalbeton (NSC) über hochfesten Beton (HPC) bis hin zu ultrahochfesten Beton (UHPC), der Druckfestigkeiten bis 250 N/mm² erreichen kann [FEHLING, SCHMIDT ET AL. 2005; FITIK 2012]. Typische Spannungs-Dehnungs-Linien von Betonen mit unterschiedlichen Festigkeiten sind in *Abbildung 3.4* dargestellt. Mit zunehmender Festigkeit zeigt sich ein ausgeprägteres elastisches Verhalten im Vorbruchbereich und es wird zugleich eine höhere Bruchdehnung erreicht. Allerdings weist der Beton mit steigender Festigkeit auch ein zunehmend sprödes Verhalten auf, das mit einem schlagartigen Versagen sowie einem steileren Abfall im Nachbruchbereich einhergeht.

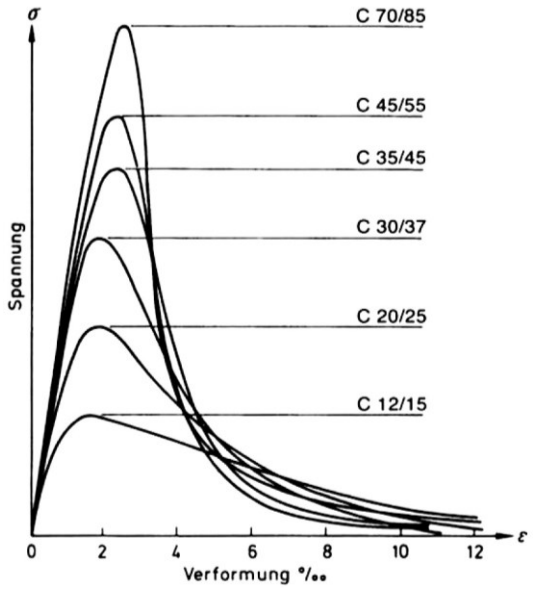

Abbildung 3.4: *Spannungs-Verformungs-Beziehungen unter Druckbeanspruchung für verschiedene Betondruckfestigkeiten aus [ANDERS 2007] nach [KÖNIG, TUE ET AL. 2001]*

Neben der Druckfestigkeit wird das Betonverhalten unter anderem auch durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst, da das Verformungsverhalten des Betons eine Reihe von zeitabhängigen Komponenten beinhaltet. Mit steigenden Dehnraten erhöht sich zwar die Druckfestigkeit, aber auch der spröde Charakter im Materialverhalten [MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983; THIENEL 2008].

Die Zeitabhängigkeit in den Verformungen des Betons zeigt sich besonders deutlich in seinem Kriechverhalten unter konstanter Dauerlast. Die unter einer Dauerlast entstehenden zeit- und lastabhängigen Verformungen beinhalten verschiedene Komponenten, die sowohl reversible als auch irreversible Anteile besitzen [LOCHNER 2000; BOCKHOLD 2005; ZILCH & ZEHETMAIER 2010; ANDERS 2013]. Die einzelnen Bestandteile der Verformungen sind in *Abbildung 3.5 links* veranschaulicht. Die Entwicklung der Verformungen hängt dabei wesent-

lich von der Höhe der Beanspruchung ab. Bis zu einer Spannung von ca. $0{,}8 \cdot f_c$, der sogenannten Dauerstandfestigkeit, ist von einem konvergenten Kriechverhalten auszugehen, dass von einer abklingenden Entwicklung in den Verformungen gekennzeichnet ist [BOCKHOLD 2005]. Wird dagegen eine Beanspruchung oberhalb der Dauerstandfestigkeit aufgebracht, geht die Verformungsentwicklung in einen wieder zunehmenden Verlauf über, bis der Beton unter der Dauerlast versagt (*Abbildung 3.5 rechts*). Diese Verformungsentwicklung kann in drei Phasen unterteilt werden:

- **Primärkriechen**: abnehmende Rate der Kriechverzerrungen zu Beginn der Belastungsphase
- **Sekundärkriechen**: konstante Verzerrungsrate im mittleren Bereich der Belastungsphase
- **Tertiärkriechen**: Zunahme der Verzerrungsrate am Ende der Belastungsphase, bis das Versagen des Betons eintritt.

Zusätzlich zu der Verformungsentwicklung wurde festgestellt, dass infolge der Dauerbeanspruchung auch eine Schädigung in Form der Degradation der elastischen Steifigkeit beobachtet werden kann [MAZZOTTI & SAVOIA 2002].

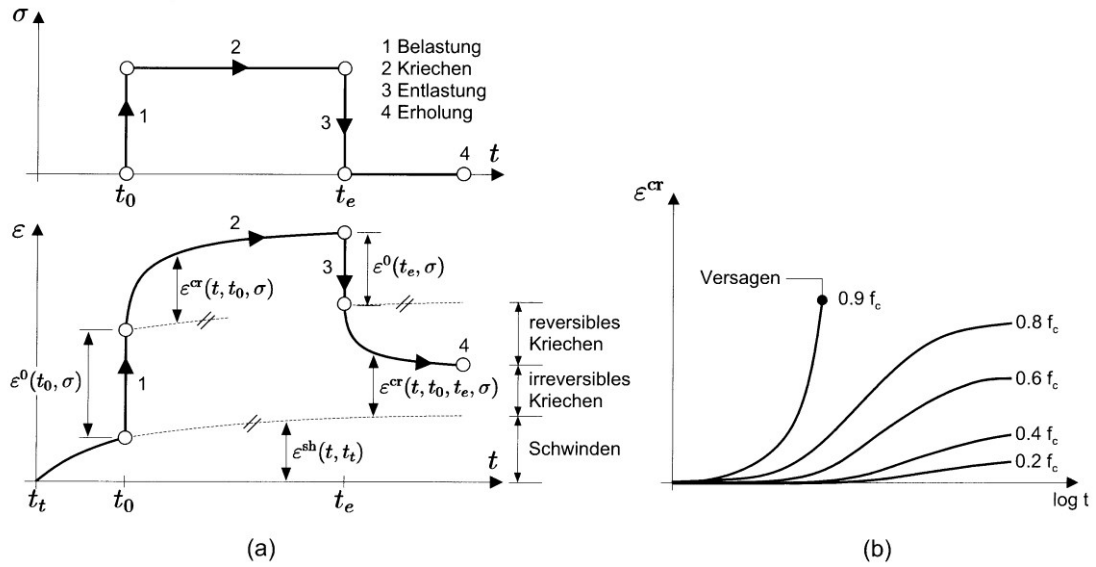

Abbildung 3.5: *Komponenten der Langzeitverformung von Beton unter Dauerlast (links) und Kriechverformungen für verschiedene Belastungsniveaus (rechts) aus [BOCKHOLD 2005]*

Als Ursache für das Kriechen werden in der Literatur mehrere Vorgänge genannt. Der Abstand zwischen Zementsteinpartikeln wird durch äußere Belastung verringert und in Gelporen physikalisch gebundenes Wasser wird unter Druck gesetzt, was zum Ausdiffundieren des Wassers aus den Poren heraus führt. Des Weiteren werden Verschiebungs- und Gleitvorgänge von Partikeln sowie auch Mikrorissbildung im Gefüge als Ursache beschrieben [BAZANT 1986; LOCHNER 2000; BOCKHOLD 2005; THIENEL 2008; ANDERS 2013].

3.1.3 Mehraxiale Beanspruchungen

Da der Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung im Wesentlichen durch Zugversagen aus Querzugbeanspruchungen versagt, führen zusätzliche äußere Beanspruchungen in einer zwei-

ten oder auch dritten Richtung zu einer entscheidenden Beeinflussung des Tragverhaltens. Prinzipiell lässt sich feststellen, dass mehraxiale Druckbeanspruchungen die Druckfestigkeit und die Duktilität des Betons im Vergleich zur einaxialen Beanspruchung nennenswert erhöhen. Zu unterscheiden ist zwischen zweiaxialen und dreiaxialen Beanspruchungen.

Das Verhalten unter zweiaxialen Beanspruchungen wurde z. B. in [KUPFER 1973], [SCHICKERT & WINKLER 1977] und [VAN MIER 1984] untersucht. Es zeigt sich, dass sich Beanspruchungen im Zug/Zug-Bereich nicht oder nur unwesentlich beeinflussen. Im Druck/Zug-Bereich hingegen reduziert sich erwartungsgemäß die Druckfestigkeit erheblich. Unter Beanspruchungen im Druck/Druck-Bereich findet schließlich eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit im Bezug auf die einaxiale Druckbeanspruchung statt [KUPFER 1973]. Die daraus resultierenden biaxialen Versagenskurven sind beispielhaft in *Abbildung 3.6 links* wiedergegeben. Bei einem Spannungsverhältnis von σ_1/σ_2 = -1/-0,52 ergab sich bei Kupfer eine maximale Festigkeitserhöhung um 27 %. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im Druck/Druck-Bereich unterscheiden sich qualitativ nur wenig von denen unter einaxialer Beanspruchung. Durch die vorhandene Druckspannung in der zweiten Richtung werden aber die Querdehnung und damit auch die Mikrorissbildung behindert, was schließlich zu der beschriebenen Steigerung der Druckfestigkeit führt [PÖLLING 2000].

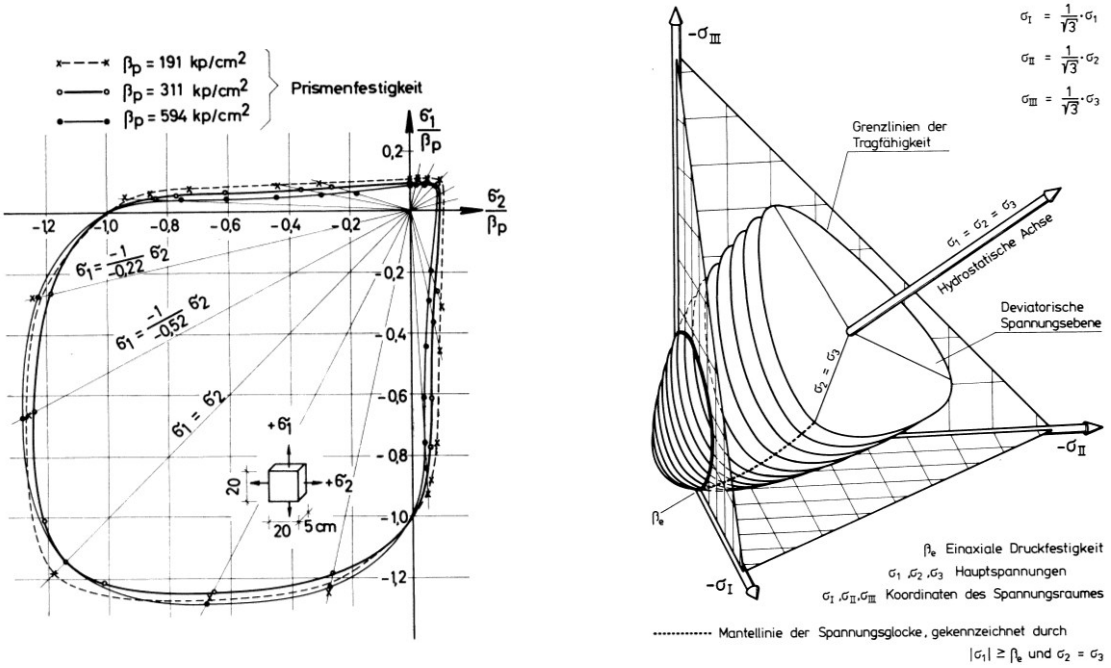

Abbildung 3.6: *Versagenslinien von Beton unter statischer zweiaxialer Druckbeanspruchung aus [KUPFER 1973] (links) und Versagensfläche von Beton unter statischer dreiaxialer Druckbeanspruchung aus [SCHICKERT 1980] (rechts)*

Bei der Untersuchung des Verhaltens von Beton unter dreiaxialen Beanspruchungen sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Prüftechniken zu unterscheiden. Zum einen die Untersuchung von Betonzylindern in Traixialzellen, bei denen mit Hilfe einer Flüssigkeit ein hydrostatischer Manteldruck aufgebracht wird. Zum anderen die Untersuchung von Betonwürfeln in dreiaxialen Prüfmaschinen, bei denen in der Regel über Bürsten die Last aus drei unabhängigen Prüfzylindern in die Würfel eingebracht wird. Untersuchungen zum Verhalten von Beton unter dreiaxialen Beanspruchungen wurden z. B. in [SCHICKERT & WINKLER 1977],

[VAN MIER 1984], [SCHOLZ, NECHVATAL ET AL. 1995], für normal- und hochfeste Betone in [ROGGE 2003] sowie für hoch- und ultrahochfeste Betone in [SPECK 2008] bzw. [CURBACH & SPECK 2007] durchgeführt. Entsprechend dem Verhalten unter zweiaxialen Druckbeanspruchungen führt das Aufbringen einer zusätzlichen Druckspannung in der dritten Richtung zu einer weiteren Behinderung der Querdehnung und damit auch der Mikrorissbildung. Die Betondruckfestigkeit wird dadurch gegenüber der entsprechenden zweidimensionalen Festigkeit bereits durch relativ geringe Druckspannungen in der dritten Richtung erheblich erhöht. Bei geringen Werten der dritten Spannung bleiben aber die Versagenscharakteristika aus der reinen zweidimensionalen Beanspruchung erhalten. Das Material versagt bei einer mehraxialen Druckbeanspruchung durch Zugdehnung in Richtung der kleinsten Hauptspannung [SCHICKERT & WINKLER 1977]. Generell zeigen die Untersuchungen, dass mit zunehmenden Werten für die Druckbeanspruchungen in den beiden Querrichtungen auch eine höhere Festigkeit erreicht wird. Der aus der einaxialen Festigkeit bekannte Sprödbruch wandelt sich dabei zu einem quasi duktilen Versagen um. Das Verhalten des Betons ändert sich nochmals, wenn sich die dreidimensionale Beanspruchung in den Bereich nahe dem hydrostatischen Druck bewegt. In diesem Falle wird die Mikrorissbildung nahezu vollends unterbunden, der Beton verhält sich erheblich duktiler und eine Brucherkennung wird immer schwieriger [SCHICKERT & WINKLER 1977]. Die *Abbildung 3.6 rechts* zeigt beispielhaft die räumliche Versagensfläche für Beton unter dreiaxialen Beanspruchungen.

3.2 Zur Ermüdung von Beton allgemein

3.2.1 Aktuelle Schwerpunkte und Relevanz der Thematik

Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Wie bereits in der Einleitung in Kapitel 1 dargelegt wurde, besteht generell nach wie vor vielfältiger Forschungsbedarf im Hinblick auf die Ermüdung von Beton. Der eigentliche Ermüdungsvorgang ist bei metallischen Werkstoffen bereits weitgehend erforscht und erklärt. Für den mehrphasigen Werkstoff Beton hingegen ist der Ermüdungsvorgang bei weitem noch nicht in gleichem Maße geklärt. Dies liegt zum einen in seinem sehr komplexen Materialverhalten begründet, das vorrangig aus seiner heterogenen Gefügestruktur resultiert, und zum anderen in der großen Vielfalt seiner Zusammensetzungen. Hinzu kommt, dass der Beton nach wie vor weiterentwickelt wird, wobei auch immer neue Rezepturen mit neuen Eigenschaften entstehen. Beispiele dafür sind hochfeste Betone (HPC), ultrahochfeste Betone (UHPC) oder auch selbstverdichtende Betone (SCC).

Entsprechend der vielfältigen offenen Fragestellungen zum Thema der Betonermüdung sind auch die Inhalte der aktuellen Forschungen auf diesem Gebiet sehr unterschiedlich und auch breit gefächert. Im Rahmen der aktuellen Forschungen zur Ermüdung von Beton sind unter anderem die folgenden Thematiken Gegenstand der Untersuchungen bzw. Betrachtungen:

- Ermüdungsfestigkeit, speziell von besonderen Betonen wie HPC und UHPC [KIM & KIM 1996; FEHLING, SCHMIDT ET AL. 2005; TUE & MUCHA 2006; ANDERS 2007; HERWIG 2008; WEFER 2010; FITIK 2012]
- Einflussfaktoren auf die Ermüdung bzw. die Ermüdungsfestigkeit [KESSLER-KRAMER 2002; HOHBERG 2004; BREITENBÜCHER, IBUK ET AL. 2007; LOHAUS, WEFER ET AL. 2011]

- Ermüdungsprozess [BAHN & HSU 1998; GAO & HSU 1998; KESSLER-KRAMER 2002; SCHWABACH 2005; BREITENBÜCHER, IBUK ET AL. 2007; IBUK 2008]
- Mehraxiales Ermüdungsverhalten [TALIERCIO & GOBBI 1996; HOOI 2000; SHAH & MU 2004; GRÜNBERG, LOHAUS ET AL. 2007]
- Ermüdung an Bauteilen sowie Verbund [SCHLÄFLI 1999; CAO & CHUNG 2001; THUN 2006; GRÜNBERG, HANSEN ET AL. 2007; MAEKAWA, FUKUURA ET AL. 2007; HERWIG 2008; GAEDICKE, ROESLER ET AL. 2009; LINDORF 2011; FEHLMANN 2012; TEWORTE 2014]
- Modellansätze für Ermüdungsfestigkeiten und Ermüdungsvorgänge [GAO & HSU 1998; PFANNER 2002; ALLICHE 2004; PFISTER 2007; GÖHLMANN 2009; GUO, CARPINTERI ET AL. 2010; WEFER 2010; LOHAUS, WEFER ET AL. 2011]

Praktische Relevanz der Betonermüdung

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 1.1 ist die praktische Relevanz der Ermüdungsthematik des Betons trotz des relativ geringen Anteils im Bezug auf das gesamte Bauwesen in verschiedener Weise gegeben und ist vor allem zunehmend.

Neben diversen existierenden Anwendungen, in denen Betontragwerke ermüdungsrelevanten Beanspruchungen ausgesetzt sind, führen neue Einsatzmöglichkeiten für Beton zu weiteren Anwendungen, bei denen die Ermüdung ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. Zusätzlich sind auch Veränderungen von Einwirkungen auf die Tragwerke im Laufe der Zeit Ursache für gesteigerte Ermüdungsbeanspruchungen. Dies ist besonders bei bestehenden Tragwerken von Bedeutung und betrifft in ausgeprägter Form Infrastrukturbauwerke.

Ein weiterer Faktor beruht auf den sich ändernden Grundsätzen bzw. Gesichtspunkten bei der Gestaltung von Tragwerken. Die zunehmende Entwicklung zu filigraneren Strukturen bedingt in verschiedener Weise ebenfalls eine Steigerung von Beanspruchungen mit zyklischem Charakter. In diesem Zusammenhang begünstigt die Entwicklung neuer höher-fester Betone derartige Möglichkeiten in der Gestaltung.

Gesellschaftliche Aspekte bedingen außerdem eine zunehmende Bedeutung der Ressourcenschonung. Das führt auch im Bauwesen zu einem sorgsameren Umgang mit den Materialien, aber zugleich zu dem Streben nach längeren Lebensdauern bei Neu- und Altbauten. Für die Bemessung bedeutet dies insgesamt eine möglichst effiziente aber zugleich zuverlässige Auslegung. In diesem Zusammenhang ist im Hinblick auf die Qualität der Bemessung bei der Ermüdung ein möglichst ähnlich hoher Qualitätsgrad anzustreben wie im Falle der statischen Bemessungen. Hierfür sind vor allem bessere Ansätze und Modelle erforderlich.

Für Bestandsbauwerke ist vor allem eine zuverlässige Bestimmung der aktuellen ermüdungsbedingten Schädigungs- bzw. Lebensdauerzustände erstrebenswert sowie darauf aufbauend eine verlässliche Prognose von Restlebensdauern.

Die derzeitigen Bemessungsverfahren zur Betonermüdung in den Regelwerken [CEB-FIP 1993; DIN-EN-1992-2 2010; DIN-EN-1992-1-1 2011; CEB-FIP 2012] spiegeln dagegen zwangsläufig das eingeschränkte Wissen im Bezug auf das Ermüdungsverhalten des Betons wider. Sie erfassen das Ermüdungsverhalten des Betons nur unzureichend und lassen eine Reihe von Aspekten der Betonermüdung ganz außen vor [HEGGER, ROGGENDORF ET AL. 2014]. Das betrifft auch die Ermittlung von Ist-Zuständen sowie die Bestimmung von Restlebensdauern.

Die genannten Hintergründe unterstreichen die bestehende sowie auch die zunehmende Relevanz der Ermüdung von Beton auch für die Praxis und sind zugleich mit ausschlaggebend für den anhaltenden Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

3.2.2 Allgemeines zum Ermüdungsverhalten von Beton

Die Thematik der Ermüdung von Beton ist nachweislich bereits seit dem Anfang des letzten Jahrhunderts Gegenstand von Untersuchungen. Aus den ersten bekannten Arbeiten hierzu sind zum Beispiel die von [VAN ORNUM 1903] und [VAN ORNUM 1907] zu nennen, der sich damals mit dem Verhalten unter Druckschwellbeanspruchungen befasst hat. Seitdem hat es eine Vielzahl an Untersuchungen und Arbeiten zum Thema der Betonermüdung gegeben, wobei der Forschungsbedarf nach wie vor noch nicht erschöpft ist. Einen Überblick zu den frühen Arbeiten aus der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts findet sich z. B. in [MURDOCK 1965]. Für einen allgemeinen Überblick zum jüngeren Stand der Erkenntnisse über das Ermüdungsverhalten von Beton eignen sich [RILEM 1984], [CEB 1988], [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994] sowie [HEGGER, ROGGENDORF ET AL. 2014]. Darüber hinaus bietet z. B. die Arbeit von [PFANNER 2002] eine umfassende Zusammenstellung von Literatur speziell zur experimentellen Untersuchung der Betonermüdung.

Im Gegensatz zu Metallen spielen bei der Ermüdung von Beton neben der Amplitude der zyklischen Beanspruchung zusätzlich auch die absolute Höhe der einzelnen Lastniveaus eine wichtige Rolle, was durch die Höhe der Mittellast S_m definiert wird, um die die zyklische Beanspruchung schwingt. Aufgrund der Abhängigkeit der Betonermüdung von absoluten Werten werden zur besseren Vergleichbarkeit die einzelnen Kenngrößen der Schwingbeanspruchung mit der jeweiligen statischen Druckfestigkeit f_c des betreffenden Betons normiert, was in *Abbildung 3.7* veranschaulicht ist. Auf diese Weise ist es schließlich möglich, die Ergebnisse aus Versuchen an Betonen unterschiedlicher Festigkeiten zu vergleichen.

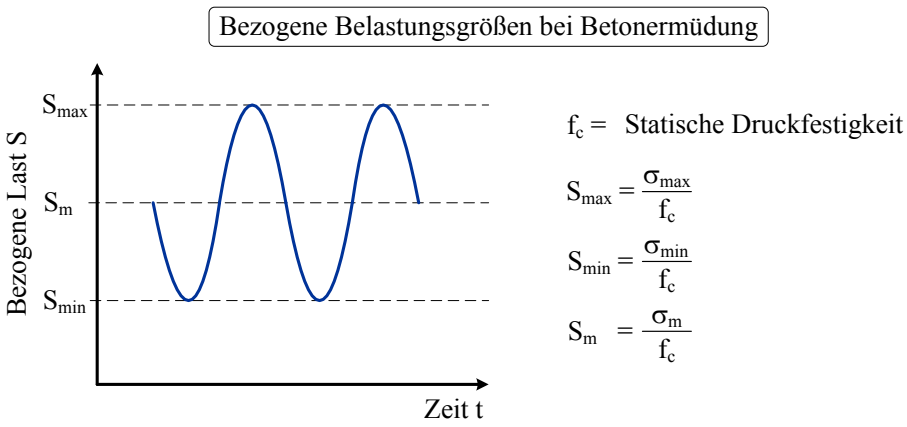

Abbildung 3.7: *Kenngrößen der Belastungen im Rahmen von Ermüdungsuntersuchungen an Beton*

Wie bereits im Kapitel 2.1 an der schematischen Wöhlerlinie in *Abbildung 2.4* gezeigt, sind prinzipiell verschiedene Ermüdungsfestigkeitsbereiche in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe und der resultierenden Lastspielzahl zu unterscheiden. Im Allgemeinen wird in dem Zusammenhang, wie in Kapitel 2.1 vorgestellt, auch zwischen nieder- und hochzyklischer Ermüdung unterschieden. Die Definition für den Übergang zwischen nieder- und hochzyklischem Ermüdungsverhalten ist für den Beton nicht eindeutig, wird aber zumeist in der Literatur mit 10^3 und seltener auch mit 10^4 Lastzyklen angegeben [HSU 1981; HORDIJK 1991;

KÖNIG & DANIELEWICZ 1994; PETRYNA 2004]. Wie in [ANDERS 2007] beschrieben und ebenfalls im Kapitel 2.1 vorgestellt, leiten sich manche der Unterscheidungen weniger aus dem Materialverhalten als vielmehr aus charakteristischen Beanspruchungen ab. Für Betonbauwerke hat [HSU 1981] die in *Abbildung 3.8* wiedergegebene Unterteilung der Ermüdungsfestigkeit in Anlehnung an die Art der Beanspruchung abgeleitet.

Die experimentelle Untersuchung erfolgt in der Regel im niederzyklischen Bereich mit weggeregelten Versuchen, während der hochzyklische Bereich vorrangig mit kraftgeregelten Versuchen untersucht wird.

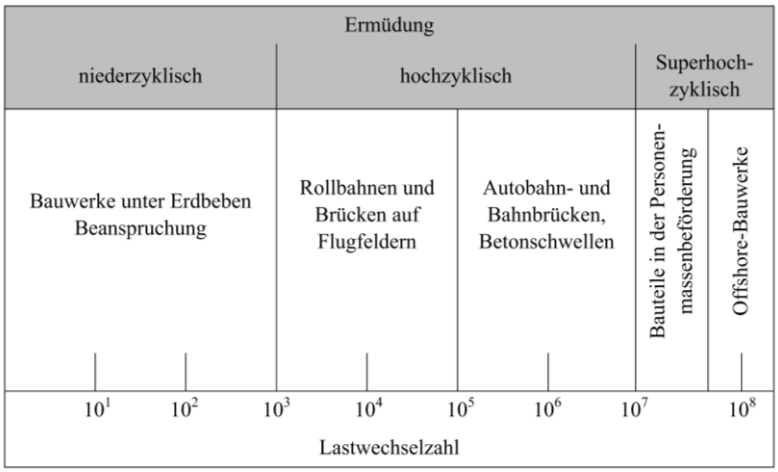

Abbildung 3.8: *Unterteilung der Bereiche der Ermüdungsfestigkeit von Beton nach [HSU 1981] aus [ANDERS 2007]*

Wie schon im Kapitel 2.1 erläutert, ist prinzipiell zwischen Druckschwell-, Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen zu unterscheiden. Schon unter monotonen Beanspruchungen zeigt der Beton ein sehr differenziertes Tragverhalten zwischen Druck- und Zugbeanspruchungen, siehe Kapitel 3.1. Dementsprechend weist der Beton auch unter zyklischen Beanspruchungen Unterschiede in seinem Verhalten in Abhängigkeit vom Beanspruchungsbereich auf, die sich unter anderem auch in verschiedenen Ermüdungsfestigkeiten äußern. Schematisch ist dies anhand von Wöhlerlinien in *Abbildung 3.9* wiedergegeben.

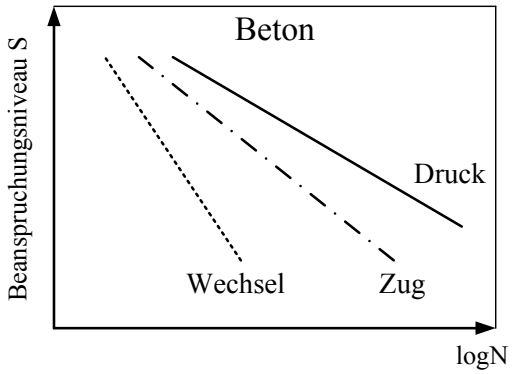

Abbildung 3.9: *Schematische Veranschaulichung der qualitativen Verläufe der Wöhlerkurven für Druckschwell-, Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen in Anlehnung an [WEIGLER & RINGS 1987], [CORNELISSEN & REINHARDT 1984] und [WEFER 2010]*

Die jeweiligen Ermüdungsvorgänge weisen zwar sowohl im Druckschwell-, im Zugschwell- als auch im Wechselbereich sehr ähnliche Charakteristika auf, trotzdem ist im Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit im Druckbereich, die im Zugbereich geringer und die im Wechselbereich sogar noch kleiner. An dieser Stelle zeigt sich ein wesentlicher Unterschied zum Ermüdungsverhalten von Metallen, die derartige Unterschiede in der Ermüdungsfestigkeit zwischen den verschiedenen Beanspruchungsbereichen nicht aufweisen.

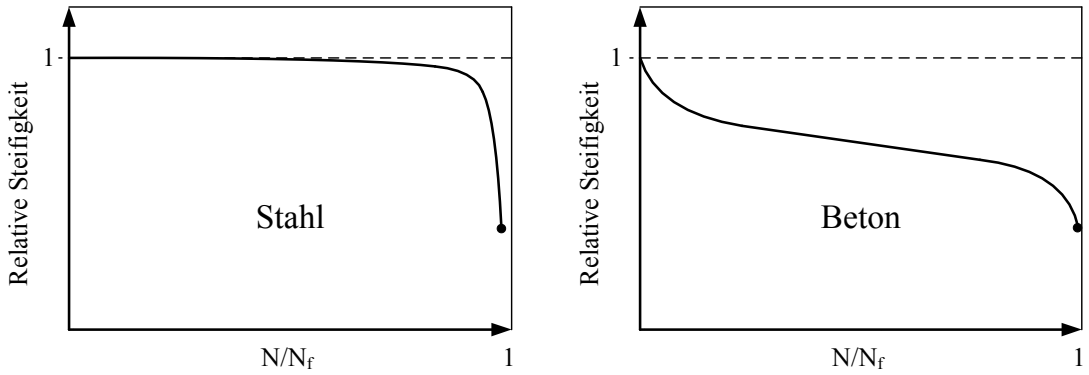

Abbildung 3.10: *Qualitativer Verlauf der Schädigungsentwicklung in Form der relativierten Steifigkeit unter hochzyklischen Beanspruchungen bei Stahl (links) und bei Beton (rechts)*

Nicht nur bei den Ermüdungsfestigkeiten, sondern auch beim Ermüdungsvorgang existieren prinzipielle Unterschiede zwischen Beton und Metallen. Unter Betrachtung der Steifigkeitsentwicklung als Indikator für den Schädigungsverlauf zeigt sich, wie in *Abbildung 3.10 links* schematisch dargestellt, im Falle hochzyklischer Ermüdung anfänglich in Metallen keine messbare Schädigung [LEMAITRE 1992; PEERLINGS 1999]. Diese entwickelt sich erst in der späten Phase der Lebensdauer und nimmt dann aber schlagartig zu. Hingegen beim Beton beginnt bereits von Anfang an ein Schädigungsprozess mit nennenswerten Auswirkungen auf das Materialverhalten. Dieser Vorgang stellt sich prinzipiell, wie in *Abbildung 3.10 rechts* veranschaulicht, als ein 3-phasiger Entwicklungsprozess über die Lebensdauer dar. Im Detail zeigen sich beim Beton nicht nur bei der Ermüdungsfestigkeit, sondern auch beim Ermüdungsvorgang Unterschiede in Abhängigkeit davon, ob es sich um zyklische Druck-, Zug- oder Wechselbeanspruchungen handelt.

Druckschwellbeanspruchungen

Das Verhalten des Betons unter Druckschwellbeanspruchungen besitzt die größte praktische Relevanz, da der Beton bedingt durch seine verhältnismäßig geringe Zugfestigkeit fast ausschließlich für den Lastabtrag von Druckbeanspruchungen eingesetzt wird. Aus diesem Grund befasst sich auch die vorliegende Arbeit mit dem Ermüdungsverhalten unter Druckschwellbeanspruchungen. Der Fokus bei der Sichtung und Zusammenstellung des aktuellen Forschungsstandes im Hinblick auf die Betonermüdung liegt daher vorranging auf den Druckschwellbeanspruchungen, auf die im Kapitel 3.3 und 3.4 genauer eingegangen wird.

Zug- und Biegebeanspruchungen

Trotz der geringeren praktischen Bedeutung ist das Verhalten des Betons unter zyklischen Zugbeanspruchungen ebenfalls von Interesse für die Forschung, da sich der eigentliche Versagensmechanismus von Beton unter Druckbeanspruchungen wiederum auf lokales Zugversagen zurückführen lässt. Der Ermüdungsvorgang im Beton unter Zugbeanspruchungen zeigt

im Prinzip ähnliche Charakteristika wie jener unter Druckbeanspruchung, er ist aber insgesamt von einem deutlich spröderen Verhalten geprägt, ähnlich wie dies unter monotonen Beanspruchungen der Fall ist. Die experimentelle Untersuchung des Ermüdungsverhaltens unter Zugbeanspruchungen ist vor allem auch aufgrund dieses spröden Verhaltens deutlich anspruchsvoller, als sich dies für Druckbeanspruchungen gestaltet. Dabei kann die Untersuchung auf verschiedene Weise durchgeführt werden, und zwar entweder als direkter Zugversuch an reinen Zugproben oder als Biegeversuch an Balken, die in beiden Fällen entweder gekerbt oder ungekerbt sein können. Darüber hinaus lassen sich die Versuche noch in kraft- und weggeregelt unterscheiden.

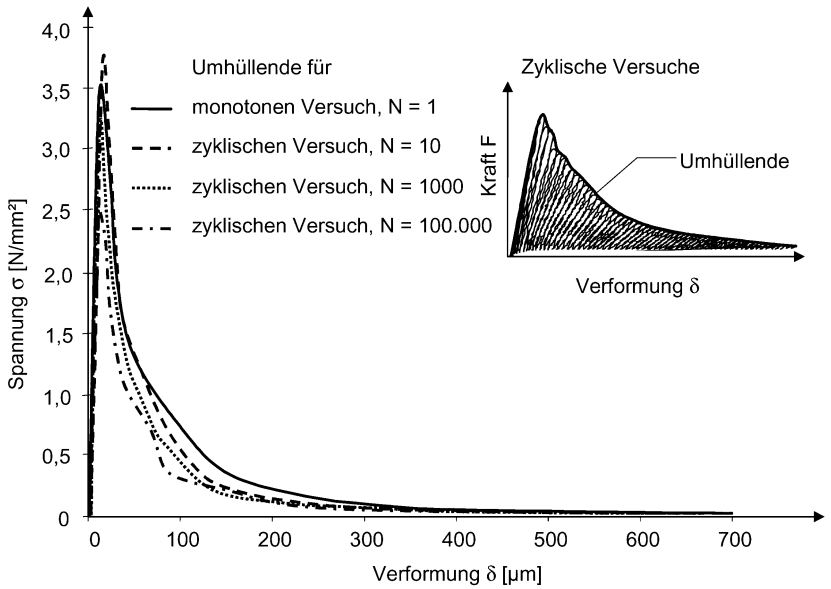

Abbildung 3.11: *Umhüllende der zyklischen Spannungs-Verformungs-Kurven aus weggeregelten einaxialen Zugversuchen mit verschiedenen Lastspielzahlen aus [KESSLER-KRAMER 2002]*

Die kraftgeregelten werden überwiegend für hochzyklische Ermüdungsversuche eingesetzt, aus denen sich die typischen Wöhlerlinien ableiten lassen. Die weggeregelten Versuche hingegen werden vorrangig für niederzyklische Untersuchungen verwendet, die auch als Grundlage für bruchmechanisch basierte Materialmodelle dienen. Typische Ergebnisse für weggeregelte Versuche sind in Form der Einhüllenden der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beispielhaft in *Abbildung 3.11* wiedergegeben. Aus kraftgeregelten hochzyklischen Versuchen entstehen hingegen üblicher Weise, wie in *Abbildung 3.12* dargestellt, Verformungsentwicklungen über die Zyklenzahl. Deren Entwicklung über die Lebensdauer entspricht qualitativ der unter zyklischen Druckbeanspruchungen.

Entsprechende Untersuchungen in Form von reinen Zugversuchen wurden z. B. in [CORNELISSEN & TIMMERS 1981], [SAITO & IMAI 1983], [CORNELISSEN & REINHARDT 1984], [HORDIJK 1991] oder [KESSLER-KRAMER 2002] durchgeführt. Die in den *Abbildung 3.11* und *Abbildung 3.12* gezeigten Ergebnisse aus [KESSLER-KRAMER 2002] geben die Beobachtungen aus einachsigen zyklischen Zugversuchen wieder. Da sich bei Biegeversuchen z. B. die Lasteinleitung weniger problematisch gestaltet als bei einachsigen Zugversuchen, aber auch der Rissfortschritt deutlich besser beobachten lässt, existieren eine Reihe von Arbeiten in denen zyklische Versuche unter Biegung umgesetzt wurden. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von [OH 1991A], [OH 1991B], [DUDA 1991], [TOUMI, BASCOUL ET AL. 1998] und

[KESSLER-KRAMER 2002] genannt. In [ZHANG, PHILLIPS ET AL. 1996] wurde unter Biegung auch der Einfluss der Belastungsfrequenz untersucht. Die meisten der genannten Arbeiten beinhalten auch entsprechende Wöhlerlinien für Beton unter Zugbeanspruchungen.

Der wesentliche Unterschied zum Ermüdungsvorgang unter Druckbeanspruchungen liegt in der stark lokalisierten Schädigung, die sich meist in einem einzelnen Trennriss konzentriert. Dieses Verhalten kann bereits unter monotoner Zugbeanspruchung festgestellt werden. Infolgedessen zeigt sich ein sehr sprödes Ermüdungsversagen, das durch sehr geringe plastische Verformungen gekennzeichnet ist und zudem einen wenig ausgeprägten Nachbruchbereich aufweist.

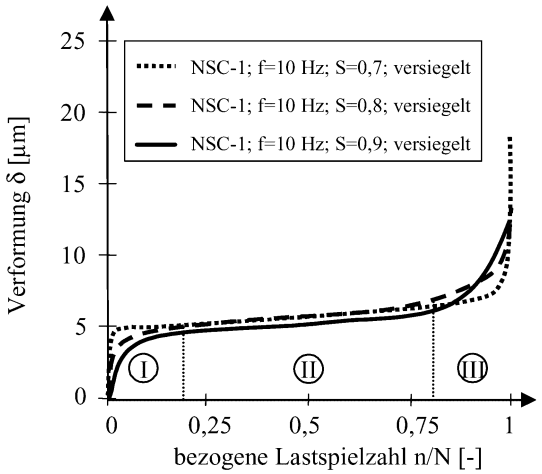

Abbildung 3.12: *3-phasige mittlere Rissentwicklungen aus kraftgeregelten einaxialen zyklischen Zugversuchen für verschiedene Belastungsgrade aus [KESSLER-KRAMER 2002]*

Da das Ermüdungsversagen in der Regel durch einen einzelnen Trennriss hervorgerufen wird, unterliegt die Ermüdungsfestigkeit unter Zugbeanspruchungen infolge der sehr heterogenen Gefügestruktur des Betons auch größeren Streuungen, als dies unter Druckbeanspruchungen der Fall ist.

Wechselbeanspruchungen

Für die zyklische Wechselbeanspruchung von Beton liegen im Vergleich zu den beiden anderen Beanspruchungsarten die wenigsten Untersuchungen vor. Dies liegt sicher zum einen an der geringeren praktischen Relevanz, aber auch an der anspruchsvollen Durchführung derartiger Versuche. Verschiedene Autoren haben in ihren Untersuchungen festgestellt, dass bei einem Auftreten eines Vorzeichenwechsels im Rahmen einer zyklischen Beanspruchung die Ermüdungsfestigkeit des Betons deutlich abnimmt [CORNELISSEN & TIMMERS 1981; CORNELISSEN & REINHARDT 1984; WEIGLER & RINGS 1987].

So zeigen auch Zugversuche im Wechselbereich geringere Lastspielzahlen als reine Zugschwellversuche. In Abhängigkeit von der Höhe der jeweiligen Druck- und Zugbeanspruchung bzw. auch deren Verhältnis zueinander, stellt sich am Ende der Lebensdauer entweder ein Druck- oder ein Zugversagen der Probe ein. Für ein Verhältnis von $S_Z/S_D \geq 0{,}2$ wird in [WEIGLER & RINGS 1987] ein Übergang vom Druck- zum Zugversagen bestimmt. Weiterhin stellen sie in ihren Untersuchungen fest, dass im Vergleich zu Druckschwellbeanspruchungen der Verlauf der Wöhlerlinie bereits durch geringe Zugbeanspruchungen signifikant beeinflusst wird. Dabei zeigt sich für den Fall einer konstanten Zugbeanspruchung und unterschreiten

einer bestimmten Höhe der Druckbeanspruchung ein deutlicher Knick im Verlauf der Wöhlerlinie. Ab einer Bruchschwingzahl von $N \geq 10^5$ wird diesbezüglich in [WEIGLER & RINGS 1987] eine deutliche Abnahme der Ermüdungsfestigkeit beobachtet.

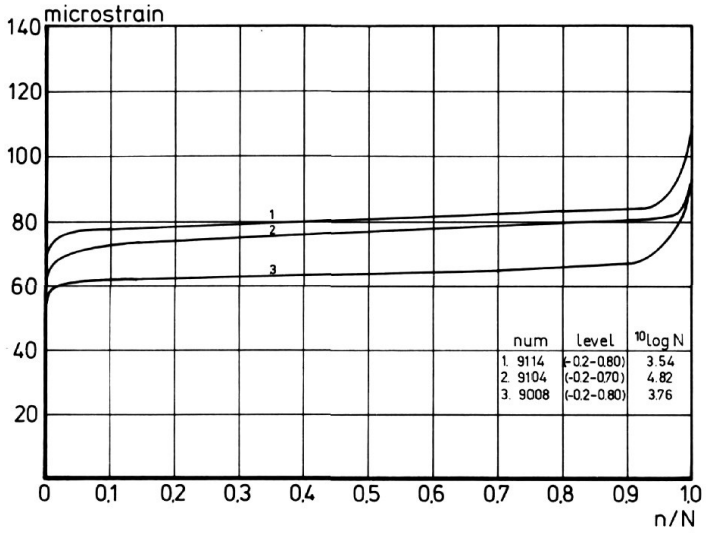

Abbildung 3.13: *3-phasige Dehnungsentwicklung von einaxialen zyklischen kraftgeregelten Zug-Druck-Versuchen aus [CORNELISSEN & TIMMERS 1981]*

Auch unter Wechselbeanspruchungen können die typischen 3-phasigen Entwicklungen festgestellt werden, wie die Ergebnisse aus [CORNELISSEN & TIMMERS 1981] in *Abbildung 3.13* zeigen. Eine Abhängigkeit des Verlaufes am Ende der Lebensdauer von der eintretenden Versagensart wird in [WEIGLER & RINGS 1987] beschrieben. Dort wurde für den Fall des Druckversagens die in *Abbildung 3.13* dargestellte Zunahme der Verformungsentwicklung in der dritten Phase der Lebensdauer beobachtet. Im Falle des Zugversagens hingegen stellte sich stattdessen eine Abnahme in der Verformungsentwicklung ein. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von UHPC finden sich z. B. in [FITIK 2012].

3.3 Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchungen

3.3.1 Die Ermüdungsfestigkeit

Eine der wichtigsten Eigenschaften beim Ermüdungsverhalten des Betons ist die Ermüdungsfestigkeit, die zumeist als Wöhlerkurve dargestellt wird. Eine typische Darstellung von Wöhlerlinien für verschiedene Beanspruchungsniveaus findet sich in *Abbildung 3.14 links*. Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeiten von Betonen ist der Schwerpunkt in der Mehrzahl der Untersuchungen, die zur Ermüdung von Beton durchgeführt wurden. Wie schon im Kapitel 3.2.2 erwähnt, gehen die ersten Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Beton unter Druckschwellbeanspruchungen auf den Anfang des 19. Jahrhunderts zurück. Diese begründeten sich auf den bereits zuvor durchgeführten Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von metallischen Werkstoffen (August Wöhler). Die lange Geschichte sowie der große Umfang an Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit liegen in mehreren Ursachen begründet. Zum einen ist dies eine Folge der immensen praktischen Relevanz dieser Größe für die Bemessung und

dem zugleich relativ hohen Aufwand, der für deren Bestimmung notwendig ist. Aber auch die stetige Weiterentwicklung der Betone macht immer wieder eine Ermittlung neuer Wöhlerlinien für derartige Betone erforderlich, wie zum Beispiel UHPC [WEFER 2010].

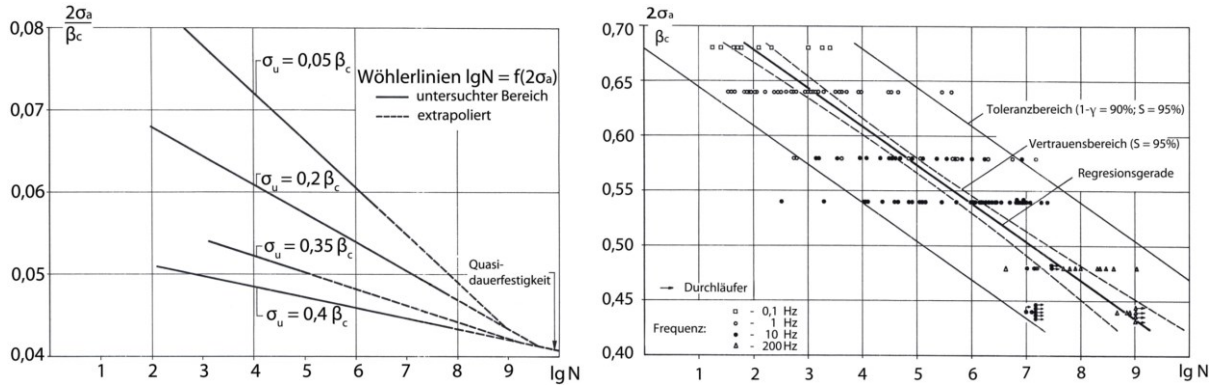

Abbildung 3.14: *Wöhlerlinien für verschiedene Unterspannungen mit extrapolierten Bereichen (links) und Einzelergebnisse für Ermüdungsfestigkeiten mit Streubereich und Regressionsgerade (rechts) aus [KLAUSEN 1978]*

Im Vergleich zu den metallischen Werkstoffen sind die Ermüdungsfestigkeiten von Betonen sehr großen Streuungen unterworfen. Während bei Stahl der Toleranzbereich zwischen dem 5 % und dem 95 % Quantilwert der Bruchlastspielzahl üblicherweise in der Größenordnung von ca. $\Delta N = 10^1$ liegt, wird für den Beton in der Literatur eine Größenordnung von ca. $\Delta N = 10^3$ bis 10^4 angegeben [KLAUSEN 1978; MÜLLER, KEINTZEL ET AL. 1983; KÖNIG & DANIELEWICZ 1994]. In der *Abbildung 3.14 rechts* sind beispielhaft die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen aus [KLAUSEN 1978] mit ihren Streubereichen dargestellt. Aufgrund dieser Tatsache erfordern Ermüdungsversuche an Beton zur Ermüdungsfestigkeit eine entsprechend hohe Anzahl an Versuchen, um eine statistisch auswertbare Basis zu schaffen. Die Ursache für diese großen Streuungen wird von mehreren Autoren auf die Streuung der statischen Druckfestigkeit als Bezugswert zurückgeführt [WEIGLER & FREITAG 1975; PETKOVIC & ROSSELAND 1992; KÖNIG & DANIELEWICZ 1994; WEFER 2010]. Berücksichtigt man die bekannte Streubreite der statischen Druckfestigkeit in Zusammenhang mit der logarithmischen Beziehung zwischen Beanspruchungsniveau und resultierender Bruchlastspielzahl, kann damit der große Toleranzbereich bei den Ermüdungsfestigkeiten erklärt werden. Eine Abhängigkeit der Größe der Streuungen von der Höhe des Beanspruchungsniveaus hat [OH 1991B] im Rahmen von Biegeversuchen festgestellt. Dabei ergaben sich für niedrigere Lastniveaus mit entsprechend höheren Bruchlastspielzahlen größere Streuungen.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Arbeiten mit Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Beton, von denen hier nur einige ausgewählte Arbeiten beispielhaft genannt seien. Mit normalfesten Betonen haben sich [GAEDE 1962], [TEPFERS, FRIDEN ET AL. 1977], [KLAUSEN 1978], [TEPFERS & KUTTI 1979], [HOLMEN 1979], [DYDUCH, SZERSZEŃ ET AL. 1994] und [KIM & KIM 1996] befasst. Eine umfangreiche Zusammenstellung von Versuchsergebnissen ist in [HSU 1981] zu finden. [WEIGLER & FREITAG 1975] haben Leichtbetone untersucht und dabei den zuvor beschriebenen Zusammenhang zwischen den Streuungen der statischen Druckfestigkeiten und den Ermüdungsfestigkeiten festgestellt. Für hochfeste Betone sind entsprechende Untersuchungen in [PETKOVIC & ROSSELAND 1992], [KIM & KIM 1996] sowie [TUE & MUCHA 2006] enthalten und für ultrahochfeste Betone in [FEHLING, SCHMIDT ET AL. 2005], [WEFER 2010] bzw. [LOHAUS, WEFER ET AL. 2011].

In den Untersuchungen von [KIM & KIM 1996] wurde zudem auch eine Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der statischen Druckfestigkeit der Proben beobachtet. Mit zunehmender Druckfestigkeit zeigte sich dort eine abnehmende Ermüdungsfestigkeit in den Versuchen.

Die Existenz einer Quasidauerschwingfestigkeit konnte für Beton bisher experimentell nicht nachgewiesen werden. Nach [HOHBERG 2004] besteht an ihrer Existenz theoretisch kein Zweifel. Die Ergebnisse aus einigen Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit geben zumindest den Hinweis auf eine Existenz. Wie z. B. die Wöhlerlinien in *Abbildung 3.14 links* aus [KLAUSEN 1978] zeigen, würden sich die extrapolierten Regressionsgeraden irgendwann schneiden, was physikalisch unrealistisch wäre. Daher nimmt Klausen zum einen ein Abflachen der Geraden im Bereich des Schnittpunktes an und schließt dann auf eine Quasidauerfestigkeit im Bereich zwischen 10^{10} und 10^{11} Lastzyklen. Auch [WEIGLER & FREITAG 1975] nehmen basierend auf ihren Versuchsergebnissen eine Quasidauerschwingfestigkeit bei ca. 10^{10} Lastzyklen an.

3.3.2 Der Ermüdungsvorgang

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, stand bei der überwiegenden Mehrzahl der existierenden Untersuchungen zur Ermüdung von Beton die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit im Vordergrund. Jedoch findet bereits vor dem Ermüdungsversagen während der gesamten Lebensdauer ein ermüdungsbedingter Schädigungsprozess statt, der eine Degradation von Materialeigenschaften zur Folge hat. Ein Überblick über die wesentlichen bisher bekannten Erkenntnisse aus der Literatur zu diesem Ermüdungsvorgang wird nachfolgend gegeben.

3.3.2.1 Niederzyklisches Verhalten (makroskopisch)

Die Untersuchung des niederzyklischen Ermüdungsvorgangs ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden, da nur geringe Lastzyklenzahlen und sehr kurze Versuchszeiten entstehen. Derartige Untersuchungen finden oft vor dem Hintergrund von Erdbebenbeanspruchungen statt, die durch geringe Lastzyklenzahlen und hohe Beanspruchungen gekennzeichnet sind. Vorwiegend werden solche Versuche verformungsgesteuert durchgeführt, wobei typischer Weise die in *Abbildung 3.15* dargestellten Hysteresekurven erzeugt werden.

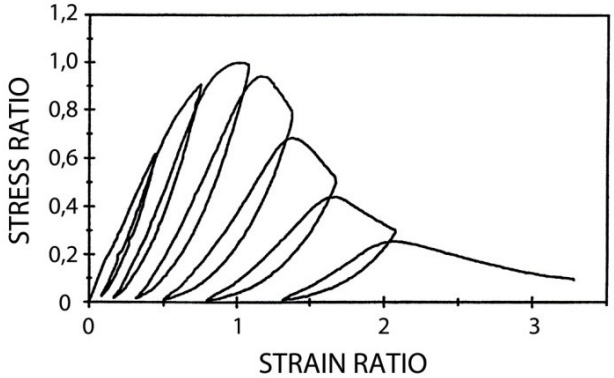

Abbildung 3.15: *Typische Hysteresekurven aus einem weggeregelten niederzyklischen Druckversuch aus [BAHN & HSU 1998]*

In vielen der existierenden Untersuchungen hat es sich ergeben, dass sich die zyklischen Be- und Entlastungskurven innerhalb der zugehörigen monotonen Arbeitslinie bewegen. Aus diesem Grund wird sie in diesem Zusammenhang auch als Einhüllende (Envelope) bezeichnet. Das auf diesem Phänomen basierende Envelope-Konzept ist Grundlage für viele Ansätze zur Modellierung des Materialverhaltens speziell unter niederzyklischen Beanspruchungen.

Versuchsergebnisse zu niederzyklischen weggeregelten Versuchen finden sich z. B. in [SPOONER & DOUGILL 1975] oder [BAHN & HSU 1998]. Sie weisen mit zunehmender Lastzyklenzahl eine fortschreitende Reduzierung der Betonsteifigkeit auf, siehe *Abbildung 3.15*. In den Versuchen von [SPOONER & DOUGILL 1975] wurde zusätzlich auch eine Messung von Schallemissionen durchgeführt. Eine detailliertere Erläuterung zur Schallemissionsmessung selbst findet sich im Kapitel 4.3.2. Mit ihrer Hilfe haben Spooner & Dougill die eingetragenen Energien sowie den zugehörigen Schädigungszuwachs untersucht und daraus geschlussfolgert, dass ein Schädigungszuwachs unter zyklischer Beanspruchung nur mit fortschreitender Steigerung der Gesamtverformung erzeugt wird. Diese Feststellung wird zur Grundlage für spätere Arbeiten anderer Autoren.

Neben den verformungsgesteuerten Versuchen wurden auch kraftgeregelte Versuche durchgeführt, in denen ein relativ hohes Lastniveau gefahren wird, um ein zügiges Versagen der Probe zu erreichen [AWAD & HILSDORF 1971; SCHWABACH 2005]. Ein wesentliches Ergebnis aus derartigen Versuchen ist, dass das in den verformungsgesteuerten Versuchen beobachtete Phänomen von der monotonen Arbeitslinie als Einhüllende nicht untermauert werden kann. Die kraftgeregelten Versuche lieferten zum Teil Verformungen, die beim Erreichen der Ermüdungsfestigkeit bereits außerhalb der Einhüllenden lagen. Entsprechende Beobachtungen machten z. B. [AWAD & HILSDORF 1971] in ihren Untersuchungen, die auch zugleich feststellten, dass die Einhüllende selbst als verwertbare Bezugsgröße nicht eindeutig ist. Dabei zeigte sich, dass der Verlauf der monotonen Arbeitslinie sowohl von der Belastungsrate als auch vom Alter des Betons entscheidend abhängt. Das Envelope-Konzept scheint daher keine uneingeschränkte Gültigkeit zu besitzen.

3.3.2.2 Hochzyklisches Verhalten (makroskopisch)

Das hochzyklische Ermüdungsverhalten wird in der Regel, wie auch die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit, mit Hilfe von kraftgeregelten Versuchen untersucht. Zum Teil sind die Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten des Betons das Ergebnis von begleitenden Untersuchungen an Versuchen zur Ermittlung von Wöhlerlinien.

Verformungen

Unter hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen zeigt sich im Beton eine typische 3-phasige Entwicklung in den in Belastungsrichtung auftretenden Verformungen, ähnlich wie dies auch für hochzyklische Zugschwell- und zum Teil auch für Wechselbeanspruchungen festzustellen ist (siehe Kapitel 3.2.2). Diese Entwicklung findet sich in den Ergebnissen einer Reihe von Untersuchungen zu Druckschwellbeanspruchungen, wie z. B. [GAEDE 1962], [KLAUSEN 1978], [HOLMEN 1979], [DYDUCH, SZERSZEŃ ET AL. 1994], [KIM & KIM 1996], [GAO & HSU 1998], [HOHBERG 2004], [TUE & MUCHA 2006] oder [IBUK 2008], und ist beispielhaft in *Abbildung 3.16 links* wiedergegeben. Für die Ausprägung der drei charakteristischen Phasen werden in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben. Für den Übergang von Phase I zu Phase II finden sich Werte zwischen 5 % und 20 % der Lebensdauer, und für den Übergang von Phase II zu Phase III sind es Werte zwischen 80 % und 95 % [HOLMEN 1979; KIM & KIM 1996; HOHBERG 2004; TUE & MUCHA 2006; WEFER 2010].

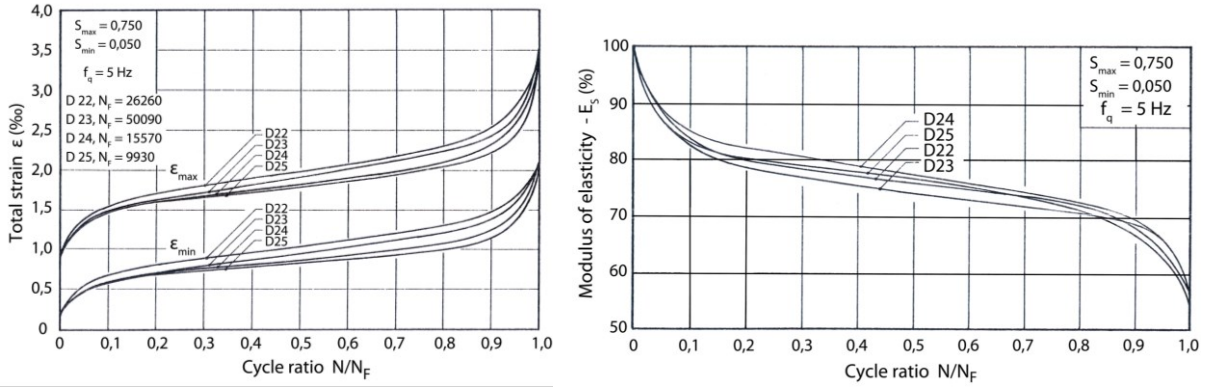

Abbildung 3.16: *3-phasige Entwicklung der Dehnungen (links) und Reduzierung der Sekantensteifigkeit (rechts) bei Ermüdungsversuchen im Druckschwellbereich aus [HOLMEN 1979]*

Prinzipiell wurde in diesem Zusammenhang festgestellt, dass die Ausprägung der Phasen abhängig ist von der Festigkeit des Betons. Normalfeste Betone zeigen eine größere Ausprägung der Phase I und III, während höher feste Betone eine geringere Ausprägung aufweisen [KIM & KIM 1996; WEFER 2010]. Darüber hinaus stellen [KIM & KIM 1996] und [PETKOVIC & ROSSELAND 1992] fest, dass die reine Ermüdungsdehnung, also die relative Dehnungszunahme unter S_{max}, bei höheren Betonfestigkeiten beim Versagen geringer ausfällt als bei geringeren Betonfestigkeiten. Sie schließen daraus, dass bei höher festen Betonen die Schädigung stärker lokalisiert ist.

Steifigkeiten

Mit Hilfe der Spannungs-Dehnungs-Beziehung wurde in einigen Untersuchungen auch die Entwicklung der Probensteifigkeiten erfasst, zumeist als Sekantenmodul [HOLMEN 1979; PETKOVIC & ROSSELAND 1992; GAO & HSU 1998; HOHBERG 2004; IBUK 2008]. Dieser zeigt eine fortschreitende Degradation der Probensteifigkeit, die sich in ähnlicher Weise wie die Verformungen in einer 3-phasigen Form äußert und beispielhaft in *Abbildung 3.16 rechts* wiedergegeben ist. Allerdings bestimmen die verschiedenen Autoren den Sekantenmodul in der Regel, meist versuchsbedingt, zwischen unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse häufig nicht möglich ist. Der Anstieg in der stabilen Phase II der Entwicklung der Betonsteifigkeit wird von einigen Autoren auch zur Abschätzung der resultierenden Bruchlastspielzahl herangezogen [HOHBERG 2004].

Spannungs-Dehnungs-Beziehung

In einer sehr begrenzten Anzahl von Untersuchungen wurde mit Hilfe von Hysteresen, die vereinzelt im Laufe der Ermüdungsversuche abgefahren wurden, zusätzlich die Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung erfasst. Relativ umfangreiche Untersuchungen wurden diesbezüglich in [MEHMEL & KERN 1962] durchgeführt. Dabei haben [MEHMEL & KERN 1962] sowie auch [JINAWATH 1974] festgestellt, dass sich die Spannungs-Dehnungs-Beziehung fortlaufend verändert. Während dieses Veränderungsprozesses kommt es auch zu einer Krümmungsumkehr in der Spannungs-Dehnungs-Linie des Belastungsprozesses. Ein entsprechendes Ergebnis aus [MEHMEL & KERN 1962], das diese Phänomene verdeutlicht, ist in *Abbildung 3.17* dargestellt. Ein Resultat aus dieser Entwicklung ist schließlich die bereits beschriebene Veränderung der Probensteifigkeit. Zur Erklärung bzw. zur Ursache dieses Verhaltens, insbesondere der Krümmungsumkehr, wurde von Mehmel & Kern eine entsprechende Modellvorstellung entwickelt, auf die im nachfolgenden Kapitel 3.3.2.3 noch einge-

gangen wird. Das Phänomen der Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung über die Ermüdungslebensdauer und speziell deren Ursache ist generell bisher kaum untersucht und ergründet. Das gilt in besonderem Maße für hochzyklische Ermüdungsbeanspruchungen.

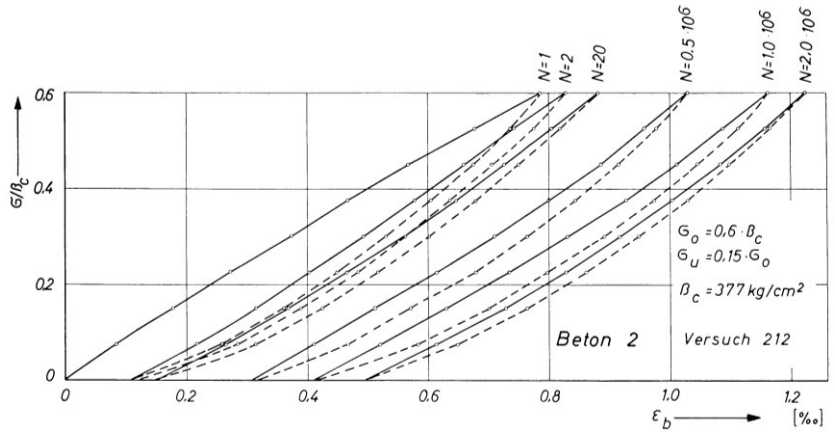

Abbildung 3.17: *Fortlaufende Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung infolge von Ermüdungsbeanspruchungen im Druckschwellbereich aus [MEHMEL & KERN 1962]*

Festigkeiten

Die statische Druckfestigkeit des Betons hat einerseits einen Einfluss auf das resultierende Verhalten unter Ermüdungsbeanspruchungen. Andererseits wird sie selbst während des Ermüdungsvorgangs beeinflusst. Wie bereits bei den Verläufen der Verformungen festgestellt, führt eine höhere statische Festigkeit des Betons zu einer Verlängerung der stabilen Phase II, was sich neben den Verformungen auch in den Entwicklungen der anderen Materialeigenschaften zeigt. Insgesamt verhält sich der höherfeste Beton auch unter Ermüdungsbeanspruchungen spröder [KIM & KIM 1996; WEFER 2010].

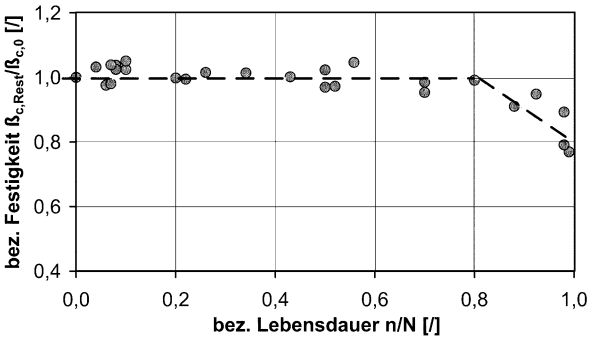

Abbildung 3.18: *Entwicklung der statischen Restdruckfestigkeit über die Ermüdungslebensdauer aus [HOHBERG 2004]*

Darüber hinaus wird während des Ermüdungsvorgangs in gewissem Maße auch die statische Restdruckfestigkeit beeinflusst. [HOHBERG 2004] und [MEHMEL & KERN 1962] stellen in ihren Untersuchungen jedoch fest, dass die Restdruckfestigkeit nicht in gleicher Weise wie die anderen Materialeigenschaften einem von Beginn an fortlaufenden Veränderungsprozess unterworfen ist. Die *Abbildung 3.18* zeigt die von Hohberg ermittelte Entwicklung der Restdruckfestigkeit. Über den längsten Zeitraum der Lebensdauer wird diese nicht beeinflusst, erst

kurz vor dem Ermüdungsversagen erfolgt eine Reduzierung der Restdruckfestigkeit. Daher stellt Hohberg fest, dass diese Größe nicht als Indikator für den Schädigungszustand geeignet ist. [MEHMEL & KERN 1962] beobachten sogar nach 2 Mio. Lastzyklen in einem Zustand ohne erkennbare Schädigungen eine Steigerung der Restdruckfestigkeit um bis zu 10 %.

ZfP-Methoden

Neben den bisher beschriebenen Methoden zur Beobachtung des Ermüdungsvorgangs kamen in einigen Untersuchungen auch andere zerstörungsfreie Messtechniken zum Einsatz.

Dazu gehört z. B. die Messung von Schallemissionsereignissen, auf deren Prinzip in Kapitel 4.3.2 noch näher eingegangen bzw. auch auf [GROßE 1996] verwiesen wird. Die gemessenen Schallemissionen geben einen direkten Hinweis auf die Aktivität in der Rissentwicklung. Zur Untersuchung der Ermüdung von Beton, speziell im hochzyklischen Bereich, ist diese Technik bisher selten angewandt worden. Erschwert wird der Einsatz vor allem durch die bei zyklischen Versuchen entstehenden Störgeräusche aus dem gesamten Prüfstand. Niederzyklische Druckversuche wurden von [SPOONER & DOUGILL] untersucht, Messungen an kraftgeregelten Biegebalken sind mit Ortung in [FINCK 2005] durchgeführt worden und niederzyklische Zugversuche hat [KESSLER-KRAMER 2002] begleitend gemessen. Letzterer führt die Schallemissionsaktivität nicht nur auf die Neubildung und das Wachstum, sondern auch auf Reibungseffekte aus Rissen zurück. Erste Untersuchungen an Beton unter hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen sind von [KLAUSEN 1978] vorgenommen worden. Er hatte allerdings nur einen Sensor mit dem er die Impulssumme ermittelt hat, die er zugleich als Schädigungsgröße definiert hat. Die *Abbildung 3.19* zeigt die so ermittelten Entwicklungen der Summenkurven, die ähnlich wie bei den Dehnungen und Steifigkeiten beobachtet, einen 3-phasigen Verlauf aufweisen.

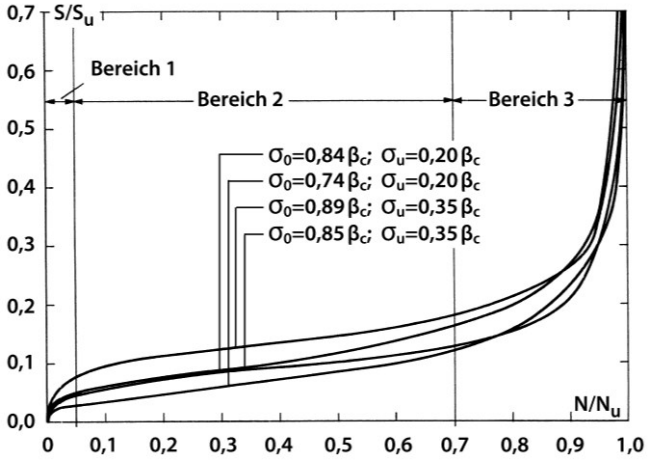

Abbildung 3.19: *Impulssummenkurven aus der Schallemissionsmessung an hochzyklischen Ermüdungsversuchen mit verschiedenen Beanspruchungsniveaus aus [KLAUSEN 1978]*

Auch die Messung von Ultraschalllaufzeiten ist in vereinzelten Arbeiten zur Anwendung gekommen [SHAH & CHANDRA 1970; HOHBERG 2004; IBUK 2008]. Auf das Prinzip der Messmethode wird ebenfalls in Kapitel 4.3.2 näher eingegangen sowie auch auf [GROßE 1996] verwiesen. In den wenigen vorhandenen Untersuchungen wurde die Messung der Ultraschalllaufzeiten vorrangig zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls eingesetzt [HOHBERG 2004; IBUK 2008]. Diesbezüglich finden sich jedoch nur eingeschränkt und lü-

ckenhafte Ergebnisse, die allerdings auf eine ähnliche Degradation hinweisen, wie sie auch beim statischen E-Modul beobachtet wurde. Eine systematische Untersuchung hat in diesem Zusammenhang aber bisher kaum stattgefunden. Die bisherigen Messungen fanden meist nur auf einem Beanspruchungsniveau statt, waren nur orthogonal zur Belastungsrichtung und von geringer Auflösung über die Lebensdauer.

Ein spezieller Fall der Ultraschallmessung ist die Coda Wellen Interferometrie, die bisher bei Beton nur für statische und niederzyklische Beanspruchungen eingesetzt wurde [NIEDERLEITHINGER, SHOKOUHI ET AL. 2011; SCHURR, KIM ET AL. 2011]. Hierbei wird mit speziellen Methoden der mehrfach im Material reflektierte Teil des Ultraschallsignals ausgewertet. Verwertbare Ergebnisse für Ermüdungsbeanspruchungen an Beton konnten nicht gefunden werden.

Schädigung/Energien

Für die ermüdungsbedingte Schädigung im Beton gibt es unterschiedliche und bisher keine einheitliche Definition. Einige Autoren verknüpfen die Schädigung mit den auftretenden Dehnungen [HOLMEN 1979; KIM & KIM 1996], einige mit der Veränderung der Steifigkeit [GAO & HSU 1998], einige mit den entstehenden Schallemissionen [SPOONER & DOUGILL 1975; KLAUSEN 1978], einige mit der Veränderung der Ultraschalllaufzeit [BREITENBÜCHER, IBUK ET AL. 2007] und andere mit den Energieeinträgen [SCHWABACH 2005]. Da der eigentliche Schädigungsvorgang im Beton bis heute noch weitgehend ungeklärt ist, ist auch nach wie vor offen, was Ermüdungsschädigung bzw. Schädigung im Beton eigentlich genau darstellt. Deshalb fehlt eine einheitliche, begründete und belastbare Definition für die Schädigung im Beton, speziell unter Ermüdungsbeanspruchungen.

3.3.2.3 Meso-/Mikroskopisches Verhalten

Bei der Betrachtung des Betons im Hinblick auf sein Materialverhalten und die zugehörigen Vorgänge innerhalb des Materials ist es zweckmäßig, eine Unterteilung in verschiedene Betrachtungsebenen vorzunehmen. Für Beton hat sich eine Aufteilung in drei Betrachtungsebenen bewährt, wie sie z. B. in [WITTMANN 1983] vorgeschlagen wird. In Anlehnung an [HOHBERG 2004] kann die Unterteilung wie folgt beschrieben werden:

- **Makro-Ebene**: Der Beton wird global als homogenes Einstoffsystem betrachtet.
- **Meso-Ebene**: Der heterogene Beton wird als Mehrkomponentensystem bestehend aus Zuschlag, Zementstein bzw. Zementmörtel, Poren und nicht gebundenem Wasser – mit Verbundeigenschaften zwischen Korn und Matrix sowie Mikro- und Makrorissen betrachtet.
- **Mikro-Ebene**: Sie umfasst die Objekte des Zementsteins von molekularer Größenordnung und die dabei ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse, wie Hydratation, Wärmeentwicklung und den Einfluss auf den Gehalt an nicht gebundenem Wasser.

Bei den in den beiden vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Erkenntnissen und Verhaltensweisen handelt es sich um Ergebnisse aus der Betrachtung des Betons auf der Makro-Ebene. Der Erkenntnisstand zum Verhalten auf der Meso- und der Mikro-Ebene wird in diesem Kapitel kurz vorgestellt. Dieser ist im Vergleich zur Makro-Ebene, speziell unter Ermüdungsbeanspruchung, sehr begrenzt. Es stehen diesbezüglich nur wenige Untersuchungsergebnisse zur Verfügung, was vor allem auch in dem erheblichen experimentellen Aufwand für derartige Untersuchungen begründet liegt.

Nach [KESSLER-KRAMER 2002] bzw. [FITIK 2012] stehen bezüglich der Rissentwicklung im Normalbeton unter zyklischer Beanspruchung im Wesentlichen zwei Hypothesen für die ursächlichen strukturellen Mechanismen des Betonversagens zur Verfügung. In der Ersten wird von einer fortschreitenden Auflösung des Verbundes zwischen den größeren Zuschlagskörnern und der Zementmörtelmatrix als Ursache für das Ermüdungsversagen ausgegangen. Die zweite Hypothese geht von einem Wachstum der bereits vor der Belastung im Beton existierenden Mikrorisse in der Matrix als Versagensursache aus. Nach [KESSLER-KRAMER 2002] bzw. [FITIK 2012] ist anzunehmen, dass beide Mechanismen unter Ermüdungsbeanspruchungen in Normalbeton auftreten und sich überlagern.

Lusche entwickelt auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen an zweidimensionalen Betonmodellen in [LUSCHE 1972] ein Modell für die Spannungsverteilung in Beton unter äußerer statischer Druckbeanspruchung. Es basiert auf einem Zweistoffsystem und berücksichtigt keine belastungsabhängige Mikrorissbildung. Das Ergebniss seiner Experimente sowie das daraus abgeleitete Modell für den Lastabtrag im Materialgefüge sind in *Abbildung 3.20* wiedergegeben. Es zeigt, wie sich infolge der steiferen Zuschläge die Spannungen zwischen den Zuschlagskörnern konzentrieren. Das hat zur Folge, dass sich infolge einer äußeren Druckbeanspruchung aufgrund der heterogenen Gefügestruktur sowohl Druck- als auch Zugspannungen im Materialgefüge ausbilden. Da die Zugfestigkeit des Betons wesentlich geringer ist als seine Druckfestigkeit, wird letztlich auch seine Tragfähigkeit auf Druckbeanspruchungen durch seine Zugtragfähigkeit bestimmt. Prinzipiell ähnliche Versuche an echten Modellbetonen wurden in [WILHELM 2006] mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation durchgeführt. Dabei wurde das zweidimensionale Verformungsfeld gemessen, das von starken lokalen Dehnungskonzentrationen geprägt ist, die in erster Linie aus inelastischen Prozessen resultieren. Unter niederzyklischen Druckschwellbeanspruchungen stellt [WILHELM 2006] fest, dass bei der Degradation des Betons das Verbundverhalten zwischen Zuschlag und Zementstein eine maßgebende Rolle spielt.

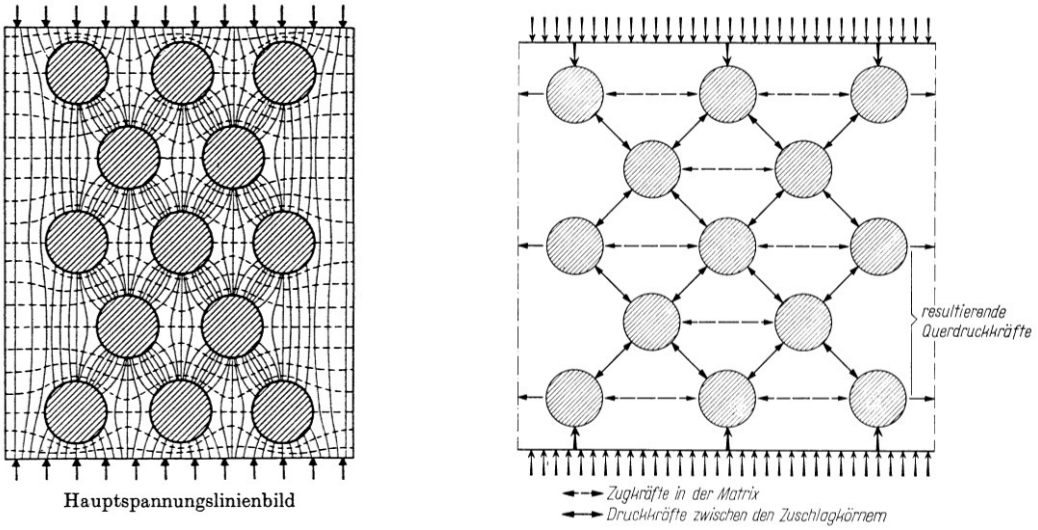

Abbildung 3.20: *Verteilung der Hauptspannungen nach den Modellversuchen von Lusche (links) sowie daraus abgeleiteter Kräfteverlauf im Betongefüge (rechts) aus [LUSCHE 1972]*

Die in [MEHMEL & KERN 1962] beschriebene Modellvorstellung über die Veränderungen im Betongefüge unter zyklischen Beanspruchungen wird in Teilen durch die Beobachtungen von [WILHELM 2006] bestätigt. Zur Erklärung der experimentell beobachteten Veränderungen der

Spannungs-Dehnungs-Beziehung gehen [MEHMEL & KERN 1962] von dem in *Abbildung 3.21* dargestellten vereinfachten Materialmodell aus. Sie gehen davon aus, dass es sich beim Zementstein um eine hoch viskose Phase handelt, während der Zuschlag eine feste Phase darstellt. Mit fortschreitender Ermüdungsbeanspruchung werden in Belastungsrichtung vorrangig zwischen Zuschlagskörnern hohe viskose Verformungen im Zementstein hervorgerufen.

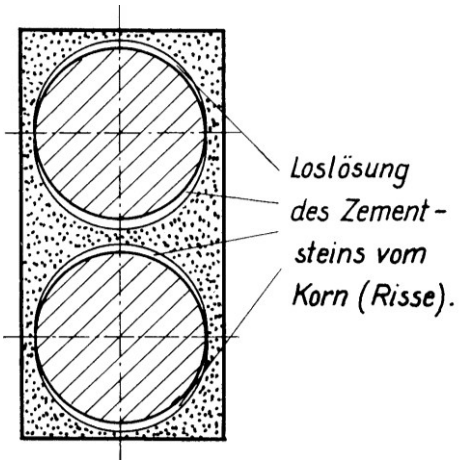

Abbildung 3.21: *Modellvorstellung zur ermüdungsbedingten Schädigung im Beton und der daraus resultierenden Krümmungsumkehr der Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus [MEHMEL & KERN 1962]*

Sind diese groß genug, führt eine Entlastung des Materials zu einer Ablösung des Zementsteins in Belastungsrichtung ober- und unterhalb der Zuschlagkörner. Diese starken lokalisierten viskosen Verformungen sowie die Ablösungen an den Zuschlagskörnern sollen schließlich die wesentliche Ursache für die beobachtete Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung und deren Krümmungsumkehr sein. Experimente in [MEHMEL & KERN 1962] an reinem Zementstein haben zumindest gezeigt, dass dieser keine Krümmungsumkehr aufweist. Darüber hinaus ist die Existenz dieser Vorgänge im Gefüge jedoch bisher kaum direkt experimentell nachgewiesen.

Neben den Modelluntersuchungen von [LUSCHE 1972] und [WILHELM 2006] sowie den Ergebnissen von [MEHMEL & KERN 1962] stehen besonders für Ermüdungsbeanspruchungen nur wenige Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zu den Vorgängen auf der Meso- und Mikro-Ebene in Beton zur Verfügung. Eine Betrachtung der eingetragenen Mikrorisse mit Hilfe der Mikroskopie wurde infolge statischer Beanspruchungen in [KUSTERMANN 2005] und infolge von Ermüdungsbeanspruchungen in [SHAH & CHANDRA 1970; IBUK 2008] sowie für hochfesten Beton in [MUCHA 2003] vorgenommen. Die vorliegenden Ergebnisse sind allerdings besonders für die Ermüdungsbeanspruchungen sehr eingeschränkt. Trotzdem zeigen die Untersuchungen von [IBUK 2008], dass mit fortschreitendem Ermüdungsprozess eine Zunahme der Mikrorissfläche einhergeht, die sowohl aus der Entstehung neuer Risse als auch aus dem Wachstum vorhandener Risse resultiert. Des Weiteren gibt [IBUK 2008] an, in Einklang mit der Modellvorstellung von [MEHMEL & KERN 1962], in Belastungsrichtung überwiegend Mikrorisse in der Verbundzone zwischen Zuschlägen und Zementstein festgestellt zu haben. Nachteilig bei dieser Untersuchungsmethode sind jedoch der hohe Aufwand und der zerstörende Charakter. Somit ist weder eine Weiterverfolgung der festgestellten Schädigungen möglich, noch die Bestimmung der eigentlichen Lebensdauer der jeweiligen Probe.

In [MUCHA 2004] werden auch zerstörungsfreie Methoden zur Untersuchung der Gefügestruktur zyklisch beanspruchter Betonzylinder eingesetzt. Zum einen werden die Computer-

tomographie (CT) und zum anderen die Neutronendiffraktometrie verwendet. In beiden Fällen kamen die Proben mit Hilfe einer Belastungshülse unter Last in die Untersuchung. Der Aufwand für derartige Versuche ist enorm hoch, die Größe der Proben ist sehr begrenzt, was gerade im Hinblick auf den notwendigen repräsentativen Volumenausschnitt problematisch ist. Die begrenzte Auflösung in der CT-Untersuchung erlaubte zudem keine Identifikation von Mikrorissen.

3.3.3 Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten

Wie zum Teil schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde, ist das Ermüdungsverhalten des Betons von einer Vielzahl an Einflussparametern abhängig. In Anlehnung an [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994] und [HOHBERG 2004] sind dabei insbesondere die in *Tabelle 3.1* aufgelisteten Parameter von Bedeutung. Eine Zusammenstellung zu den Auswirkungen der einzelnen Parameter auf das Ermüdungsverhalten findet sich z. B. in [CEB 1988] und [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994]. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen auch im Hinblick auf die einzelnen Einflussgrößen sind in [HOHBERG 2004] zu finden. Mit Verweis auf die genannte Literatur werden im Folgenden nur einige Parameter kurz erläutert.

Tabelle 3.1: *Übersicht über die wesentlichen Einflussparameter auf das Ermüdungsverhalten von Beton*

Beanspruchungs- und Umweltbedingungen	***Werkstoffparameter***
• Beanspruchungshöhe (Amplitude und Mittellast)	• Statische Festigkeit
• Frequenz (Beanspruchungsrate)	• Steifigkeit
• Beanspruchungsart (Zug-, Druck- oder Wechselbeanspruchung, ein- oder mehrachsig)	• Zusammensetzung (Zuschlag, Sieblinie, Zementgehalt, Luftporen)
• Ruhephasen	
• Belastungsgeschichte (Reihenfolge)	
• Betonfeuchtigkeit	
• Betontemperatur	

Statische Festigkeit

Der Einfluss der statischen Druckfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit und das Ermüdungsverhalten wurde bereits in den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.2 mit erläutert. Höhere Druckfestigkeiten führen zu vergleichsweise geringeren Ermüdungsfestigkeiten sowie zu einem spröderen Ermüdungsverhalten mit einer geringeren Ausprägung des typischen 3-phasigen Verlaufes.

Belastungsfrequenz/Belastungsrate

Mehrere Autoren haben in ihren Untersuchungen einen Einfluss der Belastungsfrequenz bzw. der Beanspruchungsrate auf das Ermüdungsverhalten des Betons festgestellt. So z. B. [WEIGLER & FREITAG 1975], [HOLMEN 1979] und [HOHBERG 2004]. Auch in [CEB 1988] und [KÖNIG & DANIELEWICZ 1994] wird von einem Frequenzeinfluss ausgegangen, der vom Beanspruchungsniveau abhängig ist. Eine Zusammenstellung von Literatur und Erkenntnissen zum Einfluss der Belastungsfrequenz ist in [SCHNEIDER, VÖCKER ET AL. 2012] zu finden. Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass eine höhere Belastungsfrequenz zu einer vergleichs-

weise erhöhten Bruchlastspielzahl führt. Die *Abbildung 3.22* verdeutlicht dies anhand der Ergebnisse aus [HOHBERG 2004].

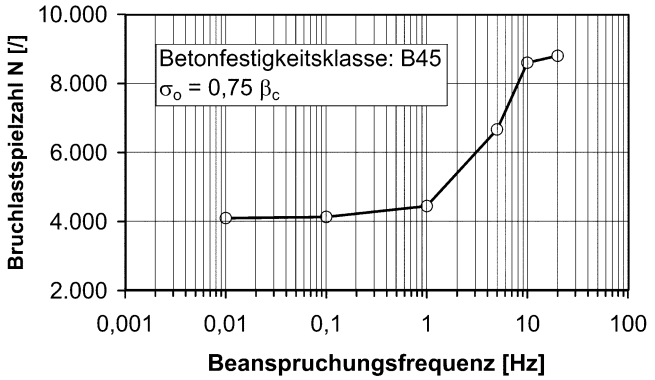

Abbildung 3.22: *Einfluss der Belastungsfrequenz auf die resultierende Bruchlastspielzahl aus [HOHBERG 2004]*

[WEIGLER & FREITAG 1975] haben aber auch beobachtet, dass der Frequenzeinfluss abhängig ist von der Höhe der zyklischen Beanspruchung. Sie beobachten in ihren Untersuchungen, dass unterhalb einer Oberlast von $S_{max} < 0{,}8$ kein Frequenzeinfluss mehr festzustellen ist. In diesem Zusammenhang wird auch in [ANDERS 2007] und in unveröffentlichten Ergebnissen von Hohberg [2003] bei hohen Frequenzen an höherfesten Betonen von einer merklichen Temperaturerhöhung berichtet. Prinzipiell ist zu vermuten, dass der Frequenzeinfluss zum einen durch die reine Zeitabhängigkeit im Materialverhalten und zum anderen durch die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Spannungsrate bedingt ist.

Feuchtigkeit

Für den Einfluss der Feuchtigkeit wird in der Literatur eine reduzierende Wirkung auf die Ermüdungsfestigkeit beschrieben [PETKOVIC & ROSSELAND 1992; ROSSI, VAN MIER ET AL. 1992; HOHBERG 2004]. Dabei zeigt sich, dass wassergelagerte Proben im Vergleich zu luftgelagerten Proben zum Teil erheblich geringere Bruchlastspielzahlen erreicht haben. In den Untersuchungen von [HOHBERG 2004] wird außerdem festgestellt, dass sich bei Normalbeton ein stärkerer Einfluss der Feuchtigkeit als bei höherfesten Betonen einstellt. Dies führt Hohberg auf die höhere Porosität und damit höhere Wassereinlagerung zurück.

Reihenfolgeeffekte

Auch die Reihenfolge, in der unterschiedlich hohe Ermüdungsbeanspruchungen auf den Beton aufgebracht werden, beeinflusst das Ermüdungsverhalten. Untersuchungen mit mehrstufigen Ermüdungsbeanspruchungen wurden z. B. von [HILSDORF & KESLER 1966], [WEIGLER & FREITAG 1975], [TEPFERS, FRIDEN ET AL. 1977], [KLAUSEN 1978], [VAN LEEUWEN & SIEMES 1979], [HOLMEN 1979] und [OH 1991A] durchgeführt. Im Ergebnis zeigen diese Untersuchungen, dass die Reihenfolge der aufgebrachten Beanspruchungen sich auf die resultierende Bruchlastspielzahl auswirkt. Somit kann bei Beton nicht von einer linearen Schädigungsakkumulation ausgegangen werden, wie dies bei der Palmgren-Miner-Regel der Fall ist, auf welche in Kapitel 3.4 näher eingegangen wird. In vielen der vorhandenen Untersuchungen stand die Überprüfung der Palmgren-Miner-Regel sowie deren Modifikation und Anpassung im Vordergrund. Die eigentlichen Vorgänge und Ursachen sind in dem Zusammenhang bisher wenig betrachtet worden.

Mehrachsige Ermüdungsbeanspruchungen

Zum Ermüdungsverhalten von Beton unter mehrachsigen Beanspruchungen finden sich in der Literatur prinzipiell nur sehr wenige Untersuchungsergebnisse. Eine Ursache dafür ist sicher in dem zumeist deutlich erhöhten experimentellen Aufwand im Bezug auf einaxiale Ermüdungsversuche zu suchen. Vergleichbar mit den Untersuchungen zum mehraxialen Verhalten unter statischen Beanspruchungen, kann auch das Verhalten unter mehraxialen Ermüdungsbeanspruchungen auf verschiedene Weisen untersucht werden. Zum einen ist zwischen zwei- und dreiaxialen Beanspruchungen zu unterscheiden. Zum anderen stehen für die Beanspruchung in der zweiten und dritten Richtung verschiedene Methoden zur Verfügung. Dies kann durch passive Behinderung der Querdehnung z. B. durch Umschnürung erfolgen, durch aktive Manteldrücke über Flüssigkeiten oder durch die aktive Lasteinleitung über massive Belastungskomponenten. In der Regel erfolgt in den vorhandenen Untersuchungen eine Erzeugung von zusätzlichen Druckbeanspruchungen in der zweiten und dritten Richtung, zusätzlich zu der Ermüdungsbeanspruchung in der ersten Richtung. Eine umfangreiche Zusammenstellung von Literatur mit experimentellen Untersuchungen zu dieser Thematik ist z. B. in [GÖHLMANN 2009] zu finden.

Die wenigen diesbezüglich vorhandenen Ergebnisse zeigen, dass davon ausgegangen werden kann, dass in ähnlicher Weise, wie auch unter monotoner Druckbeanspruchung festzustellen ist, eine zusätzliche Beanspruchung in Querrichtung durch Druckspannungen zu einer Erhöhung der statischen Tragfähigkeit und auch zu einer Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit führt.

Das zweiaxiale und einaxiale Ermüdungsverhalten wurde in [SU & HSU 1988] untersucht. Dabei wurden niederzyklische bis hochzyklische Ermüdungsversuche mit Bruchlastspielzahlen bis ca. 2 Mio. durchgeführt. Die Aufbringung der Last erfolgte aktiv in beiden Richtungen über Bürsten. Aus den Versuchsergebnissen wurden Wöhlerlinien für zweiaxiale Druckbeanspruchungen abgeleitet.

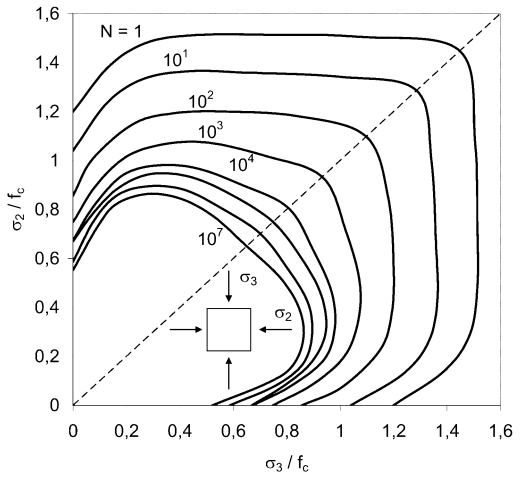

Abbildung 3.23: *Versagenskurven für zweiaxiale Ermüdungsbeanspruchungen im Druckbereich von [SU & HSU 1988] aus [GÖHLMANN 2009]*

Insgesamt konnte eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit unter zweiaxialen Ermüdungsbeanspruchungen im Vergleich zu einaxialen Beanspruchungen festgestellt werden. Dabei zeigte sich eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit um max. 52 %. Die aus diesen Versuchen abgeleiteten Versagenskurven für zweiaxiale Ermüdungsbeanspruchungen sind in der *Abbildung 3.23* wiedergegeben.

Ein anderer Weg zur Untersuchung des zweiaxialen Ermüdungsverhaltens von Beton wird in [SHAH & MU 2004] gegangen. Vor dem Hintergrund der Ermüdungsbeanspruchung von Betonplatten auf Flugfeldern verwenden sie hohle Betonzylinder, um eine kombinierte Druck-Torsions-Beanspruchung aufzubringen. Bei den Versuchen wurden Experimente im niederzyklischen Bereich durchgeführt, die sowohl in den Verformungs- als auch in den Steifigkeitsentwicklungen 3-phasige Verläufe wie unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung aufwiesen.

Zur Untersuchung des dreiaxialen Ermüdungsverhaltens von Beton werden in [HOOI 2000] Zylinder mit einer umschnürenden Bewehrung in unterschiedlichen Bewehrungsgraden verwendet. Es wurde eine zyklische Druckbeanspruchung in Längsachse aufgebracht, mit der Bruchlastspielzahlen bis ca. 10^5 Lastzyklen erreicht wurden. Auch hier wurde in den Versuchen eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zur einaxialen Ermüdungsfestigkeit festgestellt. Aus den Ergebnissen wurden entsprechende Wöhlerlinien für verschiedene Grade der Umschnürung abgeleitet, die in *Abbildung 3.24 links* veranschaulicht sind. Ähnlich wie bei der einaxialen Ermüdung zeigte sich auch hier eine Veränderung in den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen über die Lebensdauer.

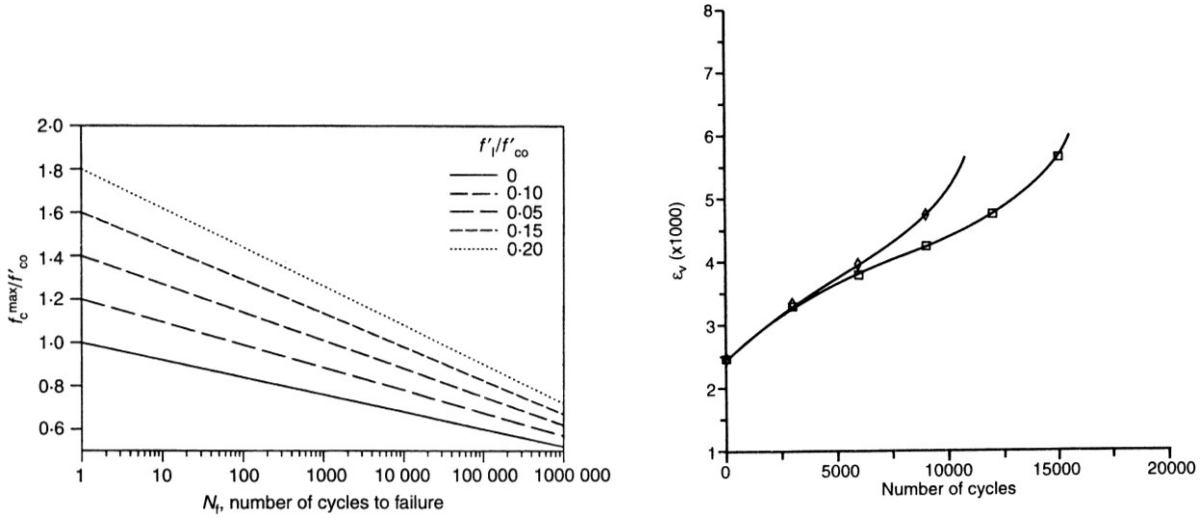

Abbildung 3.24: *Wöhlerlinien für Beton mit unterschiedlich starker Umschnürungsbewehrung aus [HOOI 2000] (links), 3-phasige Dehnungsentwicklung in axialer Richtung unter dreiaxialer Ermüdungsbeanspruchung aus [TALIERCIO & GOBBI 1996] (rechts)*

Ebenfalls unter dreiaxialen Ermüdungsbeanspruchungen wurde das Ermüdungsverhalten in [TALIERCIO & GOBBI 1996] untersucht. Die verwendeten Betonzylinder wurden in der Längsachse über die Prüfmaschine beansprucht und in der zweiten und dritten Richtung ist ein Manteldruck mit Hilfe einer Flüssigkeit aufgebracht worden. Dabei wurden Bruchlastspielzahlen bis in den hochzyklischen Bereich mit max. 500.000 Lastzyklen erreicht. Die meisten während der Versuche gemessenen Dehnungsverläufe wiesen ebenfalls die für die einaxialen Versuche typischen 3-phasigen Verläufe auf, wie beispielhaft in *Abbildung 3.24 rechts* wiedergegeben ist. Aus den Versuchsergebnissen wurden auch hier Wöhlerlinien abgeleitet. Proben, die nicht in den zyklischen Versuchen versagt hatten, wurden einer anschließenden statischen Prüfung unterzogen, in der signifikante Reduzierungen der Probensteifigkeiten festgestellt werden konnten, ähnlich wie unter einaxialen Ermüdungsbeanspruchungen.

3.4 Modelle und Theorien zur Betonermüdung

Da die eigentlichen Vorgänge, die während des Ermüdungsvorgangs im Materialgefüge ablaufen und schließlich zu den in Kapitel 3.3 beschriebenen und bekannten Veränderungen im Materialverhalten führen, bisher noch weitgehend ungeklärt sind (siehe auch Kapitel 3.3.2), liegen bis heute naturgemäß auch nur relativ wenige und eingeschränkte Modellansätze zur Beschreibung des Ermüdungsvorgangs vor. Dies gilt in besonderem Maße für das Verhalten unter Druckschwellbeanspruchungen und liegt vorwiegend in der Tatsache der Komplexität der Materialstruktur und der daraus resultierenden Komplexität des zugehörigen Ermüdungsvorgangs im Beton begründet. Daher existieren heute überwiegend nur Modelle, die sich vorrangig der Beschreibung einzelner Aspekte der Betonermüdung widmen. Eine Modellierung zur vollständigen und geschlossenen Beschreibung der Betonermüdung existiert bisher noch nicht. In diesem Zusammenhang stellt [PFANNER 2002] sehr treffend fest, dass weder der Begriff der Ermüdungsschädigung und ihre Evolution, noch das Ermüdungsversagen selbst bislang konsistent innerhalb einer umfassenden und leistungsfähigen Theorie zur Beschreibung des allgemeinen Materialverhaltens von Beton erklärt worden sind (sinngemäß zitiert nach Pfanner).

Innerhalb der existierenden Modellierungen zur Ermüdung von Beton können im Wesentlichen drei Typen von Ansätzen unterschieden werden, in Modelle für:

- die Ermüdungsfestigkeit
- die Schädigungsakkumulation
- den Schädigungsvorgang

In erster Linie wurden in der Vergangenheit Modelle zur Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit entwickelt, sprich Ansätze für die Darstellung von Wöhlerlinien. Dafür liegt auch die große Mehrzahl an experimentellen Untersuchungen vor. Außerdem kommt der Ermüdungsfestigkeit bei der Bemessung eine hohe praktische Relevanz zu, was bei der Modellentwicklung eine entscheidende Rolle spielt. Weniger Modelle liegen hingegen zur Erfassung der Schädigungsakkumulation bei mehrstufigen Beanspruchungen im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit vor. Dies liegt weniger in einer geringeren praktischen Relevanz begründet als vielmehr in den komplexeren nichtlinearen Zusammenhängen und der geringeren Anzahl an experimentellen Untersuchungen. Sie sind eine Folge der deutlich aufwendigeren Konzipierung und Durchführung derartiger Versuche. Am wenigsten Modelle existieren jedoch für die Beschreibung des Ermüdungsvorgangs selbst. Ursache dafür ist sicher zum einen das anfänglich geringere Interesse an dem Verhalten vor dem Ermüdungsversagen, was durch die geringere praktische Relevanz begründet ist. Zum anderen sind die Vorgänge und Abläufe während des Ermüdungsprozesses durch eine hohe Komplexität charakterisiert, was bereits die experimentelle Untersuchung sehr aufwendig gestaltet. All dies hat dazu geführt, dass eine geringe Anzahl an entsprechenden Untersuchungen und Erkenntnissen zum Ermüdungsvorgang vorliegt, was sich natürlich auch in den zugehörigen existierenden Modellansätzen widerspiegelt.

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zu den drei genannten Modelltypen gegeben werden, wobei hier jeweils nur einige ausgewählte Ansätze kurz vorgestellt werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit ist daher nicht gegeben und in diesem Rahmen auch nicht realisierbar.

Ansätze für Wöhlerlinien

Bis heute hat es viele Untersuchungen gegeben, aus denen Wöhlerlinien für Beton abgeleitet wurden. Wie bereits im Kapitel 3.2.2 beschrieben, sind die Arbeiten von [VAN ORNUM 1903; VAN ORNUM 1907] Beispiele für einige der ersten bekannten Untersuchungen an Beton in diesem Zusammenhang. Die Ableitung und Entwicklung von neuen und realitätsgetreueren Modellen bzw. Ansätzen für Wöhlerlinien von Beton hält bis heute an. Tendenziell liegt der Schwerpunkt dabei in jüngerer Zeit vorrangig auf der Untersuchung und Ableitung von Wöhlerlinien für neu entwickelte Betone, wie zum Beispiel Betone mit immer höheren Festigkeiten oder auch mit Faseranteilen verschiedenster Materialien. Aber auch der Bereich sehr hoher Lastzyklen sowie die Ermüdungsfestigkeit unter mehraxialen Beanspruchungen sind Gegenstand der aktuellen Forschung [GRÜNBERG, LOHAUS ET AL. 2007].

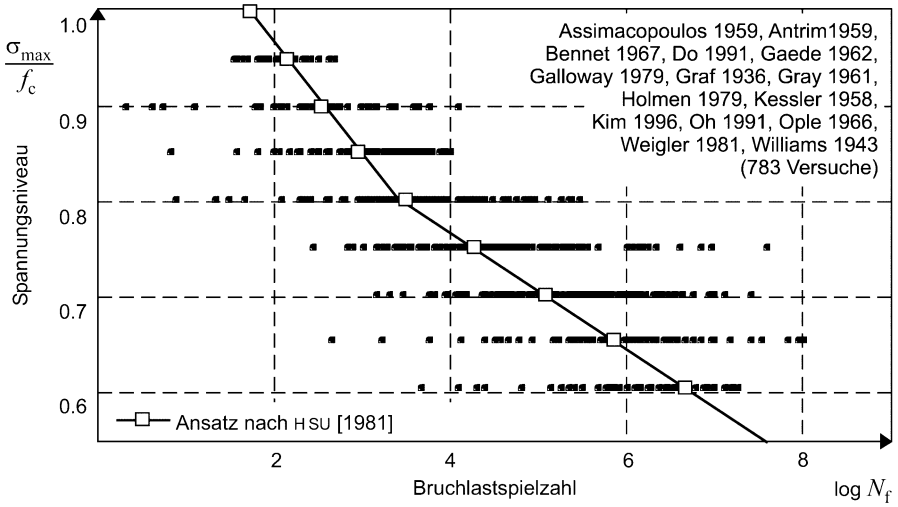

Abbildung 3.25: *Zusammenstellung von Ergebnissen aus verschiedenen Wöhlerversuchen sowie Ansatz für Wöhlerlinie nach [HSU 1981] in einer Darstellung aus [PFANNER 2002]*

Zu den bekanntesten Arbeiten, die sich mit Normalbetonen unter Druckschwellbeanspruchungen befasst haben, gehören die Werke von [KLAUSEN 1978] und [HOLMEN 1979]. Beide haben umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt und auf deren Basis entsprechende Ansätze für die Ermüdungsfestigkeit von Normalbetonen abgeleitet. Für Normal- und Leichtbetone haben z. B. [WEIGLER & FREITAG 1975] und [TEPFERS & KUTTI 1979] Ansätze für Wöhlerlinien bei Druckbeanspruchungen entwickelt. Einen universellen und bereits vielfach verwendeten Ansatz hat [HSU 1981] abgeleitet. In seinen Wöhlerlinien findet erstmals der Einfluss der Belastungsfrequenz Berücksichtigung, sowie zusätzlich auch die Unterscheidung zwischen hoch- und niederzyklischem Verhalten. Sein Ansatz basiert auf einer großen Anzahl von ausgewerteten Versuchen aus der Literatur und ist beispielhaft in *Abbildung 3.25* dargestellt. Einen Einfluss der Druckfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit haben [KIM & KIM 1996] in ihren Untersuchungen festgestellt und einen entsprechenden Ansatz für Wöhlerlinien für normal- und hochfeste Betone in Abhängigkeit der statischen Festigkeit abgeleitet. Für ultrahochfeste Betone finden sich zum Beispiel in [WEFER 2010] bzw. [LOHAUS, WEFER ET AL. 2011] Modelle für Wöhlerlinien, die aber auch für die Anwendung auf hochfeste und Normalbetone entwickelt wurden. Diese basieren auf Versuchen mit Betonen, die eine 28 Tage Festigkeit von bis zu 180 N/mm² besaßen, und wurden zudem an einer Vielzahl an Versuchsergebnissen aus der Literatur verifiziert. Die abgeleitete Versagensfläche in Abhängigkeit der Ober- und Unterlast ist in *Abbildung 3.26* wiedergegeben.

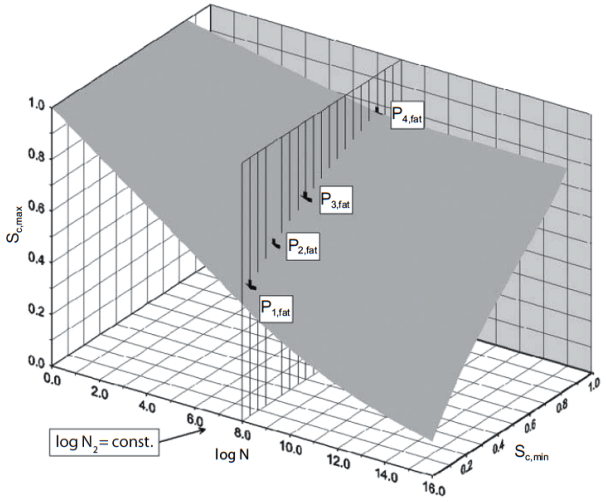

Abbildung 3.26: *Darstellung der Versagensfläche für Ermüdungsbeanspruchungen nach dem Ansatz von Lohaus & Wefer & Oneschkow aus [LOHAUS, WEFER ET AL. 2011]*

Neben den Wöhlerlinien für Druckschwellbeanspruchungen existieren natürlich auch vielfältige Ansätze für zyklische Zugbeanspruchungen im Beton, die auf Zug oder Biegeversuchen basieren. Stellvertretend dafür seien für reine Zugbeanspruchungen die Arbeiten von [SAITO & IMAI 1983] und [CORNELISSEN & REINHARDT 1984] genannt. Unter Biegung mit Berücksichtigung des Einflusses der Prüffrequenz wurde von [ZHANG, PHILLIPS ET AL. 1996] ein Modell entwickelt.

Ansätze zur Schädigungsakkumulation

Die Ermittlung der akkumulierten Schädigung aus bzw. infolge mehrstufiger zyklischer Beanspruchungen ist ein wichtiger Aspekt bei der Auslegung ermüdungsbeanspruchter Bauteile oder Bauwerke. Den Akkumulationsansätzen kommt daher eine wesentliche Bedeutung zu, da in der Realität fast nie zyklische Beanspruchungen auftreten, die über die gesamte Lebensdauer einen einstufigen und konstanten Charakter aufweisen. Sie können somit nicht direkt aus den Wöhlerlinien abgelesen werden. Praxisrelevante Ermüdungsbeanspruchungen bestehen in der Regel immer aus einer Kombination unterschiedlich hoher Belastungen. Die vorhandenen Schädigungsakkumulationsansätze dienen dazu, auf Basis der Ergebnisse einstufiger Ermüdungsversuche (Wöhlerlinien) auf die Zustände infolge mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchungen zu schließen.

Die einfachste und bekannteste Akkumulationshypothese ist die lineare Schädigungsakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner. Sie ist mit eine der ältesten Akkumulationshypothesen und geht von einer linear zunehmenden Schädigung im Bezug auf die Lastzyklen aus und ist aufgrund ihrer einfachen Anwendung besonders verbreitet [HAIBACH 2002]. Eine prinzipielle Darstellung der Palmgren-Miner-Regel ist in *Abbildung 3.27 links* abgebildet. Die wesentlichen Merkmale ihrer Einfachheit sind jedoch die Annahme einer Linearität in der Schädigungsentwicklung und die Voraussetzung einer Reihenfolgeunabhängigkeit bei der Schädigungsakkumulation. Die in der Literatur zu findenden Ergebnisse und die zugehörigen Schlussfolgerungen im Bezug auf die Gültigkeit der P-M-Regel für Beton sind nicht eindeutig und gehen zum Teil deutlich auseinander.

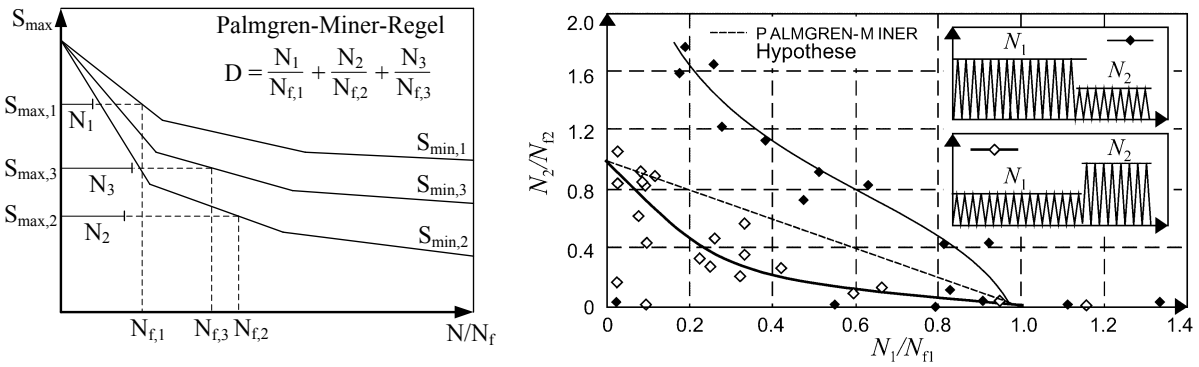

Abbildung 3.27: *Grafische Veranschaulichung der linearen Palmgren-Miner-Regel (links) und experimentell ermittelte Reihenfolgeabhängigkeit von [HILSDORF & KESLER 1966] bei zweistufigen Lastprozessen (rechts) aus [PFANNER 2002]*

Im Laufe der Zeit wurde aber von verschiedenen Autoren in ihren Untersuchungen festgestellt, dass diese Annahmen für die Anwendung auf Beton nicht gerechtfertigt sind. Beispielhaft seien dafür die Arbeiten von [HOLMEN 1979] für Druckschwell, von [HILSDORF & KESLER 1966] sowie von [OH 1991A] für Biegung genannt, siehe auch *Abbildung 3.27 rechts*. Infolge dieser Feststellungen wurden verschiedene Modifikationen der P-M-Regel bzw. auch gänzlich andere Ansätze entwickelt, um die Reihenfolgeeffekte besser abbilden zu können. Derartige alternative Akkumulationsregeln wurden zum Beispiel von [HOLMEN 1979], [SHAH 1984], [OH 1991A] oder [TEPFERS, FRIDEN ET AL. 1977] entwickelt. Andererseits gibt es auch Autoren, die in ihren Untersuchungen, zumindest für die jeweiligen speziellen Versuchskonstellationen, zu dem Ergebnis kommen, dass die P-M-Regel ausreichend genau und damit anwendbar auf den Beton ist, wie beispielsweise [WEIGLER & FREITAG 1975].

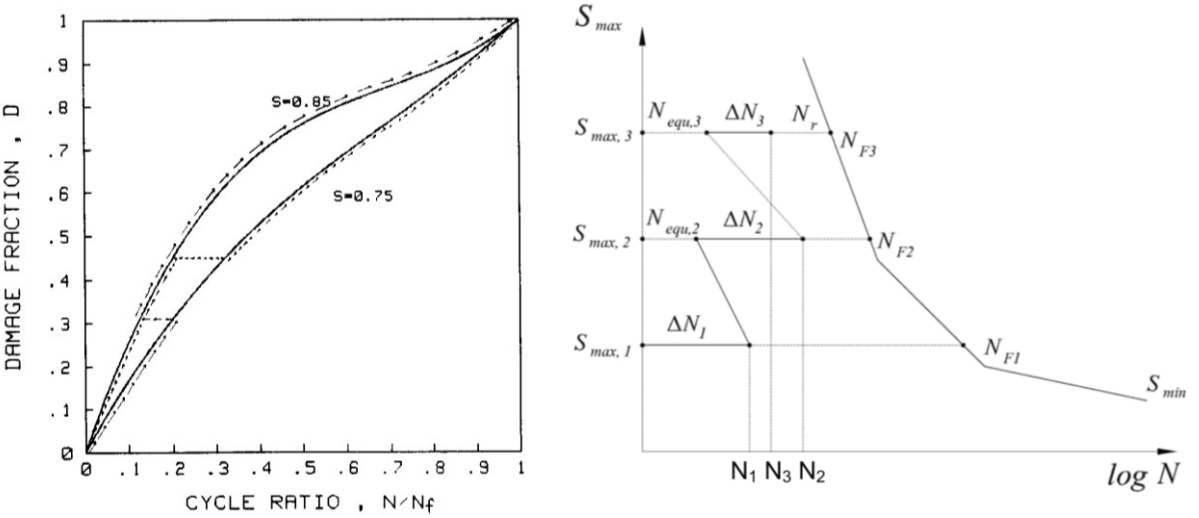

Abbildung 3.28: *Veranschaulichung der nichtlinearen Schädigungsentwicklung und des Reihenfolgeeffektes für zweistufige Lastkollektive nach OH aus [OH 1991A] (links), schematische Darstellung des Ansatzes nach Göhlmann zur Beschreibung mehrstufiger Lastprozesse (rechts) aus [GÖHLMANN 2009]*

Eine nichtlineare Anpassung der P-M-Regel stellt [OH 1991A] vor, wobei er gleich zwei Methoden darlegt, von denen eine graphisch sehr anschaulich ist. Auf Basis der Versuchser-

gebnisse von [HOLMEN 1979] entwickelt OH Gleichungen zur Beschreibung der nichtlinearen Schädigungsverläufe, und zwar in Abhängigkeit vom Beanspruchungsniveau der zyklischen Beanspruchung. Mit Hilfe dieser Verläufe ermittelt er schließlich die Schädigungsakkumulation für mehrstufige Beanspruchungen, was beispielhaft für eine zweistufige Beanspruchung in *Abbildung 3.28 links* wiedergegeben ist.

Einen gänzlich anderen Weg geht [GÖHLMANN 2009]. Er verwendet dazu die in [PFANNER 2002] vorgestellte Energiehypothese und nutzt diese, um auch mehrstufige Lastprozesse beschreiben zu können. Grundlage ist dabei die Annahme von Pfanner, dass die für einen bestimmten Schädigungszustand aufzubringende Energie sowohl bei statischen als auch bei zyklischen Beanspruchungen dieselbe ist. Auf der Basis der Gleichheit der Energien bestimmt Göhlmann bei mehrstufigen Ermüdungsbeanspruchungen für ein nachfolgendes Lastkollektiv die schädigungsäquivalente Lastwechselzahl, die der bereits eingetragenen Ermüdungsschädigung entspricht. Der Schädigungsentwicklung liegt dabei ein nichtlinearer empirischer Ansatz von Pfanner zugrunde. Eine grafische Veranschaulichung dieser Vorgehensweise ist in *Abbildung 3.28 rechts* dargestellt. Als weiterführende Literatur zum Thema der Schadensakkumulation sei auch auf [HAIBACH 2002] und [SIEMON 2006] verwiesen.

Ansätze zum Schädigungsvorgang

Sowohl die Untersuchung als auch die Beschreibung des vor dem Ermüdungsversagens ablaufenden Schädigungsvorgangs ist erst in den letzten Jahrzehnten nach und nach mehr in den Fokus der Forschung gerückt. Im Vergleich zu den vorhandenen Modellen zur Ermüdungsfestigkeit oder zur Schädigungsakkumulation liegen für den Schädigungsvorgang weitaus weniger Ansätze vor. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Modelle meist nur in der Lage sind, einzelne eingeschränkte Teilaspekte des Ermüdungsvorgangs zu beschreiben. Die einzelnen Ansätze sowie auch die Herangehensweisen sind teilwiese sehr verschieden. In aller Regel findet die Lösung dieser Ansätze auf numerischem Wege statt. Bei den existierenden Modellansätzen können zur Unterscheidung auf verschiedene Weise Kategorisierungen vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Modelle in erster Linie in folgender Weise unterschieden werden (siehe auch *Abbildung 3.29*), in Modelle, die den Beton als:

- homogenisiertes Material (*links*) oder
- heterogenes Material betrachten (Meso-Modellierungen, *rechts*).

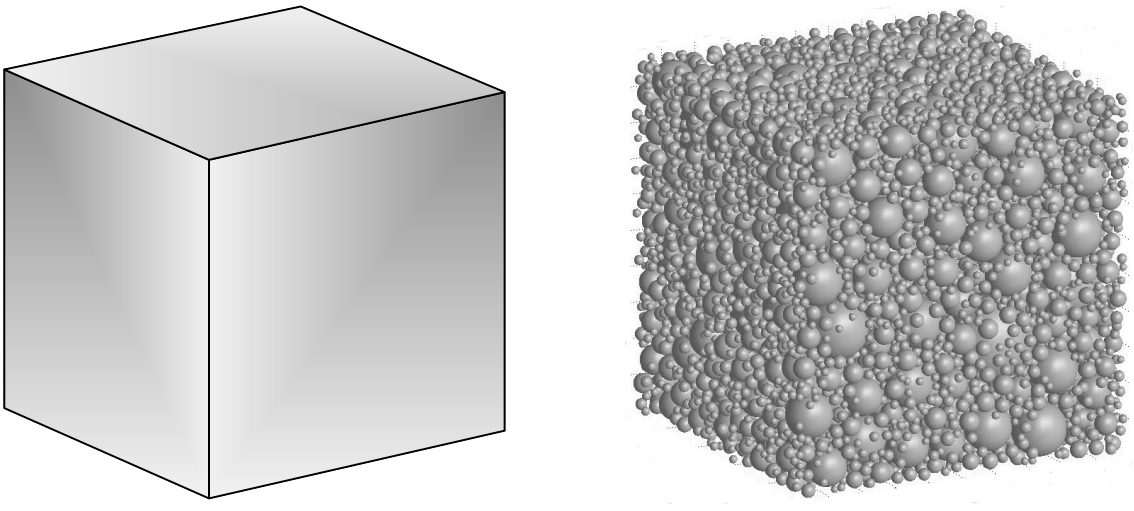

Abbildung 3.29: *Veranschaulichung der beiden Prinzipien das Material als homogenisiertes Kontinuum (links) oder als heterogenes Materialgemisch (rechts) zu betrachten*

Als erstes werden einige Vertreter der Ansätze mit homogenisierter Betrachtung vorgestellt. Bei der Mehrheit dieser Modelle handelt es sich um kontinuumsmechanisch begründete Ansätze, wobei es daneben auch andere Herangehensweisen gibt, wie die Lattice-Modelle (Bsp. [SCHLANGEN & VAN MIER 1992]). Prinzipiell benötigt die homogenisierte Betrachtung aufwendigere Materialansätze, um das komplexe Verhalten des heterogenen Materials in einem Materialgesetz abbilden zu können. Aber gerade wenn es um die Abbildung von Versagens- bzw. Bruchvorgängen geht, wie zum Beispiel auch der Nachbruchbereich beim Beton, kommen diese Modelle häufig an ihre Grenzen.

Allgemein wird in der Kontinuumsschädigungsmechanik im Rahmen statischer Beanspruchungssituationen die Entstehung von Schädigung zumeist mit dem Überschreiten einer Fließ- bzw. Schädigungsfläche im dreidimensionalen Spannungsraum verknüpft. Im Falle der Ermüdung liegen die Beanspruchungen jedoch meist innerhalb dieser Fließfläche. Es ist daher der Unterschied und die Herausforderung, dass entsprechende Ermüdungsmodelle eine Entwicklung von Schädigungen unter konstanten zyklischen Beanspruchungen auch innerhalb dieser Fließfläche erlauben und abbilden können. Einige Beispiele zur Abbildung des zyklischen Verhaltens von Beton mit Modellen, basierend auf homogenisierter Betrachtung, sind die Ansätze von [PAPA & TALIERCIO 1996], [GAO & HSU 1998], [PFANNER 2002], [ALLICHE 2004], [DESMORAT, RAGUENEAU ET AL. 2007], [ZANUY, DE LA FUENTE ET AL. 2007], [ASLANI & JOWKARMEIMANDI 2012] und [KINDRACHUK, THIELE ET AL. 2015]. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze kurz vorgestellt und erläutert.

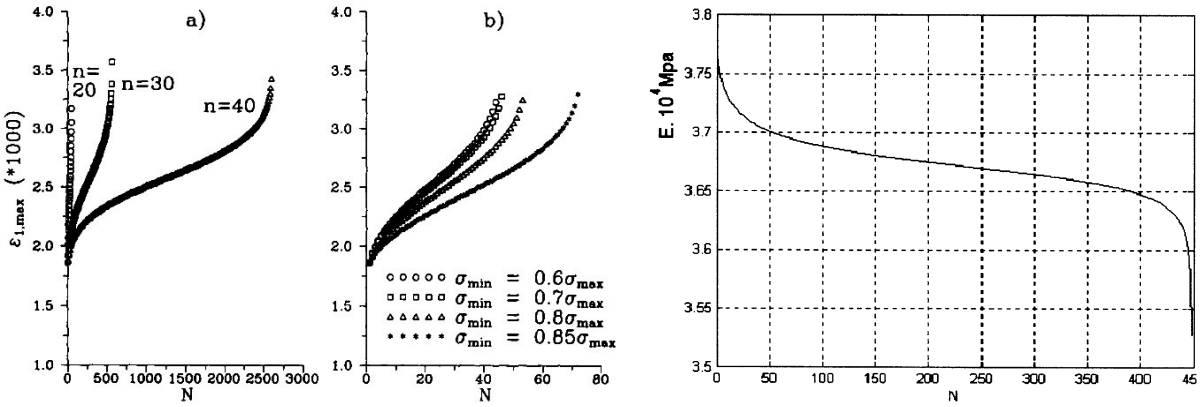

Abbildung 3.30: *Nach dem Ansatz von Papa berechnete Dehnungsentwicklungen aus [PAPA & TALIERCIO 1996] (links) und nach dem Ansatz von Alliche errechnete E-Modul-Entwicklung aus [ALLICHE 2004] (rechts)*

Der Ansatz von [PAPA & TALIERCIO 1996] baut auf einem Kontinuumsschädigungsmodell auf, wobei die zyklische Schädigungsentwicklung auf Grundlage eines Ansatzes von [MARIGO 1985] beschrieben wird. Dieser gibt s-förmige Dehnungsentwicklungen wieder (siehe *Abbildung 3.30 links*) und in eingeschränktem Maße auch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Es bleibt zu berücksichtigen, dass der Ansatz auf dem Envelope-Konzept basiert und nur für niederzyklische Versuche validiert ist, nicht aber für hochzyklische Versuche. Ein phänomenologisch begründetes Modell zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung unter Druckbeanspruchungen wird in [GAO & HSU 1998] vorgestellt. Die Ermüdungsschädigung wird darin mit der Veränderung der Steifigkeit definiert und der abgeleitete Schädigungsansatz an den eigenen Versuchen kalibriert. Mit diesem Ansatz bilden sie ebenfalls s-förmige Dehnungsentwicklungen sowie nichtlineare Schädigungsentwicklungen über die Lebensdauer

ab. Unklar ist aber für welche Lastzyklenbereiche der Ansatz kalibriert und validiert wurde. Es ist aber anzunehmen, dass es sich auch hier nur um niederzyklisches Verhalten handelt. Der Ansatz von [ALLICHE 2004] basiert auf einer anisotropen Formulierung der Schädigung nach [DRAGON, HALM ET AL. 2000]. Zur Beschreibung der zyklischen Schädigungsentwicklung kommt hier ähnlich wie bei [PAPA & TALIERCIO 1996] der Ansatz von [MARIGO 1985] als Grundlage zur Anwendung. Dabei wird eine Evolution von Schädigung auch unterhalb der für den statischen Fall definierten Fließgrenze ermöglicht. Das Modell gibt sowohl die Entwicklung der Dehnungen als auch der Steifigkeit in nichtlinearer, s-förmiger Form wieder (siehe *Abbildung 3.30 rechts*). Allerdings wird die Schädigungsentwicklung in dem Modell allein mit dem Auftreten von Zugspannungen verknüpft. Validiert ist dieses Modell zudem auch nur für einaxiale und niederzyklische Druckbeanspruchungen. Der Ansatz von [KINDRACHUK, THIELE ET AL. 2015] ist ebenfalls auf der Kontinuumsschädigungsmechanik begründet. Dieser verknüpft, im Gegensatz zu [ALLICHE 2004], die Schädigung mit inelastischen Verformungen. Aufbauend auf dem Konzept der effektiven Spannungen [KACHANOV 1958] werden viskose Verformungen auch innerhalb der statischen Fließfläche ermöglicht. Das Modell bildet das Kriechen, die Ermüdung im Druckbereich, Dehnrateneffekte sowie dreiaxiale Spannungszustände ab. Als Ergebnis werden sowohl die Dehnungsentwicklungen als auch die Steifigkeitsentwicklungen in typischer s-förmiger Form wiedergegeben. Eine Validierung des Modells fand anhand von Ergebnissen statt, die aus Kriechversuchen und hochzyklischen Ermüdungsversuchen stammten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden.

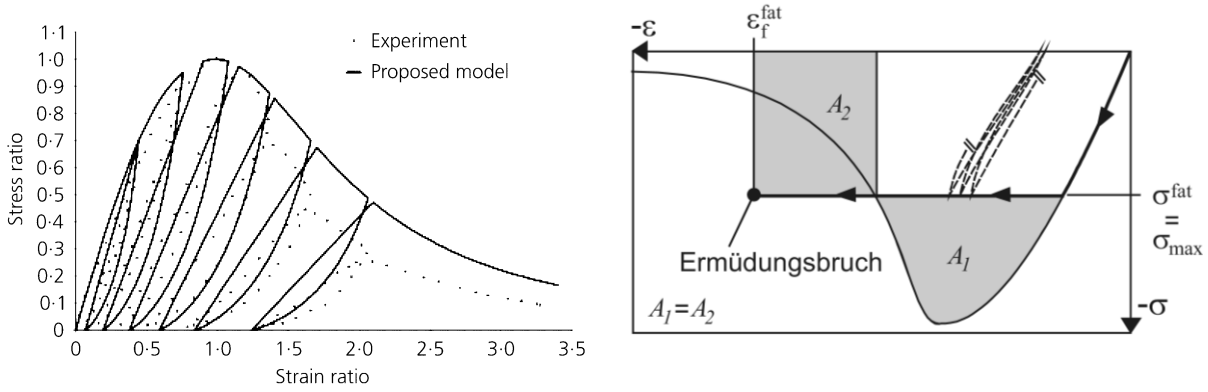

Abbildung 3.31: *Vergleich von simuliertem und niederzyklischem Verhalten aus [ASLANI & JOWKARMEIMANDI 2012] (links) und grafische Veranschaulichung der Energiehypothese von Pfanner aus [PFANNER 2002] (rechts)*

Der Ansatz von [ASLANI & JOWKARMEIMANDI 2012] wurde vor dem Hintergrund von Erdbebenbeanspruchungen entwickelt, um das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons sowohl unter zyklischen Druck- als auch unter Zugbeanspruchungen wiederzugeben. Er basiert auf dem Envelope-Konzept, besitzt nichtlineare Entlastungs- und lineare Belastungskurven mit einer schädigungsbedingten Reduzierung der Steifigkeit. Dieser Ansatz ist ebenfalls nur für niederzyklische Beanspruchungen geeignet, für welche er auch an verschiedenen Ergebnissen aus der Literatur validiert wurde. Die *Abbildung 3.31 links* zeigt einen solchen Vergleich zwischen Modellverhalten und experimentellem Ergebnis. [PFANNER 2002] geht dagegen einen Weg, der sich in seiner Konzeption wesentlich von den meisten anderen Ansätzen unterscheidet. Sein Ansatz basiert auf einer Energiehypothese sowie auf empirischen Grundlagen und geht dabei im Kern von folgender Annahme aus. Die in einem Ermüdungsprozess

aufzubringende Arbeit, die erforderlich ist, um einen bestimmten Schädigungszustand im Material zu erreichen, entspricht genau der Arbeit, die durch eine monotone Beanspruchung aufgewendet werden muss, um den gleichen Schädigungszustand herzustellen (sinngemäß zitiert nach [PFANNER 2002]). Das Grundprinzip ist schematisch in *Abbildung 3.31 rechts* dargestellt. Motiviert wird diese Hypothese durch die Ergebnisse von [SPOONER & DOUGILL 1975] aus Untersuchungen des niederzyklischen Verhaltens von Beton mit Hilfe von Schallemissionsmessungen. Das von Pfanner entwickelte Materialmodell ist an das von [PÖLLING 2000] für monotone Beanspruchungen entwickelte Materialmodell angelehnt. Es ist für einaxiale Beanspruchungen abgeleitet, berücksichtigt die ermüdungsbedingte Degradation der Materialeigenschaften in Form von Steifigkeits- und Festigkeitsreduzierungen und ist für niederzyklische sowie hochzyklische Beanspruchungen geeignet. Unberücksichtigt bleiben allerdings zeitabhängige Verformungsanteile wie das Kriechen. Von Nachteil ist außerdem die Abhängigkeit von der Beton-Arbeitslinie im Nachbruchbereich, wo die Streuungen prinzipiell größer, aber die Basis an Daten deutlich geringer ist. Des Weiteren ist der direkte Vergleich von kurzzeitigem statischen Verhalten mit zyklischem Langzeitverhalten kritisch zu betrachten. Eine belastbare experimentelle Validierung dieses Ansatzes steht bisher noch aus. Prinzipiell handelt es sich aber um einen vielversprechenden Ansatz, da er auf einer energiebasierten allgemeingültigen Erfassung des Ermüdungsvorgangs begründet ist. Für einen Überblick zu Modellierungen sowie weiterführende Informationen speziell zur Kontinuumsmechanik mit Bezug zur Schädigung und Ermüdung sei z. B. auf [LEMAITRE 1992], [VAN MIER 1997], [DE BORST 2002], [LEMAITRE & DESMORAT 2005] und [DESMORAT 2006] verwiesen.

Die Anwendung von Modellierungen auf der Mesoebene zur Abbildung des Ermüdungsvorgangs in Beton ist noch relativ jung. Die Modellierung der heterogenen Gefügestruktur des Betons nicht als homogenisiertes Kontinuum, sondern als mehrphasige heterogene Struktur in Form von Mesomodellierungen, hat sich generell erst in den letzten ca. drei Jahrzehnten entwickelt. Beispielhaft seien hierfür die Arbeiten von [SCHLANGEN & VAN MIER 1992], [ROELFSTRA, SADOUHI ET AL. 1985] und [BAZANT, TABBARA ET AL. 1990] genannt. Eine Möglichkeit, die existierenden Modellansätze zu unterteilen, ist die Unterscheidung nach Kontinuumsmodellen, diskreten Modellen sowie Kombinationen aus beiden [GRASSL & REMPLING 2008; ECKARDT 2009]. Die Lattice-Modelle können in diesem Zusammenhang wohl eher letzterer Kategorie zugeordnet werden. Grundlage für die Modellierung ist in der Regel die Erzeugung einer meist zufälligen Kornanordnung von entsprechend abgestuften Kornmengen (die Gefügegeometrie), zum Beispiel in Anlehnung an eine Sieblinie. Diese Gefügegeometrie wird anschließend vernetzt bzw. elementiert. Den einzelnen Elementen werden dann entsprechend dem jeweiligen Material (Zuschlag, Zementstein bzw. Zementmörtel und ITZ) verschiedene Materialeigenschaften zugewiesen. Da es sich bei der Simulation zyklischer Prozesse um besonders lange und komplexe Berechnungsvorgänge handelt, wurden bisher fast ausschließlich zweidimensionale und relativ kleine Ausschnitte auf Materialebene betrachtet. Des Weiteren beschränken sich die Simulationen zumeist auf nur sehr wenige Lastzyklen, so dass bisher überwiegend nur niederzyklische Ermüdungsvorgänge simuliert werden konnten. Deshalb wurden derartige Modellierungen in der Vergangenheit vorrangig zur Simulation von monotonen Beanspruchungssituationen eingesetzt. Weiterführende Informationen bzw. einen Überblick zu Modellierungen auf der Mesoebene finden sich z. B. in der Literatur in [WANG, KWAN ET AL. 1999], [HÄFNER, ECKARDT ET AL. 2006], [WRIGGERS & MOFTAH 2006], [ECKARDT 2009] oder [UNGER & ECKARDT 2011]. Nachfolgend werden einige ausgewählte Modellansätze kurz vorgestellt.

Einen diskreten Ansatz in Form eines Rigid Body-Spring Modells verwenden [NAGAI & MATSUMOTO 2010]. Ihr Modell besteht aus Polyeder-Elementen, die über Federn verknüpft

sind, welche Entfestigung bzw. Plastizität zeigen können. Der verwendete Ansatz basiert auf Entwicklungen von [MATSUMOTO, SATO ET AL. 2008]. Dem Modell liegt ein Grundkonzept zugrunde, bei dem die Gesamtverformungen des Zementmörtels in elastische, visko-elastische, visko-plastische und Rissanteile unterteilt werden. Sie simulieren damit zyklische Druck- und Zugbeanspruchungen an einem zweidimensionalen Zementmörtelmodell. Die Simulationen geben die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Hysteresen wieder, in denen auch eine Veränderung der Steifigkeit sowie der Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve abgebildet wird. Allerdings wurden nur niederzyklische Berechnungen durchgeführt. Große Zuschläge sind im ihrem Mesomodell nicht berücksichtigt worden.

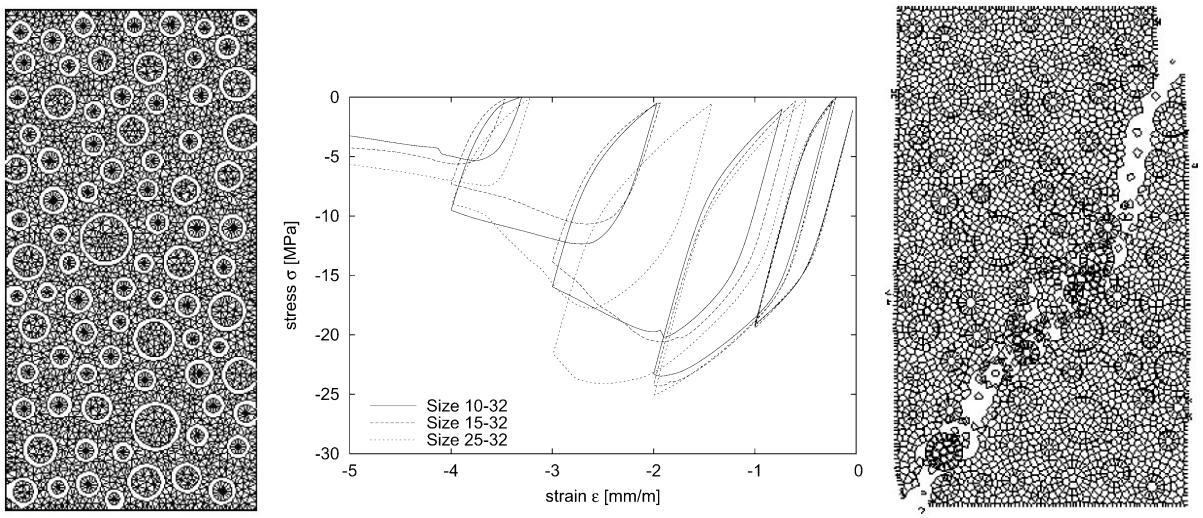

Abbildung 3.32: *Aus [REMPLING & GRASSL 2008], vernetztes Mesomodell mit Lattice-Elementen (links), simulierte niederzyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve verschiedener Korngrößen (Mitte) und statische Bruchfigur eines Lattice-Modells (rechts)*

[REMPLING & GRASSL 2008] gehen bei der Modellierung einen anderen Weg. Sie bilden den Beton zwar auch zweidimensional ab, aber als 3-Phasengemisch aus Zuschlag, Zementmörtel und ITZ. Zur Diskretisierung der verschiedenen Phasen wird ein spezielles Lattice-Modell verwendet. Dazu wird der Materialbereich über Voronoi-Diagramme in Polygone zerlegt, deren Mittelpunkte über Fachwerkstäbe verbunden werden. Inelastische Verformungen werden dabei über ein in [GRASSL & REMPLING 2008] entwickeltes Interface-Modell realisiert. Dazu werden Schädigungsmechanik und Plastizitätstheorie miteinander kombiniert. Angewendet wird dies nur auf den Zementmörtel und die ITZ, der Zuschlag bleibt wie bei den meisten Modellierungen rein elastisch. Simuliert wurden zweidimensionale Materialproben unter statischer und niederzyklischer Druckbeanspruchung, wobei nur sehr wenige Zyklen bei hoher Last abgebildet wurden. Für verschiedene Zuschlagsverteilungen und Diskretisierungen wurden so die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Hysteresen mit Veränderung der Steifigkeit berechnet. *Abbildung 3.32* zeigt die Diskretisierung, die Hysteresenverläufe sowie eine statische Bruchfigur. Es ist zu sehen, dass die Hysteresenverläufe das reale Materialverhalten noch sehr vereinfacht abbilden.

In [GUO, CARPINTERI ET AL. 2009] wird ebenfalls ein Lattice-Modell zur Diskretisierung verwendet, hier aber zur Simulation von zyklischer Biegebeanspruchung. Abgebildet wird ein 4-Punkt-Biegeversuch an hochfestem Beton, auch als zweidimensionale vereinfachte Form. Die Besonderheit bei diesen Modellen ist, dass die Gefügestruktur digital von realen Probe-

körpern aufgenommen und für die Diskretisierung verwendet werden. Aus Gründen der Effizienz wird jedoch nur der mittlere Bereich mit dem konstanten Biegemoment auf Mesoebene modelliert, der Rest wird vereinfacht als Kontinuum betrachtet. In der Mesomodellierung werden Zuschläge, Zementmörtel, Poren und die ITZ abgebildet. Die Zuschläge bleiben auch hier elastisch, während der Rest geschädigt werden kann. Dafür wird eine Ermüdungs-Schädigungs-Funktion aufgestellt, mit der die Schädigung, sprich die Steifigkeitsreduzierung, der Zementmörtel- und ITZ-Elemente beschrieben wird. Da auch hohe Lastzyklenzahlen simuliert werden sollen, werden im Modell ganze Zyklenblöcke simuliert. Das heißt, ein numerisch simulierter Zyklus entspricht in der Realität einem Block von zum Beispiel 10.000 Lastzyklen. In [GUO, CARPINTERI ET AL. 2009] und [GUO, CARPINTERI ET AL. 2010] wurden mit dieser Methode Bruchlastzyklen im Bereich von 10^4 und 10^6 simuliert, sowie die unter Zug entstehende Rissentwicklung und die zugehörige Verformungsentwicklung. Überraschend ist die gute Übereinstimmung von ihren eigenen experimentellen Ergebnissen und den numerisch ermittelten Bruchlastzyklen, die in [GUO, CARPINTERI ET AL. 2009] und [GUO, CARPINTERI ET AL. 2010] vorgestellt werden. Die Simulation von Zug- bzw. Biegebeanspruchung ist allerdings aufgrund der sehr stark lokalisierten Schädigungs- und Bruchzone weniger komplex als dies unter Druckbeanspruchungen der Fall ist.

3.5 Schlussfolgerungen zum Stand der Erkenntnisse

Die Auswertung der verfügbaren Literatur zeigt, dass es beim Beton zum Thema der Ermüdung sowohl beim Verständnis des Ermüdungsverhaltens als auch bei der zugehörigen Modellbildung teils erhebliche Lücken im aktuellen Stand der Erkenntnisse gibt. Zur Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchungen lassen sich aus den vorangegangenen Kapiteln im Hinblick auf den Ermüdungsvorgang sowie die zugehörigen Modellansätze die nachfolgenden Schlussfolgerungen zusammenfassen.

Ermüdungsvorgang

Trotz einer mittlerweile relativ langen Geschichte in der Untersuchung der Ermüdung von Beton und einer Vielzahl an entstandenen Arbeiten, die sich auch mit dem Ermüdungsvorgang im Beton befasst haben, sind die eigentlichen, während des Ermüdungsprozesses im Materialgefüge ablaufenden, Vorgänge nach wie vor weitestgehend ungeklärt. Allerdings muss an dieser Stelle aufgrund der unterschiedlichen Vorgänge zwischen der Ermüdung unter Zug- und unter Druckbeanspruchungen differenziert werden. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen unter Druckbeanspruchungen hat es jedoch bisher kaum Arbeiten gegeben, die ihren Fokus vollständig auf den Ermüdungsvorgang an sich ausgerichtet hatten. Die Schwerpunkte haben in der Vergangenheit eher auf der Ermüdungsfestigkeit und der Schädigungsakkumulation gelegen. Zum Ermüdungsvorgang selbst sind daher nur relativ wenige Ergebnisse, vorwiegend aus makroskopischen Betrachtungen vorhanden. Vor diesem Hintergrund fehlt es vor allem an Ergebnissen aus systematischen Untersuchungen unter Zuhilfenahme verschiedenster Mess- und Untersuchungsmethoden, um sowohl makroskopische als auch meso- bzw. mikroskopische Vorgänge beleuchten und verknüpfen zu können. In diesem Zusammenhang ist auch nach wie vor nicht wirklich geklärt, was Schädigung im Beton eigentlich konkret darstellt und wie diese fundiert beschrieben bzw. definiert werden kann.

Modellansätze zum Ermüdungsvorgang

Im Bezug auf die modellhafte Abbildung des Materialverhaltens lässt sich sagen, dass bis heute eine relative große Bandbreite an Modellansätzen entwickelt wurde, die sich der Ermü-

dung des Betons widmet. Dies schließt Ansätze zur Ermüdungsfestigkeit, zur Schädigungsakkumulation und auch zum Schädigungsvorgang mit ein, wobei die jeweiligen Herangehensweisen zum Teil sehr verschieden sind. Da allerdings, wie beschrieben, bis heute das Wissen über die genauen Vorgänge bzw. die physikalischen Prozesse, die während der Ermüdung im Materialgefüge ablaufen, sehr begrenzt ist, fehlt die Grundlage, um Modelle zu entwickeln, die diese Vorgänge geschlossen und realitätsnah abbilden können. Deshalb sind die existierenden Modelle weitestgehend phänomenologisch begründet und weniger auf den physikalischen Vorgängen, was sie in ihrer Gültigkeit und Anwendbarkeit prinzipiell stark einschränkt.

Ein besonderes Augenmerk wird hier auf die Mesomodellierungen gelegt, die ein großes Potential erkennen lassen. Da sie die tatsächliche Heterogenität des Betons bis zu einer bestimmten Ebene mit abbilden, sind sie in der Lage, die physikalischen Vorgänge im Gefüge am besten zu erfassen. Sie ermöglichen es außerdem, statistisch abgesicherte Ergebnisse zu gewinnen, auch im Bezug auf die Einflüsse einzelner Materialparameter des Betons auf sein resultierendes Verhalten. Auf dieser Grundlage können letztlich auch Optimierungen für Betone speziell auf die jeweiligen Beanspruchungen abgeleitet werden. Bei den hier vorgestellten Lattice-Modellen zeigt sich zwar aktuell das scheinbar leistungsfähigste Verhalten, allerdings ist kritisch zu betrachten, dass sie weniger auf den physikalischen Vorgängen im Material basieren, sondern vielmehr ein Ersatzsystem schaffen. Die Modellparameter stehen dabei kaum im Bezug zu den mechanischen Eigenschaften des tatsächlichen Materials. Dies ist bei den kontinuumsmechanischen Mesomodellen anders. Sie versuchen, die physikalischen Vorgänge im Material weitestgehend in dem Modell mit abzubilden, so dass auch ein Bezug zwischen Modellparametern und echten Materialeigenschaften besteht. Ihr prinzipbedingter höherer Rechenaufwand schränkt ihren Einsatz allerdings derzeit noch stark ein, was besonders für zyklische Simulationen bei Beton zutrifft.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsverhalten von Beton

In diesem Kapitel werden die eigenen durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Sie stellen zusammen mit den im anschließenden Kapitel 5 durchgeführten Analysen und Vergleichen der gewonnenen Versuchsergebnisse den Hauptbestandteil dieser Arbeit dar. Zugleich bilden sie die Grundlage für die im Kapitel 6 abgeleitete Beschreibung zum Ermüdungsvorgang in Beton sowie für den vorgestellten Ansatz zur Abbildung der beobachteten Schädigungsentwicklungen. Dabei werden in einem ersten Schritt alle den durchgeführten Versuchen zugrunde liegenden Zielstellungen und Versuchskonzeptionen dargestellt. Anschließend folgt eine detaillierte Vorstellung aller verwendeten Probenmaterialien sowie der eingesetzten Versuchs- und Messtechniken. Im letzten Teil des Kapitels werden schließlich alle Versuchsreihen einzeln vorgestellt und die wesentlichen Aspekte zu deren Durchführung wiedergegeben, bevor darauf aufbauend im nachfolgenden Kapitel 5 die Analyse der so gewonnenen Ergebnisse beginnen kann.

4.1 Zielstellung, Versuchskonzepte und Versuchsprogramm

4.1.1 Zielstellung der Versuche

Das Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Versuche ist es in erster Linie, mit Hilfe von entsprechenden experimentellen Untersuchungen Antworten auf die in Kapitel 1.2 genannten Fragestellungen zu finden, oder zumindest die notwendigen Grundlagen für deren Beantwortung zu schaffen.

Das Hauptaugenmerk der durchgeführten Versuche liegt dabei auf der Untersuchung des auf der Materialebene im Beton ablaufenden Schädigungsprozesses infolge von hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen. Darüber hinaus werden aber auch die Auswirkungen einiger Einflussfaktoren auf das beobachtete Ermüdungsverhalten betrachtet. Auf Grundlage der daraus gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wird anschließend in Kapitel 6 schließlich eine mögliche Beschreibung der im Material ablaufenden Schädigungsevolution abgeleitet.

Eine grafische Veranschaulichung der wesentlichen Zielstellungen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen sowie auch der auf ihnen basierenden weitergehenden Betrachtungen liefert die nachstehende *Abbildung 4.1*.

- Experimentelle Untersuchungen der Schädigungsevolution (Kapitel 4/5)

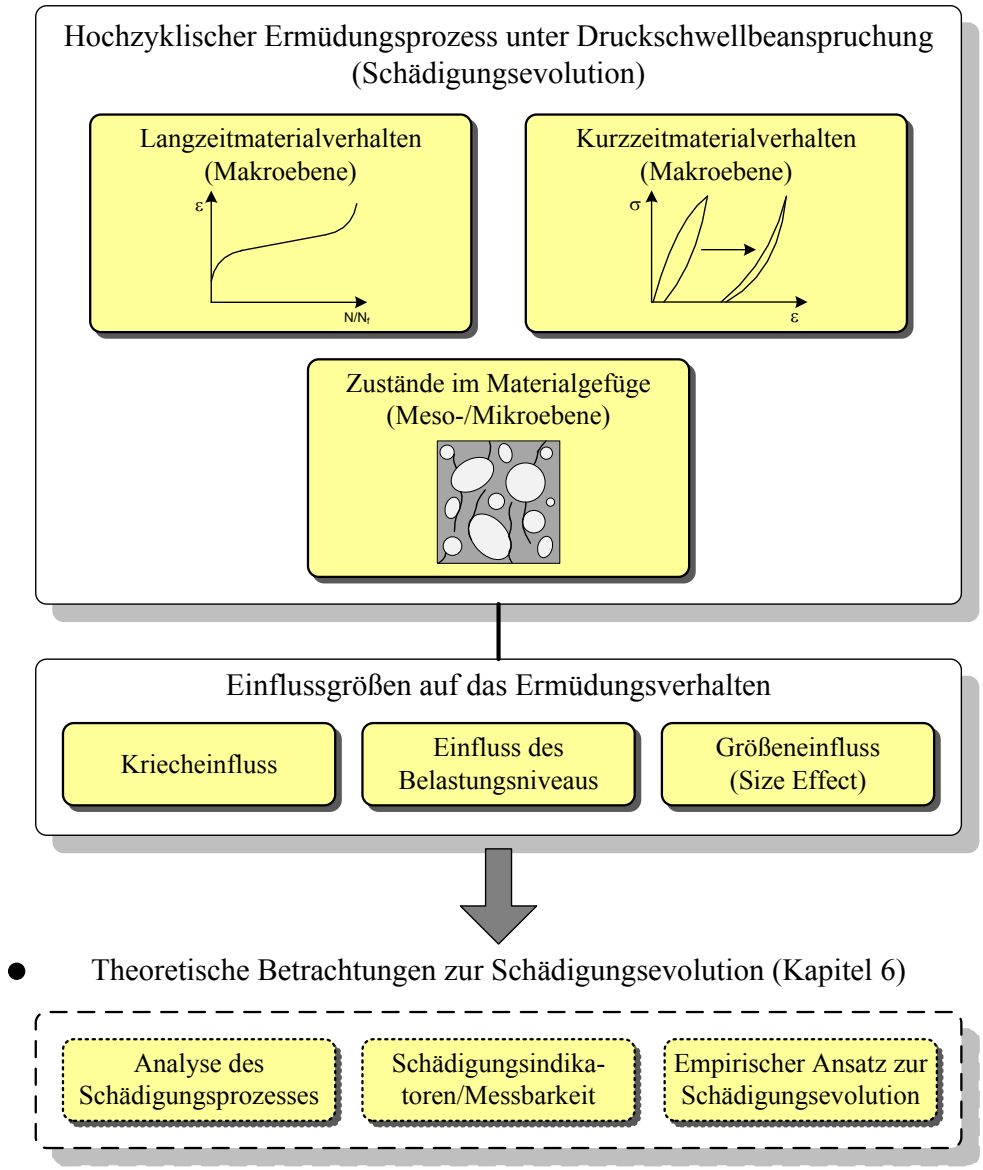

Abbildung 4.1: *Zielstellungen und Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen und der theoretischen Betrachtungen*

Damit entsprechend den aufgestellten Zielstellungen auch die zugehörigen Antworten gefunden bzw. hergeleitet werden können, sind prinzipiell die nachfolgend genannten experimentellen Untersuchungen erforderlich. Das daraus abgeleitete Versuchsprogramm wird anschließend im Kapitel 4.1.2 vorgestellt.

Als Grundlage für alle anderen durchzuführenden experimentellen Prüfungen wurden als erstes das statische Verhalten und die zugehörigen Eigenschaften des untersuchten Betons ermittelt.

Den Kern der Arbeit bildet die experimentelle Untersuchung des hochzyklischen Ermüdungsverhaltens, mit dem Ziel, einen tieferen Einblick in den Schädigungsvorgang innerhalb des Betons zu erhalten. Hierzu wurden umfangreiche hochzyklische einstufige Dauerschwingversuche an Betonproben durchgeführt, entsprechend den in Kapitel 2 vorgestellten Wöhlerver-

suchen. Unter Zuhilfenahme verschiedener zerstörungsfreier (ZfP) und zerstörender Untersuchungsmethoden (ZP) sollte dabei sowohl auf der Makro- als auch auf der Meso/Mikroebene festgestellt werden, welche Veränderungen im Material hervorgerufen werden und vor allem wie sich diese Veränderungen zeitlich während des Ermüdungsvorgangs entwickeln. Damit soll für den Evolutionsprozess der im Material stattfindenden Schädigung eine Erklärungs- und Beschreibungsbasis geliefert werden. Die grundsätzliche Konzeption der dafür angesetzten Versuche ist schematisch in der folgenden *Abbildung 4.2* veranschaulicht.

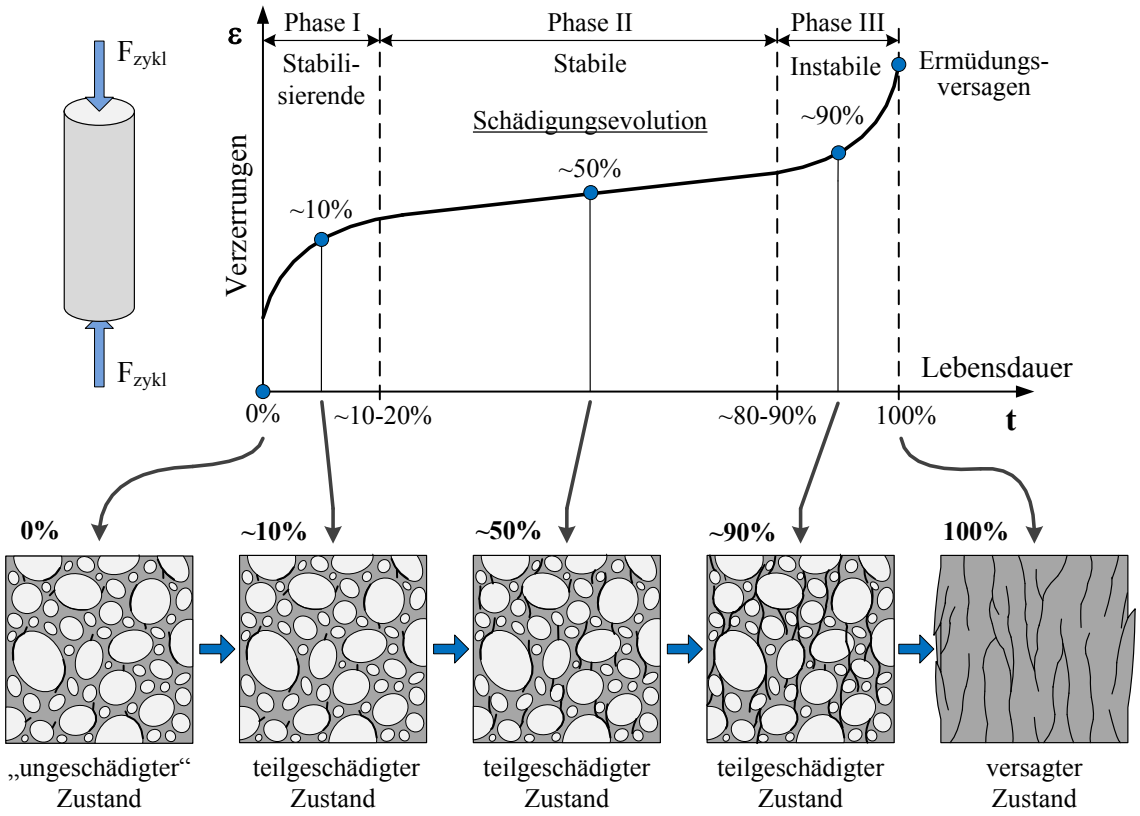

Abbildung 4.2: *Veranschaulichung der Konzeption zu den hochzyklischen Ermüdungsversuchen*

Um auch eine Betrachtung der sich tatsächlich im Materialgefüge einstellenden Veränderungen zu ermöglichen bzw. deren Auswirkungen auf das gesamte Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons zu ermitteln, reichen einfache Dauerschwingversuche, die bis zum Ermüdungsversagen gefahren werden, nicht aus. Deshalb wurden zusätzlich gezielt verschiedene Schädigungszustände erzeugt, damit diese entsprechenden Untersuchungen unterzogen werden konnten. Darüber hinaus ist auch der „ungeschädigte“ Ausgangszustand in Untersuchungen mit einbezogen worden, um so ein möglichst durchgängiges Bild vom Ermüdungsprozess zu erhalten.

Für einen Vergleich, ob der im Fokus liegende hochzyklische Ermüdungsvorgang Gemeinsamkeiten oder Unterschiede zu demjenigen auf anderen Belastungsniveaus aufweist, wurden ergänzend einstufige Dauerschwingversuche im unteren hochzyklischen Bereich durchgeführt. Sie ermöglichen es, die Übertragbarkeit der gemachten Beobachtungen im oberen hochzyklischen Bereich auf den unteren hochzyklischen Bereich zu bewerten und bieten zusätzlich Unterstützung bzw. Hilfestellung bei der Interpretation der erhaltenen hochzyklischen Versuchsergebnisse.

Andauernde Druckbeanspruchungen, wie sie auch bei den durchgeführten hochzyklischen Ermüdungsversuchen im Druckschwellbereich auftreten, sind immer auch von Kriecheffekten begleitet. Damit der Einfluss des Kriechverhaltens auf den Ermüdungsvorgang abgeschätzt werden kann, wurden entsprechende Kriechversuche durchgeführt. Diese sollten einen zu den hochzyklischen Ermüdungsversuchen vergleichbaren Kriechanteil liefern, um festzustellen, welche Veränderungen damit im Materialverhalten verbunden sind.

Aus der Literatur ist bekannt, dass das zu beobachtende Verhalten von Prüfkörpern nicht nur vom Material allein bestimmt wird, sondern zusätzlich auch durch die Dimension des betreffenden Prüfkörpers beeinflusst wird. Dabei handelt es sich um den sogenannten Größeneinfluss, oder auch "Size Effect" genannt, der z.B. in [BAZANT 2000] thematisiert ist. Der Einfluss der Probengröße lässt sich nur mit vergleichbaren Versuchen aber skalierten Proben erreichen. Da die zuvor beschriebenen Betrachtungen alle an Probekörpern der gleichen Form und Dimension vorgenommen wurden, haben in kleinem Umfang Untersuchungen an nach oben skalierten Probekörpern stattgefunden. Das Ziel war dabei, zumindest einen Hinweis darauf zu bekommen, inwiefern die an den kleinen Probekörpern gemachten Beobachtungen auch auf größere Probengrößen übertragbar sind bzw. inwieweit die Probengröße einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Neben der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an sich, erlauben die verschiedenen durchgeführten Versuche auch eine Verifizierung und Bewertung der unterschiedlichen hier eingesetzten Untersuchungs- und Prüfmethoden hinsichtlich ihrer Eignung sowie Qualität. Dies ist ebenso wie die Ableitung einer Beschreibung des Ermüdungsprozesses Bestandteil von Kapitel 6.

4.1.2 Versuchsprogramm

Auf Grundlage der zuvor genannten Zielstellungen und der damit verbundenen erforderlichen experimentellen Untersuchungen wurden fünf Versuchsreihen konzipiert und durchgeführt. Einen Überblick über die Versuchsreihen gibt die nachfolgende *Abbildung 4.3*.

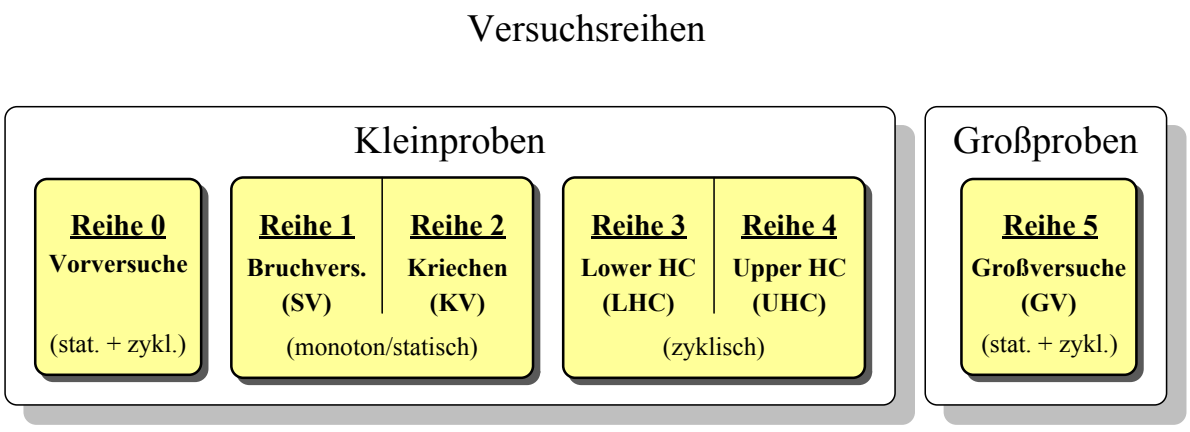

Abbildung 4.3: *Überblick zu den einzelnen durchgeführten Versuchsreihen*

Diese fünf Versuchsreihen unterteilen sich selbst wiederum in einzelne Versuchsserien. Deren Umfänge sowie die ihnen zugrunde liegende Konzeption werden im Folgenden näher vorgestellt und erläutert.

Die Versuchsreihe 0 stellt im Wesentlichen Vorversuche dar, die aus diversen statischen, niederzyklischen und auch hochzyklischen Versuchen an den ausgewählten Probekörpern bestanden. Ihr Zweck war es zum einen passende Lastniveaus für die Ermüdungsversuche im unteren und oberen hochzyklischen Bereich zu bestimmen, damit die angestrebten Zyklenbereiche von 10^3 bzw. 10^6 erreicht werden konnten. Zum anderen dienten sie dazu, um Lastprogramme zu optimieren, Messtechniken zu testen sowie auch die Funktion dieser beiden in Verbindung miteinander herzustellen und zu prüfen. Auf eine genauere Beschreibung und Darstellung dieser Vorversuche wird aber im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da sie zum eigentlichen Thema nicht beitragen.

Innerhalb der für die Arbeit relevanten Versuchsreihen 1 bis 5 wurden diverse Mess- und Untersuchungsmethoden verwendet, für deren ausführliche Beschreibung und Erläuterung auf Kapitel 4.3 verwiesen wird. Um eine übersichtliche Beschreibung des Versuchsprogramms zu ermöglichen, sollen an dieser Stelle jedoch bereits einige Begrifflichkeiten kurz vorgestellt werden. Zur Anwendung kamen während der Versuche die Messung von Ultraschall-Laufzeiten (US) sowie die von Schallemissionen (SE). Weiterhin wurden verschiedene Verformungen gemessen, im Wesentlichen die der Gesamtprobe als Druckplattenabstand (DPA), die an der Probe selbst als Dehnung ε_P und die flächige Oberflächenverformung mit dem System ARAMIS. Außerdem gab es mikroskopische Untersuchungen an Probenschnittflächen (Mikroskopie) sowie auch im Rasterelektronenmikroskop (REM).

Statische Versuche (Versuchsreihe 1 - SV)

Das Verhalten des Betons und der Probekörper unter monotonen bzw. statischen Beanspruchungen ist Bestandteil der Untersuchungen der Versuchsreihe 1. Die Versuchsreihe untergliedert sich in mehrere Versuchsserien, welche jeweils zur Untersuchung bestimmter Materialeigenschaften oder bestimmten Materialverhaltens dienen. Eine Übersicht zu diesen Versuchsserien gibt die *Tabelle 4.1* wieder.

Tabelle 4.1: *Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der statischen Versuchsreihe*

Versuchstyp (Serie)	*Messungen*	*Versuchsanzahl*
Weggeregelt		
SV-S1 (Arbeitslinien)	DPA/ε_P	10
SV-S2 (Arbeitslinien)	DPA/ε_P/US/SEA	6
SV-S3 (Bruchdehnungen)	DPA/ε_P	4
Kraftgeregelt		
SV-S4 (Festigkeiten)	-	54
SV-S5 (Festigkeiten)	DPA/US/SEA	28

Mit der Serie SV-S1 und SV-S2 wurde in erster Linie die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des verwendeten Betons sowie der verwendeten Probekörper im Druckbereich ermittelt. Dazu wurden weggeregelte Druckversuche durchgeführt, in denen neben dem erforderlichen Druckplattenabstand auch zusätzlich die Verformungen an der Probe selbst gemessen wurden. Außerdem fanden in einigen Versuchen auch begleitende Messungen der Ultraschalllaufzeiten sowie der Schallemissionen statt. Die verwendete Verformungsgeschwindigkeit betrug $\dot{\varepsilon} = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$ 1/s und wurde zuvor in genormten Versuchen zur Bestimmung des E-Moduls bei

$\dot{\sigma} = 0{,}5$ N/mm² · s als sich einstellende Dehnungsrate ermittelt. In der Serie SV-S3 wurden in gleicher Weise monoton weggeregelte Druckversuche durchgeführt, jedoch mit dem Ziel, die Verformungsanteile im Moment beim Erreichen der Maximallast zu bestimmen. Durch eine wiederholte Belastung dieser Proben konnte auch das sich dabei verändernde Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Vorbruchbereich dieser Proben ermittelt werden.

Ein wesentlicher Bestandteil der statischen Versuchsreihe bestand aber in der Ermittlung der aktuellen Festigkeiten der Probekörper durch kraftgeregelte Druckversuche. Die eingesetzte Belastungsrate betrug $\dot{\sigma} = 0{,}5$ N/mm² · s. Da diese Festigkeitswerte der Bezugswert für die Auslegung der Lasten in den zyklischen Ermüdungsversuchen darstellen und die Ermüdungsversuche selbst über einen größeren Zeitraum verteilt stattfanden, mussten begleitend zu diesen in regelmäßigen Abständen die aktuellen Festigkeiten der Probekörper bestimmt werden. Einige dieser Versuche wurden zusätzlich mit Messungen begleitet, um auch für den monotonen kraftgeregelten Beanspruchungsfall die Verformungsentwicklung, die Schallemissionen sowie die Ultraschall-Laufzeiten als Vergleichsbasis zu den zyklischen Versuchen zu erhalten.

Kriechversuche (Versuchsreihe 2 - KV)

Im Rahmen der Kriechuntersuchungen wurden vier Proben einer Druckbeanspruchung ausgesetzt, um das Material- bzw. Probenverhalten unter monotoner Dauerlast zu bestimmen, das als ein Bestandteil des Verhaltens unter zyklischer Druckbeanspruchung angesehen werden kann. Hierzu wurde eine Dauerlast von $0{,}55 \cdot f_c$ aufgebracht, die der Mittellast in den hochzyklischen Ermüdungsversuchen entspricht, um so näherungsweise den zugehörigen Kriechanteil zu ermitteln. Da aus technischen Gründen zu diesem Zeitpunkt kein typischer Kriechstand für viele Probekörper zur Verfügung stand, erfolgte die Prüfung unter einem „normalen“ Prüfzylinder einer Prüfmaschine. Daher konnten nur vier Proben geprüft werden, dafür aber mit einem flexiblen Prüfprogramm. Dieses ermöglichte durch den Einsatz von Lastrampen die Ermittlung der Verformungsentwicklung auf verschiedenen Lastniveaus sowie die Bestimmung von zwei verschiedenen Steifigkeitsentwicklungen, die so auch in den hochzyklischen Ermüdungsversuchen ermittelt wurden.

Tabelle 4.2: *Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der Kriechversuche*

Versuchstyp (Serie)	*Messungen*	*Versuchsanzahl*	*Dauer*
KV-S1 (Kriechversuch)	ε_P/Temp./rel. Luftfeuchte	4	ca. 2 Wo.
KV-S2 (Nachprüfung von S1)	ε_P	4	-

Die Dauer der Kriechversuche war durch den Einsatz dieser einen Prüfmaschine auf ca. zwei Wochen je Versuch begrenzt, womit jedoch die Laufzeit fast aller hochzyklischen Ermüdungsversuche abgedeckt werden konnte. Im Anschluss an die Kriechversuche erfolgte in der Serie KV-S2 die Nachprüfung der Proben aus der Serie KV-S1 in Form einer kraftgeregelten Festigkeitsprüfung, die neben der Ermittlung der Festigkeit auch verschiedene Verformungsgrößen sowie Steifigkeiten ermittelte.

Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (Versuchsreihe 3 - LHC)

Die Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (Lower High Cycle – LHC) fanden unter einer sinusförmigen Druckschwellbeanspruchung auf einem Lastniveau statt, das

Bruchlastzyklen in der Größenordnung um 10^3 bis 10^4 Zyklen erreichen ließ. Sie erfolgten unter einer vergleichbaren Belastungs- und Messcharakteristik wie die Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich, so dass damit eine Vergleichsbasis zu den dort gemachten Beobachtungen gegeben war. Die *Tabelle 4.3* gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Tabelle 4.3: *Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der LHC Versuchsreihe 3*

Versuchstyp (Serie)	S_{min} ***[-]***	S_{max} ***[-]***	***Frequenz [Hz]***	***Messungen***	***Versuchsanzahl***
LHC-S1 (100% Nf)	0,425	0,825	5,0	ε_P /US/SEA/ ARAMIS	28
LHC-S2 (50%)	0,425	0,825	5,0	ε_P /SEA/ ARAMIS	3
LHC-S2 (Nachprüfung)	-	-	-	ε_P /SEA	3

Neben der Messung der Verformungen an der Probenoberfläche in allen Versuchen, kamen in ausgewählten Versuchen auch Schallemissionsmessungen (SE), Ultraschall-Laufzeitmessungen (US) sowie die flächige Messung der Oberflächenverformungen (ARAMIS) zum Einsatz. Die Prüffrequenz war in allen zyklischen Versuchen gleich und betrug 5 Hz. Der wesentliche Bestandteil der Versuchsreihe 3 war die Serie LHC-S1, in der die Proben bis zum Ermüdungsversagen, also bis 100 % ihrer Lebensdauer gefahren wurden. Dabei ließ sich der vollständige Ermüdungsvorgang beobachten. Darüber hinaus wurde versucht, einige Proben bis zur Hälfte ihrer Lebensdauer zu fahren, um sie dann einer statischen Nachprüfung zu unterziehen. Als Abbruchkriterium wurde aus der Serie LHC-S1 (100 %) die mittlere Dehnung an der Probe genommen, die sich zur Hälfte der jeweiligen Lebensdauer eingestellt hatte. An drei Proben konnte dies schließlich durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf der experimentellen Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, dass die Entwicklung der Probensteifigkeiten sowie die Schallemissionsaktivität wesentlich besser geeignet sind, um zuverlässig und gezielt bestimmte Lebensdauerzustände anzufahren. Eine darauf basierende Methode kam letztlich auch in den folgenden Versuchen der hochzyklischen Versuchsreihe 4 zum Einsatz.

Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (Versuchsreihe 4 - UHC)

Auch die Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (Upper High Cycle – UHC) fanden alle unter einer sinusförmigen Druckschwellbeanspruchung statt. Es kam auch hier ebenfalls nur ein Lastniveau für alle zyklischen Prüfungen zum Einsatz, welches so gewählt war, dass sich Bruchlastzyklen in der Größenordnung um 10^6 bis 10^7 Zyklen erreichen ließen. Da es derzeit mit zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden nicht möglich ist, versuchsbegleitend die Vorgänge im Materialgefüge, die hier von Interesse sind, zu untersuchen, mussten die Versuche entsprechend konzipiert werden. Um trotzdem eine möglichst genaue Untersuchung der Schädigungsevolution im Material zu ermöglichen, setzte sich daher die hochzyklische Versuchsreihe aus fünf verschiedenen Versuchsserien zusammen, in denen jeweils gezielt ein bestimmter Schädigungsgrad angefahren wurde, um diesen dann auch mit zerstörenden Untersuchungsmethoden zu untersuchen. Die *Abbildung 4.4* veranschaulicht schematisch, welche Lebensdauerzustände mit welchen Versuchsserien erzeugt wurden. Als erstes wurden dabei in der Versuchsserie UHC-S1 Probekörper wie üblich bis zum Ermüdungsversagen gefahren. Mit Hilfe der in diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse war es dann

möglich, auch gezielt bestimmte Schädigungsgrade anzufahren und die Versuche dort zu stoppen.

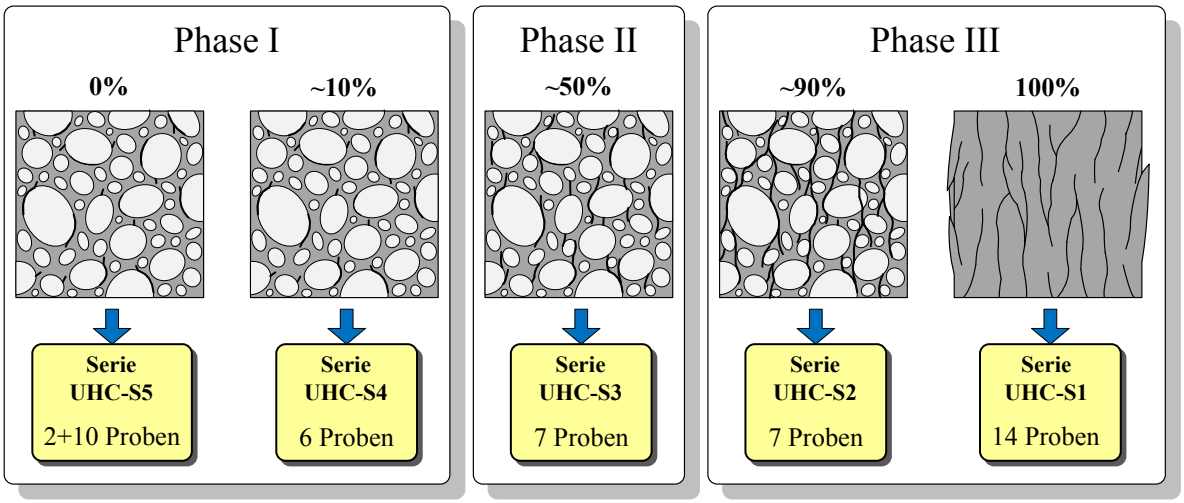

Abbildung 4.4: *Versuchskonzept der einzelnen Versuchsserien der hochzyklischen Ermüdungsversuche der Versuchsreihe 4 mit Schädigungsgraden und Probenzahlen*

Im Einzelnen wurden so drei Schädigungsgrade bzw. Lebensdauerzustände untersucht, die sich jeweils mitten in einer der drei typischen Phasen des Ermüdungsprozesses befanden, um einen Einblick in diese zu bekommen. Hierbei wurden jeweils immer mehrere Probekörper einmal bis ca. 10 % der Lebensdauer in den sich stabilisierenden Anfangsbereich, bis ca. 50 % in die stabile Phase und bis ca. 90 % in die instabile Phase des Ermüdungsprozesses gefahren und so entsprechend zyklisch vorgeschädigt. Ergänzend zu den verschieden zyklisch geschädigten Materialzuständen wurden auch mechanisch völlig unbeanspruchte Probekörper in die Untersuchung mit einbezogen, um so auch den Ausgangszustand des Materials in die Betrachtung zu integrieren. Eine Übersicht über die daraus resultierenden fünf Versuchsserien mit den zugehörigen Messungen und Probenzahlen ist in *Tabelle 4.4* wiedergegeben.

Tabelle 4.4: *Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der UHC Versuchsreihe 4*

Versuchstyp (Serie)	***S_{min} [-]***	***S_{max} [-]***	***Frequenz [Hz]***	***Messungen***	***Versuchsanzahl***
UHC-S1 (100%)	0,35	0,75	5,0	DPA/ε_P /US/ SEA/ARAMIS	14
UHC-S2 (90%)	0,35	0,75	5,0	DPA/ε_P /US/ SEA	7
UHC-S3 (50%)	0,35	0,75	5,0	DPA/ε_P /US/ SEA	7
UHC-S4 (10%)	0,35	0,75	5,0	DPA/ε_P /US/ SEA	6
UHC-S5 (0%)	-	-	-	-	2

Im Anschluss an die Vorschädigung im zyklischen Teil der einzelnen Versuchsserien erfolgte dann im Rahmen der Nachprüfung die zerstörende Untersuchung der jeweiligen Probekörper mittels verschiedener Untersuchungsmethoden. Allein die Probekörper der ungeschädigten Serie UHC-S5 wurden direkt der Nachprüfung unterzogen. Die *Tabelle 4.5* gibt einen Überblick zu den einzelnen Serien der Nachprüfungen mit ihren entsprechenden Methoden und Messungen.

Tabelle 4.5: *Übersicht zu den Versuchsserien der Nachprüfungen für die zuvor zyklisch geprüften Proben*

Versuchsserie	*Nachprüfung*	*Art*	*Messungen*	*Probenanzahl*
UHC-S2 (90%)				
	Arbeitslinie	Weggeregelt	DPA/ε_P /SEA	2
	Mikroskopie	Längs + Quer		2
	REM	Längs		1
UHC-S3 (50%)				
	Arbeitslinie	Weggeregelt	DPA/ε_P /SEA	3
	Mikroskopie	-		2
UHC-S4 (10%)				
	Arbeitslinie	Weggeregelt	DPA/ε_P /SEA	4
	Mikroskopie	Längs + Quer		2
	REM	Längs		1
UHC-S5 (0%)				
	Arbeitslinie	Weggeregelt	DPA/ε_P /SEA	10
	Mikroskopie	Längs + Quer		2
	REM	Längs		1

Im Wesentlichen erfolgten bei den Nachprüfungen drei verschiedene Prüfungen bzw. Untersuchungen. Zum einen wurde für alle Schädigungszustände die vollständige Spannungs-Dehnungs-Beziehung (Arbeitslinie) bestimmt, um die Veränderungen im Materialverhalten aufzuzeigen. Zum anderen sind mikroskopische Untersuchungen an jeweils einem Längs- und einem Querschnitt aus einer Probe vorgenommen worden, damit auch ein Einblick in den Gefügezustand gewonnen werden konnte. Als Ergänzung bzw. weitere Vertiefung dieser Betrachtung wurden Ausschnitte aus drei der Längsschnitte in einem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Versuche an Großproben (Versuchsreihe 5 - GV)

Die Versuche an den Großproben waren soweit wie möglich genauso wie die entsprechenden Versuche an den kleinen Probekörpern konzipiert. Dabei wurden sowohl statische als auch Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich durchgeführt. Aufgrund der wesentlich aufwendigeren Herstellung, Vorbereitung und Prüfung konnte im Rahmen dieser Arbeit nur eine begrenzte Anzahl von Versuchen an großmaßstäblichen Zylindern durchgeführt werden. Zu jedem der großen Probekörper existierten auch immer drei Probekörper der kleinen Größe, die aus derselben Herstellung stammten.

Zur Untersuchung des Verhaltens der Probekörper unter monotonen Beanspruchungen wurden in einer kleinen Versuchsserie mit drei Probekörpern jeweils kraftgeregelte Druckversuche durchgeführt. Hiermit sollten zum einen das Verhalten der großen Probekörper unter statischen bzw. monotonen Beanspruchungen untersucht werden und zum anderen die Festigkeit dieser als Grundlage für die Auslegung der Lastniveaus in den anschließenden zyklischen Versuchen bestimmt werden. Die Belastungsrate betrug dabei $\dot{\sigma} = 0{,}5$ N/mm² · s, wie in den anderen Festigkeitsversuchen an den kleinen Probekörpern auch. *Tabelle 4.6* gibt die Serie GSV-S1 mit ihren zugehörigen Messungen wieder.

Tabelle 4.6: *Übersicht zu den statischen Versuchen GSV an Großprobekörpern*

Versuchstyp (Serie)	***Messungen***	***Versuchsanzahl***
Kraftgeregelt		
GSV-S1 (Festigkeiten)	DPA/ε_P (L+Q)/US/SEA	3

Der Versuchsablauf sowie die Messungen an den Probekörpern entsprachen weitestgehend denen, die in den vergleichbaren Versuchen der Serie SV-S5 an den kleinen Probekörpern vorgenommen wurden. Aufgrund der Besonderheit dieser Versuche sowie der großen Oberflächen kamen hier zusätzlich noch die Messungen der Verformungen in Längs- und Querrichtung an der Probe selbst hinzu.

Jeweils parallel zu den einzelnen Versuchen an den Großproben wurden zum gleichen Zeitpunkt auch die zugehörigen drei kleinen Probekörper einer entsprechenden Festigkeitsprüfung unterzogen. Diese erfolgten im Rahmen der statischen Versuchsreihe 1 und waren dort ein Bestandteil der Versuche von Serie SV-S4, die auszugsweise in *Tabelle 4.7* wiedergegeben sind. Messungen erfolgten an diesen Proben nicht, sie dienten allein dazu, einen Zusammenhang zwischen den Festigkeiten der großen Probekörper und denen der kleinen Probekörper herzustellen, was auch im Hinblick auf die Durchführung der nachfolgenden zyklischen Versuche geschah.

Tabelle 4.7: *Übersicht zu den parallel durchgeführten statischen Versuchen an den zugehörigen kleinen Probekörpern, als Bestandteil der statischen Versuchsreihe SV*

Versuchstyp (Serie)	***Messungen***	***Versuchsanzahl***
Kraftgeregelt		
SV-S4 (Festigkeiten)	-	9

Zyklische Versuche an den Großproben fanden nur im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) statt. Grund dafür war neben der beschränkten Anzahl an Probekörpern, die durch die verwendete Prüfmaschine begrenzte Prüffrequenz von ca. 1 Hz, die sich im Zusammenspiel mit den großen Probekörpern ergab. Aufgebracht wurde auch hier eine sinusförmige Druckschwellbeanspruchung, wobei die Belastungs- und Messcharakteristik weitestgehend denen entsprach, die an den kleinen Probekörpern in der LHC-Versuchsserie LHC-S1 verwendet wurden. Damit sollte eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den Versuchsergebnissen der kleinen und der großen Proben erreicht werden. Aufgrund der erzielten Bruchlastzyklen an den kleinen Proben in der Serie LHC-S1 wurde das Lastniveau für die großen Proben

sicherheitshalber etwas reduziert, um möglichst sicher eine ausreichende Anzahl von Lastzyklen im oberen Bereich von 10^3 zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten zwei zyklische Versuche umgesetzt werden, die in *Tabelle 4.8* aufgeführt sind.

Tabelle 4.8: *Übersicht zu den zyklischen Versuchen an den Großprobekörpern*

Versuchstyp (Serie)	S_{min} ***[-]***	S_{max} ***[-]***	***Frequenz [Hz]***	***Messungen***	***Versuchsanzahl***
GZV-S1 100%	0,40	0,80	1,0	DPA/ε_p (L+Q)/ US/SEA	2

Wie bei den statischen Versuchen entsprachen auch hier der Versuchsablauf und die Messungen im Wesentlichen denen der vergleichbaren Versuche an kleinen Probekörpern der LHC-Versuchsserie LHC-S1. Als einzige zusätzliche Messung erfolgte hier die Aufnahme der Verformungen in Querrichtung auf der Probenoberfläche.

In ähnlicher Weise wie bei den statischen Versuchen der Serie GSV-S1, wurden direkt vor der Prüfung der großen Probe die zugehörigen drei kleinen Probekörper einer Festigkeitsuntersuchung unterzogen. Sie erfolgten ebenfalls im Rahmen der Serie SV-S4 der statischen Versuchsreihe 1 und dienten vorrangig dazu, in Verbindung mit den zuvor bestimmten Festigkeiten der großen Proben in Serie GSV-S1, einen Festigkeitswert als Grundlage für die Auslegung der zyklischen Lasten festzulegen. Auf die Darstellung dieser drei Prüfungen in einer Tabelle wird an dieser Stelle verzichtet.

4.2 Probenmaterial und Probekörper

4.2.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen kam nur eine einzige Mischungsrezeptur zum Einsatz. Dies liegt darin begründet, dass im Rahmen dieser Arbeit der Schädigungsprozess an sich im Fokus stand und weniger das Verhalten bestimmter Betonrezepturen bzw. die Einflüsse aus unterschiedlichen Zusammensetzungen oder aus unterschiedlichen Herstellungsvorgängen. Somit war es möglich, weitgehend vielfältige experimentelle Untersuchungen umzusetzen, die vorrangig auf den Schädigungsvorgang im Beton ausgerichtet waren. Verwendet wurde dabei ein Normalbeton der Güte C40/50 mit einer Rezeptur, die nach [DIN-EN-1766 2000] als C(0,45) geregelt ist, und welcher im Betonlabor der Abteilung 7 der BAM hergestellt und verarbeitet wurde. Die Wahl des Betons erfolgte einerseits aus Gründen der Reproduzierbarkeit und wurde zusätzlich dadurch beeinflusst, dass sich, unter Berücksichtigung der verwendeten Probekörperformen sowie der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine, ein verträgliches Kräfteniveau erreichen ließ. Zum anderen erfolgte die Wahl vor dem Hintergrund, dass es sich bei diesem Beton um einen relativ „weichen“ Beton handelt, bei dem sich entsprechende Verformungen und Phänomene verhältnismäßig signifikant abzeichnen sollten.

Als Betonzuschlag wurde Quarzsand und Quarzkies mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Dieser war nach [DIN1045-2 2008] entsprechend der Sieblinie A/B16 abgestuft und aus 8 Kornfraktionen zusammengesetzt. Das zugehörige Diagramm zur verwendeten Sieblinie findet sich im Anhang A1 in *Abbildung A1 1*.

Bei dem Quarzsand und dem Quarzkies bis 8 mm handelte es sich um runden Elbkies bzw. Elbsand, während die Kornfraktion 8/16 mm aus rundem Rheinkies bestand. Als Bindemittel kam ein CEM I 42,5 R aus dem Werk Rüdersdorf zum Einsatz, und bei dem Zugabewasser handelte es sich um Berliner Leitungswasser. Für die Mischung wurde ein Wasserzementwert w/z von 0,461 eingestellt. Zusätzlich kam noch das Fließmittel Woerment FM21 (FM)/ BV21 (BV) zum Einsatz, womit eine weiche Frischbetonkonsistenz der Konsistenzklasse F3 bis F4 erreicht wurde. Die *Tabelle 4.9* gibt einen Überblick über die genaue Zusammensetzung des gewählten Betons. Verschiedene Vorversuche hatten gezeigt, dass sich mit dieser Betonzusammensetzung brauchbare Verdichtungsergebnisse und damit auch für die Versuche gut nutzbare Probenoberflächen erreichen lassen. Grund dafür ist die hohe Schlankheit der verwendeten Probekörper, die im Vergleich zu den üblichen Würfelformen mit 150 mm Kantenlänge das Erreichen einer vergleichbaren gleichmäßigen Verdichtung und Probenoberfläche erschwert.

Tabelle 4.9: *Mischungszusammensetzung des verwendeten Betons*

Betongüte	***w/z-Wert***	***Wasser***	***Zement***	***Fließmittel***	***Zuschlag [kg/m³] Kornfraktionen***		
	[-]	***[kg/m³]***	***[kg/m³]***	***[kg/m³]***	***0/2***	***2/8***	***8/16***
C40/50	0,461	169	375	5,25	544	581	690

Diese Mischung wurde für alle Proben im Rahmen dieser Arbeit verwendet, sowohl für die kleinen als auch für die großen Probekörper.

4.2.2 Probekörperform

Bei der Wahl der Probekörperform galt es, eine für die geplanten Versuche und deren Zielstellung möglichst geeignete Form auszuwählen. Da das Ziel der Experimente die Untersuchung des Ermüdungsprozesses unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung war, sollte der Probekörper im Versuchsstand zumindest bereichsweise einen annähernd einaxialen Beanspruchungszustand aufweisen. Da sich im Bereich der Lasteinleitungen, die meistens aus Stahl bestehen, ohne den Einsatz besonderer Maßnahmen, wie Bürsten oder Teflonlagen, Zwängungen infolge behinderter Querdehnungen im Randbereich der Probe ausbilden, ist davon auszugehen, das im randnahen Bereich kein ungestörter einaxialer Beanspruchungszustand erreicht wird.

Entsprechende Untersuchungen zu den Einflüssen der Lasteinleitung auf die Beanspruchungen im Randbereich der Probekörper wurden beispielsweise von [VONK 1992], [VAN MIER 1984] und [SCHICKERT & WINKLER 1977] durchgeführt. Daraus resultiert, dass der Probekörper entsprechend lang sein muss, damit sich diese Störungen zur Probenmitte hin abbauen können und sich so in der Probenmitte ein vergleichsweise einaxialer Beanspruchungszustand einstellen kann. Dieses Verhalten ist schematisch in *Abbildung 4.5* veranschaulicht. Die im reinen einaxialen Beanspruchungszustand auftretende Querdehnung wird im randnahen Bereich behindert und kann sich somit erst weiter entfernt vom Rand frei einstellen.

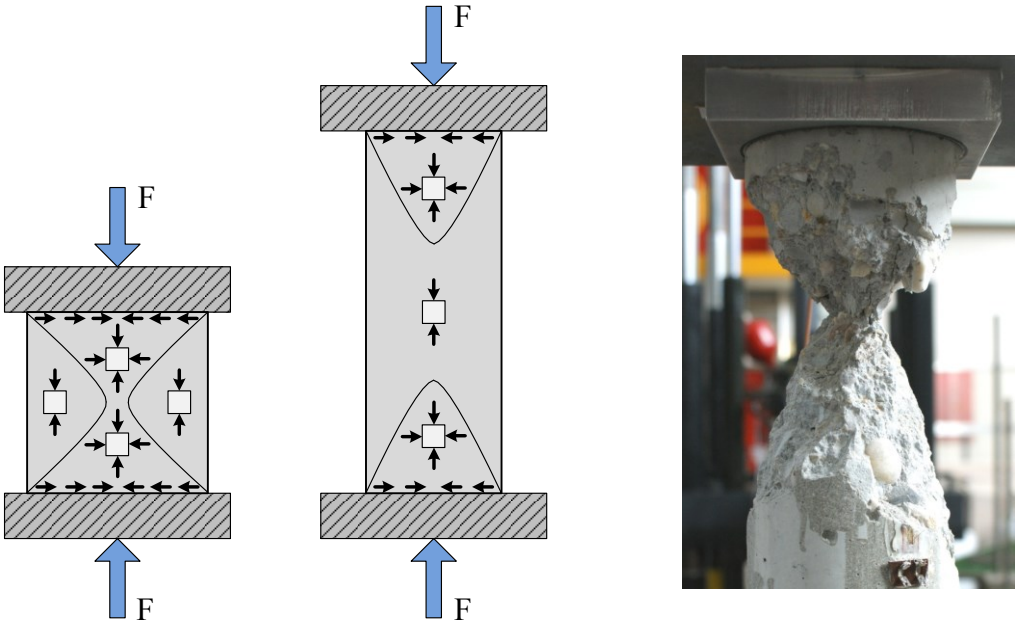

Abbildung 4.5: *Schematische Darstellung der gestörten Randbereiche bei verschiedenen Probenformen (links), sowie Bild eines Bruchs mit Ausbildung des entsprechenden Bruchkegels (rechts).*

Aus diesem Grund wurden Betonzylinder mit einem Verhältnis D/H = 1/3 verwendet, die für den Großteil der Versuche die Abmaße von D = 100 mm und H = 300 mm besaßen. Die Zylinderform als rotationssymmetrischer Körper sorgt ihrerseits für eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung im Querschnitt und wurde daher auch in der Vergangenheit in der überwiegenden Zahl der experimentellen Untersuchungen zur Betonermüdung im Druckbereich verwendet. Beispiele dafür sind [HOHBERG 2004], [HOLMEN 1979], [KIM & KIM 1996], [TUE & MUCHA 2006] oder [TEPFERS & KUTTI 1979]. Darüber hinaus findet sich auch die

konkrete Dimensionierung von 100 x 300 mm in verschiedenen vorangegangenen Arbeiten wieder, wie bei [HOHBERG 2004] oder [TUE & MUCHA 2006]. Die *Abbildung 4.6* zeigt die verwendete Form mit den Abmaßen der kleinen Probekörper sowie zwei beispielhafte Probekörper.

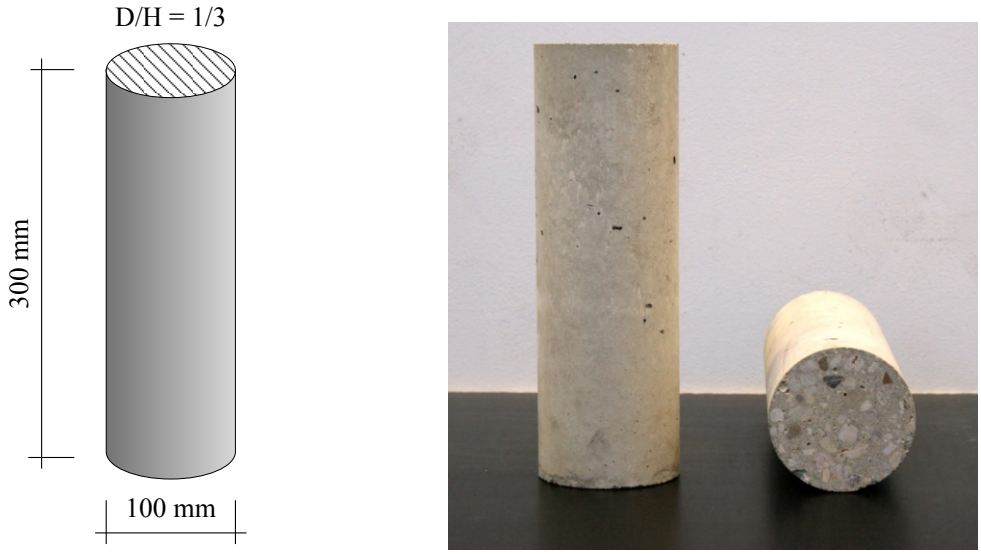

Abbildung 4.6: *Schematische Darstellung der Form und Maße der kleinen Betonzylinder (links) und Bild von kleinen Betonzylindern (rechts)*

Eine weitere Erhöhung der Probenschlankheit über das Verhältnis von D/H = 1/3 hinaus würde allerdings die Realisierung einer möglichst zentralen Lasteinleitung ohne Exzentrizität erschweren, was für die durchgeführten Versuche jedoch eine wichtige Voraussetzung darstellt.

Unter Berücksichtigung des verwendeten Größtkorns von 16 mm in allen Probekörpern bietet der gewählte Probendurchmesser mit 100 mm auch eine ausreichende Größe, um einen repräsentativen Ausschnitt aus dem heterogenen Materialgefüge wiederzugeben. Als Formen kamen bei der Herstellung nahtlose Kunststoffformen mit einer Länge von 310 mm zum Einsatz, so dass für die Probenbearbeitung zusätzliche Länge bereit stand.

Für die Versuche an größeren Probekörpern wurden im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit den „kleinen“ Betonzylindern und mit dem Schwerpunkt auf dem Größeneffekt ebenfalls Zylinder mit dem gleichen Größenverhältnis gewählt. Dabei wurde die Dimension um den Faktor vier vergrößert, so dass sich mit den vorhandenen technischen Möglichkeiten noch handhabbare und auch prüfbare Probekörper erreichen ließen. Sie besaßen einen Durchmesser D = 400 mm und eine Höhe H = 1.200 mm und sind in *Abbildung 4.7* veranschaulicht. Als Form wurden zwei längsöffnende Kunststoffformen für Säulen verwendet, so dass immer zwei große Probekörper zusammen hergestellt werden konnten. Die Formen konnten mehrfach verwendet und auf einer Palette montiert werden.

Zusätzlich zu den eigentlichen Probekörpern in Form von Zylindern erfolgte bei jeder Mischung auch die Herstellung von je drei Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm, um damit begleitend jeweils die 28 Tage Festigkeit zu bestimmen.

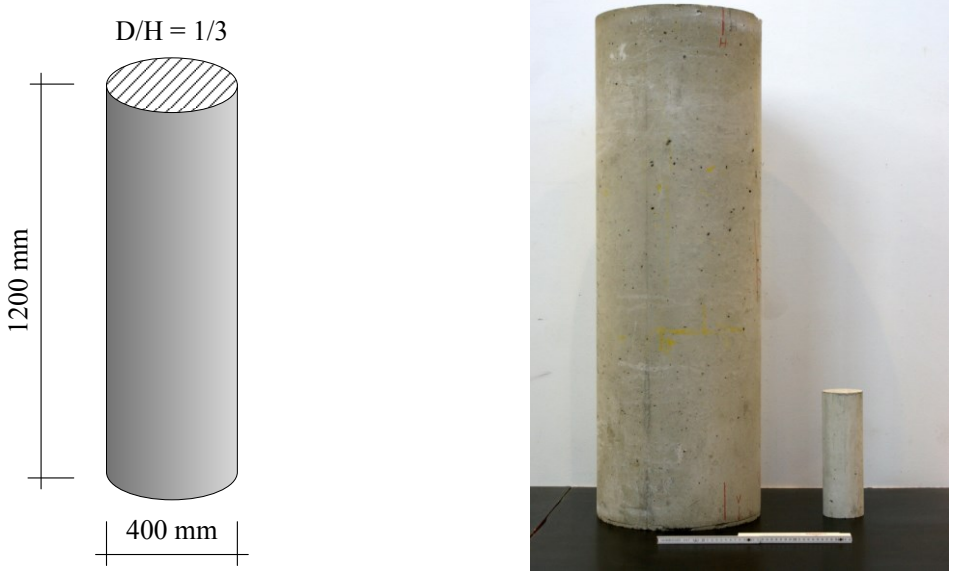

Abbildung 4.7: *Schematische Darstellung der Form und Maße der großen Betonzylinder (links), Bild mit großem und kleinem Betonzylinder (rechts)*

4.2.3 Herstellung und Lagerung

Die Herstellung aller Probekörper erfolgte im Betonlabor der Abteilung 7 der BAM mit Hilfe eines Tellerzwangsmischers der Firma Teka, der eine Kapazität von 250 l besaß (*Abbildung 4.8 links*). Unter zusätzlicher Berücksichtigung der zulässigen Verarbeitungszeit wurde immer die maximal mögliche Anzahl an Probekörpern aus einer Mischung hergestellt, um die Anzahl der einzelnen Mischungen so gering wie möglich zu halten. Für den Mischungsvorgang wurden als erstes alle trockenen Zuschläge in den Mischer eingefüllt. Bei laufendem Mischer erfolgte dann die Zugabe des Zements und des Zugabewassers und zum Schluss des Fließmittels. Die Gesamtmischdauer hat dabei nicht mehr als 4 Minuten betragen. Nach Abschließen des Mischprozesses wurden direkt im Anschluss die Frischbetoneigenschaften der jeweiligen Mischung bestimmt. Hierzu erfolgte nach [DIN-EN-12350 2000] die Ermittlung der Frischbetonrohdichte, des Luftgehaltes sowie der Betonkonsistenz über das Ausbreitmaß.

Abbildung 4.8: *Zur Betonherstellung verwendeter 250l Mischer (links), 51 gefüllte Formen einer Mischung direkt nach der Betonierung (rechts)*

Parallel zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften begann das Einbringen des Betons in die Formen der Probekörper. Insgesamt wurden so 369 kleine Betonzylinder, 51 Betonwürfel und 9 große Betonzylinder hergestellt.

Im Falle der kleinen Betonzylinder wurden mit einer Mischung maximal 52 Zylinder (*Abbildung 4.8 rechts*) sowie drei Würfel hergestellt, was spätestens nach ca. 30 Minuten abgeschlossen war. Das Einbringen des Betons in die Zylinderformen erfolgte in zwei Lagen und in die Würfel mit einer Lage. Während des Einbringens standen die Formen auf einem Rütteltisch mit dem die Würfel ca. 15 Sekunden lang verdichtet wurden. Bei den Zylindern erfolgte eine zweistufige Verdichtung, die bei der ersten Lage 30 Sekunden und bei der zweiten Lage 60 Sekunden dauerte.

Die Nachbehandlung der Probekörper fand entsprechend der [DIN-EN-12390-2 2001] statt. Nach Abschluss des Betoniervorgangs wurden die gefüllten Probenformen zum Schutz gegen Austrocknung mit einer Folie abgedeckt. Die Ausschalung der Proben aus den Formen erfolgte 24 h nach der Herstellung, danach wurden die Proben bis zum 7. Tag im Wasser gelagert. Im Anschluss daran fand das Schleifen der beiden Stirnseiten statt, womit die oberen Mörtelschichten aus der Herstellung entfernt, die Proben auf eine Länge von 300 mm gelängt sowie die Planparallelität der beiden Lasteinleitungsflächen hergestellt wurde. Von da an kamen die Proben zur Lagerung in eine Klimakammer mit 20 °C Lufttemperatur und einer relativen Luftfeuchte von 65 %, wo sie bis zur jeweiligen Prüfung verblieben. Aufgrund der zeitaufwendigen Versuche zogen sich die Prüfungen über einen längeren Zeitraum hin. Im Falle der zyklischen Prüfungen hatten die Proben zum Zeitpunkt des Versuches ein Alter von mindestens 8 Monaten und maximal 3 Jahren, so dass von einem weitestgehend ausgehärteten Beton ausgegangen werden konnte.

Bei den großen Betonzylindern konnte aufgrund der Betonmenge mit einer Mischung immer nur ein großer Zylinder sowie drei Würfel und drei kleine Zylinder hergestellt werden. Das Einbringen des Betons in die kleinen Zylinder sowie die Würfel erfolgte parallel zur Befüllung des großen Zylinders. Der Ablauf entsprach dabei dem bereits zuvor beschriebenen Vorgehen bei der Herstellung der Probenserien mit den kleinen Betonzylindern. In die große Zylinderform wurde der Beton sukzessive per Hand mit kleinen Schaufeln eingebracht und begleitend dazu mit einem Flaschenrüttler verdichtet. Nach Beendigung des Betoniervorgangs wurden auch hier die gefüllten Formen mit einer Folie abgedeckt.

Abbildung 4.9: *Zwei frisch betonierte große Zylinder in ihrer Form (links), Lagerung mehrerer großer Zylinder nach dem Schleifen auf Europaletten.*

Die weitere Behandlung der je drei kleinen Betonzylinder sowie der drei Würfel erfolgte in gleicher Weise wie bei den bereits beschriebenen Serien der kleinen Betonzylinder, bis zum 7. Tag Wasserlagerung, Schleifen der Stirnseiten und anschließend Lagerung in der Klimakammer. Die großen Zylinder konnten aufgrund ihrer Größe nicht im Wasser gelagert werden, daher verblieben sie bis zum 7. Tag in der Schalung. Nach dem Ausschalen wurden sie für mindestens zwei Monate in der Klimakammer bei 20 °C Lufttemperatur sowie 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Anschließend wurden bei allen Zylindern die beiden Stirnseiten eben und planparallel geschliffen und gleichzeitig damit auch die oberen Betonschichten entfernt. In *Abbildung 4.9* sind zwei Proben direkt nach dem Betonieren sowie sechs gelagerte Proben nach dem Schleifen abgebildet. Insgesamt wurden von den großen Zylindern neun Stück mit den jeweils zugehörigen drei kleinen Zylindern und Würfeln hergestellt.

Aus Platzgründen war es nicht möglich, nach dem Schleifen die großen Betonzylinder weiterhin in der Klimakammer zu lagern. Daher verblieben sie bis zur Prüfung in den Räumlichkeiten des Labors bei Raumtemperatur und entsprechender Luftfeuchtigkeit. Zum Zeitpunkt der Prüfung betrug das jeweilige Alter der Probekörper mindestens sieben Monate.

4.2.4 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften wurden für jede Mischung jeweils direkt nach Abschluss des Mischvorgangs entsprechend [DIN-EN-12350 2000] ermittelt. Bestimmt wurden die Frischbetonrohdichte, der Luftgehalt sowie die Frischbetonkonsistenz über das Ausbreitmaß. In *Tabelle 4.10* sind die mittleren Werte der in allen Mischungen ermittelten Frischbetoneigenschaften dargestellt.

Tabelle 4.10: *Mittlere Frischbetonkennwerte aller verwendeten Betonmischungen*

Beton	***Rohdichte [kg/m³]***	***Luftgehalt [Vol.-%]***	***Ausbreitmaß [cm]***	***Konsistenz-klasse***
C40/50	2,38	1,5	42 - 55	F3 - F4

Für jede einzelne Mischung wurden außerdem die Festbetonkennwerte Rohdichte und Druckfestigkeit f_c an den je drei zugehörigen Würfeln nach 28 Tagen bestimmt. Zusätzlich wurden ebenfalls nach 28 Tagen für eine Mischung dieselben Kennwerte auch an drei kleinen Zylindern ermittelt. Im Rahmen einer Prüfserie der statischen Versuchsreihe SV fand nach 147 Tagen an zwei kleinen Zylindern auch die Prüfung der Festbetoneigenschaften zusätzlich mit Ermittlung des statischen E-Moduls statt. Die Festigkeitsprüfungen erfolgten in Anlehnung an [DIN-EN-12390-3 2002]. Die gemittelten Werte aus diesen drei genannten Prüfserien zu den Festbetonkennwerten sind in der *Tabelle 4.11* wiedergegeben.

Daneben wurden auch Prüfungen zur Bestimmung der optimalen Verdichtungsprozedur für die kleinen Zylinder durchgeführt. Dazu sind 12 Zylinder mit verschiedenen Verdichtungszeiten hergestellt worden, um im Anschluss zu prüfen, mit welcher Prozedur möglichst gute und zu den Würfeln vergleichbare Verdichtungsergebnisse erreicht werden können, ohne aber eine Entmischung des Betons zu bewirken. Im Rahmen der Überprüfung erfolgte das Aufschneiden aller Zylinder in der Längsachse, ein Vergleichen der jeweiligen Gefügestrukturen und basierend auf diesen Ergebnissen letztlich die Auswahl der Verdichtungsprozedur für die kleinen Betonzylinder.

Tabelle 4.11: *Mittlere Festbetonkennwerte aller verwendetet Betonmischungen aus Würfeln sowie für einzelne Betonmischungen an kleinen Zylindern*

Probekörper	***Prüfalter [d]***	***Rohdichte [g/cm³]***	***Druckfestigkeit f_c [N/mm²]***	***Druckkraft F_c [kN]***	***E-Modul E [N/mm²]***
Würfel	28	2,35	63,9	1.438	-
Zylinder	28	2,37	55	420	-
Zylinder	147	2,36	55,7	425	35.880

4.3 Versuchs- und Messtechnik

4.3.1 Versuchstechnik

Für die unterschiedlichen Prüfungen kamen im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Prüfmaschinen zum Einsatz, die im Folgenden kurz vorgestellt werden und teilweise in *Abbildung 4.10* dargestellt sind.

Der Hauptteil der Versuche fand an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma MTS statt, die eine Prüfkraft von maximal ±1.000 kN erlaubte. In ihr wurden alle zyklischen und statischen Versuche an den kleinen Betonzylindern durchgeführt, mit Ausnahme der Kriechversuche. Ihr Aufbau bestand aus einem sehr steifen viersäuligen Lastrahmen. Ausgestattet war die Maschine mit einer unten liegenden Kraftmessdose, einem oben angeordneten Hydraulikzylinder sowie einer Kalotte an der oberen Druckplatte. Möglich waren Prüffrequenzen bis zu 10 Hz bei einem maximalen Kolbenhub von ± 0,5 mm. Die Regelung erlaubte neben der Aufzeichnung der Soll- und Ist-Werte von Kolbenweg und Kraft auch die integrierte Erfassung der Werte aus allen Wegaufnehmern, die am Versuch beteiligt waren, was besonders hilfreich bei der späteren Auswertung der Messdaten war. Darüber hinaus wurde die Maschinenregelung auch mit den Geräten der Ultraschallmessung, der Schallemissionsmessung sowie dem ARAMIS verbunden, um dort die jeweiligen Messungen zu starten bzw. zu beenden. Im Falle der Schallemissionsmessung konnte sogar der laufende Versuch in Abhängigkeit der aktuellen Werte in der Schallemissionsmessung gestoppt bzw. beeinflusst werden. Dies war eine wesentliche Grundlage für die Durchführung der hochzyklischen Versuche der UHC-Versuchsreihe mit Teilschädigungen.

Für die Kriechversuche kam ein Belastungsportal mit hängendem Hydraulikzylinder und Kraftmessdose zum Einsatz, das Bestandteil eines Großbauteilprüfstandes war und eine Prüflast im Druckbereich von maximal 1.000 kN erlaubte. Grund dafür war, dass zu diesem Zeitpunkt für derartige Kriechversuche kein Kriechstand mit entsprechender Anzahl an Prüfplätzen zur Verfügung stand. Deshalb fanden diese Versuche in einer Prüfhalle unter Raumklimabedingungen statt. Die Folge war, dass immer nur eine Probe geprüft werden konnte, so dass insgesamt nur wenige und auch zeitlich sehr begrenzte Kriechversuche umgesetzt werden konnten. Im Gegenzug erlaubte dieser Versuchsstand jedoch die Verwendung von vorprogrammierbaren Lastprogrammen, mit denen neben der Bestimmung der Kriechverformungen in Intervallen zusätzliche Eigenschaften der Prüfkörper bestimmt werden konnten.

Die Versuche an den großen Betonzylindern wurden aufgrund der hohen Prüflasten an einer zweisäuligen servohydraulischen Prüfmaschine mit einer maximalen Prüfkraft von 10 MN im Druckbereich durchgeführt. Die Kraftmessung fand hier nicht mittels einer Kraftmessdose statt, sondern wurde über eine Differenzdruckbetrachtung im Hydraulikzylinder der Prüfma-

schine realisiert. Da es sich bei der Regelung für die Prüfmaschine um ein ähnliches System wie bei der für die Versuche an den kleinen Zylindern eingesetzten MTS 1MN-Prüfmaschine handelte, konnten prinzipiell die gleichen Belastungsprogramme wie bei den kleinen Zylindern umgesetzt werden. Allerdings konnten wegen der großen Kräfte und der daraus resultierenden großen Verformungen in den Probekörpern sowie dem gesamten Prüfaufbau selbst, nur deutlich kleinere Prüffrequenzen in den zyklischen Versuchen realisiert werden, als dies bei den kleinen Probekörpern in der MTS 1MN-Prüfmaschine möglich war.

Abbildung 4.10: *1MN Prüfmaschine zur Prüfung der kleinen Zylinder (links), 10MN Prüfmaschine für die Prüfung der großen Zylinder (Mitte) und 5MN Prüfmaschine zur Prüfung der Würfel (rechts)*

Neben den Versuchen an den Betonzylindern wurden Würfel mit 150 mm Kantenlänge zur Bestimmung der 28 Tage-Festigkeit der einzelnen Mischungen geprüft. Diese Versuche fanden an einer zweisäuligen servohydraulischen Prüfmaschine statt, die eine maximale Prüflast von 5 MN Druck erlaubte. Dabei handelte es sich um eine besonders steife Druckpresse der Firma MTS, die mit einer Kalotte ausgerüstet war, keine Kraftmessdose besaß und vorrangig zur Prüfung der Druckfestigkeit aller Arten von Betonen eingesetzt wird. Die Kraftmessung erfolgte hier auch über eine Differenzdruckbetrachtung am Hydraulikzylinder.

Alle für die durchgeführten Versuche verwendeten Prüfmaschinen besaßen eine Kalibrierung bezüglich der Kraft, die der Genauigkeitsklasse 1 entsprach.

4.3.2 Messtechnik

In allen durchgeführten Versuchen wurden in Abhängigkeit vom Typ und der Zielstellung des Versuches verschiedene Messtechniken eingesetzt. Die einzelnen dabei zum Einsatz gekommenen Techniken sowie die ihnen zugrundeliegenden Prinzipien werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt und erläutert.

Kraftmessungen

Eine der wichtigsten Messungen in den Versuchen war die Messung der Kraft, die nicht nur zur Ermittlung der Bruchlasten in statischen Versuchen diente, sondern vor allem zur korrekten Einregelung der aufzubringenden Kräfte durch die Maschinenregelung. In der Prüfma-

schine MTS 1MN sowie dem Belastungsportal für die Kriechversuche wurde die Kraftmessung mit einer festinstallierten Kraftmessdose realisiert. Nur bei der MTS 5MN und der 10MN Prüfmaschine erfolgte die Bestimmung der Prüfkräfte über eine Differenzdruckbetrachtung im Hydraulikzylinder durch die Prüfmaschinenregelung.

Verformungen und Dehnungen

Die vorrangigste Messung an den Probekörpern selbst war die begleitende Bestimmung der Verformungen bzw. Dehnungen, die in dem überwiegenden Teil der Versuche durchgeführt wurden. Je nach Versuchstyp kamen dabei unterschiedliche Messtechniken zum Einsatz, die in ihrer Eignung jeweils am besten zum Versuch passten. Als einfachste und am schnellsten anzuwendende Technik wurden sogenannte Clip-on Extensometer der Firma MTS verwendet, die sich hier vorrangig nur für die monotonen Versuche eigneten. Diese besaßen eine Messlänge von 100 mm, einen Messbereich von ± 2 mm und waren Klasse 1 geprüft. Sie wurden direkt in den Messverstärker der Prüfmaschinenregelung mit eingebunden. Mit Hilfe von Gummibändern wurden sie an die Probe gedrückt, wobei eine der Schneiden des Aufnehmers durch eine an der Probe eingeschnittene Kerbe fixiert war. Eingesetzt wurden sie bei einfachen statischen Versuchen zur Messung des E-Moduls, in denen jeweils drei Stück von ihnen im mittleren Bereich der Probenhöhe an der Probe angebracht wurden.

Für die Verformungsmessung an der Probe in niederzyklischen Ermüdungsversuchen kamen Induktive Wegaufnehmer der Firma HBM vom Typ W2TK zum Einsatz. Es handelte sich dabei um Feinwegtaster mit einem Messbereich von ± 2 mm, die auch Klasse 1 geprüft und ebenfalls in den Messverstärker der Prüfmaschine eingebunden waren. Zur Befestigung am Probekörper wurden je zwei Messinghalter mit einem Zweikomponentenkleber an der Probe angebracht, durch deren Abstand der Messbereich auf der Probenoberfläche festgelegt wurde. Der Aufnehmer selbst war in einen der beiden Messinghalter eingespannt und einjustiert. Auch hier kamen immer drei Aufnehmer an einer Probe zum Einsatz. Durch die Wiederverwendung der Aufnehmer und auch der Messinghalter handelt es sich um eine sehr genaue und materialsparende Messmethode. Allerdings erwiesen sich diese Aufnehmer für die Messungen an den Proben in den hochzyklischen Versuchen als nicht besonders geeignet.

In den hochzyklischen Ermüdungsversuchen sowie auch in verschiedenen monotonen Versuchen wurden die W2TK-Aufnehmer anstatt für die Messung der Verformungen an der Probe selbst für die Messung des Druckplattenabstandes (DPA) eingesetzt. Dazu wurden sie mit entsprechenden Magnetstativen auf der unteren Druckplatte befestigt und an der oberen Druckplatte ausgerichtet. Auch hier wurden immer drei Aufnehmer je Versuch angebracht, die so die gesamte Verformung der Probe in Belastungsrichtung gemessen haben. Im Falle von weggeregelten Versuchen diente der Mittelwert dieser drei Aufnehmer zur Regelung des Versuches über den Druckplattenabstand.

Zur Messung der Dehnungen an der Probe in den hochzyklischen Ermüdungsversuchen wurden Dehnungsmessstreifen (DMS) verwendet. Eingesetzt wurden DMS von der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co. (TML) vom Typ PL in den Längen 90 mm und 120 mm mit einer maximalen Dehnung von 2 %, die über einen Messverstärker ebenfalls in die Prüfmaschinenregelung eingebunden waren. Mit dem Zweikomponentenklebstoff X60 der Firma HBM wurden diese auf die zuvor angeschliffene Oberfläche der Betonzylinder appliziert, wobei ebenfalls immer drei DMS je Probe aufgebracht wurden. Für die langlaufenden hochzyklischen Versuche hatten sich die DMS als am geeignetsten erwiesen.

Als vierte Möglichkeit zur Messung von Verformungen kam in einzelnen ausgewählten Versuchen das Messsystem ARAMIS der Firma GOM zur Anwendung. Dabei handelt es sich um eine optische und berührungslose Messmethode, die auf dem Prinzip der digitalen Bildkorre-

lation beruht. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Aufnehmertypen liefert diese Methode nicht einen integralen Wert für eine Messlinie, sondern eine flächige Verteilung von Verformungen und Dehnungen auf der Probenoberfläche. Hierzu wurde eine ausgewählte Messfläche auf der Probe mit einem Messmuster präpariert und anschließend im Versuch mittels zweier Digitalkameras erfasst. Mit Hilfe der zugehörigen Software ARAMIS auf dem Messrechner erfolgten nach Versuchsende die Analyse der einzelnen Bilder und schließlich die Berechnung der Verformungen und Dehnungen in der Messfläche.

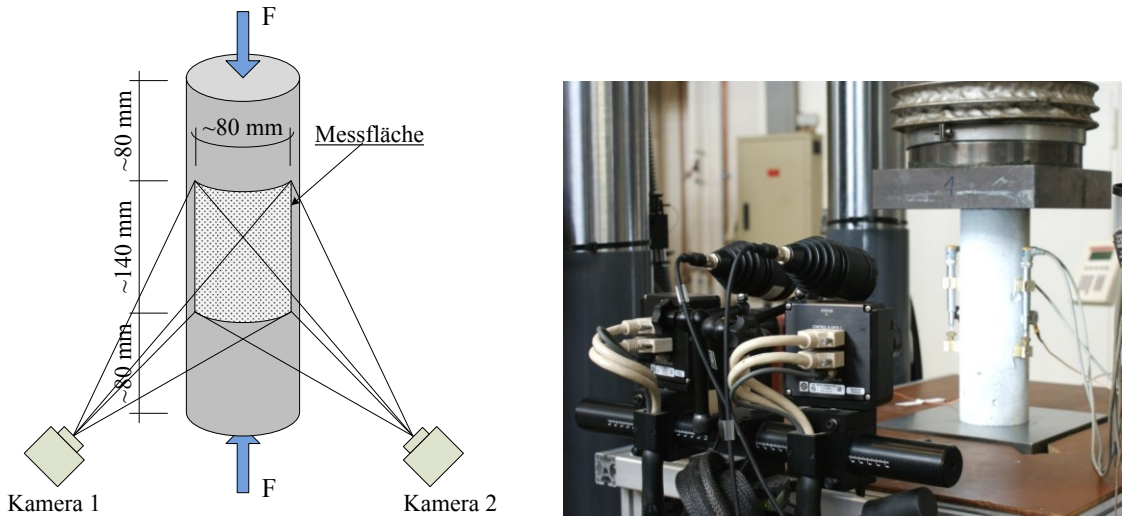

Abbildung 4.11: *Schematische Darstellung der Messfläche von ARAMIS an einem kleinen Betonzylinder (links), Foto der Messanordnung im Versuch (rechts)*

Die prinzipielle Anordnung der Messfläche an einem kleinen Betonzylinder ist in *Abbildung 4.11 links* schematisch dargestellt, während das rechte Bild den Messaufbau im Versuch zeigt. Ausgelöst wurde die Messung automatisiert über ein Trigger-Signal, das von der Prüfmaschinenregelung gegeben wurde und im Lastprogramm vorprogrammiert war. Das Messsystem wurde sowohl in monotonen als auch in zyklischen Versuchen angewandt und kam an den kleinen sowie auch an den großen Betonzylindern zum Einsatz.

Schallemissionsmessungen (SE)

In einigen monotonen sowie in den meisten zyklischen Versuchen wurde die Messung von Schallemissionsereignissen vorgenommen, die innerhalb des Probekörpers stattfanden. Ursache für derartige Schallereignisse im Materialgefüge sind vorrangig die Entstehung und Ausbreitung von Rissen im Material sowie auch die Reibung von aneinander liegenden Rissufern bzw. beim Schließen von Rissen. Bei diesen Vorgängen wird meist an lokalen Stellen im Material, bei denen hohe Spannungen auftreten, durch plötzliche Entstehung eines Risses bzw. einer Verschiebung ruckartig das umliegende Material entspannt. Durch ein solches Ereignis wird schlagartig Energie freigesetzt, die sich dann unter anderem als elastische Welle im Material ausbreitet und mit auf der Probenoberfläche angebrachten Schallemissionssensoren aufgenommen werden kann. Schematisch ist dieser Vorgang in *Abbildung 4.12* dargestellt, links die Ausbreitung der elastischen Wellen im Material und rechts das gemessene Signal an einem Sensor. Die aufgenommenen Signale lassen sich mit der entsprechenden Software dann analysieren und bewerten.

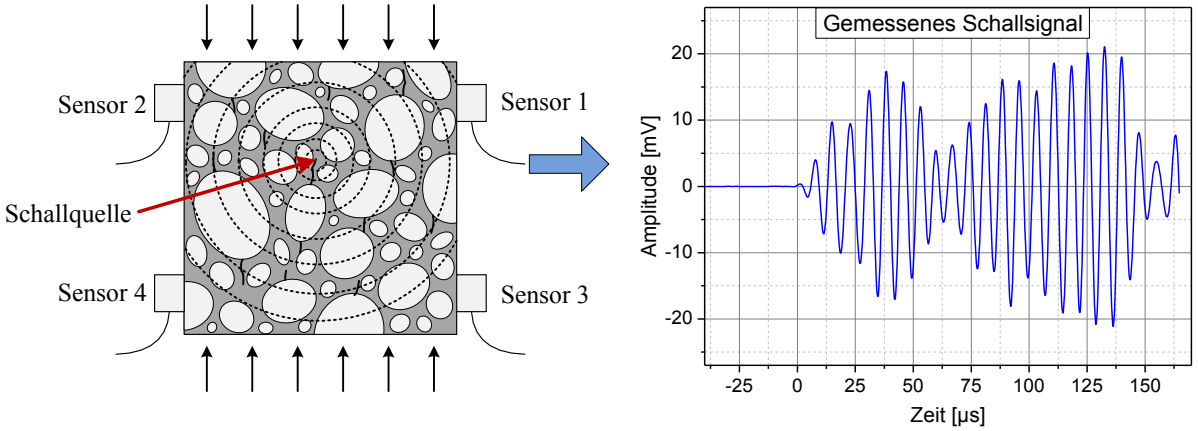

Abbildung 4.12: *Schematische Darstellung der Wellenausbreitung im Materialgefüge für ein Rissereignis (links) und davon durch einem Sensor an der Oberfläche gemessener Signalverlauf (rechts)*

Bei der Schallemissionsmessung handelt es sich um ein zerstörungsfreies und im Gegensatz zur Ultraschallmessung um ein passives Verfahren. Die gemessenen Schallwellen werden vom Defekt selbst erzeugt, so dass damit direkt die Ereignisse detektiert werden können, die mit einem Schädigungszuwachs im Material in Verbindung stehen. Bei der Ausbreitung der Welle durch das Material wird diese abgeschwächt, so dass sie nur in einer begrenzten Entfernung zum Ursprung noch detektiert werden kann. Werden mehrere Sensoren an verschiedenen Positionen eingesetzt und wird das Signal von diesen erfasst, kann über die unterschiedlichen Ankunftszeiten auch die Position der Signalquelle errechnet werden.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche kam ein Messsystem vom Typ AMSY-5 der Firma Vallen zum Einsatz sowie piezoelektrische Sensoren vom Typ VS150-MS mit einem Frequenzbereich von 100-450 kHz, ebenfalls von der Firma Vallen. In den Versuchen wurden entweder sechs oder teilweise auch acht Sensoren an den Probekörpern verwendet. Diese wurden mit Klebepads vom Typ UHU-Patafix als Koppelmittel angebracht und durch Gummibänder gesichert. Start und Ende der Messung ließen sich durch eine Kopplung mit der Prüfmaschinenregelung über das Lastprogramm beliebig steuern, und umgekehrt war es auch möglich, das Lastprogramm über die Schallemissionsanalyse zu beeinflussen, wie zum Beispiel den Versuch zu stoppen. Somit konnten die während eines Versuches auftretenden und messbaren Schallereignisse aufgenommen und teilweise auch lokalisiert werden. Außer der Messung der Schallereignisse im Probekörper ermöglichte das System zusätzlich die Durchführung von Ultraschallmessungen, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

Ultraschallmessungen (US)

Die Ultraschallmessung wurde zumeist in Verbindung mit der zuvor beschriebenen Schallemissionsmessung durchgeführt und kam in einigen monotonen sowie in den meisten zyklischen Versuchen zur Anwendung. Es handelt sich dabei ebenso wie die Schallemissionsmessung um eine zerstörungsfreie Prüfung, allerdings stellt die Ultraschallmessung ein aktives Verfahren dar. Dazu wird über einen an der Probe befindlichen Sensor aktiv ein Ultraschallsignal ausgesendet, das dann nach Durchlaufen des Materials von weiteren Sensoren an der Probe empfangen wird. Je stärker das Materialgefüge geschädigt wird, was in erster Linie durch Rissbildung oder Veränderung der vorhandenen Materialstruktur geschieht, um so mehr wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals verringert sowie die Amplitude gedämpft. Schematisch ist dies in *Abbildung 4.13* für einen ungeschädigten und einen geschädigten Gefügezustand mit beispielhaften gemessenen Signalverläufen veranschaulicht.

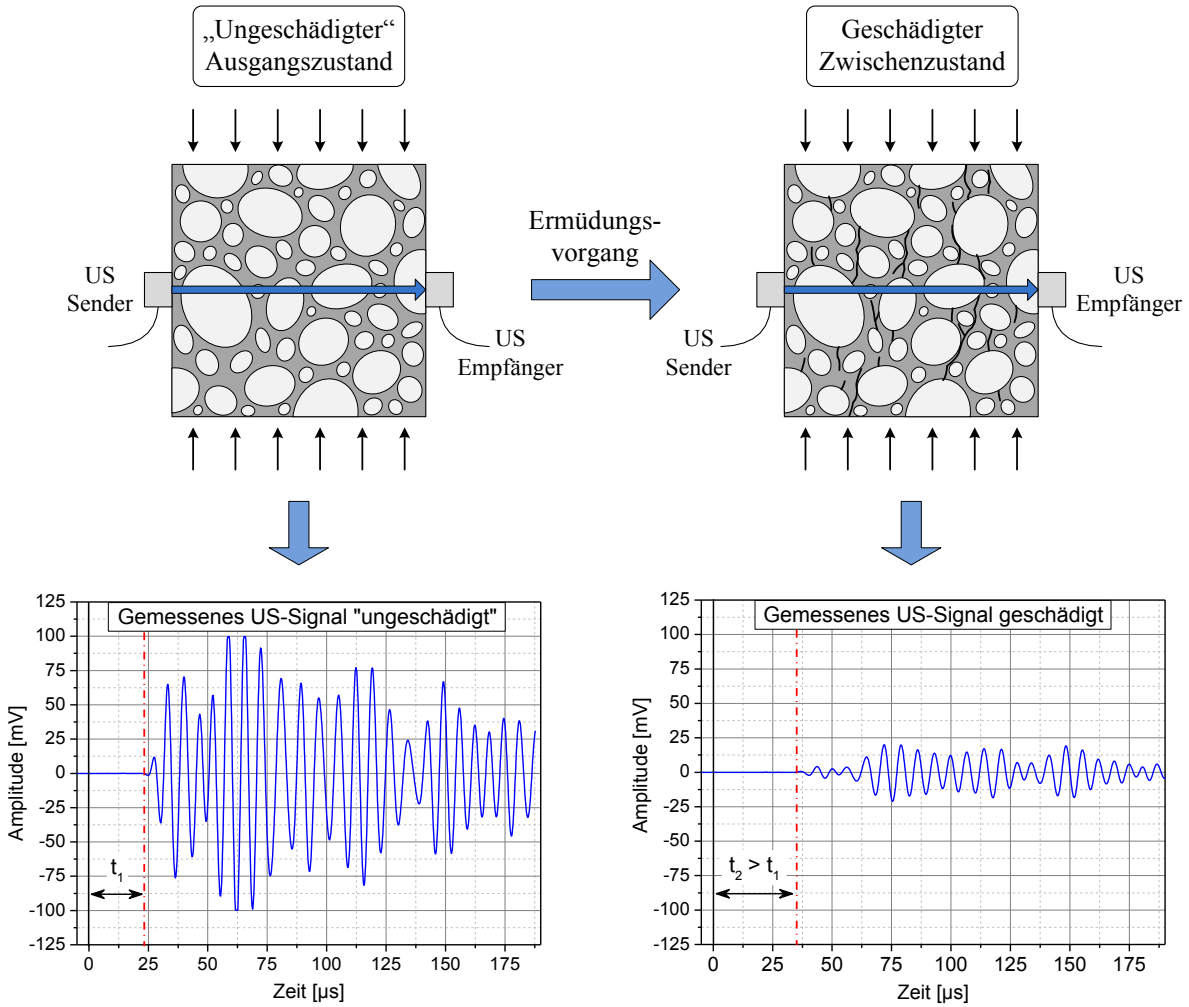

Abbildung 4.13: *Schematische Darstellung der Ultraschallmessung an einem ungeschädigten Gefüge (links) und einem geschädigtem Gefüge (rechts) mit gemessenen beispielhaften Signalverläufen*

Die zwei relevanten Messgrößen sind die Laufzeit des Ultraschallsignals vom Sender durch das Material zum Empfänger sowie die Dämpfung der Signalamplitude. Für die Bestimmung der Laufzeit muss am empfangenden Sensor der Ersteinsatz des ankommenden Signalverlaufes detektiert werden. An dieser Stelle kann es aufgrund der zunehmenden Dämpfung der Signale durch eine fortschreitende Schädigung des Materialgefüges zu Problemen kommen. Um einen Ersteinsatz zu detektieren, muss ein Schwellwert für die Amplitude angesetzt werden, der oberhalb des Rauschens liegt. Sinkt die Amplitude des ersten Signalausschlags unter diesen Schwellwert, wird schlagartig eine längere Laufzeit ermittelt, und in der zeitlichen Entwicklung der Signallaufzeit ergibt sich so ein stufenförmiger Versatz, wie in *Abbildung 4.14* schematisch veranschaulicht ist.

Um diesen Versatz zu korrigieren, kann der nachfolgende Kurvenverlauf einfach um den Differenzwert in der Laufzeit versetzt werden, der sich direkt an der Unstetigkeit der Kurve ergibt. Da damit prinzipiell nur die verspätete Signaldetektion am nachfolgenden Signalausschlag infolge des unterlaufenen Schwellwertes korrigiert wird, wird damit kein Fehler in dem Messergebnis erzeugt.

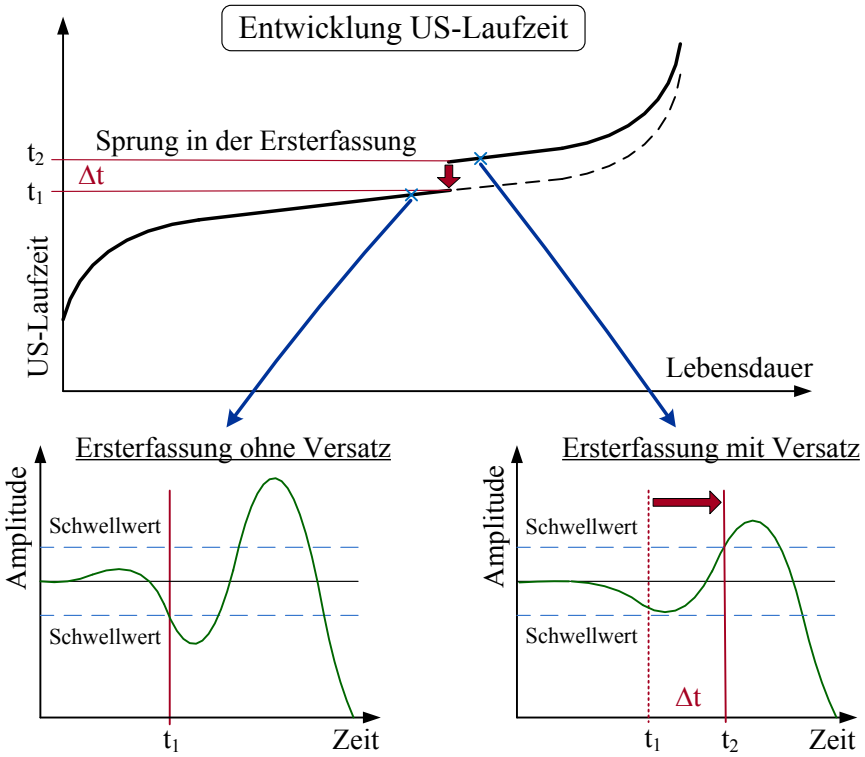

Abbildung 4.14: *Schematische Veranschaulichung des Versatzes bei einer verspäteten Detektion des Signalersteinsatzes sowie die mögliche Korrektur über eine Rückrechnung*

Die Ultraschallmessung fand zum überwiegenden Teil mittels der zuvor beschriebenen Messtechnik der Schallemissionsmessung statt. Nur in einigen Versuchen wurde die Messung mit dem Ultraschall-Messsystem UKS-D der Firma Geotron-Elektronik durchgeführt, wobei zwei piezoelektrische Sensoren der Firma Vallen vom Typ VS150-L mit einem Frequenzbereich von 100-450 kHz zum Einsatz kamen. Dieses System erlaubte es zwar nur zwei Sensoren zu betreiben, konnte dafür aber auch die Signalamplituden mit auswerten. Im Gegensatz dazu war es mit dem Schallemissionssystem der Firma Vallen möglich, mit mehreren Sensoren Ultraschallmessungen durchzuführen. Jedoch konnten dabei aufgrund der speziellen Messkonfiguration die Signale nicht hinsichtlich ihrer Amplitude ausgewertet werden.

Gemessen wurde in den Versuchen mit zwei Messkonfigurationen, die beide in *Abbildung 4.15* schematisch dargestellt sind. Zum einen erfolgte die Messung mit zwei Sensoren in nur einer Achse auf halber Probenhöhe in horizontaler Richtung durch die Probe, so dass senkrecht zur Belastungsrichtung gemessen wurde. In der zweiten Konfiguration wurde zusätzlich zu der horizontalen Messung auch eine Messung in vertikaler Richtung längs durch den Probekörper realisiert. Dazu wurden extra Zwischenplatten für die Lasteinleitung verwendet, die in der Mitte eine Bohrung für den Sensor sowie einen Schlitz für das Sensorkabel besaßen. So konnte gemeinsam die Messung senkrecht und parallel zur Belastungsrichtung an einem Probekörper durchgeführt werden. Diese vertikale Messung ist in den Prüfungen an den großen Betonzylindern nicht umgesetzt worden. Ursache für diese zwei unterschiedlichen Messanordnungen waren technische Gründe sowie auch die Verfügbarkeit der jeweiligen Messtechnik. Angekoppelt und gesichert wurden die Sensoren in gleicher Weise wie bereits bei der Schallemissionsmessung beschrieben. Die Auslösung der jeweiligen Ultraschallmessung erfolgte über eine Verbindung des Messsystems mit der Prüfmaschinenregelung durch vordefinierte Zeitpunkte im Belastungsprogramm.

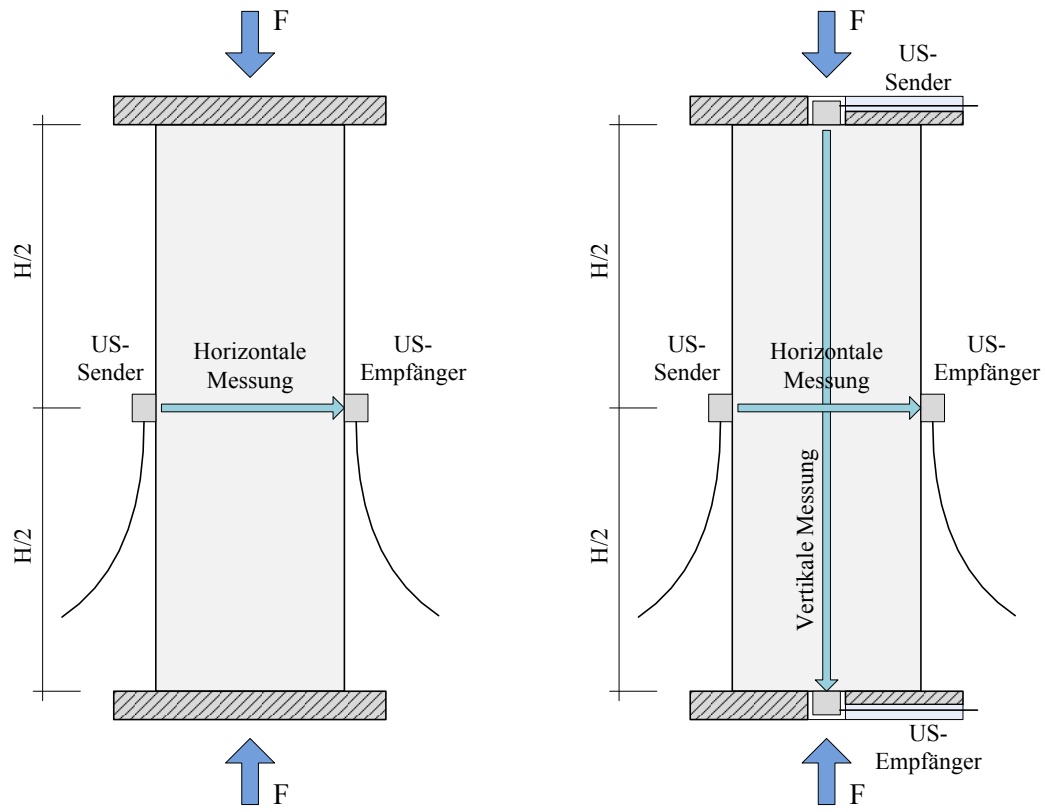

Abbildung 4.15: *Messanordnung zur Ultraschallmessung mit zwei Sensoren horizontal (links) und mit vier Sensoren horizontal und vertikal (rechts)*

Die Ergebnisse, die mit Hilfe der beiden verschiedenen Messsysteme gewonnen wurden, weisen allerdings Unterschiede zueinander auf. Die qualitativen Verläufe der Ergebnisse sind zwar gleich, nicht aber die absoluten Werte, die sich teils merklich voneinander unterscheiden. Als Folge daraus konnten bei der Versuchsauswertung diese Ergebnisse nicht miteinander gemittelt werden, sondern wurden getrennt betrachtet. Die Ursache für diese Unterschiede ist in den beiden doch sehr verschiedenen Messsystemen zu suchen.

Lichtmikroskopie

Neben den bereits beschriebenen zerstörungsfreien Messmethoden wurde mit der Lichtmikroskopie auch eine zerstörende Untersuchungsmethode angewandt. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Messmethoden erlaubt die Mikroskopie einen konkreten Blick in das Materialgefüge hinein, so dass die entstandenen Veränderungen in der Gefügestruktur direkt untersucht werden können. Dies wird jedoch mit der Zerstörung der jeweiligen Probe erkauft, so dass eine Fortführung der Prüfung der Probe und damit die Betrachtung der Entwicklung der festgestellten Risse nicht mehr möglich sind. Die Ergebnisse stellen somit nur eine Momentaufnahme dar, bei der zusätzlich auch zu berücksichtigen ist, dass hier allein der entlastete Zustand der Gefügestruktur untersucht wird. Das hat zur Folge, dass Risse, die sich unter Last öffnen, nun möglicherweise wieder weitgehend geschlossen und somit weniger deutlich zu erkennen sind. Umgekehrt bleiben Risse, die unter Last überdrückt werden, jetzt geöffnet, wodurch sie wiederum deutlicher zu sehen sind.

Prinzipiell stehen für die Vorbereitung und Durchführung einer mikroskopischen Untersuchung unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden eine

Präparation mit einem fluoreszierenden, niedrigviskosen Kunstharz sowie die Betrachtung von Anschliffen unter UV-Licht in einem Stereomikroskop angewandt. Ziel ist es dabei, dass mit dem Kunstharz alle Fehlstellen wie Risse und Poren im Materialgefüge ausgefüllt werden und somit im UV-Licht unter dem Mikroskop hervorgehoben und sichtbar werden.

Die Untersuchungen konzentrierten sich auch hier auf das mittlere Drittel der Betonzylinder. Dazu wurde aus jedem Probekörper sowohl ein Querschnitt als auch ein Längsschnitt entsprechend der *Abbildung 4.16* hergestellt. Für die Präparation wurde in einem ersten Schritt der komplette Zylinder in Harz eingebettet, der währenddessen einem Unterdruck ausgesetzt war, um eine größere Eindringtiefe durch die anschließende Beaufschlagung mit atmosphärischem Druck zu erreichen. Nachdem der Probekörper so stabilisiert war, erfolgte das Zerschneiden des Zylinders zur Gewinnung eines Querschnitts (1) und eines Längsschnitts (2) mit Hilfe einer Säge im Nassverfahren, wie in *Abbildung 4.16* dargestellt.

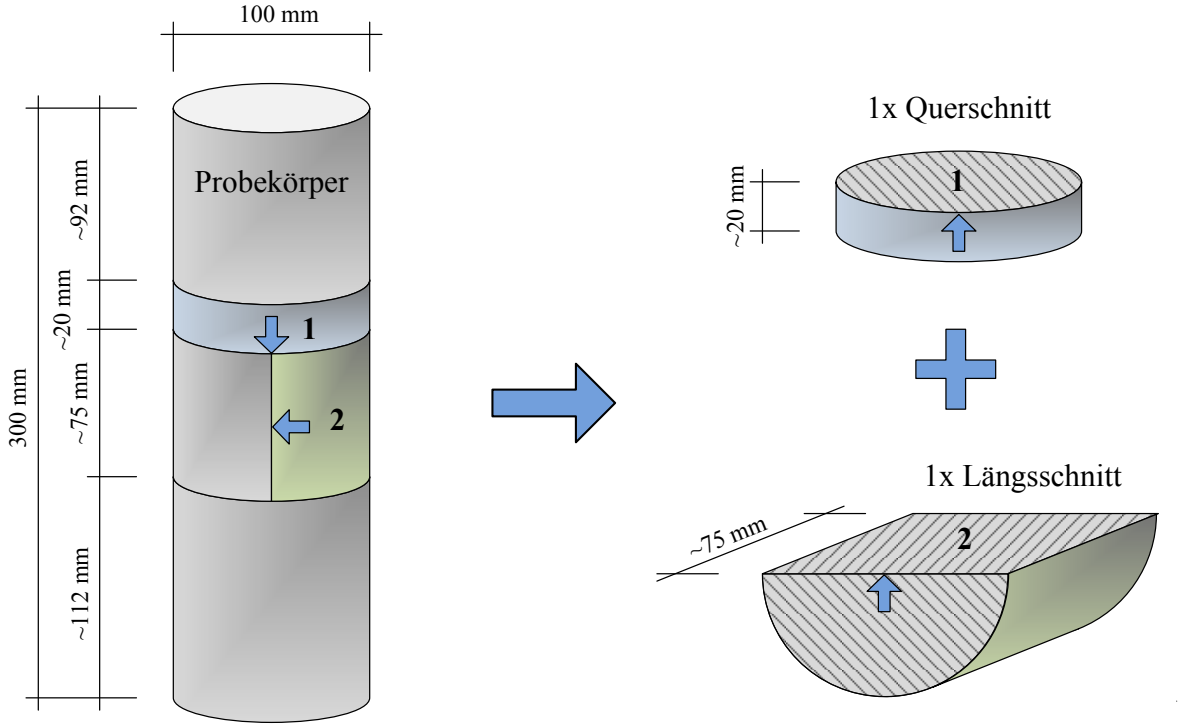

Abbildung 4.16: *Schematische Darstellung der Schnittanordnung zur Gewinnung der Probenteile für mikroskopische Untersuchungen*

Die beiden Probenteile wurden danach in einem Trockenofen getrocknet, bevor sie nochmals in Kunstharz eingebettet wurden. Dafür kamen sie in ein leichtes Vakuum, unter dem das Kunstharz eingefüllt wurde. Die völlig in Harz eingebetteten Proben wurden anschließend für mindestens 24 Stunden bei 15 Bar in einem Druckbehälter gelagert. Das bei der betreffenden Probenoberfläche aufstehende Harz wurde, nachdem es ausgehärtet war, mit Hilfe eines Topfschleifers bis auf die Probe herunter geschliffen. Die Oberfläche wurde dann noch poliert, bevor sie fertig für die Untersuchung im Lichtmikroskop war (siehe *Abbildung 4.17 links*).

Zur Untersuchung der präparierten Proben kam ein Stereomikroskop vom Typ Olympus SZX16 zum Einsatz, mit Objektiven, die eine Vergrößerung von 0,7-fach bis 11,5-fach erlaubten. Dieses Mikroskop war zusätzlich mit einer UV-Licht-Einrichtung, einer Digitalkame-

ra sowie einem automatisiertem X-Y-Tisch ausgestattet und ist in *Abbildung 4.17 rechts* dargestellt. Damit war es möglich, größere Flächen der Proben rasterförmig abzutasten und anschließend aus diesen Einzelbildern hochauflösende zusammengesetzte Gesamtbilder zu erzeugen.

Da bei einer für die Risserkennung notwendigen Vergrößerung nur sehr kleine Probenausschnitte erfasst werden, wurden aufgrund der entstehenden großen Bildmengen und besonders wegen der Auswertbarkeit nicht die gesamten Probenoberflächen (Gesamtfläche A) aufgenommen, sondern nur ein ausgewählter Teilbereich (Teilfläche B). Diese sind für den Längsschnitt und den Querschnitt in *Abbildung 4.18* veranschaulicht.

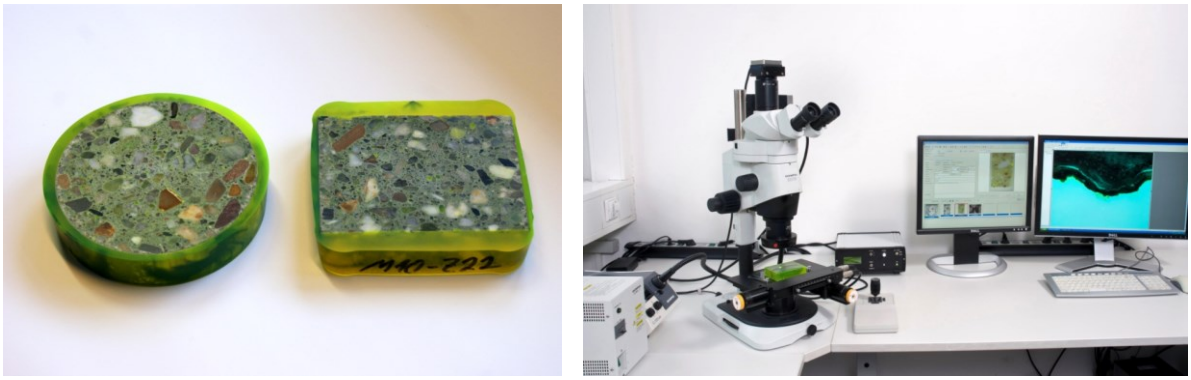

Abbildung 4.17: *Fertig präparierter Längs- und Querschnitt aus einem Betonzylinder (links), verwendetes Stereomikroskop vom Typ Olympus SZX16 (rechts)*

Damit trotzdem eine ausreichend repräsentative Probenfläche betrachtet werden konnte, wurde jeweils ein ca. 25 mm hoher Streifen über den gesamten Probenquerschnitt untersucht. In diesem Streifen wurden je circa 216 Einzelaufnahmen gemacht, die im Anschluss zu einem Gesamtbild zusammengefügt wurden. Anhand dieses Gesamtbildes erfolgte schließlich die Auswertung zum Zustand des Materialgefüges. Dazu wurden die in den Aufnahmen sichtbaren Risse ausgezählt, deren jeweilige Länge gemessen sowie auch die Richtung der Risse ermittelt.

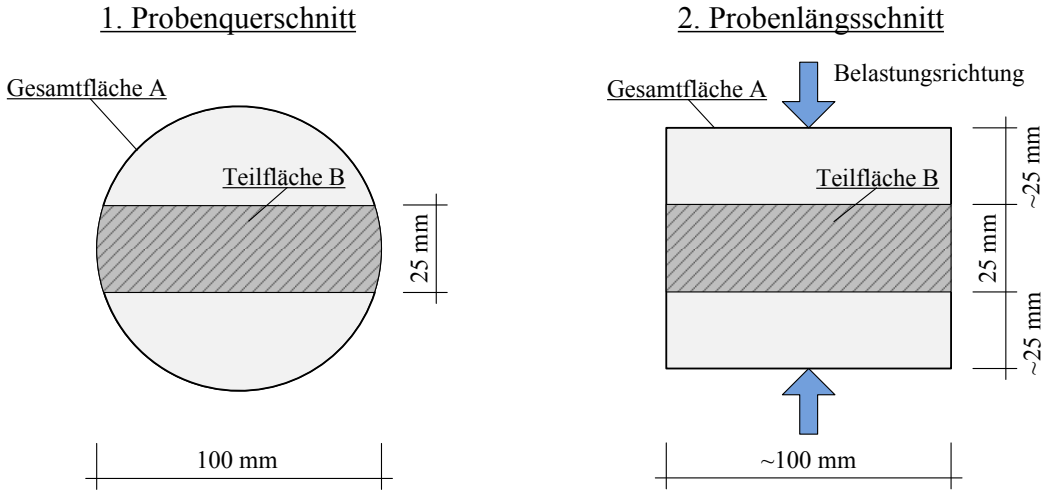

Abbildung 4.18: *Schematische Darstellung der mit dem Lichtmikroskop untersuchten Teilflächen auf den Probenlängs- und Probenquerschnitten*

Es fand außerdem eine Unterscheidung statt im Bezug darauf, ob der Riss im Mörtel verlief oder durch ein Zuschlagskorn hindurch ging. Zusätzlich zur Analyse aller Risse in den Gesamtaufnahmen wurden von den dort identifizierten Rissen einzelne repräsentative Risse ausgewählt, für die separat mittels maximaler Vergrößerung auch die Rissbreiten bestimmt wurden.

Bei der Bewertung der ermittelten Ergebnisse aus der mikroskopischen Untersuchung muss berücksichtigt werden, dass davon auszugehen ist, dass durch die Probenpräparation mittels Sägen und Schleifen zusätzlich Schädigungen in das Gefüge der Probe eingetragen werden. Eine genaue Quantifizierung dieser Zusatzschädigung ist allerdings nur schwer möglich, da der ursprüngliche Schädigungszustand vor der Präparation in der Regel unbekannt ist. Eine Untersuchung zu den Einflüssen der Präparation auf den Schädigungszustand wurde zum Beispiel von [KUSTERMANN 2005] vorgenommen. Dabei konnte ein Einfluss der Anzahl der Schnittvorgänge auf die Mikrorissbilder in den Proben festgestellt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch alle Proben in gleicher Weise präpariert wurden, kann durch die angesetzte relative Betrachtung bei den Untersuchungsergebnissen trotzdem auf die unterschiedlichen Schädigungsgrade infolge der Ermüdungsbeanspruchung geschlossen werden.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Als eine weitere zerstörende Untersuchungsmethode kam neben der Mikroskopie auch die Untersuchung mit einem Rasterelektronenmikroskop zur Anwendung. Dieses bietet im Bezug auf die zuvor beschriebene Mikroskopie einen noch tieferen Einblick in die Gefügestruktur und wurde im Nachgang zur Mikroskopie durchgeführt. Für die Untersuchung am REM wurden Probekörper aus den für die Mikroskopie präparierten Probekörpern herausgeschnitten. Aufgrund technischer Randbedingungen sowie des Arbeitsaufwandes wurden für das REM nur drei Proben präpariert und untersucht. Hierzu wurden unter Berücksichtigung der Beobachtungen aus der Mikroskopie drei Probenlängsschnitte mit unterschiedlichen Schädigungsgraden ausgewählt. Aus diesen wurde jeweils ein gezielt ausgesuchtes 3 x 3 cm Teilstück herausgeschnitten, welches sich im Bereich der bereits mit der Mikroskopie untersuchten Teilfläche B befand. Die Schnittanordnung sowie die Probengeometrie für die REM-Untersuchungen sind in *Abbildung 4.19* schematisch dargestellt.

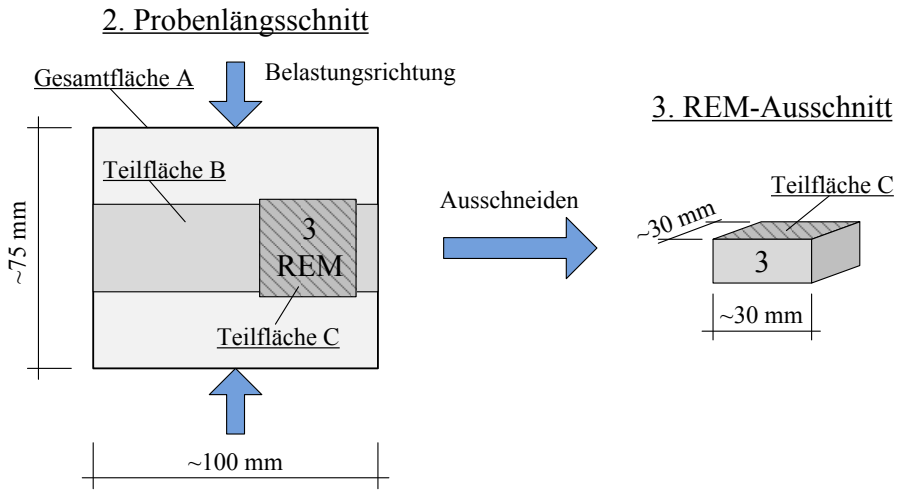

Abbildung 4.19: *Schematische Veranschaulichung der Schnittanordnung für die Gewinnung der REM-Proben mit Darstellung der zugehörigen Probengeometrie*

Die so gewonnenen Probekörper mussten nochmals besonders fein poliert werden, um eine für die Untersuchung geeignete Probenoberfläche zu erreichen. Ein so präparierter Probekörper ist in *Abbildung 4.20 links* zu sehen.

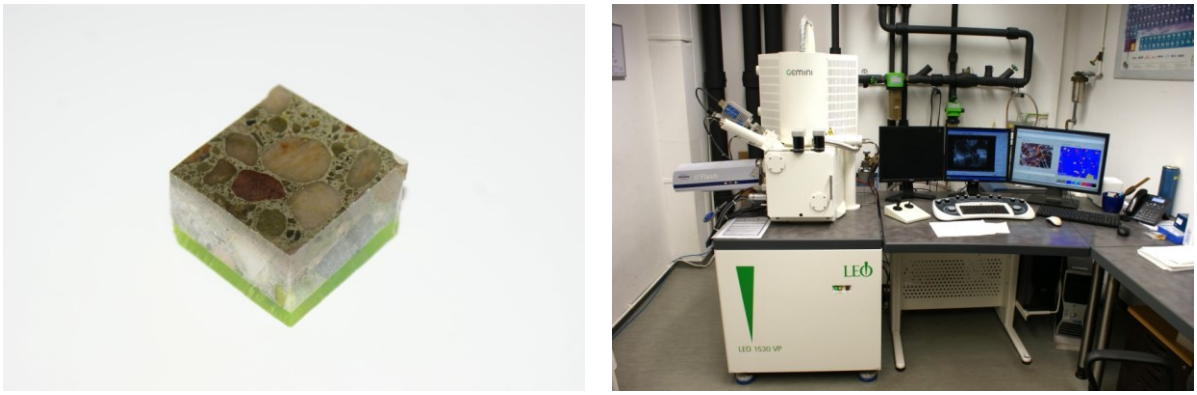

Abbildung 4.20: *Fertig präparierte Probe für das REM (links) und das verwendete Rasterelektronenmikroskop vom Typ LEO Gemini 1530 VP (rechts)*

Die Untersuchung der drei Probekörper fand an einem Rasterelektronenmikroskop vom Typ LEO Gemini 1530 VP statt, das in *Abbildung 4.20 rechts* wiedergegeben ist. Unter einem Hochvakuum und bei einer verwendeten Spannung von 15 kV ergibt sich dabei eine maximale theoretische Auflösung von 1 nm. Auf den Oberflächen der drei Proben wurden einzelne gezielt ausgewählte Teilbereiche jeweils mit verschiedenen Vergrößerungen aufgenommen, um ein möglichst breites Spektrum in der Betrachtungstiefe abdecken zu können. Hierfür wurden Bereiche ausgesucht, die entweder eine besonders hohe Schädigungskonzentration oder eine besonders geringe Schädigung vermuten ließen. Die so aufgenommenen Bilder zeigten Probenausschnitte, die eine maximale Kantenlänge von höchstens 2,4 mm und mindestens 38 µm besaßen. Die Auswertung der erzeugten Bilder fand im Nachgang durch eine visuelle Betrachtung und Vergleich der einzelnen Aufnahmen statt.

4.4 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird kurz auf die prinzipielle Durchführung der einzelnen in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Versuchsreihen eingegangen. Dabei werden die wesentlichen Merkmale der jeweiligen Versuchsreihen vorgestellt, wie die Belastungsprogramme, die Belastungsniveaus und die durchgeführten Messungen.

4.4.1 Monotone Versuche

Zur Untersuchung des Verhaltens der verwendeten Probekörper unter monotoner Druckbeanspruchung wurden, wie im Kapitel 4.1.2 beschrieben, verschiedene statische Versuche durchgeführt. Sie fanden alle in derselben Prüfmaschine wie die zyklischen Versuche statt und unterteilen sich im Wesentlichen in weggeregelte und kraftgeregelte Prüfungen.

Wegregelung (SV-S1/2/3)

Bei den weggeregelten Versuchen wurde eine konstante Dehnrate von $\dot{\varepsilon} = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$ 1/s auf die Proben aufgebracht, welche über den Druckplattenabstand der Prüfmaschine geregelt wurde. Dieser wurde mit Hilfe von drei induktiven Wegaufnehmern vom Typ W2TK erfasst. Abgeleitet wurde diese Dehnrate aus drei E-Modul-Prüfungen, die entsprechend [DIN1048-5 1991] durchgeführt wurden. Um die Probekörper ausreichend weit in den Nachbruchbereich zu fahren, wurde auf die 300 mm hohen Proben ein mittlerer Gesamtweg von 1,8 mm aufgebracht, was einer Gesamtstauchung von ca. 6 ‰ entspricht. Neben der Erfassung des Druckplattenabstandes wurden auch die Verformungen an den Proben mit drei Clip-on Extensometern im mittleren Drittel der Probenhöhe auf einer Messlänge von 100 mm gemessen. Dies entspricht prinzipiell derselben Messkonfiguration, wie sie auch in den anderen Versuchsreihen zur Erfassung der Probendehnungen angewendet wurde.

Einen Sonderfall unter den weggeregelten Versuchen stellen die Versuche der Versuchsserie SV-S3 dar, die zur Ermittlung der Dehnungsanteile im Bruchmoment dienten. Hier erfolgte zusätzlich die Überwachung der Kraftentwicklung, so dass beim Überschreiten der Maximallast in der Belastungsphase sofort in die weggeregelte Entlastung der Probe umgeschaltet wurde. So wurde die Probe schließlich wieder bis zur vollständigen Entlastung zurück gefahren, um auch die zugehörigen elastischen und plastischen Dehnungsanteile zu bestimmen.

Kraftregelung (SV-S4/5)

Den größten Teil der statischen Versuche machten jedoch die kraftgeregelten Prüfungen aus, die in erster Linie zur Ermittlung der aktuellen Druckfestigkeiten der Probekörper dienten. Hierzu wurde in Anlehnung an die Vorgaben der [DIN-EN-12390-3 2002] eine konstante Belastungsrate von $\dot{\sigma} = 0{,}5$ N/mm² · s aufgebracht, bis es zum Versagen der Proben kam. Eine Erfassung von Verformungen während der Prüfungen fand nur in Einzelfällen statt.

4.4.2 Kriechversuche

Die Kriechversuche erfolgten entsprechend der im Kapitel 4.1.2 vorgestellten Konzeption an vier Probekörpern, die in einem ersten Schritt für ca. zwei Wochen einer konstanten Dauerbelastung unterworfen wurden. Nach Beendigung der Belastungsphase fand anschließend in einem zweiten Schritt eine Nachprüfung der Probekörper in Form eines statischen Festigkeitsversuches statt.

Kriechversuche (KV-S1)

Die Kriechversuche selbst erfolgten aus technischen Gründen nicht in einem üblichen Kriechstand, sondern im Prüfrahmen einer normalen servohydraulischen Prüfmaschine mit einem regelbaren Hydraulikzylinder. Die vier Probekörper wurden daher einzeln nacheinander geprüft, konnten aber deswegen auch mit dem in *Abbildung 4.21* dargestellten Belastungsprogramm beansprucht werden.

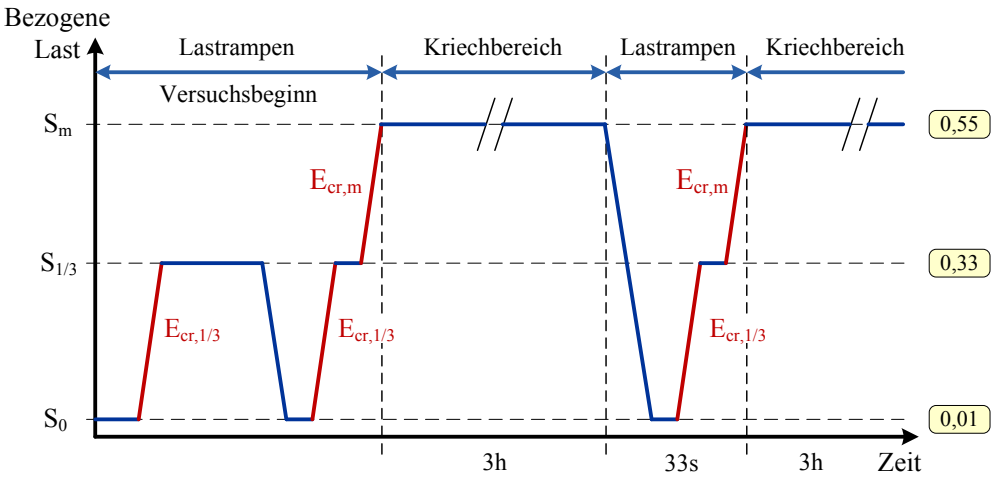

Abbildung 4.21: *Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die Kriechversuche mit den integrierten Be- und Entlastungsrampen in regelmäßigen Intervallen zu Messzwecken*

Aufgebracht wurde eine Kriechbeanspruchung von $0{,}55 \cdot f_c$, die genau der Mittellast in den hochzyklischen Ermüdungsversuchen der Versuchsreihe 4 entsprach. Diese wurde in regelmäßigen Abständen von ca. drei Stunden durch ein kurzes Intervall mit linearen Lastrampen unterbrochen. Die Lastrampen dienten dazu, neben der Verformung der Probe unter der Kriechlast zusätzlich auch die Entwicklung der bleibenden Verformung im annähernd entlasteten Zustand zu bestimmen sowie auch die Steifigkeit als Sekantenmodul in zwei verschiedenen Beanspruchungsbereichen zu ermitteln. Die entsprechenden Werte für die aufgebrachten Beanspruchungen sind in der *Tabelle 4.12* wiedergegeben.

Tabelle 4.12: *Verwendete Belastungsniveaus für die Kriechversuche*

Beanspruchung	S_0	$S_{1/3}$	S_m
S [-]	0,01	0,33	0,55
F [kN]	5	145	239
σ [N/mm²]	0,66	19,0	31,3

Zur Messung der sich einstellenden Verformungen des Probekörpers waren jeweils, wie in *Abbildung 4.22 links* dargestellt, drei DMS im mittleren Drittel der Probenhöhe verteilt auf dem Umfang appliziert. Die Messwerte der DMS wurden über den gesamten Versuch mit einer Abtastrate von 2 Hz aufgenommen. Neben der Dehnungsmessung erfolgte weiterhin die Messung der Kraft, der Lufttemperatur sowie der relativen Luftfeuchte.

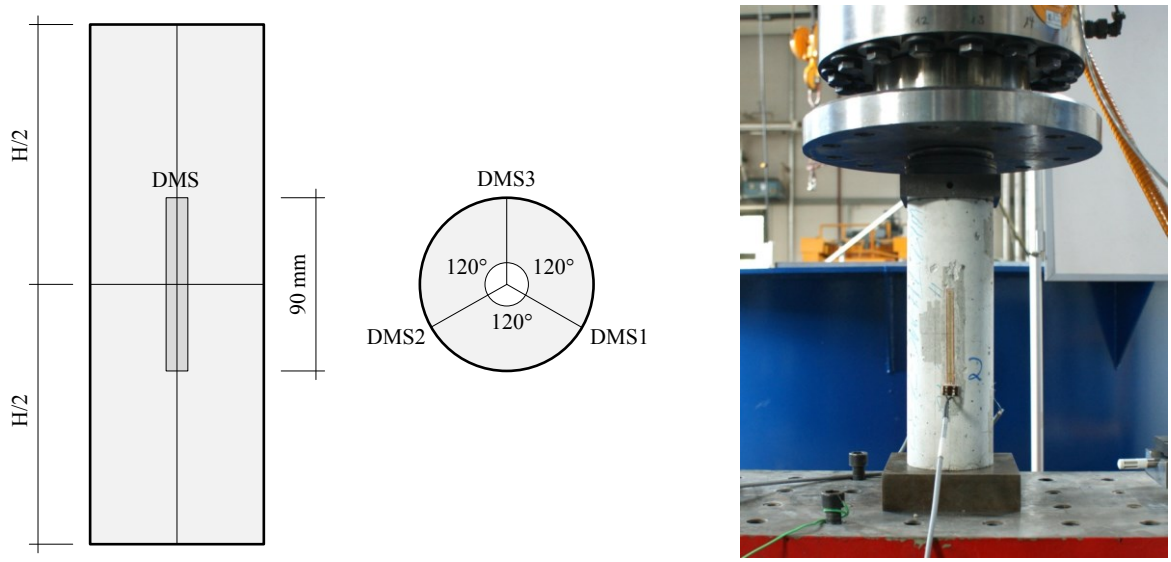

Abbildung 4.22: *Schematische Darstellung der Messanordnung am Probekörper für die Kriechversuche (links) sowie Bild eines Probekörpers in der Prüfmaschine während eines Kriechversuches (rechts)*

Zum Einbau in den Versuchsstand wurde der Probekörper unter der obenliegenden Kalotte zentral ausgerichtet, bevor die Grundlast S_0 zur Fixierung der Probe angefahren und anschließend mit dem Prüfprogramm begonnen wurde.

Die Messergebnisse aus den vier Kriechversuchen weisen insgesamt sehr geringe Abweichungen untereinander auf, so dass trotz der geringen Versuchsanzahl von einem repräsentativen Ergebnis ausgegangen werden kann. Aufgrund von Unterbrechungen im Prüfablauf konnten allerdings die Ergebnisse des ersten Probekörpers nur begrenzt in die Auswertung mit einfließen.

Obwohl die Kriechversuche nicht in einem klimatisierten Kriechstand stattfanden, sondern unter dem normalen Raumklima des Prüflabores, ließ sich keine Auswirkung daraus auf die Messergebnisse ausmachen. Zum einen waren die gemessenen Temperaturschwankungen während der Prüfungen mit max. 2 °C sehr gering und zum anderen zeigten die Messergebnisse aus den Kriechversuchen keinerlei Einflüsse aus den Temperaturveränderungen. Ein weiterer positiver Aspekt aus dieser Prüfkonstellation besteht darin, dass alle anderen Versuche an den kleinen Betonzylindern ebenfalls unter Raumklima in demselben Prüflabor stattgefunden haben. Somit können die Kriechergebnisse sogar gut mit den Ergebnissen der hochzyklischen Ermüdungsversuche der UHC-Versuchsreihe in Beziehung gesetzt werden.

Nachprüfungen

Die Nachprüfung der Probekörper erfolgte in Form einer kraftgeregelten Festigkeitsprüfung, wobei das in *Abbildung 4.23* gezeigte Lastprogramm abgefahren wurde. Da eine Nachprüfung direkt im Anschluss an den Kriechversuch nicht möglich war, erfolgte diese frühestens vier Wochen nach Beendigung des Kriechversuches, um zeitliche Prozesse infolge der Entlastung möglichst weit abklingen zu lassen.

Während der Nachprüfung wurden die Dehnungen über die drei vorhandenen DMS an den Proben sowie die Kraft in der Prüfmaschine gemessen. Die zu Beginn der Nachprüfung gefahrene Be- und Entlastungsrampe liefert die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der zuvor im Kriechversuch vorbeanspruchten Proben in Form einer Hysterese. Dabei wird bis zu einer

maximalen Last von $S_{max} = 0{,}75$ gefahren, die genau dem obersten Lastniveau der hochzyklischen Ermüdungsversuche der UHC-Versuchsreihe entspricht, um so einen direkten Vergleich zwischen beiden Versuchsreihen zu ermöglichen.

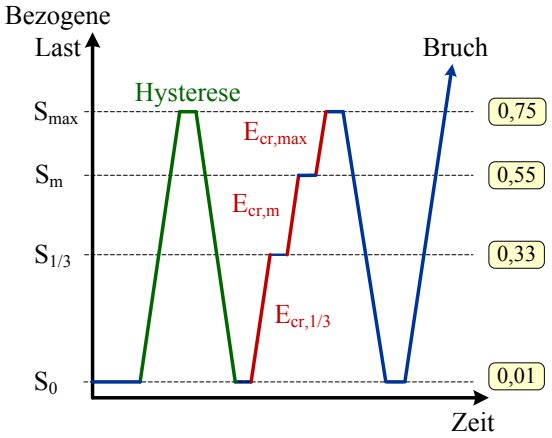

Abbildung 4.23: *Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die statische Nachprüfung der Probekörper im Anschluss an die Kriechversuche*

Die mit diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse werden im Kapitel 5.2 vorgestellt und analysiert. Sie können annähernd als Kriechanteil in den gemessenen Werten der hochzyklischen Ermüdungsversuche der UHC-Versuchsreihe angesehen werden und somit mit diesen in Beziehung gesetzt werden, um Rückschlüsse auf den entsprechenden Ermüdungsanteil zu ziehen.

4.4.3 Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC)

Die Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC-Versuche) waren die ersten zyklischen Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Sie dienten neben der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens in diesem Bereich vorrangig auch der Erprobung und Optimierung der Mess- und Prüftechnik. Das dabei entwickelte Belastungsprogramm ist mit den zugehörigen Lastniveaus in *Abbildung 4.24* wiedergegeben, welches in dieser Form schließlich auch für alle weiteren zyklischen Versuche zum Einsatz kam. Das Lastprogramm zeichnet sich im Wesentlichen durch die sinusförmige zyklische Beanspruchung mit einer Frequenz von 5 Hz aus sowie durch einen Abschnitt mit mehreren linearen Lastrampen, der die Sinuslast in regelmäßigen Intervallen von 250 Lastzyklen unterbricht. Dieser Abschnitt, in welchem auch der überwiegende Teil aller Messungen während der Ermüdungsversuche stattgefunden hat, dient vorrangig messtechnischen Zwecken. Die zugehörigen Werte für die in dieser Versuchsreihe aufgebrachten Beanspruchungen sind in der *Tabelle 4.13* zusammengestellt.

Wie das Lastdiagramm in *Abbildung 4.24* zeigt, findet dabei als erstes eine fast vollständige Entlastung der Probe auf S_0 statt, gefolgt von einer vollen Belastung auf S_{max} und einer weiteren Entlastung. Dies entspricht einer Art Hysterese und erlaubt zugleich die bleibenden Verformungen in der Probe zu ermitteln. Im Anschluss wird die Oberlast S_{max} in drei Stufen wieder angefahren, die dazu dienten, jeweils den E-Modul als Sekantenmodul zu ermitteln. Dabei handelt es sich bei der untersten E-Modul-Rampe, die zwischen der Grundlast S_0 und

1/3 der statischen Bruchlast $S_{1/3}$ gefahren wird, um eine in Anlehnung an [DIN1048-5 1991] gestaltete Rampe zur Bestimmung des statischen E-Moduls von Beton.

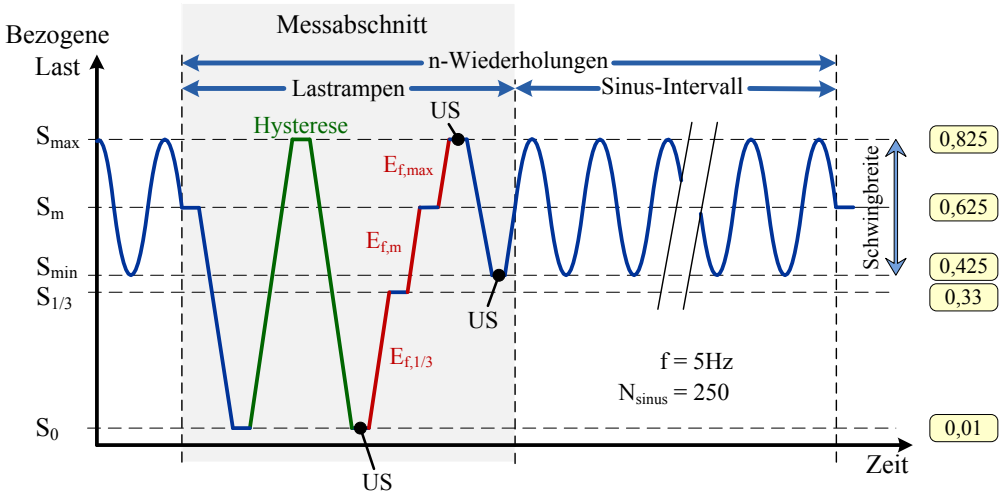

Abbildung 4.24: *Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich mit dem für Messzwecke integrierten Abschnitt aus Lastrampen*

Im Unterschied zur [DIN1048-5 1991] wurde aus Zeitgründen hier jedoch eine 4-fach höhere Belastungsrate verwendet. Vorversuche hatten aber gezeigt, dass der Einfluss der höheren Belastungsrate auf das Ergebnis sehr gering ist. Die nachfolgenden beiden E-Modul-Rampen resultieren einfach aus den sich anschließenden Lastniveaus der Mittellast S_m und der Oberlast S_{max}. Abschließend wurde dann auch noch die Unterlast S_{min} angefahren, bevor es letztlich wieder auf die Mittellast S_m ging und das nächste Sinusintervall startete.

Tabelle 4.13: *Für die Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) verwendete Belastungsniveaus*

Beanspruchung	S_0	$S_{1/3}$	S_{min}	S_m	S_{max}
S [-]	0,01	0,33	0,425	0,625	0,825
F [kN]	5	145	185	272	360
σ [N/mm²]	0,66	19,0	24,2	35,6	47,2

Während der kurzen Haltephasen auf den einzelnen Lastniveaus erfolgten weitere Messungen mit dem Ultraschallsystem oder mit ARAMIS. Da aus verschiedenen Gründen nicht an jedem Versuch alle Messtechniken zusammen eingesetzt werden konnten, ergaben sich in Abhängigkeit der jeweils angewandten Messmethoden im Bereich der Lastrampen teilweise etwas unterschiedlich gestaltete Lastprogramme. Dies hatte zur Folge, dass es bei Versuchen mit gleichen Lastzyklen am Ende trotzdem zu leicht verschiedenen Laufzeiten kommen konnte.

Die prinzipielle Anordnung der Messtechnik in diesen Versuchen ist schematisch in *Abbildung 4.25 links* dargestellt und beispielhaft für einen Versuch in *Abbildung 4.25 rechts* wiedergegeben. Zur Messung der Längsverformung der Probekörper waren alle Proben mit je drei Messaufnehmern im mittleren Drittel der Probenhöhe bestückt. Zum Einsatz kamen dabei

im Rahmen der LHC-Versuche überwiegend induktive Wegaufnehmer vom Typ W2TK, während bei allen anderen zyklischen Versuchen vorwiegend DMS verwendet wurden.

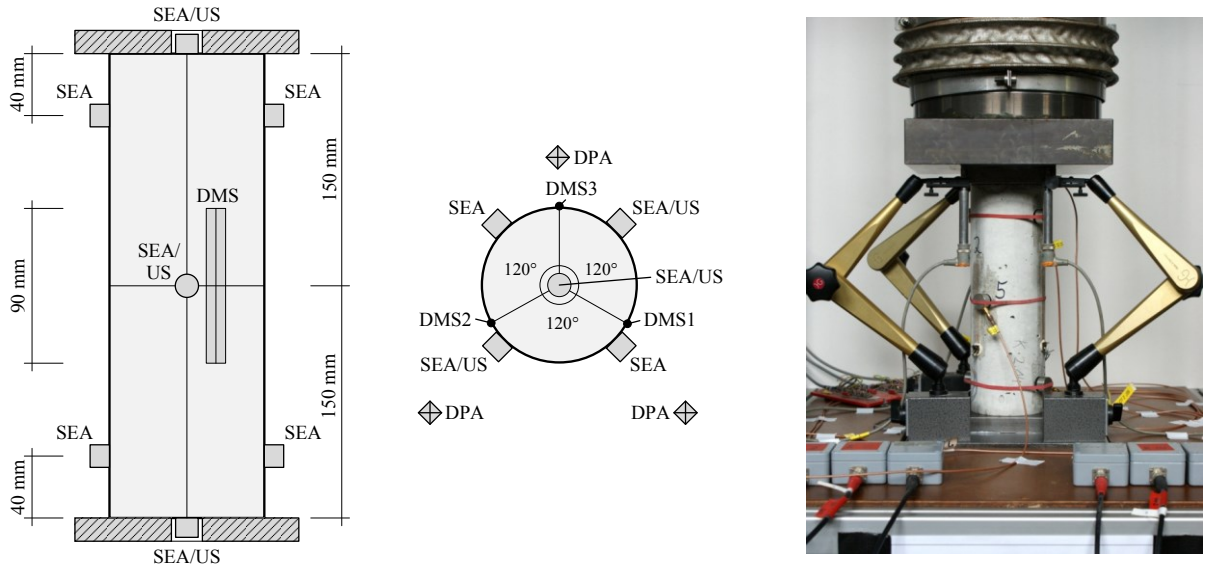

Abbildung 4.25: *Schematische Darstellung der Messanordnung an der Probe (links) sowie Foto einer Probe in der Prüfmaschine mit applizierter Messtechnik (rechts) für die Ermüdungsversuche*

Die Ultraschallmessungen fanden vorrangig mit zwei Sensoren horizontal durch den Probekörper auf halber Höhe statt. Nur in einem Versuch wurde auch die Messung vertikal durch die Probe realisiert. Weiterhin wurden auch die Schallemissionen innerhalb der Probe entweder mit 6 oder mit 8 Sensoren gemessen, die wie in *Abbildung 4.25 links* dargestellt, angeordnet waren. Die verwendete Detektionsschwelle für die Erfassung der Schallemissionen betrug in den LHC-Versuchen 55 dB. Darüber hinaus erfolgte an einigen Proben auch die Messung der Oberflächenverformungen mit dem System ARAMIS, mittels der Messkonfiguration, die bereits in Kapitel 4.3.2 vorgestellt wurde. Detailliertere Beschreibungen zu allen einzelnen eingesetzten Messtechniken finden sich im Kapitel 4.3.2. Eine Übersicht über alle einzelnen Versuche mit den jeweils durchgeführten Messungen ist im Anhang B3 in *Tabelle B3 1* und *Tabelle B3 2* angefügt.

Tabelle 4.14: *Übersicht über die durchgeführten Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) mit den erreichten Zyklenzahlen und der Versuchsdauer*

S_{min} [-]	S_{max} [-]	f [Hz]	Anzahl [-]	Lastzyklen N_f [-]	N_f Mittel [-]	Dauer [min]
Serie LHC-S1A: Durchgängig bis 100% N_f						
0,425	0,825	5,0	17	2.180-37.418	12.596	19-372
Serie LHC-S1B: Bis 100% N_f mit kurzer Pause						
0,425	0,825	5,0	11	1.564-72.476	25.581	20-735
Serie LHC-S2: Teilschädigung bis N_i ohne Versagen						
0,425	0,825	5,0	4	1.459-6.454	3.980	15-69

Einen Überblick über die drei Versuchsserien, die innerhalb der LHC-Versuchsreihe umgesetzt wurden, mit den jeweiligen Probenzahlen und den erreichten Lastzyklen ist in der *Tabelle 4.14* wiedergegeben. Sie zeigt ein breites Spektrum der erreichten Bruchlastzyklen von 1.564 bis zu 72.478 Zyklen, die sich alle im angestrebten unteren Bereich des hochzyklischen Spektrums befinden. In den Versuchen der Serie LHC-S1A wurden die Proben durchgängig bis zum Ermüdungsversagen gefahren, wohingegen in der Serie LHC-S1B zu unterschiedlichen Lebensdauerzeitpunkten im Versuchsverlauf eine kurze Pause eingefügt wurde. Die dritte Serie LHC-S2 beinhaltet schließlich Versuche, die nur zyklisch vorgeschädigt wurden, ohne ein Ermüdungsversagen. Neben den Angaben über die Lastzyklen ist in *Tabelle 4.14* auch die Dauer der Ermüdungsversuche aufgeführt. Diese zeigen, dass es sich um sehr kurzzeitige Versuche mit Laufzeiten zwischen 15 Minuten und max. 12,5 Stunden handelte.

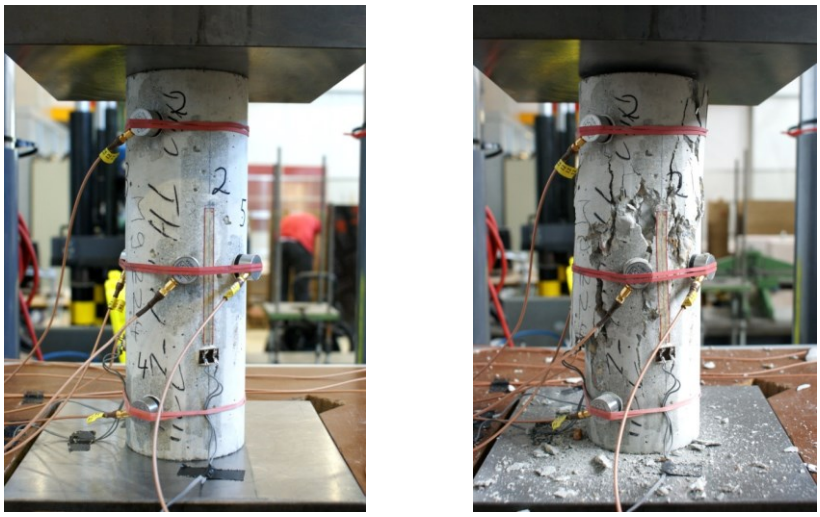

Abbildung 4.26: *Foto einer Probe in der Prüfmaschine vor dem Ermüdungsversuch (links) und nach dem Ermüdungsversagen (rechts)*

Ein typisches Bruchbild einer durch Ermüdungsbeanspruchung versagten Probe ist in *Abbildung 4.26 rechts* dem ungeschädigten Ausgangszustand in *Abbildung 4.26 links* gegenübergestellt. Bei der Durchführung wurde versucht, soweit als möglich eine identische Umsetzung der einzelnen Versuche zu realisieren.

4.4.4 Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC)

Diese Versuchsreihe mit Ermüdungsversuchen im oberen hochzyklischen Bereich (UHC-Versuche) stellt den Hauptteil der experimentellen Untersuchungen dar. Wie bereits im Kapitel 4.1.2 beschrieben, lassen sich die Versuche der UHC-Versuchsreihe prinzipiell in zwei Gruppen unterteilen. Zum einen in diejenigen Ermüdungsversuche, bei denen die Probekörper bis zum Ermüdungsversagen zyklisch geprüft wurden und zum anderen in jene, bei denen die Proben bei bestimmten Lebensdauerzuständen vor dem Ermüdungsversagen aus der zyklischen Prüfung herausgenommen wurden. Die Durchführung beider Versuchsgruppen wird im Folgenden kurz separat erläutert.

100% N_f Versuche (UHC-S1)

Bei dem verwendeten Lastprogramm handelt es sich prinzipiell um das gleiche, welches für die LHC-Versuche verwendet wurde und bereits in *Abbildung 4.24* dargestellt ist. Die beiden

Lastprogramme unterscheiden sich nur in der Höhe der einzelnen Lastniveaus sowie in der Länge des Sinus-Intervalls. Für die UHC-Versuche wurde die Mittellast S_m im Vergleich zu den LHC-Versuchen abgesenkt, wogegen die Schwingbreite beibehalten wurde. Die *Tabelle 4.15* zeigt die zugehörigen konkreten Werte für die angesetzten Beanspruchungen dieser Versuchsreihe. Eine entsprechende Darstellung des Lastprogramms findet sich im Anhang A3 in *Abbildung A3 1*.

Tabelle 4.15: *Verwendete Belastungsniveaus für die Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC)*

Beanspruchung	S_0	$S_{1/3}$	S_{min}	S_m	S_{max}
S [-]	0,01	0,33	0,35	0,55	0,75
F [kN]	5	145	152	239	326
σ [N/mm²]	0,66	19,0	19,9	31,3	42,7

Die Länge des Sinus-Intervalls wurde im Gegensatz zu den LHC-Versuchen auf 10.000 Zyklen angehoben, um eine weitestgehend vergleichbare Messauflösung im Hinblick auf die Anzahl der Messabschnitte über die gesamte Lebensdauer zu erreichen.

Auch die Anordnung der Messtechnik war weitestgehend identisch mit der in *Abbildung 4.25* vorgestellten Anordnung für die LHC-Versuche. Im Unterschied zu den LHC-Versuchen wurden die Längsverformungen jedoch über drei DMS vom Typ PL90 erfasst. Zusätzlich wurde meistens auch der Druckplattenabstand (DPA) über drei induktive Wegaufnehmer mit aufgenommen. Bei der Ultraschallmessung kamen außerdem zwei verschiedene Messsysteme zum Einsatz. Für die Erfassung der Schallemissionen wurde eine Detektionsschwelle von 45 dB verwendet. Die Messung der Oberflächenverformungen mit dem System ARAMIS wurde ebenfalls eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung der beiden verwendeten US-Messsysteme sowie auch zu allen anderen eingesetzten Messtechniken findet sich im Kapitel 4.3.2. Im Anhang B1 in *Tabelle B1 1* ist zudem auch eine Übersicht über alle einzelnen Versuche der Serie UHC-S1 mit den jeweils durchgeführten Messungen angefügt.

Abbruchversuche

Bei den Abbruchversuchen handelt es sich um drei Versuchsserien, bei denen die Probekörper gezielt nur bis zu einem bestimmten Schädigungsgrad zyklisch vorgeschädigt wurden, um sie anschließend verschiedenen zerstörenden Nachuntersuchungen zu unterziehen. Schematisch ist dieses Konzept in *Abbildung 4.27* an der typisch 3-phasigen Evolutionskurve der Verzerrungen veranschaulicht. In diesen drei Versuchsserien wurde einmal ein Lebensdauerzustand von ca. 10 %, von ca. 50 % und von ca. 90 % angefahren, so dass alle drei Phasen der Lebensdauer untersucht werden konnten. Wie die *Abbildung 4.27* zeigt, gehören zur Vervollständigung der Untersuchung auch die zuvor beschriebenen Versuche der Serie UHC-S1, die bis zum Ermüdungsversagen gehen sowie weitere Untersuchungen an mechanisch unbeanspruchten Probekörpern.

Das verwendete Lastprogramm sowie die konkreten Lastwerte sind mit denen der 100%-Versuche (UHC-S1) identisch. Gleiches gilt für die Messanordnung und auch die Durchführung der Messungen. Der Abbruch der Ermüdungsversuche zu den drei verschiedenen Zeitpunkten wurde auf Basis der Messergebnisse aus den zuvor durchgeführten Versuchen der Serie UHC-S1 realisiert, die bis zum Ermüdungsversagen durchliefen. Anhand der daraus gewonnenen Evolutionskurven der E-Moduli $E_{f,1/3}$, $E_{f,max}$ und der SE-Aktivität wurden

Grenzwertkombinationen abgeleitet, die einen automatisierten Abbruch des Versuches bei ca. 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer ermöglichten. Nach dem Abbruch wurde die Probe vollständig entlastet und dann entweder direkt im Anschluss in der Prüfmaschine statisch geprüft oder für die Lichtmikroskopie und REM-Untersuchungen entnommen.

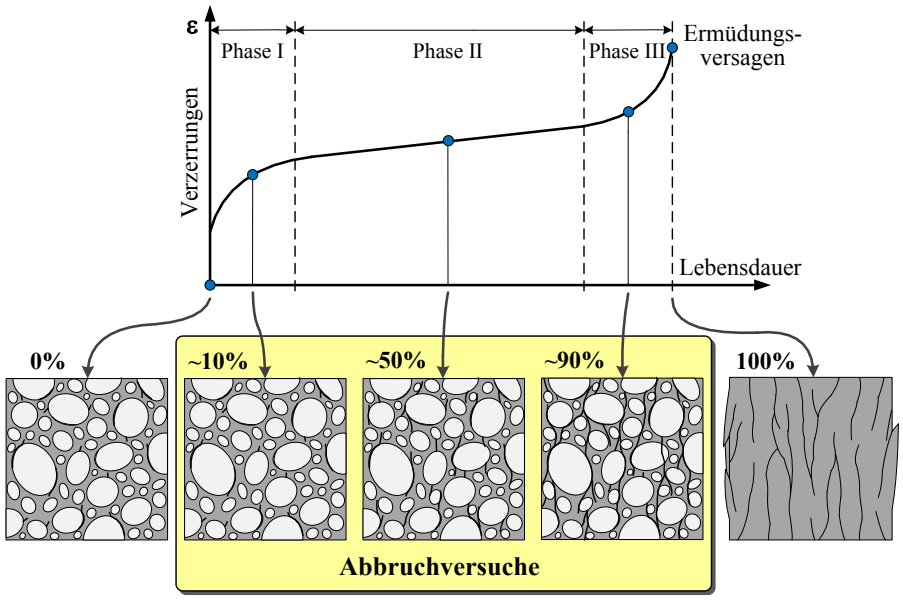

Abbildung 4.27: *Schematische Darstellung der Entnahmezeitpunkte während des Ermüdungsvorgangs für die drei Versuchsserien der Abbruchversuche*

Die *Tabelle 4.16* gibt einen Überblick über alle vier Serien der UHC-Versuche mit den Angaben zu der jeweiligen Probenanzahl, zu den erreichten Lastzyklen sowie der Dauer der Versuche. Die Lastspielzahlen liegen wie angestrebt im oberen Bereich des hochzyklischen Spektrums zwischen 10^6 und 10^7 Lastzyklen.

Tabelle 4.16: *Übersicht über die durchgeführten Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC) mit den Abbruchversuchen sowie den erreichten Zyklenzahlen und der Versuchsdauer*

S_{min} [-]	S_{max} [-]	f [Hz]	Anzahl [-]	Lastzyklen N_f [-]	N_f Mittel [-]	Dauer [h]
Serie UHC-S1: Durchgängig bis 100% N_f						
0,35	0,75	5,0	14	1.734.130-8.402.485	4.348.414	101-488
Serie UHC -S2: Teilschädigung bis 90% Lebensdauer						
0,35	0,75	5,0	7	1.220.077-11.971.372	4.691.437	71-701
Serie UHC -S3: Teilschädigung bis 50% Lebensdauer						
0,35	0,75	5,0	7	1.291.233-14.603.871	4.405.619	76-857
Serie UHC -S4: Teilschädigung bis 10% Lebensdauer						
0,35	0,75	5,0	6	210.207-740.711	487.137	12-43

Ein detaillierter Überblick über alle einzelnen durchgeführten Versuche der vier Serien mit den zugehörigen Messungen und den erreichten Zyklenzahlen findet sich im Anhang B1 in *Tabelle B1 1* und *Tabelle B1 2*. Die Laufzeiten in diesen Versuchsserien bewegten sich zwischen min. 12,5 h und max. 35 Tagen.

Im Bezug auf die Abbruchmethode hatten die Versuchsergebnisse der durchgehenden Versuche der Serie UHC-S1 relativ schnell gezeigt, dass der angestrebte gezielte Abbruch anhand von Lastzyklenzahlen nicht realisierbar ist. Dabei wurde diese Vorgehensweise in der Vergangenheit bereits mehrfach für bewusste Abbrüche von Ermüdungsversuchen angewendet, wie z.B. in [SHAH & CHANDRA 1970; AWAD & HILSDORF 1971; IBUK 2008]. Die beiden Diagramme in *Abbildung 4.28 links* und *rechts* veranschaulichen jedoch sehr deutlich, wie ungenau eine auf Zyklenzahlen basierende Methode ist.

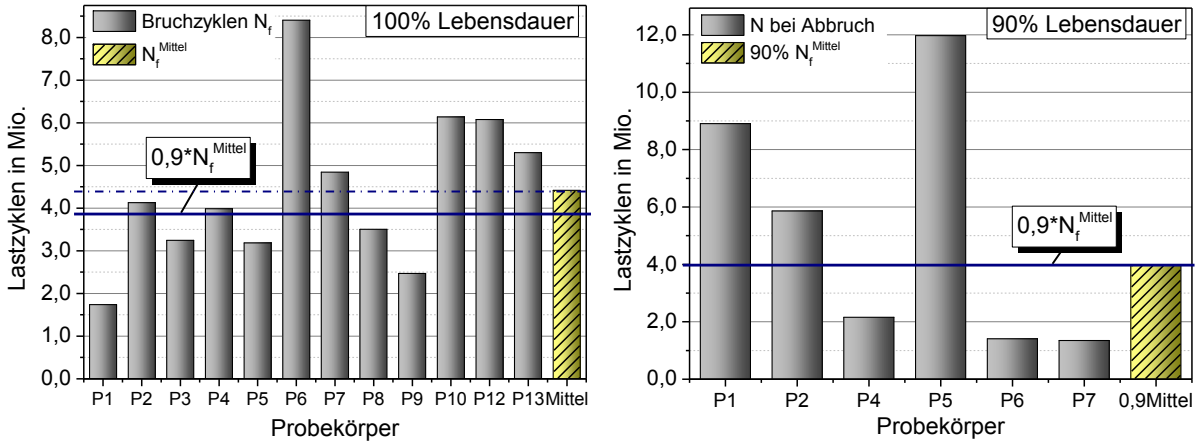

Abbildung 4.28: *Veranschaulichung der Nichteignung der Zyklenzahlen als Lebensdauerindikator, (links) in den Versuchen erreichte Bruchzyklenzahlen mit Mittelwert sowie (rechts) in den Abbruchversuchen tatsächlich erreichte Zyklenzahlen bei 90 % der Ermüdungslebensdauer*

Die *Abbildung 4.28 links* zeigt die in der Serie UHC-S1 erreichten Bruchlastzyklen sowie den zugehörigen Mittelwert und den daraus resultierenden 90 % Wert als blaue Linie. Es wird schnell ersichtlich, dass mit dem 90 % Wert die meisten Versuche deutlich über- oder unterschätzt werden und nur in Ausnahmen annähernd der angestrebte Lebensdauerzustand erreicht werden kann. In der *Abbildung 4.28 rechts* sind auch die aus der Serie UHC-S2 (90%-Versuche) tatsächlich erreichten Zyklenzahlen beim Abbruch bei 90 % der Lebensdauer mit der hier vorgestellten Methode zu sehen. Sie unterstreichen nochmals sehr deutlich, wie ungeeignet in diesem Falle die Lastzyklenzahlen sind.

Nach dem Abbruch des zyklischen Versuches wurden die vorgeschädigten Proben entweder einer statischen Nachprüfung unterzogen oder für die mikroskopische Untersuchung präpariert. Im Falle der statischen Nachprüfung blieb die Probe komplett mit der applizierten Messtechnik aus dem zyklischen Teil in der Prüfmaschine stehen, in welcher die Probe soweit wie möglich direkt im Anschluss einem weggeregelten Druckversuch unterzogen wurde. Die dabei verwendete Dehnrate entsprach jener, die bei den in Kapitel 4.4.1 vorgestellten Versuchen zur Bestimmung des statischen E-Moduls nach [DIN1048-5 1991] gemessen wurde. Diese betrug $\dot{\varepsilon} = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$ 1/s. Für die mikroskopischen Untersuchungen wurde die Probe aus dem Versuchsstand vollständig ausgebaut und jegliche Messtechnik entfernt. So zeitnah wie möglich erfolgte dann der erste Schritt der Probenpräparation, bei dem entsprechend der Beschreibung zur Lichtmikroskopie in Kapitel 4.3.2, der komplette Probekörper zur Stabili-

sierung in Kunstharz eingebettet wurde. Anschließend wurden die Proben der weiteren Probenpräparation zugeführt. Für die Untersuchungen am REM wurden die für die Lichtmikroskopie präparierten Proben verwendet, nachdem die mikroskopischen Untersuchungen abgeschlossen waren. Dazu wurden die Proben nochmals zugeschnitten und zusätzlich speziell aufpoliert.

4.4.5 Versuche an Großproben

Bei den Großversuchen handelt es sich um statische und zyklische Versuche an hoch skalierten Probekörpern, die soweit es möglich war, in gleicher Art und Weise geprüft wurden wie die kleinen Probekörper. Es wurde allerdings aufgrund der Größe und des Aufwands nur eine sehr geringe Anzahl an Versuchen umgesetzt. Auf die statischen Versuche wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da diese lediglich zur Vorbereitung der zyklischen Versuche dienten und prinzipiell in gleicher Weise wie die statischen Versuche an den kleinen Probekörpern durchgeführt wurden.

Die Ermüdungsversuche der Serie GZV-S1 waren Versuche, die wie die LHC-Versuche an den kleinen Probekörpern auch, im unteren hochzyklischen Bereich angesetzt waren. Sie wurden zwar an einer anderen Prüfmaschine als die Prüfungen der kleinen Probekörper durchgeführt, es wurde aber trotzdem das gleiche Lastprogramm verwendet wie bei den zuvor beschriebenen zyklischen Versuchen. Dieses findet sich im Anhang A3 in *Abbildung A3 2* und entspricht auch weitestgehend dem in *Abbildung 4.24* (Kap. 4.4.3) dargestellten Lastprogramm. Nur die Lastniveaus wurden etwas verändert, eine geringere Prüffrequenz von 1 Hz statt 5 Hz und ein auf 400 Zyklen erhöhtes Sinus-Intervall im Gegensatz zu den LHC-Versuchen an den kleinen Proben wurden verwendet. Die ermittelten statischen Druckfestigkeiten der großen Proben bewegten sich generell etwas unterhalb derer, die die zugehörigen kleinen Zylinder der gleichen Herstellung aufwiesen. Da die Versuche außerdem mit einer geringeren Frequenz als bei den kleinen Proben gefahren wurden, sind aufgrund dieser beiden Tatsachen die Lastniveaus im Vergleich zu den LHC-Versuchen an den kleinen Proben modifiziert worden. Um also sicher eine ausreichend hohe Zahl an Lastzyklen zu erreichen, wurde die Mittellast S_{min} bei gleichbleibender Schwingbreite etwas reduziert. Die *Tabelle 4.17* gibt die einzelnen konkreten Lastwerte wieder, wobei die absoluten Lastwerte nur für die Probe P2 gelten. Infolge anderer Druckfestigkeiten bei den zur Probe P1 zugehörigen kleinen Betonzylindern weichen die absoluten Lastwerte der Probe P1 etwas von den in der *Tabelle 4.17* dargestellten Werten ab.

Tabelle 4.17: *Verwendete Belastungen für die Ermüdungsversuche an den Großproben im unteren hochzyklischen Bereich*

Beanspruchung	S_0	$S_{1/3}$	S_{min}	S_m	S_{max}
S [-]	0,01	0,33	0,40	0,60	0,80
F [kN]	90	2.200	2.640	3.960	5.280
σ [N/mm²]	0,71	17,4	20,9	31,3	41,8

Die eingesetzten Messungen sowie deren Anordnung entsprechen weitestgehend denen, die in den Ermüdungsversuchen an den kleinen Probekörpern verwendet wurden. Aufgrund der Größe der Proben wurden jedoch einige Anpassungen vorgenommen. Zum einen wurden zusätzlich zu den Längsverformungen hier auch die Querverformungen über drei DMS auf

halber Probenhöhe gemessen. Weiterhin wurde die Anzahl der Schallemissions- bzw. der Ultraschallsensoren erhöht und in diesem Zusammenhang auch die Anordnung etwas modifiziert. Bei der Erfassung der Schallemissionen wurde die Detektionsschwelle auf 35 dB gesetzt. Die verwendete Messanordnung ist schematisch in *Abbildung 4.29 links* wiedergegeben, zusammen mit dem Bild eines eingebauten Probekörpers in *Abbildung 4.29 rechts*.

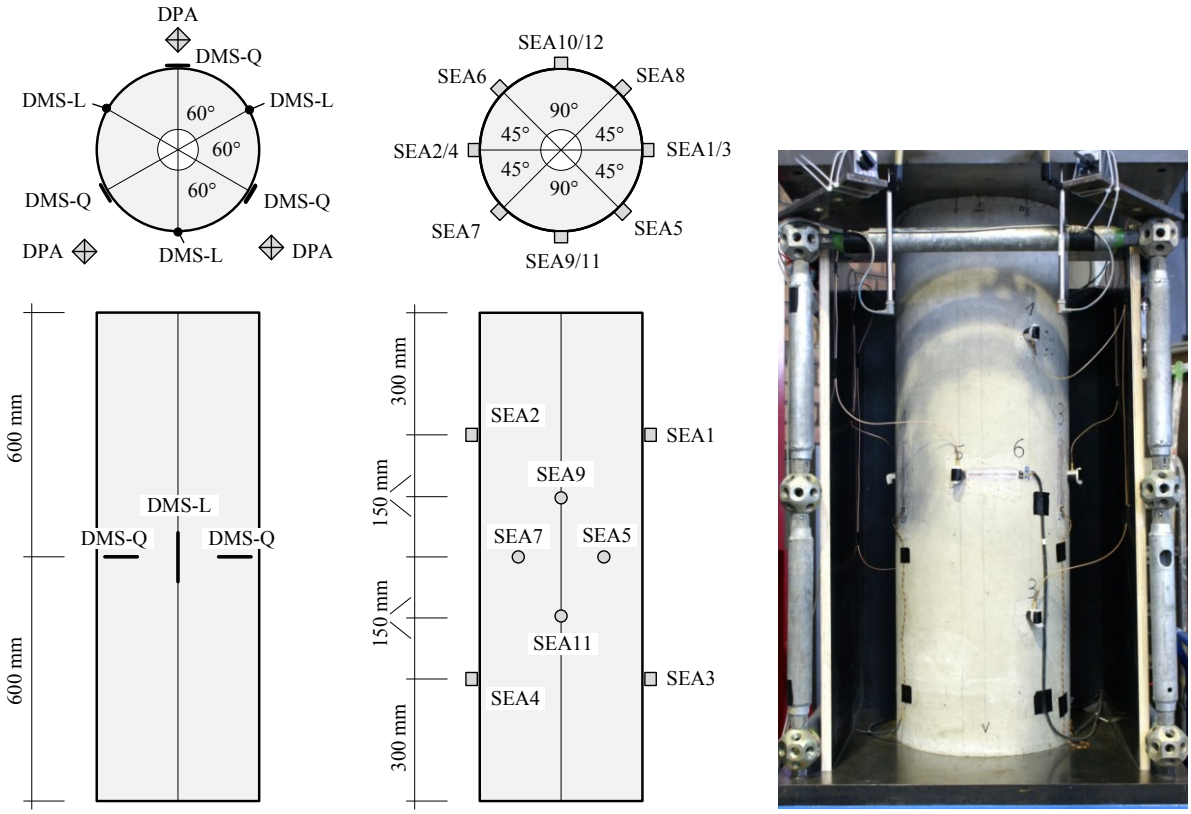

Abbildung 4.29: *Schematische Darstellung der Messanordnung für die Ermüdungsversuche an den Großproben (links) sowie Foto einer Großprobe in der Prüfmaschine mit applizierter Messtechnik (rechts)*

Der Versuchsablauf entsprach ansonsten dem bei den zyklischen Prüfungen der kleinen Probekörper. Die in den beiden Versuchen erreichten Zyklenzahlen und die entsprechenden Laufzeiten sind in der *Tabelle 4.18* zusammengestellt. Obwohl es nur zwei Versuche sind, zeigen die Ergebnisse trotz der leichten Absenkung der Lastniveaus sehr ähnliche Werte der Bruchlastzyklen verglichen mit den LHC-Versuchen an den kleinen Proben. Dabei handelt es sich bereits um einen Hinweis auf den Größeneffekt, der in der anschließenden Versuchsauswertung noch diskutiert wird.

Tabelle 4.18: *Übersicht über die durchgeführten Ermüdungsversuche an den Großproben im unteren hochzyklischen Bereich mit den erreichten Zyklenzahlen und der Versuchsdauer*

S_{min} [-]	S_{max} [-]	f [Hz]	Anzahl [-]	Lastzyklen N_f [-]	N_f Mittel [-]	Dauer [h]
Serie GZV-S1: Durchgängig bis 100% N_f						
0,40	0,80	1,0	2	5.455/39.670	22.563	1:58/13:50

Das Ermüdungsversagen der Proben erfolgte wie bei den kleinen Probekörpern auch durch schlagartiges Zerplatzen der Proben, das sich durch sichtbare Rissbildung auf der Oberfläche im Vorfeld angekündigt hat. Die beiden Fotos in der *Abbildung 4.30 links* und *rechts* zeigen das Resultat nach dem Ermüdungsversagen.

Abbildung 4.30: *Fotos einer Großprobe in der Prüfmaschine nach dem Ermüdungsversagen*

Kapitel 5

Analyse und Vergleich der Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel beinhaltet die Auswertung und den Vergleich der Ergebnisse der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Versuche. Es stellt daher den Hauptteil dieser Arbeit dar. Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse zum Ermüdungsvorgang im Beton bilden außerdem die Grundlage für die im anschließenden Kapitel 6 abgeleitete Beschreibung für den Ablauf des Ermüdungsprozesses sowie für dessen empirische Abbildung. Als erstes findet eine detaillierte Analyse der Ergebnisse aus den UHC-Versuchen statt, da der Fokus dieser Arbeit auf dem hochzyklischen Verhalten des Betons liegt. Anschließend werden diese Ergebnisse schrittweise mit denen der anderen Versuchsreihen verglichen und analysiert. Dabei wird zuerst auf den Einfluss des Kriechens in den UHC-Versuchen eingegangen, bevor anschließend die Zusammenhänge zwischen dem Ermüdungsverhalten im unteren und oberen hochzyklischen Bereich betrachtet werden. Im weiteren Verlauf wird dann ein Vergleich zwischen dem statischen und dem zyklischen Materialverhalten vorgenommen, bevor abschließend der Einfluss der Probengröße beim Vergleich der Ergebnisse der Großproben mit denen der Kleinproben untersucht wird.

5.1 Hochzyklisches Ermüdungsverhalten (UHC)

Für die Versuchsergebnisse, die aus den in Kapitel 4.4.4 vorgestellten hochzyklischen Ermüdungsversuchen gewonnen wurden, werden nachfolgend alle Ergebnisse schrittweise analysiert. In diesem Zusammenhang werden die erhaltenen Ergebnisse zwecks einer besseren Übersicht in drei Kategorien unterteilt. Zum einen in das ***Langzeitmaterialverhalten***, das sich auf der Makroebene zeigt und die Entwicklung bestimmter Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer beinhaltet. Dazu gehören die Entwicklung der Verformungen auf den jeweiligen Lastniveaus, die Entwicklung der Steifigkeiten, die Entwicklung der Schallemissionsaktivitäten sowie auch die Entwicklung der Eigenschaften von Ultraschallsignalen über die Lebensdauer. Als zweite Kategorie wird das makroskopische ***Kurzzeitmaterialverhalten*** festgelegt, bei dem bestimmte Materialeigenschaften oder Verhaltensweisen jeweils zu einem festen Zeitpunkt der Lebensdauer unter monotoner Beanspruchung betrachtet werden. Dies beinhaltet zum Beispiel die Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei einem bestimmten Schädigungsgrad, die mit Hilfe der Hysteresen ermittelt wurde oder auch die vollständige Arbeitslinie aus der statischen Nachprüfung vorgeschädigter Proben. Die letzte Kategorie stellen die ***Zustände im Materialgefüge*** dar, die die Gefügezustände im Beton auf Meso- und Mikroebene zu bestimmten Lebensdauerzuständen beinhalten. Vorrangig handelt es sich dabei um Mikrorisszustände aus Untersuchungen mittels Lichtmikroskop oder REM sowie auch Messungen flächiger inhomogener Dehnungsverteilungen mit Hilfe von ARAMIS.

Um eine vergleichende Darstellung der einzelnen Versuchsergebnisse zu ermöglichen sowie um auch Mittelwerte ermitteln zu können, wurden die Verläufe der einzelnen Ergebnisse auf die relative Lebensdauer des jeweiligen Versuches bezogen. Diese ergibt sich aus der Normierung der Zyklenzahlen N durch die erreichte Bruchlastspielzahl N_f und wird hier in Prozent angegeben.

5.1.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene)

Bei den in diesem Abschnitt dargestellten Versuchsergebnissen zum makroskopischen Langzeitmaterialverhalten handelt es sich prinzipiell, mit wenigen Ausnahmen, um gemittelte Werte aus den Ergebnissen aller einzelnen Versuche. Die zugehörigen Diagramme mit den Kurvenscharen der einzelnen Versuche finden sich im Anhang B1 in *Abbildung B1 5* bis *Abbildung B1 10*, ebenso wie eine Zusammenstellung der nachfolgend erläuterten Versuchsergebnisse, im Anhang B1 in *Abbildung B1 1*.

Verformungen

Aus den mittels der DMS gemessenen Verformungen wurden die Evolutionskurven der Dehnungen auf drei verschiedenen Beanspruchungsniveaus erstellt und über die relative Lebensdauer dargestellt. Das Diagramm in *Abbildung 5.1* zeigt die gemittelten Verläufe für die UHC-Versuche.

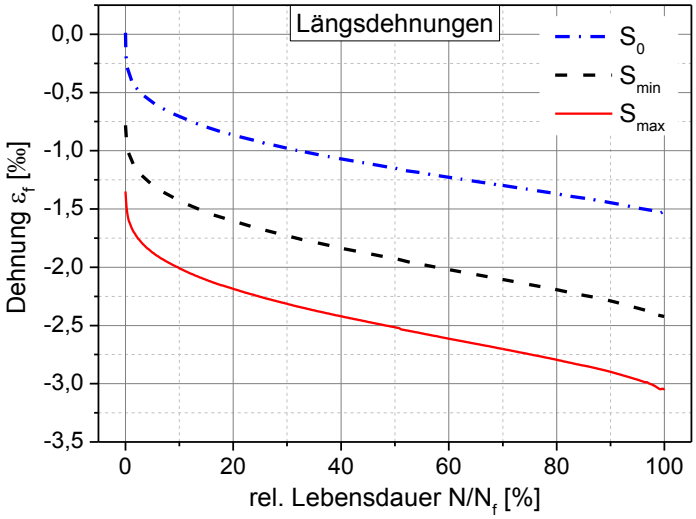

Abbildung 5.1: *Entwicklung der gemittelten Längsdehnungen aus den UHC-Versuchen für drei verschiedene Lastniveaus*

Dargestellt sind zum einen die Verformungen auf dem Lastniveau S_0, bei dem die Probe nahezu vollständig entlastet ist. Sie geben daher die in der Probe verbleibenden Verformungen wieder, welche plastische, visko-plastische und auch visko-elastische Anteile enthalten. Die Kurve für das Lastniveau S_{min} liefert die Verformungen, die sich auf der Unterlast der zyklischen Beanspruchung einstellen, während die Kurve für S_{max} die Entwicklung der max. Verformungen unter der Oberlast der Ermüdungsbeanspruchung wiedergibt. Diese beinhaltet zusätzlich zu den plastischen, visko-plastischen und visko-elastischen Verformungsanteilen auch die rein elastischen Anteile zum jeweiligen Lebensdauerzeitpunkt. Alle drei Kurven lassen prinzipiell die drei Phasen des Ermüdungsvorgangs erkennen. Auffällig ist, dass die

drei Kurven nahezu parallel verlaufen. Das heißt, dass der wesentliche Anteil der aus dem Ermüdungsvorgang resultierenden Verformungen aus bleibenden Verformungen stammt und weniger aus der Veränderung des elastischen Verformungsverhaltens. Wie im Weiteren noch gezeigt wird, unterliegt aber auch das elastische Verhalten einem Veränderungsprozess. Da bei den im Beton enthaltenen Zuschlägen von einem ausgeprägt elastischen Verhalten ausgegangen werden kann, stammen die bleibenden Verformungen vermutlich vorrangig aus dem Zementstein.

Steifigkeiten

Wie bei der Erläuterung des Lastprogramms in Kapitel 4.4.4 bereits beschrieben, wurden neben den Verformungen in regelmäßigen Abständen auch drei E-Moduli in drei verschiedenen Beanspruchungsbereichen als Sekantenmodule bestimmt. Die *Abbildung 5.2 links* zeigt nochmals schematisch den entsprechenden Ausschnitt des Lastprogramms mit den drei betreffenden Lastrampen, über die die E-Moduli ermittelt wurden. Bei dem unteren E-Modul $E_{f,1/3}$, der zwischen der Grundlast S_0 und 1/3 der statischen Bruchlast ($S_{1/3}$) bestimmt wird, handelt es sich im Wesentlichen um den normativ nach [DIN1048-5 1991] geregelten statischen E-Modul von Beton. Dieser ermöglicht so eine gute Vergleichbarkeit mit in anderen Versuchen entsprechend ermittelten E-Moduli. Die weiteren beiden E-Moduli definieren sich einfach durch die beiden anschließenden Lastniveaus der Mittellast S_m und der Oberlast S_{max}.

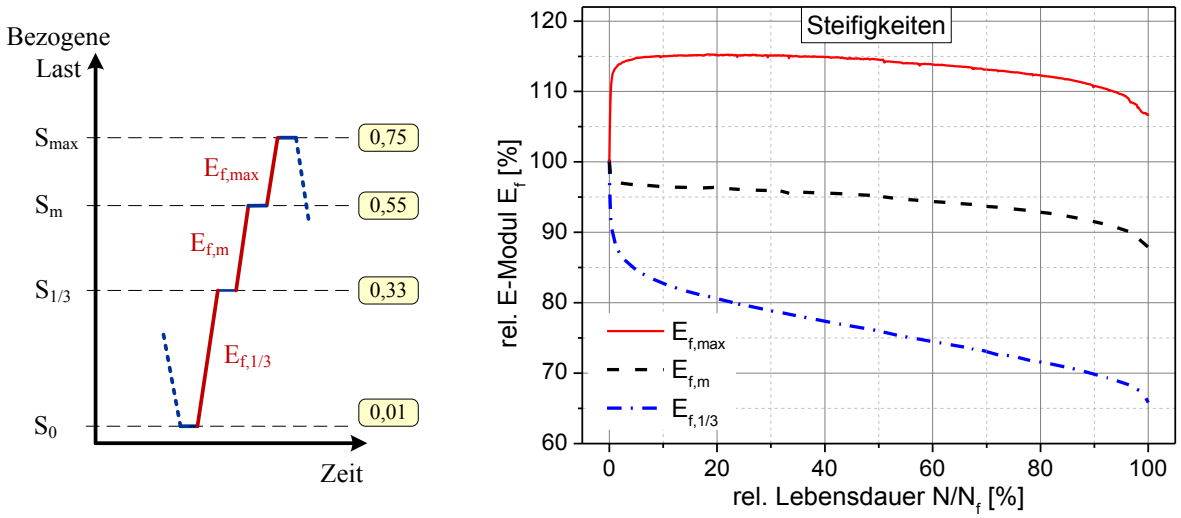

Abbildung 5.2: *Ausschnitt aus dem Lastprogramm mit den drei E-Modul-Rampen (links) und relative Entwicklung der drei E-Moduli aus den UHC-Versuchen über die relative Lebensdauer (rechts)*

Die in *Abbildung 5.2 rechts* dargestellten Evolutionskurven der drei beschriebenen E-Moduli zeigen die relative Entwicklung dieser im Bezug auf die jeweiligen Anfangswerte, aufgetragen über die relative Lebensdauer. Es ist ersichtlich, dass sich die drei E-Moduli ganz im Gegensatz zu den Verformungen, abhängig von der Spannung doch sehr unterschiedlich entwickeln. Trotzdem zeigen auch sie mehr oder weniger ausgeprägt die typischen drei Phasen des Ermüdungsvorgangs. Im unteren Beanspruchungsbereich findet bei $E_{f,1/3}$,wie erwartet, eine über die gesamte Lebensdauer ablaufende, sehr deutliche Steifigkeitsreduzierung auf knapp 65 % der Ausgangssteifigkeit statt. Die eingetragenen Gefügeschädigungen befinden sich unter diesem Beanspruchungsniveau offenbar in einem sehr wirksamen bzw. aktiven Zustand und bewirken eine Art Gefügeauflockerung. Auch beim E-Modul $E_{f,m}$ im mittleren

Beanspruchungsbereich findet noch eine Steifigkeitsreduzierung statt, die jedoch deutlich geringer ausfällt und nur knapp 1/3 der von $E_{f,1/3}$ beträgt. Die Auswirkungen der eingetragenen Gefügeschädigungen sind demnach unter diesem höheren Beanspruchungsniveau wesentlich kleiner. Der E-Modul $E_{f,max}$ im obersten Beanspruchungsbereich zeigt dagegen in der Anfangsphase ein völlig gegenteiliges Verhalten. Dieses ist von einem schlagartigen und drastischen Anstieg der Steifigkeit auf ca. 115 % gekennzeichnet, das erst gegen Ende der Phase I stagniert und langsam in eine Reduzierung übergeht. Aber selbst zum Ende der Lebensdauer hin wird der Wert der Anfangssteifigkeit nicht mehr erreicht, er geht letztlich nur auf einen mittleren Wert von ca. 106 % zurück. Es ist zu vermuten, dass in diesem obersten Bereich der Beanspruchung sich die für die Auflockerung verantwortlichen Gefügeschädigungen in einem nicht mehr wirksamen Zustand befinden. Vielmehr ist wohl eher eine Art Verdichtung in der Gefügestruktur in Richtung der Beanspruchung anzunehmen, aus der die Steifigkeitserhöhung resultiert.

Diese Beobachtungen weisen auf eine nicht gleichmäßige Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung hin, auf die im Kapitel 5.1.2 konkreter eingegangen wird. Des Weiteren zeigen sie ein gutes Korrelationsverhalten zwischen den beiden unteren E-Moduli und den Entwicklungen der Verformungen. Hingegen kann zwischen dem obersten E-Modul $E_{f,max}$ keine Korrelation mit den anderen bisher gezeigten Größen ausgemacht werden, was möglicherweise auf einen anderen verursachenden Prozess im Gefüge hinweist.

Schallemissionen (SEA)

Die Messung der Schallemissionen erfolgte mittels der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Messtechnik und war im Falle der UHC-Versuche so eingestellt, dass sie nur während der Lastrampen und nicht während der Sinusbeanspruchung gemessen hatte, siehe *Abbildung 4.24* in Kapitel 4.4.3. Mit dieser Methode konnten handhabbare Datenmengen sowie aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Als wesentliches Ergebnis aus diesen Messungen ergab sich die Schallemissionsaktivität, die sich als Anzahl der Schallemissionsereignisse pro Zeiteinheit definiert und in diesem Fall der Anzahl der Ergebnisse pro Messintervall entsprach. Diese gibt einen Hinweis auf im Gefüge entstehende und sich entwickelnde Risse sowie auch auf Reibung von Rissufern und spiegelt somit in gewisser Weise den Schädigungszuwachs und auch den aktuellen Schädigungsgrad im Material wider.

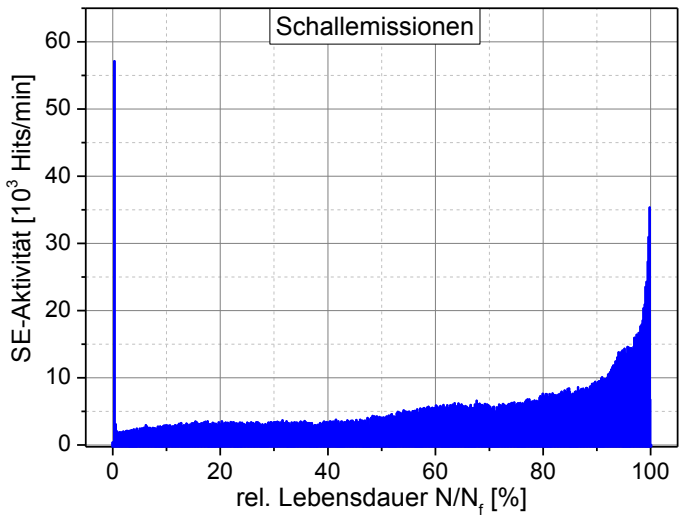

Abbildung 5.3: *Beispielhafter Verlauf der gemessenen Schallemissionsaktivität über die relative Lebensdauer für einen Versuch der UHC-Versuchsreihe*

Da die absoluten Werte der Schallemissionsmessungen sehr stark durch die Position, die Anzahl und auch die Ankopplung der Sensoren beeinflusst werden, war es nicht möglich, sinnvolle Ergebnisse in Form von Mittelwerten zu bilden. Die relative Entwicklung der Schallemissionsaktivität ist jedoch qualitativ immer ähnlich gewesen und beispielhaft für einen Versuch in *Abbildung 5.3* veranschaulicht. Auch hier zeigen sich drei Phasen während des Ermüdungsvorgangs, allerdings in einer etwas anderen Ausprägung als in den zuvor diskutierten Verformungen und Steifigkeiten. Die Erstbelastung führt zur größten Schallemissionsaktivität, die wenn überhaupt auch nur nahe dem Ermüdungsversagen nochmal erreicht wird. Dieser Vorgang hat auch den größten Zuwachs an bleibenden Verformungen zur Folge, welche mit einem Zyklus in den Beton eingetragen werden. Anschließend bricht die Schallemissionsaktivität nahezu schlagartig ein und erreicht ihr Minimum. Damit beginnt hier die Phase II, in der vom Minimum ausgehend eine langsam und stetig zunehmende Entwicklung in der Schallemissionsaktivität einsetzt. Sie spiegelt einen relativ stabilen Entwicklungsprozess wider, wie er prinzipiell auch in den Verformungen und Steifigkeiten beobachtet werden kann. An die stabile Phase II schließt sich zum Ende der Lebensdauer die Phase III mit einer exponentiell ansteigenden Schallemissionsaktivität an. Während dieser Phase konnten in den überwiegenden Fällen sichtbare Risse auf den Oberflächen der Proben ausgemacht werden, die eine verstärkte Rissbildung im Material bestätigen.

In den gewonnenen Ergebnissen der SE-Aktivitäten fällt besonders auf, dass ihre Entwicklung speziell am Anfang, aber auch in der Phase II, keine sehr gute Korrelation mit den Veränderungen der Verformungen sowie den unteren beiden E-Moduli aufweist. Dort, wo diese Größen zu Beginn noch eine sehr starke Veränderung zeigen, befindet sich die SE-Aktivität bereits auf ihrem Minimum. Daher ist zu vermuten, dass die Ursache für deren Veränderung zumindest nicht alleine in den Vorgängen begründet liegt, die die Schallemissionen hervorrufen.

Im Gegensatz dazu passt die Entwicklung des obersten E-Moduls $E_{f,max}$ sehr gut mit den Veränderungen in den SE-Aktivitäten zusammen. Somit ist zu vermuten, dass hier ein Zusammenhang in den Ursachen für die Entwicklung der beiden Größen besteht.

Ultraschallsignale (US)

Die Ultraschallmessungen erfolgten, wie im Kapitel 4.3.2 beschrieben, sowohl horizontal als auch vertikal durch die Probekörper. Dabei wurden die Ultraschallgeschwindigkeiten und zum Teil auch die Amplituden der Ultraschallsignale gemessen. Da aber, wie im Kapitel 4.3.2 erläutert, die mit Hilfe der beiden verwendeten Messsysteme gewonnenen Schallgeschwindigkeiten etwas unterschiedlich sind, werden diesbezüglich im Folgenden nur die mit der SEA gemessenen Ergebnisse vorgestellt, weil diese gleichzeitig horizontal und vertikal bestimmt wurden. Die ebenfalls hier vorgestellten Ergebnisse der Signalamplituden stammen dagegen ausschließlich aus den Messungen mit dem Ultraschall-Messsystem UKS-D. Im Rahmen der Auswertung findet hier, in gleicher Weise wie bereits bei den E-Moduli vorgestellt, eine relative Betrachtung der jeweiligen Werte statt, wobei die Bezugsgröße immer der Ausgangswert ist. Die mittlere absolute Schallgeschwindigkeit in den unbelasteten Proben vor Beginn der Prüfungen betrug ca. $v = 4.400$ m/s.

Auch in den Verläufen der Ultraschallmessungen zeigen sich mehr oder weniger ausgeprägt die drei Phasen des Ermüdungsvorgangs, sowohl in den Geschwindigkeiten als auch in den Amplituden. Prinzipiell sind die Signalamplituden aber deutlich sensitiver im Bezug auf die Gefügeschädigungen, da ihre Reduzierung wesentlich größer ausfällt als die der Schallgeschwindigkeiten. Allerdings hat sich in den Versuchen auch gezeigt, dass die Amplitude wesentlich sensibler bezüglich der Ankopplung ist, was somit zu deutlich größeren Streuun-

gen in den Ergebnissen führt. Die entsprechenden Kurvenscharen für die Amplituden und die Geschwindigkeiten sind im Anhang B1 *Abbildung B1 8* bis *Abbildung B1 10* zu finden.

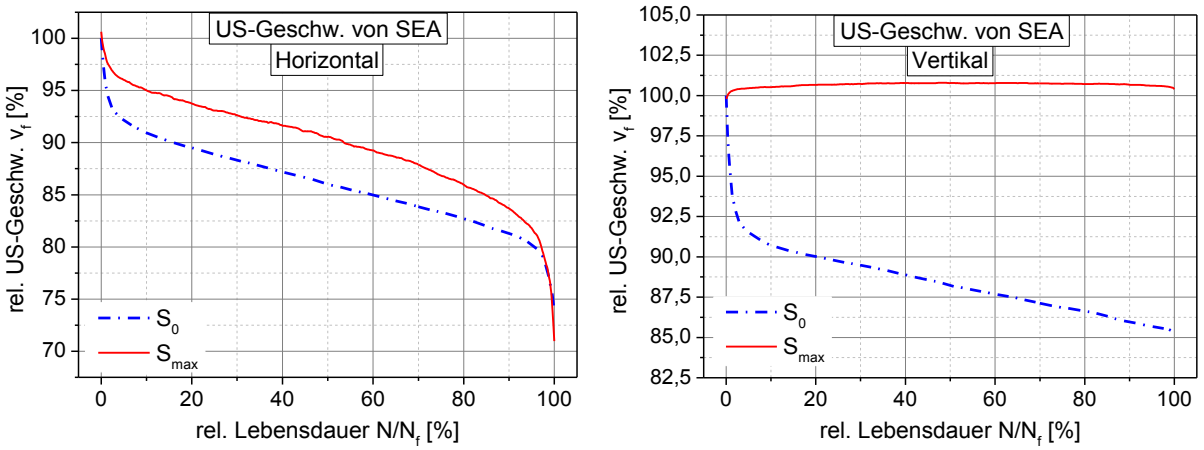

Abbildung 5.4: *Relative Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeiten senkrecht (links) und parallel zur Belastungsrichtung (rechts,) jeweils unter Oberlast S_{max} und Grundlast S_0*

Für die Ultraschallgeschwindigkeiten sind die gemittelten Verläufe aus der horizontalen Messung in *Abbildung 5.4 links* und für die vertikale Messung in *Abbildung 5.4 rechts* dargestellt. Gemessen wurde einmal unter der Oberlast S_{max} und einmal im fast entlasteten Zustand unter S_0. Prinzipiell zeigt sich in den Ergebnissen sehr deutlich die Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der durch die einaxiale Beanspruchung eingetragenen Materialschädigung, was aus den sehr unterschiedlich ausfallenden Entwicklungen in horizontaler und vertikaler Richtung ersichtlich wird. Die Auswirkung der Materialschädigung ist in Richtung senkrecht zur Beanspruchung ausgeprägter als parallel dazu. Zudem ist ihr Einfluss auf das Materialverhalten auch noch stark von der Höhe des jeweiligen Beanspruchungsniveaus abhängig.

Vertikal: In Richtung parallel zur Beanspruchung zeigt sich besonders deutlich die Abhängigkeit der Auswirkungen der Schädigungen auf die Schallgeschwindigkeiten bezüglich der Beanspruchungshöhe. Im entlasteten Zustand unter S_0 sind die reduzierenden Auswirkungen der Gefügeschädigungen am größten. Dies deckt sich gut mit den Beobachtungen bei den Steifigkeiten. Im untersten Beanspruchungsniveau zeigt auch $E_{f,1/3}$ infolge der Ermüdungsschädigung den stärksten Rückgang. Da es einen Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem E-Modul eines Materials gibt, ist dies gut nachvollziehbar. Beide Beobachtungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass Gefügeschädigungen vorhanden sind, die in diesem Belastungszustand zumindest in der vertikalen Richtung besonders aktiv bzw. wirksam sind. Unter der max. Beanspruchung durch S_{max} zeigt sich die Schallgeschwindigkeit dagegen nahezu unbeeinflusst durch den Ermüdungsvorgang, es gibt also keinerlei schädigende Auswirkungen auf die Schallgeschwindigkeit. Einzig ein leichter Anstieg um ca. 1 % findet statt. Dies lässt die Annahme zu, dass die zuvor im entlasteten Zustand vertikal noch wirksamen Gefügeschädigungen jetzt nicht mehr aktiv bzw. sogar völlig überdrückt sind. Auch hier deckt sich die Beobachtung prinzipiell mit der Entwicklung der zugehörigen Steifigkeit. Diese zeigt auf dem obersten Beanspruchungsniveau für $E_{f,max}$ sogar eine signifikante Steigerung der Steifigkeit, die sich allerdings nicht in einer entsprechend hohen Steigerung der Schallgeschwindigkeit auswirkt.

Eine mögliche Ursache dafür könnte darin liegen, dass die Steigerung der Steifigkeit vorrangig aus Veränderungen im Zementstein resultiert, der sich in Belastungsrichtung zwischen

eng aneinander liegenden größeren Zuschlagskörnern befindet. Betrachtet man aber schließlich in der vertikalen Richtung die gesamte Lauflänge des Schallsignals durch die Probe, kann festgestellt werden, dass die für die Veränderung verantwortlichen Zementstein-Bereiche vergleichsweise nur einen sehr geringen Anteil haben. Daher wirkt sich eine Steifigkeitserhöhung dieser Bereiche nur geringfügig auf die gesamte Signallaufzeit durch die Probe aus. Auf die makroskopische Steifigkeit der Probe hingegen hat dies einen wesentlich stärkeren Einfluss. Im Falle des entlasteten Zustands verhält es sich jedoch nicht gleichermaßen, da eine lokale aktive Schädigung des Gefüges, z. B. in Form geöffneter Risse, eine sehr stark dämpfende Wirkung besitzt. Diese führt so zu entsprechend großen Reduzierungen der Schallgeschwindigkeit. Die nachfolgenden Kapitel werden noch mehr Aufschluss über die sehr unterschiedlich im Gefüge verteilten Beanspruchungen liefern.

Horizontal: Senkrecht zur Beanspruchungsrichtung fallen die Abhängigkeiten vom Beanspruchungsniveau auf die Auswirkungen der Schädigungen wesentlich geringer aus. Auf beiden Lastniveaus sind die Gefügeschädigungen sehr wirksam und führen zu einer von Beginn an permanent zunehmenden Reduzierung der Schallgeschwindigkeiten. Dieses Verhalten weist eine gute Korrelation mit der Entwicklung der Verformungen und der Steifigkeit im unteren Spannungsbereich auf. Ähnlich wie in der vertikalen Richtung auch, wirken sich die Schädigungen im entlasteten Zustand stärker auf die Schallgeschwindigkeiten aus als unter S_{max}. Die theoretischen Vorstellungen zum Schädigungsvorgang gehen aber vorwiegend von vertikal orientierten Rissen im Gefüge aus, die letztlich auch die horizontalen Schallgeschwindigkeiten wesentlich beeinflussen sollten. Die entsprechenden Ergebnisse der im Kapitel 5.1.3 vorgestellten Mikroskopie-Untersuchungen werden diese vertikalen Risse auch prinzipiell bestätigen. Im Ergebnis sollte dann in der horizontalen Richtung eher unter der höchsten Beanspruchung die stärkste Reduzierung erreicht werden. Trotzdem fallen die gemessenen Reduzierungen unter S_{max} geringer aus als unter S_0. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass das horizontale Verhalten in gewissem Umfang zusätzlich auch von den in vertikaler Richtung festgestellten Effekten beeinflusst wird. Da anzunehmen ist, dass im Gefüge mehraxiale Spannungszustände vorherrschen, kann auch davon ausgegangen werden, dass die steifigkeitssteigernden Vorgänge unter höheren Lastniveaus nicht alleine in der vertikalen Richtung wirken, sondern auch horizontale Anteile besitzen. Diese steifigkeitssteigernden Effekte sind in ihrer horizontalen Wirkung möglicherweise groß genug, um die Auswirkungen der Gefügeschädigungen in horizontaler Richtung unter der max. Beanspruchung S_{max} geringer ausfallen zu lassen als im entlasteten Zustand.

Das Fehlen bzw. die geringe Ausprägung der Phase III in den Verläufen der vertikalen Messungen im Gegensatz zu den horizontalen kann mit den Beobachtungen zur Rissbildung in den Versuchen gut erklärt werden. Es kommt besonders während der Phase III vorrangig zu vertikal orientierten Makrorissen, die auf den Probenoberflächen gut sichtbar sind. Sie beeinflussen zwar die horizontalen Messungen wesentlich, aber kaum bzw. weniger die vertikalen.

Die Entwicklung der Signalamplituden wurde, wie bereits erwähnt, nur bei der Messung horizontal durch die Proben realisiert. In der *Abbildung 5.5* sind die Verläufe für die gemessenen Amplituden unter S_{max} und S_0 wiedergegeben. Mit einer Reduzierung infolge der Ermüdungsschädigung auf annähernd 0 % ist die Amplitude die sensibelste Größe. Allerdings sind auch die Streuungen in den Messungen besonders groß, wie die Diagramme im Anhang B1 *Abbildung B1 10* zeigen. Die Verläufe geben die drei Phasen des Ermüdungsvorgangs im Gegensatz zu den Schallgeschwindigkeiten kaum wieder. Dagegen zeigt sich auch bei den Amplituden die gleiche Abhängigkeit in der Ausprägung der Reduzierung vom Beanspruchungsniveau wie bei den Schallgeschwindigkeiten. Die Ursache dafür kann in denselben Erklärungen gesehen werden, wie sie bei den Schallgeschwindigkeiten dargestellt wurden.

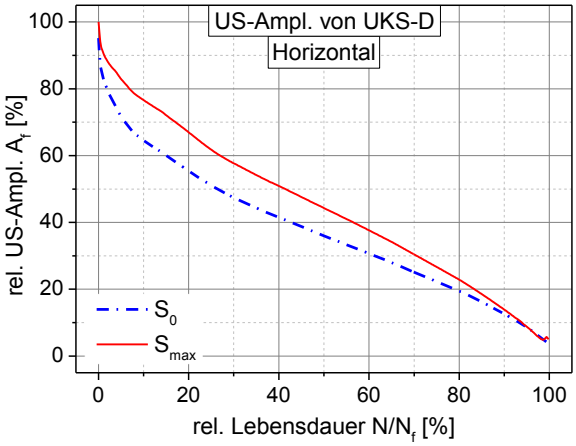

Abbildung 5.5: *Relative Entwicklung der Signalamplituden aus den Ultraschallmessungen senkrecht zur Belastungsrichtung unter Oberlast S_{max} und Grundlast S_0*

Für die vertikale Richtung konnten zumindest einzelne Signale aus der Messung stichpunktartig ausgewertet werden. Diese zeigen im Gegensatz zu den Schallgeschwindigkeiten sowohl unter der Grundlast S_0 als auch unter der Oberlast S_{max} eine Reduzierung in den Amplituden, was deren Sensitivität bezüglich der Ermüdungsschädigung unterstreicht. Demnach bleiben in der vertikalen Richtung auch unter der max. Belastung schädigende Auswirkungen der Gefügeveränderungen wirksam. Diese haben zwar nicht auf die Schallgeschwindigkeiten, wohl aber auf die Signalamplituden einen Einfluss.

Temperaturentwicklung

In den Untersuchungen anderer Autoren zum Ermüdungsverhalten von Beton hatten sich zum Teil deutliche Temperaturerhöhungen an den Probekörpern infolge der zyklischen Belastungen gezeigt. So zum Beispiel in [WEFER 2010] oder auch in unveröffentlichten Ergebnissen von Hohberg [2003]. Da eine derartige Temperaturveränderung zusätzlich einen Einfluss auf das Materialverhalten hat, wurde in den eigenen Versuchen zumindest an einem Probekörper begleitend die Oberflächentemperatur an verschiedenen Positionen gemessen. Es hat sich dabei gezeigt, dass es keine erkennbare bzw. messbare Veränderung der Probentemperatur infolge der zyklischen Belastung gibt. Einzig ganz zu Beginn des Versuches hat es einen leichten Anstieg der Probentemperatur im Bezug auf die Umgebungstemperatur gegeben, der aber nachweislich aus der Aufwärmung des Prüfaufbaus über das erwärmte Hydrauliköl der Prüfmaschine stammt. Daher braucht hier der Einfluss einer Temperaturveränderung auf das Materialverhalten des Betons nicht zusätzlich berücksichtigt werden. Die beiden zugehörigen Diagramme mit den gemessenen absoluten und der relativen Temperaturentwicklung sind im Anhang B1 in *Abbildung B1 2* dargestellt.

Einflüsse von Ausgangseigenschaften

Im Rahmen der Versuchsauswertungen wurde auch überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen bestimmten Eigenschaften des Probekörpers zu Beginn des Versuches und den letztlich erreichten Zyklenzahlen gibt. Dies hätte es ermöglicht, bereits zu Beginn der Prüfungen eine Abschätzung über die Versuchsdauer zu treffen. Allerdings konnte zwischen keiner der betrachteten Größen und den jeweiligen Zyklenzahlen bis zum Ermüdungsversagen ein Zusammenhang festgestellt werden. Untersucht wurden hierzu die verschiedenen E-Moduli sowie die Ultraschallgeschwindigkeit.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Zielstellung dieses Kapitels begründet sich im Wesentlichen auf der Fragestellung:

Wie verändern sich die Materialeigenschaften bzw. das Materialverhalten während des Ermüdungsvorgangs?

Alle der hier gemessenen Materialeigenschaften wurden infolge der Ermüdungsbeanspruchung verändert. Sie zeigten fast alle von Beginn an eine fortlaufende Veränderung über die gesamte Lebensdauer mit einem mehr oder weniger ausgeprägten 3-phasigen Verlauf in ihrer Entwicklung.

Allerdings korrelieren nicht alle Größen in ihrer Entwicklung miteinander. Das deutet darauf hin, dass die verschiedenen Größen jeweils unterschiedlich durch die ermüdungsbedingten Vorgänge und Veränderungen im Material beeinflusst werden. Oder anders ausgedrückt, zeigen sich bestimmte Veränderungen im Gefüge signifikant nur in bestimmten makroskopischen Eigenschaften.

Im Detail hat sich herausgestellt, dass die fortlaufende Zunahme der Verformungen nicht mit der SE-Aktivität, dem obersten E-Modul $E_{f,max}$ sowie der vertikal gemessenen US-Geschwindigkeit unter S_{max} korreliert. Dies zeigt sich besonders in der Phase I. Dagegen ist bei allen anderen gemessenen Größen eine gute Korrelation zu den Verformungen festzustellen. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Entwicklungen der Verformungen, der unteren beiden E-Moduli, der horizontalen US-Messungen sowie der vertikalen US-Messungen im entlasteten Zustand ihre Ursache prinzipiell in ganz ähnlichen Veränderungen im Gefüge haben. Hingegen liegen die Entwicklung des obersten E-Modul $E_{f,max}$, der SE-Aktivität und der vertikalen Ultraschallgeschwindigkeit unter der Oberlast vermutlich nicht in den gleichen Veränderungen des Gefüges begründet.

Die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten und der zugehörigen Signalamplituden, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung durch die Proben, haben zusätzlich sehr deutlich gezeigt, dass die unter dieser einaxialen Ermüdungsbeanspruchung eingetragenen Materialschädigungen einen ausgeprägten anisotropen Charakter besitzen.

5.1.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene)

Bei den in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnissen handelt es sich in erster Linie um das resultierende Materialverhalten von Probekörpern das sie zeigen, nachdem sie bis zu einem bestimmten Lebensdauerzustand vorgeschädigt wurden. Des Weiteren werden auch daraus ableitbare Entwicklungen betrachtet.

Hysteresen

Ein weiterer Bestandteil des in Kapitel 4.4.4 beschriebenen Lastprogramms ist die in *Abbildung 5.6 links* auszugsweise veranschaulichte Be- und Entlastungsrampe, die eine Art Hysterese wiedergibt. Diese Hysteresen wurden, ebenso wie z. B. die E-Modul-Messungen, in regelmäßigen Abständen wiederholt und liefern so das jeweilige Spannungs-Dehnungs-Verhalten des zyklisch geschädigten Betons. Beispielhaft zeigt die *Abbildung 5.6 rechts* eine typische Entwicklung der Hysteresen über die Lebensdauer einer Probe. Zwischen den hier gezeigten Spannungs-Dehnungs-Kurven liegen jeweils 330.000 Lastzyklen. Die letzte Kurve wurde bei 99,7 % der Ermüdungslebensdauer bestimmt.

Die im Kapitel zuvor gezeigten Ergebnisse der verschiedenen E-Moduli hatten bereits auf das hingedeutet, was die Kurven in *Abbildung 5.6 rechts* deutlich widerspiegeln. Es findet über die gesamte Lebensdauer hinweg eine permanente Veränderung der kompletten Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons statt.

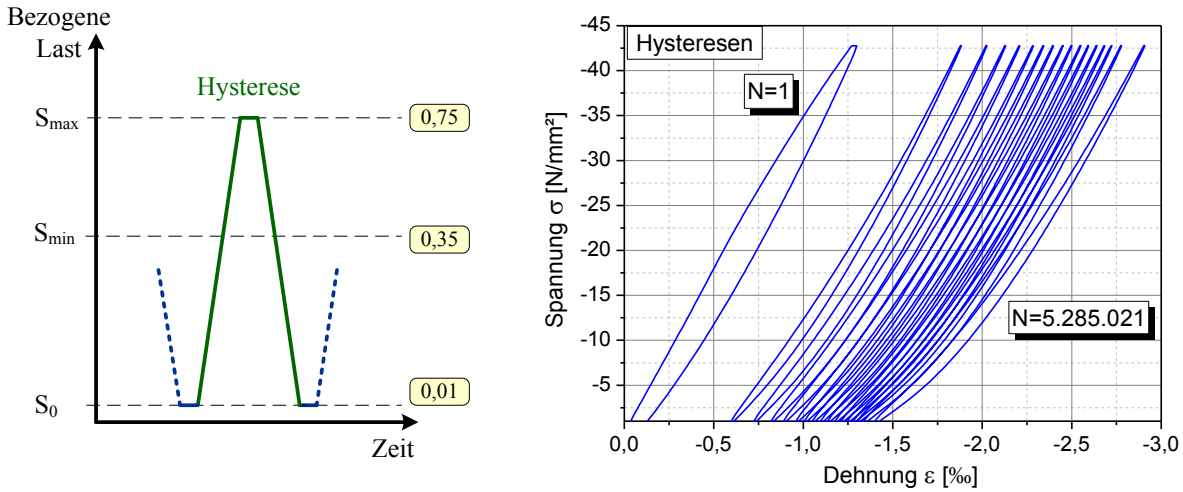

Abbildung 5.6: *Ausschnitt aus dem Lastprogramm mit den Rampen für die Hysterese (links) und beispielhafte Entwicklung der so gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen mit jeweils 330.000 Lastzyklen Abstand (rechts)*

Demnach ist das Materialverhalten unter der zyklischen Beanspruchung einem Evolutionsprozess unterworfen. Ähnliche Beobachtungen wurden teilweise schon von [MEHMEL & KERN 1962] und [JINAWATH 1974] gemacht. Die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien veranschaulichen nicht nur die bereits diskutierten Entwicklungen der E-Moduli, sondern geben auch die Entwicklungen der verschiedenen Dehnungsanteile anschaulich wieder. Neben der recht früh einsetzenden Krümmungsumkehr in der Belastungslinie zeigt sich generell auch eine Zunahme der Nichtlinearität in der Beziehung zwischen Spannungen und Dehnungen.

Wie stark die Veränderungen infolge des Ermüdungsvorgangs in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sind und wie unterschiedlich diese über den Beanspruchungsbereich ausfallen, wird besonders deutlich veranschaulicht durch die 1. Ableitung der Spannungs-Dehnungs-Kurven. Diese wurde entsprechend der *Gleichung 5.1* durch Ableitung der Spannung σ nach der Dehnung ε bestimmt.

spannungsabhängiger E-Modul:
$$E^* = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \qquad (5.1)$$

Sie spiegelt die Steifigkeit der Spannungs-Dehnungs-Linie in jedem Punkt wider und entspricht somit dem jeweiligen Tangentenmodul. Beispielhaft ist in *Abbildung 5.7* eine typische Entwicklung für eine Ableitung der reinen Belastungskurven aus den Hysteresen während der Lebensdauer dargestellt, links aufgetragen über die Spannungen und rechts über die Dehnungen. Sehr gut zu erkennen ist, dass sich der Verlauf der 1. Hysterese gänzlich von allen anderen unterscheidet. Bereits ab der zweiten Hysterese zeigen alle anderen Ableitungen einen

qualitativ sehr ähnlichen Verlauf und weisen auch schon den Wechsel in der Krümmung der Belastungskurven nach.

Es fällt besonders deutlich auf, dass sich die Materialsteifigkeiten im untersten und im obersten Spannungsbereich extrem in ihren Entwicklungsweisen unterscheiden, was sich zuvor schon in den Entwicklungen der Sekantenmodule angedeutet hatte. Im obersten Spannungsbereich vollzieht sich zu Beginn eine drastische Versteifung, die bei der zweiten Hysterese bereits abgeschlossen ist. Anschließend ist dort bis kurz vor dem Ermüdungsversagen nahezu keine weitere Veränderung festzustellen, bevor sich zum Ende hin eine leichte Steifigkeitsreduzierung zeigt. Im Gegensatz dazu findet im unteren Spannungsbereich trotzdem von Beginn an über die gesamte Lebensdauer eine fortlaufende Auflockerung in Form einer Steifigkeitsreduzierung statt. Auch die Verformungen wachsen währenddessen immer weiter an.

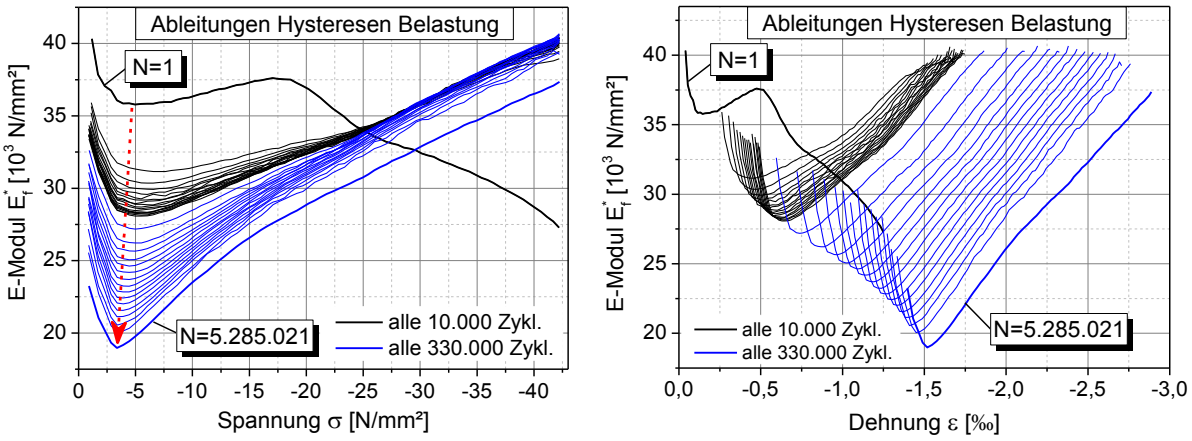

Abbildung 5.7: *Beispielhafte Entwicklung der 1. Ableitung der Belastungskurven aus den Hysteresen während der Lebensdauer, dargestellt über die Spannung (links) und über die Dehnung (rechts)*

Vor diesem Hintergrund scheint die unter dem obersten Spannungsbereich entstehende plötzliche Versteifung im Gefüge weniger durch die Vorgänge verursacht bzw. beeinflusst zu sein, die für die stetig zunehmenden Dehnungen und die fortlaufende Auflockerung verantwortlich sind. Hingegen korreliert dieses Verhalten sehr gut mit der Entwicklung der SE-Aktivität und auch der vertikalen US-Geschwindigkeit unter der Oberlast. Der Versteifungseffekt zeigt außerdem keinen nennenswerten zeit- und zyklenabhängigen Charakter, so dass eine Ursache in den viskosen Verformungen unwahrscheinlich erscheint. Zudem deutet der langanhaltend stabile Zustand der Materialsteifigkeit darauf hin, dass im belasteten Zustand keine nennenswerten Störungen des Gefüges vorhanden sind, die den Tragwiderstand beeinflussen würden.

Die fortlaufende Reduzierung der Steifigkeit im unteren Spannungsbereich besitzt dagegen einen sehr zeit- und zyklenabhängigen Charakter, der gut mit den Entwicklungen der Verformungen korreliert. Da allerdings während der Zeit, in der sich die Verformungen und die untere Steifigkeit verändern, keine entsprechende SE-Aktivität festgestellt wurde und auch die obere Steifigkeit nicht beeinflusst wird, ist deren Ursache vermutlich vorrangig mit viskosen Vorgängen verknüpft.

Die ermüdungsbedingte Schädigung des Materialgefüges zeigt sich also im Wesentlichen im fast entlasteten Zustand des Gefüges. Dabei besteht scheinbar ein Zusammenhang zwischen der Gefügeauflockerung im unteren Spannungsbereich und den bleibenden Verformungen. Keinen Zusammenhang zu diesen beiden Veränderungen weist dagegen die Gefügeversteifung im oberen Spannungsbereich auf. Vertikale Mikrorisse als Folge der Ermüdungs-

schädigung und als Ursache für die Steifigkeitsreduzierung erscheinen daher unwahrscheinlich, da neben der unveränderten Gefügesteifigkeit im oberen Spannungsbereich auch die SE-Aktivität währenddessen minimal ist.

Eine Darstellung der entsprechenden Ableitungen für die Entlastungskurven findet sich im Anhang B1 *Abbildung B1 12*, wo auch weitere Entwicklungen von Ableitungen anderer Proben zu finden sind. In den Darstellungen der Ableitungen über die Dehnungen lässt sich feststellen, dass sich bei den Belastungskurven ab dem Minimum zu Beginn und bei den Entlastungskurven sogar fast über den gesamten Bereich ein annähernd linearer Zusammenhang zeigt. Das bedeutet für die zyklisch vorgeschädigte Spannungs-Dehnungs-Beziehung, dass sich sowohl bei der Belastung als auch bei der Entlastung im Wesentlichen ein quadratischer Zusammenhang zwischen den Spannungen und den Dehnungen einstellt. Worin der davon abweichende Knick zu Beginn der Verläufe der Ableitungen der Belastungskurven begründet liegt, kann hier nicht abschließend geklärt werden. Eine Überprüfung durch Auswertung der Messungen des Druckplattenabstandes führte aber zu ähnlichen Ergebnissen. Aber auch die Untersuchungen von [MEHMEL & KERN 1962] hatten bereits zum Teil ähnliche Verhaltensweisen aufgezeigt. Es bleibt noch zu berücksichtigen, dass vor der ersten Hysterese immer bereits eine E-Modul-Rampe bis σ = 19 N/mm² gefahren wurde. Eine Auswertung einzelner Versuche ohne eine vorangegangene Beanspruchung zeigte allerdings im Verlauf der Ableitungen bis 19 N/mm² eine ähnliche Charakteristik, nur weniger stark ausgeprägt.

Eingetragene Energien

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Hysteresen war es zusätzlich möglich, verschiedene Anteile der in die Probekörper eingetragenen Energien zu bestimmen. Dazu wurden über Integrale unterschiedliche zwischen den einzelnen Hysteresen aufgespannte Flächen ermittelt, welche schematisch in der Skizze in *Abbildung 5.8 links* veranschaulicht sind.

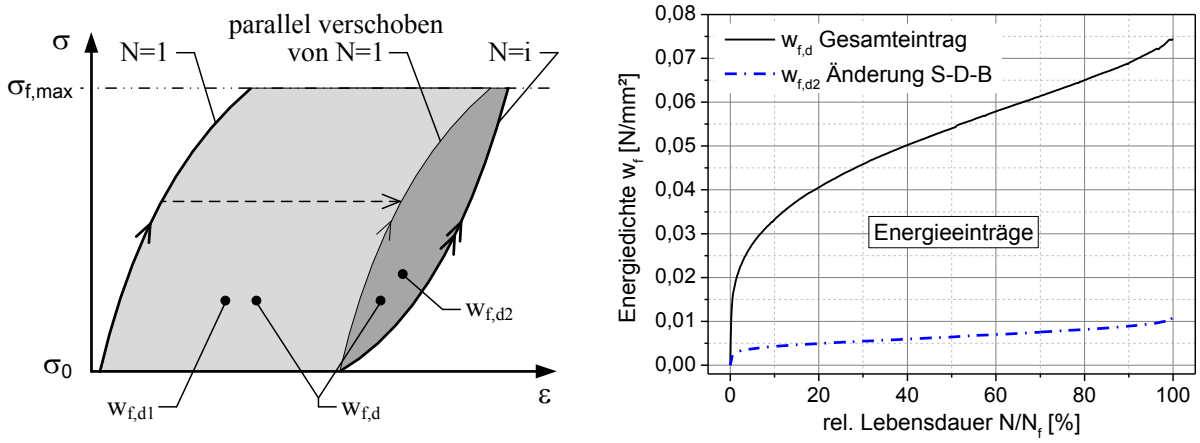

Abbildung 5.8: *Schematische Darstellung der aus den Hysteresen ermittelten Energieanteile (links) und resultierende Entwicklungen der beiden errechneten Energieanteile über die Lebensdauer (rechts)*

Die zwischen der ersten und der i-ten Belastungskurve bestimmte Energie $w_{f,d}$ entspricht weitestgehend dem Gesamtenergieeintrag in die Probe zu diesem Zeitpunkt und setzt sich aus der hell- und dunkelgrauen Fläche in der Skizze zusammen. Der in der Probe gespeicherte reine elastische Anteil ist dabei nicht mehr enthalten, ebenso wie Anteile aus der Dämpfung. Diese Gesamtenergie wird vorwiegend durch die plastischen und visko-plastischen Verformungen geprägt. Im Gegensatz dazu spiegelt die zweite Energiegröße $w_{f,d2}$ die Fläche wider,

die sich alleine aus der Veränderung der Form der Belastungskurve ergibt. Sie ist in der Skizze dunkelgrau markiert und wird zwischen der parallel verschobenen ersten und der i-ten Belastungskurve bestimmt. Die Besonderheit ist, dass sie nahezu unabhängig von den plastischen und visko-plastischen Verformungsanteilen auf der Makroebene ist und ausschließlich von der Änderung der Form sowie der Neigung der Spannungs-Dehnungs-Linie bestimmt wird. Als dritte Größe ergibt sich noch $w_{f,d1}$ aus der Differenz der beiden zuvor genannten Größen $w_{f,d}$ und $w_{f,d2}$, die im Weiteren aber nicht explizit betrachtet wird.

Die für diese beiden Energiegrößen aus den Versuchen ermittelten mittleren Verläufe sind in der *Abbildung 5.8 rechts* wiedergegeben. Sie weisen wie die meisten anderen Größen prinzipiell einen 3-phasigen Verlauf auf und belegen den ständigen Energieeintrag in die Probe sowie auch die stetige Veränderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Linie. Deutlich erkennbar ist der große Einfluss der plastischen und visko-plastischen Verformungsanteile in $w_{f,d}$, besonders zu Beginn der Lebensdauer. Eine Besonderheit der zweiten Energiegröße $w_{f,d2}$ wird beim Vergleich mit den LHC-Versuchen in Kapitel 5.3.2 vorgestellt und diskutiert.

Arbeitslinien und Festigkeiten

Die vollständigen Arbeitslinien konnten in zerstörenden Nachprüfungen in Form von weggeregelten statischen Bruchversuchen bestimmt werden, in denen aus den drei Serien der Abbruchversuche unterschiedlich stark vorgeschädigte Probekörper geprüft wurden. Die aus diesen Versuchen gewonnenen und gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien sind in *Abbildung 5.9* vergleichend mit einer aus mechanisch unbeanspruchten Proben bestimmten Arbeitslinie zusammen dargestellt. In der Darstellung sind die aus den jeweiligen zyklischen Vorschädigungen resultierenden bleibenden Verformungen mit berücksichtigt, die die Ursache für den Versatz am Fußpunkt der entsprechenden Kurven sind.

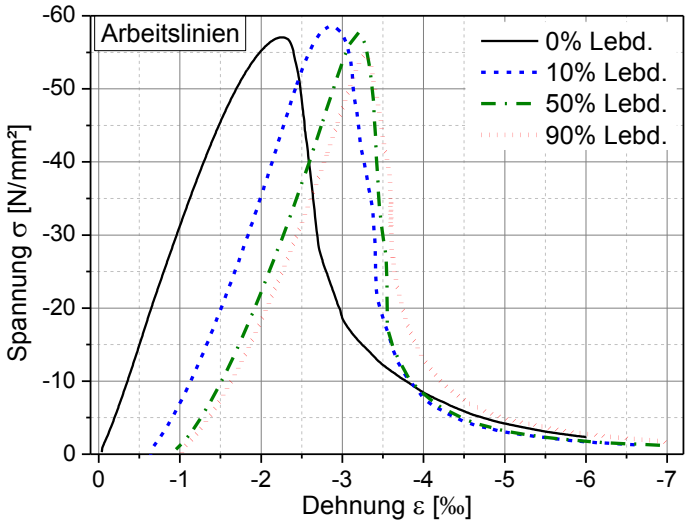

Abbildung 5.9: *Vollständige Arbeitslinien von unterschiedlich stark zyklisch vorgeschädigten Proben sowie von ungeschädigten Proben*

Der Vergleich der Kurven zeigt deutlich, dass die eingetragene Ermüdungsschädigung eine signifikante Veränderung der kompletten Spannungs-Dehnungs-Beziehung zur Folge hat, auch über das Lastniveau der zyklischen Beanspruchung hinaus. Diese Veränderung reicht bis in den Nachbruchbereich hinein. Besonders ausgeprägt sind die Veränderungen jedoch im Vorbruchbereich. Insgesamt zeigen die Kurven durch einen immer schmaleren und spitzeren

Verlauf eine zunehmende Materialversprödung infolge der anwachsenden Ermüdungsschädigung. Dies zeigt sich auch sehr deutlich in der Bruchenergie $w_{s,tot}$, die über das Integral der jeweiligen Kurven bestimmt wurde und deren Werte in der *Tabelle 5.1* gegenübergestellt sind.

Tabelle 5.1: *Gegenüberstellung der Bruchenergien für verschiedene Schädigungsgrade*

Energie-Größe	***0%***	***10%***	***50%***	***90%***
Energiedichte $w_{s,tot}$ [N/mm²]	0,124	0,106	0,089	0,091
rel. Energiedichte $w_{s,tot}$ [%]	100	85,4	71,6	73,1

Aus der relativen Betrachtung wird ersichtlich, dass die Bruchenergie $w_{s,tot}$ auf nahezu 70 % des Ausgangswertes zurück geht, wobei ab 50 % der Lebensdauer keine wesentliche Veränderung mehr aufgetreten ist.

Eine Ursache für diese Versprödung wird vermutlich der Abbau von plastischen und viskoplastischen Verformbarkeiten im Materialgefüge sein. Allerdings zeigen die erreichten Bruchdehnungen der vorgeschädigten Proben, dass das Materialgefüge Gesamtverformungen aufnehmen kann, die deutlich über die aus der reinen statischen Festigkeitsprüfung hinaus gehen. Eine weiterführende Diskussion bezüglich der Bruchdehnungen erfolgt im Kapitel 5.4.

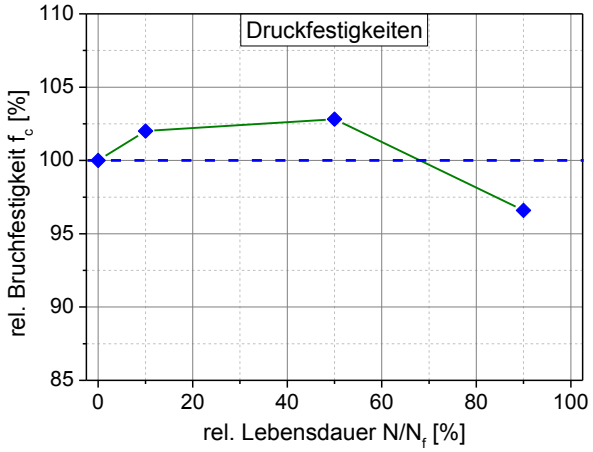

Abbildung 5.10: *Entwicklung der relativen statischen Bruchfestigkeit infolge einer zyklischen Vorschädigung für verschiedene Lebensdauerzustände*

Aus den Arbeitslinien lässt sich weiterhin auch ein Vergleich der jeweiligen statischen Bruchfestigkeiten ziehen. Dazu wurden die mittleren Werte der erreichten Bruchfestigkeiten in einer relativen Betrachtung in *Abbildung 5.10* über die Lebensdauer aufgetragen. Die dazugehörigen absoluten Werte der einzelnen Prüfungen finden sich im Anhang B1 *Abbildung B1 3*. Innerhalb der untersuchten Lebensdauerzustände konnte keine besonders signifikante Änderung der Festigkeiten festgestellt werden. Es zeigt sich allenfalls eine leichte Festigkeitssteigerung im mittleren Bereich, während erst zum Ende der Lebensdauer eine leichte Festigkeitsverringerung ausgemacht werden kann. Diese leichte Steigerung der Festigkeit korreliert mit der ebenfalls festgestellten Versteifung des Gefüges im oberen Spannungsbereich. Aus dem langen stabilen Verhalten der Festigkeit lässt sich ablesen, dass das Gefüge ebenso lange

seine Tragfähigkeit beibehält. Es ist also nicht nennenswert durch entsprechende Risse im Gefüge geschädigt, die im oberen Spannungsbereich wirksam sein könnten. Was es an schädigenden Rissen im Gefüge gibt, wird vermutlich weitgehend überdrückt sein. Diese Beobachtung bestätigt direkt die zuvor bei den Ableitungen der Hysteresen gemachten Feststellungen und wird durch die gemessenen SE-Aktivitäten zusätzlich untermauert.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei der Auswertung der in diesem Kapitel vorgestellten Versuchsergebnisse stand in erster Linie die Klärung der folgenden Fragestellung im Vordergrund:

Welche Auswirkungen hat der Schädigungsvorgang auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons?

Insgesamt lässt sich sagen, dass die eingetragenen ermüdungsbedingten Veränderungen im Materialgefüge zunehmend das Kurzzeitmaterialverhalten beeinflussen und verändern. Diese führen zu einer Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung im gesamten Beanspruchungsbereich zwischen der Grundlast S_0 und der Oberlast S_{max} und auch darüber hinaus. Dabei handelt es sich um einen von Beginn an einsetzenden Evolutionsprozess, der sich über die gesamte Lebensdauer erstreckt und auch eine Krümmungsumkehr in der Spannungs-Dehnungs-Linie bewirkt.

Sehr anschaulich geben die Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Linien aus den Hysteresen wieder, was sich bereits im Langzeitmaterialverhalten angedeutet hatte. Die ermüdungsbedingte Materialschädigung wirkt sich im Wesentlichen auf den untersten Spannungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus, nahe dem entlasteten Zustand. Sie zeigt sich dort in Form einer von Beginn an einsetzenden und über die gesamte Lebensdauer fortlaufenden Steifigkeitsreduzierung, die also einem Evolutionsprozess unterworfen ist. Die eingetragene Gefügeschädigung besitzt hier ihre größte Wirkung.

Im Gegensatz dazu wirkt sich der Ermüdungsprozess auf die Materialsteifigkeit im obersten Spannungsbereich der Hysteresen fast gar nicht aus. Nach einer plötzlichen Versteifung zu Beginn bleibt die Steifigkeit bis kurz vor Ende der Lebensdauer nahezu unverändert. Die ermüdungsbedingte Gefügeschädigung besitzt hier also keinen nennenswerten Einfluss auf die Tragfähigkeit des Materialgefüges.

Die festgestellte Versteifung weist keinen viskosen Charakter auf, die Auflockerung hingegen schon. Aus diesen Beobachtungen lässt sich schlussfolgern, dass der Vorgang der Versteifung oben und der Auflockerung unten vermutlich nicht miteinander verknüpfte Prozesse sind und daher unterschiedliche Ursachen besitzen müssen. Diese Annahme wird durch die im Langzeitmaterialverhalten gemachten Beobachtungen unterstützt.

In den Bruchversuchen der statischen Nachprüfungen hat sich darüber hinaus gezeigt, dass sich auch die Bruchfestigkeit bis kurz vor dem Ermüdungsversagen fast nicht verändert. Zusammen mit dem Verhalten der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich sowie der gemessenen SE-Aktivität lässt sich daraus schließen, dass das Materialgefüge bis kurz vor dem Ermüdungsversagen nicht wesentlich durch für die Tragfähigkeit relevante Risse geschädigt sein kann. Allerdings haben die ermittelten Arbeitslinien gezeigt, dass trotzdem eine Versprödung des Materialverhaltens vonstattengeht, was sich auch in einer deutlichen Verringerung der Bruchenergie widerspiegelt.

5.1.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene)

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse vorgestellt, die sich vorrangig mit den konkreten Zuständen im Materialgefüge befassen. Sie ergänzen die vorhergehenden Betrachtungen zum makroskopischen Verhalten der Probekörper und liefern Erkenntnisse über die Risszustände im Gefüge sowie zu den lokalen Dehnungsverteilungen.

Oberflächenverformungen

Das im Kapitel 4.3.2 bereits kurz vorgestellte Messsystem ARAMIS ermöglichte es, auf der Probenoberfläche die flächige Verteilung der Oberflächenverformungen zu erfassen. Betrachtet wurde dabei eine Messfläche von ca. 80 mm Breite und ca. 140 mm Höhe, die sich im mittleren Drittel der Probenhöhe befand. Die Messungen liefern eine graphische Veranschaulichung der Verteilungen der Dehnungskomponenten quer zur Probenlängsachse, parallel zur Probenlängsachse sowie auch die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises.

Die typischen Ergebnisse aus einem Ermüdungsversuch sind in der *Abbildung 5.11* für die Dehnungen quer zur Belastungsrichtung und in der *Abbildung 5.12* für die Dehnungen parallel zur Belastungsrichtung wiedergegeben. Für die Vergleichsdehnung nach von Mises finden sich die Ergebnisse im Anhang B1 in *Abbildung B1 16* und *Abbildung B1 17*.

In der *Abbildung 5.11* und *Abbildung 5.12* zeigt jeweils das linke Bild den unbelasteten Ausgangszustand zu Beginn des Ermüdungsversuches ohne jegliche Dehnungen. Das mittlere Bild gibt hingegen jeweils den Zustand kurz vor dem Ermüdungsversagen bei 99 % der Lebensdauer für die entlastete Probe unter S_0 wieder und liefert so die in der Probe verbliebenen Dehnungen. In den rechten Bildern ist schließlich der Zustand für die voll belastete Probe unter S_{max} jeweils kurz vor dem Ermüdungsversagen bei 99 % der Lebensdauer dargestellt.

Die Ergebnisse beider Dehnungskomponenten zeigen sehr deutlich eine starke richtungsabhängige und inhomogene Verteilung der Dehnungen auf der Probenoberfläche. Obwohl es sich hier nur um Beobachtungen auf der Probenoberfläche handelt, die die Zustände im Probeninneren nur begrenzt wiedergeben, spiegeln sie sehr deutlich den sehr inhomogenen Charakter des Lastabtrags im Beton wider. Es zeichnen sich darin lokale Bereiche ab, in denen sehr hohen Dehnungskonzentrationen auftreten. Bei den Querdehnungen handelt es sich um positive Dehnungen, die sich in vertikal orientierten und rissförmigen länglichen Bereichen konzentrieren. Diese Linien deuten auf infolge des Querzugs entstandene feine Risse hin, die zum Teil später auch Bestandteil der Bruchstruktur beim Versagen sind. Dieses Bild entspricht auch der theoretischen Vorstellung zum Tragverhalten und zum Versagensvorgang von Beton unter Druckbeanspruchung durch Querzug. Vergleiche dieser Messergebnisse mit den jeweiligen Aufnahmen der Probenoberfläche haben gezeigt, dass die roten rissförmigen Strukturen in der Messung Risse ankündigen, weit bevor sie mit dem bloßen Auge auf der Probe zu erkennen sind. Bei den gemessenen Längsdehnungen handelt es sich hingegen um Druckstauchungen, die sich zwar ähnlich inhomogen gestalten aber weniger in derart länglichen Bereichen konzentriert sind als die Querdehnungen. Aber auch hier gibt es lokal zum Teil sehr hohe Konzentrationen von Druckstauchungen. Es ist anzunehmen, dass es aufgrund der hohen Dehnungswerte, ähnlich wie bei den Querdehnungen, an diesen Stellen zu nennenswerten bleibenden Gefügeveränderungen kommt, die hier allerdings aus einer Gefügestauchung resultieren. Den Dehnungen in allen beiden Richtungen ist gemein, dass auch im entlasteten Zustand kurz vor dem Ermüdungsversagen nicht nur die Strukturierung der inhomogenen Dehnungsverteilung erhalten bleibt, sondern auch der größte Teil der Dehnungen an sich in der Probe verbleibt. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Beobachtungen bei den Längsdehnungen.

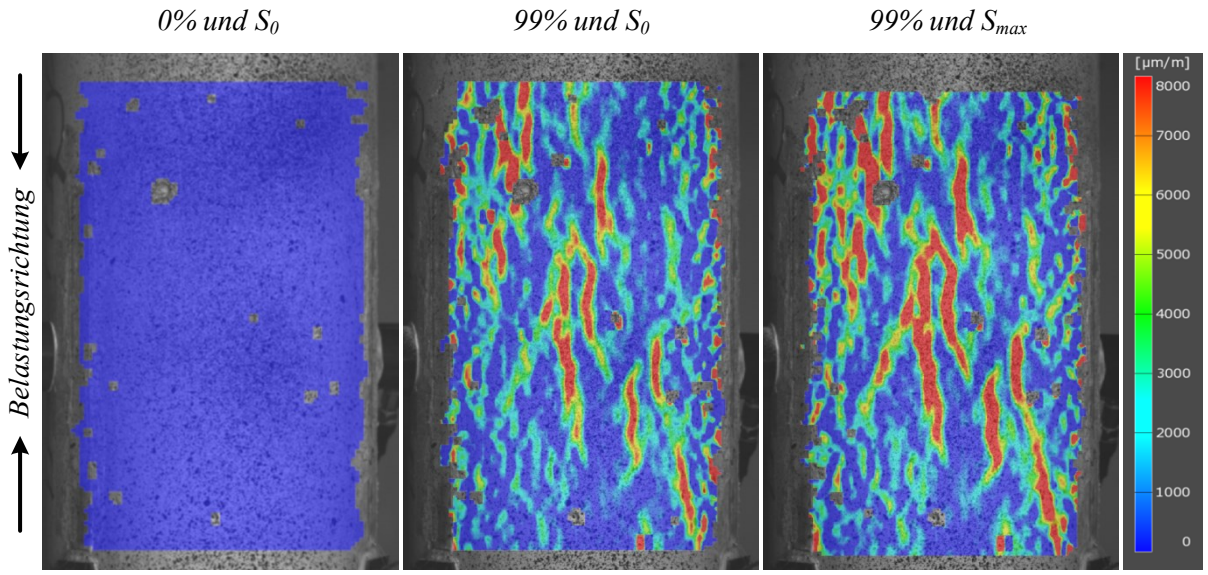

Abbildung 5.11: *Verteilung der horizontalen Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0 (links), zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (Mitte) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

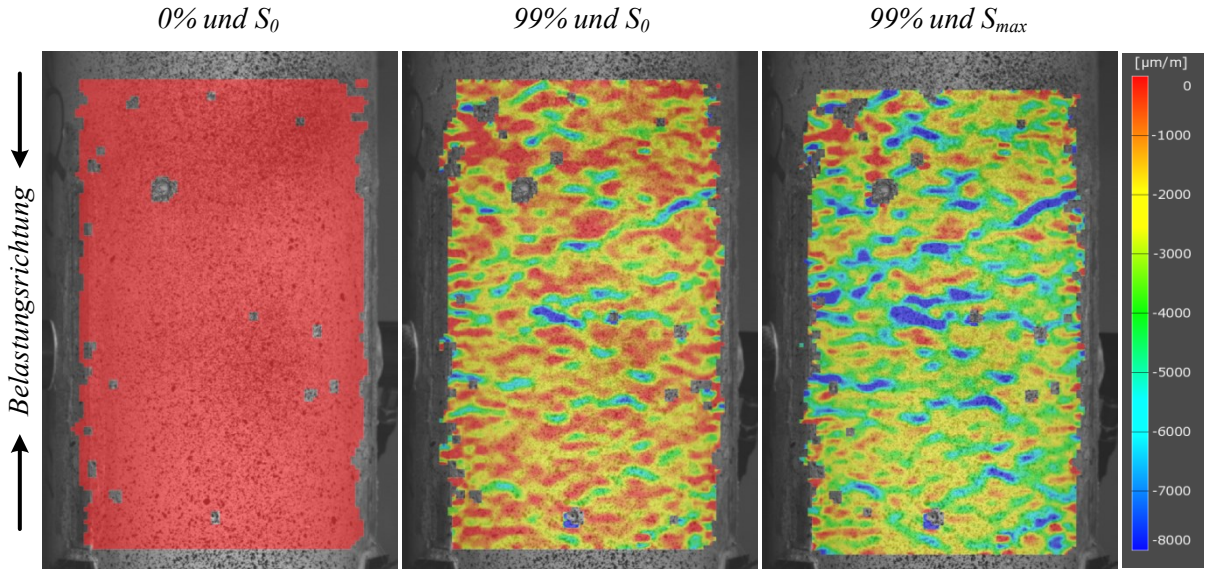

Abbildung 5.12: *Verteilung der vertikalen Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0 (links), zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (Mitte) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

Im Endergebnis bestätigen die Messergebnisse der hier vorgestellten Oberflächenverformungen die bereits bei den Ultraschallmessungen festgestellte Anisotropie der durch die einaxiale Ermüdungsbeanspruchung eingetragenen Materialschädigung. Die durch die zyklische Beanspruchung eingetragenen Materialschädigungen zeigen sich sowohl horizontal als auch vertikal in Form von sehr inhomogen verteilten großen lokalen Dehnungskonzentrationen. Diese äußern sich zum einen über vertikal orientierte feine längliche Risse sowie durch kurze quer orientierte Gefügestauchungen. Auch im entlasteten Zustand verbleiben diese weitestgehend im Materialgefüge.

Eine Gegenüberstellung des Bruchbildes nach dem Ermüdungsversagen mit den entsprechenden Messungen der Oberflächenverformungen findet sich im Anhang B1 in *Abbildung B1 15*. Diese zeigen anschaulich, dass die in den Messbildern deutlich ersichtlichen rissförmigen Dehnungskonzentrationen im Falle der Querzugdehnungen, bzw. auch der Vergleichsdehnungen nach van Mises, später Bestandteil der Bruchflächen sind.

Aus verschiedenen Gründen kam bei diesen UHC-Versuchen eine veränderte Messkonfiguration zum Einsatz, als dies bei den Messungen in den LHC-Versuchen der Fall war. Darin bedingt liegen leichte Unterschiede in den Messergebnissen, sowohl qualitativ als auch quantitativ, die einen direkten Vergleich der beiden Versuchsreihen erschweren.

Lichtmikroskopie

An einigen Proben aus den drei Abbruchserien UHC-S2/3/4 sowie an mechanisch unbeanspruchten Probekörpern wurden mikroskopische Untersuchungen hinsichtlich der Risszustände im Materialgefüge durchgeführt. Die Präparation der Proben sowie die Durchführung der Untersuchung erfolgte entsprechend der Beschreibung im Kapitel 4.3.2. Untersucht wurden insgesamt vier Lebensdauerzustände, ungeschädigte Proben sowie bis 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer vorgeschädigte Probekörper. Jeweils wurden aus den Proben ein Längs- und ein Querschnitt hergestellt und betrachtet. Besonders im Hinblick auf die zuvor gezeigten Ergebnisse über die sehr inhomogen verteilten Dehnungen und damit auch Gefügeschädigungen muss beachtet werden, dass die hier vorgestellten Ergebnisse aus relativ kleinen Bereichen von einzelnen wenigen Stellen der Probekörper stammen. Daher liefern sie nicht zwangsläufig ein ausreichend repräsentatives Bild vom jeweiligen Gefügezustand des Probekörpers.

Die hier präsentierten Gefügeaufnahmen liefern schließlich ein Bild des inneren Betongefüges. Auf dieser Betrachtungsebene lassen sich im Wesentlichen die großen Zuschlagskörner als auch die feinen Zuschlagsanteile sowie der Zementstein unterscheiden. Letztere beide bilden gemeinsam als Matrix den Zementmörtel. In *Abbildung 5.13* und *Abbildung 5.14* sind beispielhafte Aufnahmen von Mikrorissen mit den zugehörigen Rissbreiten zu sehen.

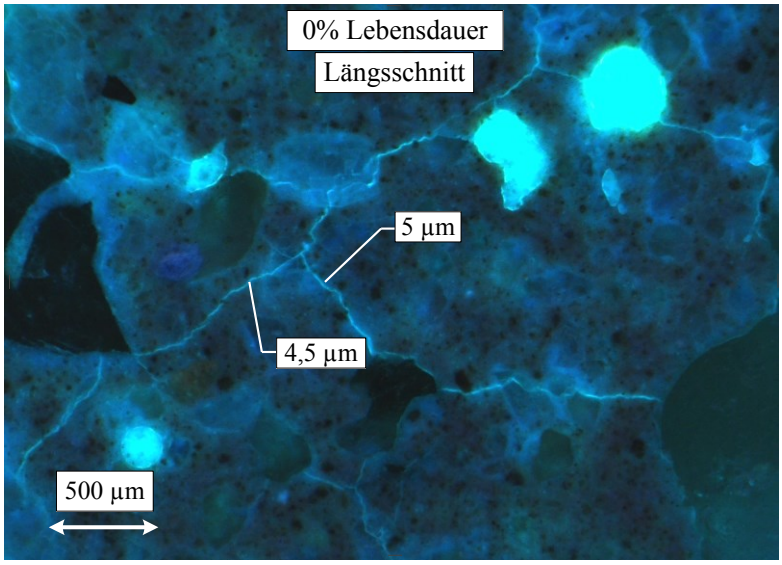

Abbildung 5.13: *Mikroskop-Aufnahme von ungerichteten Mikrorissen durch den Zementstein im Zementmörtels, mit Rissbreiten in einem Längsschnitt einer mechanisch unbeanspruchten Probe*

Die *Abbildung 5.13* zeigt eine unbelastete Probe in der ungerichtete Mikrorisse zu erkennen sind, die vermutlich vornehmlich aus dem Hydratationsprozess resultieren. Dagegen zeigt *Abbildung 5.14* eine bis 90 % der Lebensdauer vorgeschädigte Probe, in der vorwiegend parallel zur Lastrichtung orientierte Mikrorisse auftreten.

Bei der Auswertung der Aufnahmen wurden neben der Anzahl der gefundenen Risse auch deren Länge, deren Richtung und in ausgewählten Fällen auch deren Breite ermittelt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse weisen zum Teil relativ große Streuungen auf. Allerdings ist bei der Bewertung zu beachten, dass jeder Lebensdauerzustand aus einem anderen Probekörper mit jeweils nur zwei Schnittebenen ausgewertet wurde. Eine Nachverfolgung der Weiterentwicklung festgestellter Rissbilder ist daher nicht möglich.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen haben die Auswertungen folgende Ergebnisse geliefert. Bereits im Ausgangszustand der unbeanspruchten Probe weist das Gefüge ein ausgeprägtes Rissbild auf. Dabei ist das Gefüge von überwiegend willkürlich gerichteten Mikrorissen durchsetzt, die sich sowohl im Zementstein als auch in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag (ITZ) befinden. Das Material ist also bereits vorgeschädigt, wobei die Zuschlagskörner selbst davon unberührt bleiben.

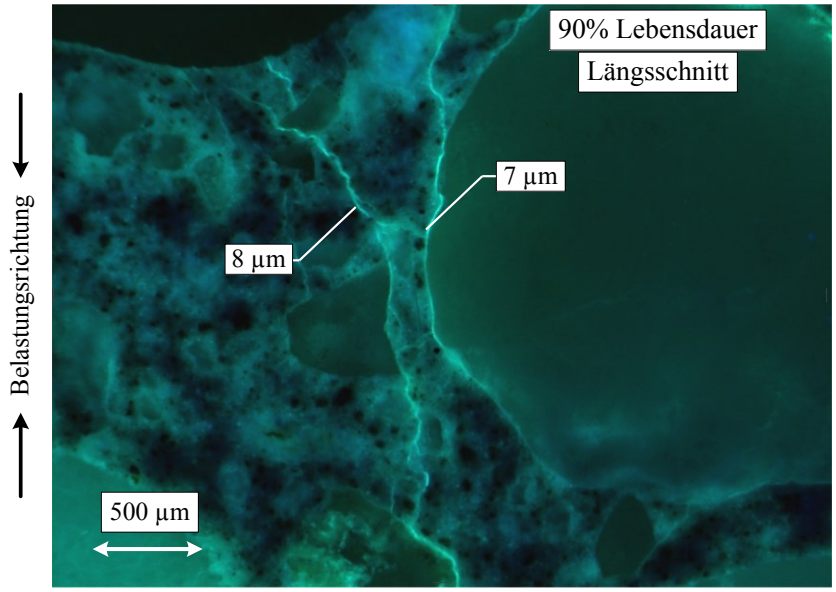

Abbildung 5.14: *Mikroskop-Aufnahme von parallel zur Lastrichtung orientierten Mikrorissen mit Rissbreiten in einem Längsschnitt von einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe*

Inwieweit diese Risse aus der Probenpräparation stammen oder aus dem Hydratationsprozess resultieren, kann leider nicht festgestellt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass aufgrund der sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften, der thermischen Beanspruchung sowie des Schwindens im Rahmen des Hydratationsvorgangs nennenswerte Eigenspannungen entstehen, die letztlich auch zu ungerichteten Mikrorissen im Gefüge führen [HSU 1963; VAN MIER 1997; KUSTERMANN 2005; THIENEL 2008]. Die Existenz derartiger Mikrorisse im unbeanspruchten Beton wurde z.B. in [KUSTERMANN 2005] gezeigt. Die statistische Auswertung der Rissrichtungen in *Abbildung 5.16* spiegelt diese zufällige Verteilung der Rissrichtungen wider. Die dabei festgestellten Rissbreiten besaßen Werte zwischen 2 µm und 9 µm, die in der *Abbildung 5.15 links* in einem Vergleich mit den anderen Lebensdauerzuständen dargestellt sind.

Infolge der aufgebrachten zyklischen Beanspruchungen konnten mit den durchgeführten Untersuchungen bei den bis 10 % und bis 50 % vorgeschädigten Proben prinzipiell keine wesentlichen Veränderungen im Rissbild festgestellt werden. Die beobachteten Risse verlaufen nach wie vor fast ausschließlich im Zementstein und der ITZ. Auch an den Rissbreiten, der Gesamtlänge und der mittleren Länge ändert sich nahezu nichts, siehe *Abbildung 5.15*. Das gleiche Bild bietet sich erwartungsgemäß auch bei der errechneten Rissflächensumme, die im Anhang B1 in *Abbildung B1 25* dargestellt ist. Einzig die ermittelten Rissrichtungen zeigen eine signifikante Entwicklung. Während sich die Verteilung der Rissrichtungen im Schnitt quer zur Beanspruchungsrichtung nicht verändert und gleichmäßig bleibt, zeigen die Risse im Schnitt parallel zur Beanspruchungsrichtung eine zunehmende Orientierung zur Belastungsrichtung. Dies wird aus den im Anhang B1 in *Abbildung B1 24* dargestellten Diagrammen zu den Rissrichtungen für alle vier untersuchten Lebensdauerzustände ersichtlich. Allerdings würde eine Zunahme bzw. ein Wachstum von Rissen in der Vertikalrichtung sich prinzipiell nicht mit den Beobachtungen aus den vorangegangenen Kapiteln decken, wo bei den relevanten Größen keine Veränderungen festzustellen waren.

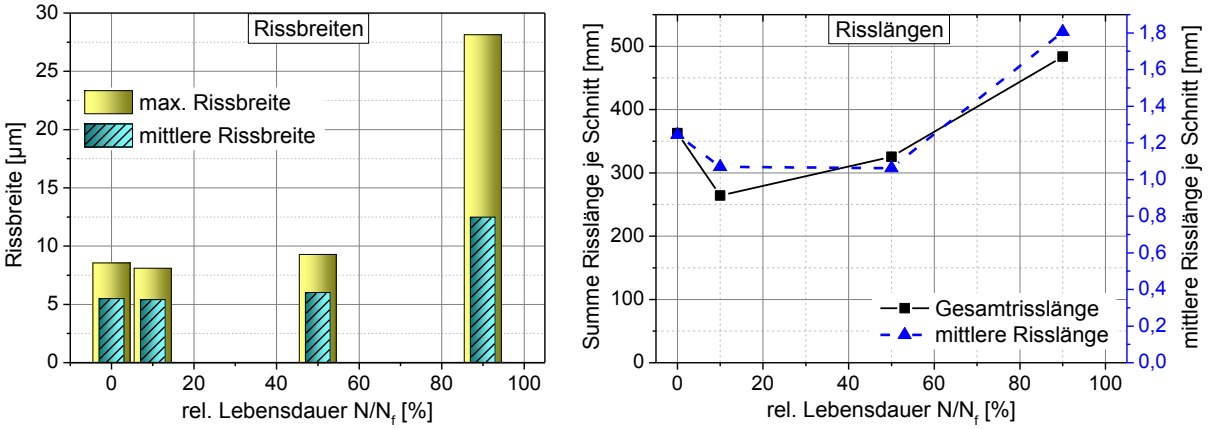

Abbildung 5.15: *Bei der Lichtmikroskopie gemessene maximale und mittlere Rissbreiten (links) sowie die je Schnitt ermittelten Gesamtrisslängen und mittleren Risslängen (rechts) jeweils für unbeanspruchte und bis zu verschiedenen Lebensdauerzuständen zyklisch vorgeschädigte Proben*

Möglicherweise ist die Zunahme der vertikalen Risse gering genug, um die besagten anderen Eigenschaften nicht zu beeinflussen, oder es hat stattdessen eine Reduzierung der horizontal orientierten Risse stattgefunden. Dies könnte in bestimmten Gefügebereichen eine Folge der sich einstellenden bleibenden Gefügeverformungen sein. Eine endgültig nachweisbare Erklärung dieses Zusammenhangs bleibt hier jedoch offen.

Bei den in den Aufnahmen festgestellten Rissverläufen zeigt sich häufig, wie Risse im Zementmörtel in deren Richtung liegende Zuschlagskörner förmlich in der Kontaktzone umlaufen. Beispielhaft ist dies in der *Abbildung B1 20* und *Abbildung B1 21* im Anhang B1 zu sehen.

Im letzten untersuchten Schädigungszustand bei 90 % der Lebensdauer ließen sich schließlich erstmals signifikante Veränderungen im beobachteten Rissbild feststellen. Generell zeigt sich, dass die Risse nun nicht mehr nur durch Zementstein und Kontaktzone verlaufen, sondern auch vereinzelt durch Zuschlagskörner hindurchgehen. Dabei handelt es sich vermehrt um teils große Rissstrukturen, die aus vielen verzweigten Einzelrissen zusammengesetzt sind. Bei einigen handelt es sich bereits um Makrorisse, die zum Teil deutlich sichtbar auf der Proben-

oberfläche erscheinen und die Bruchfigur ankündigen. Diese sichtbaren Veränderungen spiegeln sich sowohl in einer signifikanten Zunahme der gemessenen Rissbreiten als auch der Gesamtlänge und der mittleren Länge wider, wie die *Abbildung 5.15* zeigt. Dabei steigt neben der mittleren Rissbreite besonders die maximale Breite an. Gemessen wurden Breiten zwischen 2 µm und knapp 30 µm. Auch die bereits festgestellten Entwicklungen bei den Rissrichtungen setzten sich bis zu dieser Phase weiter fort. In der *Abbildung 5.17 links* ist der nach wie vor unveränderte Zustand der gleich verteilten Rissrichtungen im Querschnitt zu erkennen, wohingegen sich im Längsschnitt in *Abbildung 5.17 rechts* eine weiter gestiegene ausgeprägte Vertikalorientierung zeigt. Die konkreten Werte für die hier beschrieben Größen, die aus der Rissauswertung resultieren, sind im Anhang B1 in der *Tabelle B1 3* und der *Tabelle B1 4* wiedergegeben.

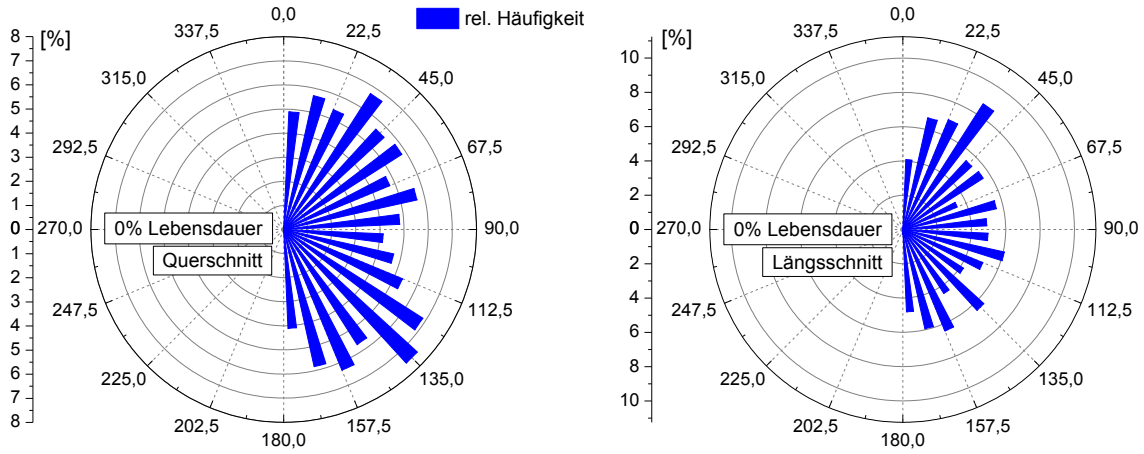

Abbildung 5.16: *Darstellung der Verteilungen der relativen Häufigkeit der ermittelten Rissrichtungen in unbeanspruchten Proben im Schnitt quer zur Belastungsrichtung (links) und parallel zur Belastungsrichtung (rechts)*

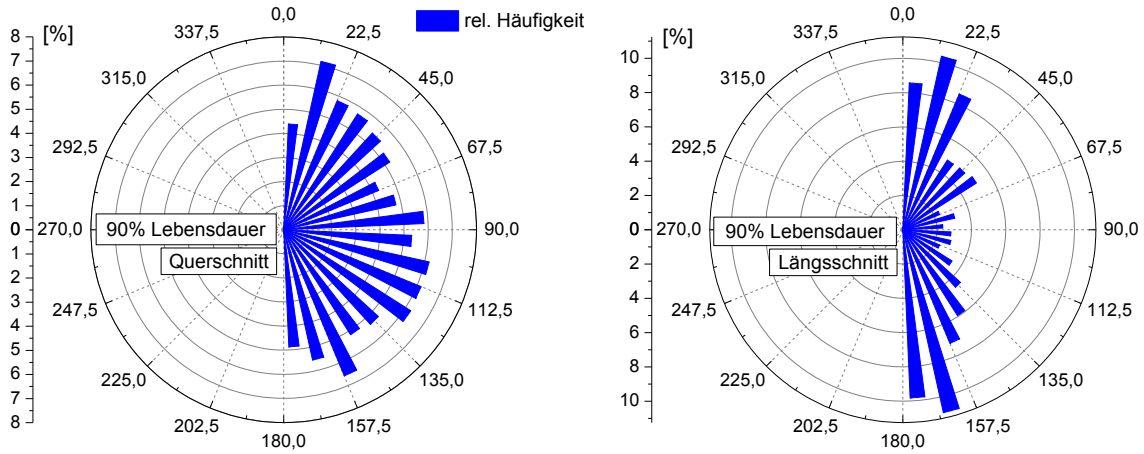

Abbildung 5.17: *Darstellung der Verteilungen der relativen Häufigkeit der ermittelten Rissrichtungen in bis 90% der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Proben im Schnitt quer zur Belastungsrichtung (links) und parallel zur Belastungsrichtung (rechts)*

Prinzipiell bestätigen die Ergebnisse der Lichtmikroskopie die bisherigen Beobachtungen aus den Ultraschallmessungen und den ARAMIS-Aufnahmen im Bezug auf die Anisotropie der

durch die einaxiale zyklische Beanspruchung eingetragenen Materialschädigungen. Des Weiteren ist aus den Ergebnissen abzulesen, dass sich der Schädigungsprozess in erster Linie in der Zementmatrix und der Kontaktzone abspielt, und erst zum Ende der Lebensdauer hin auch die Zuschlagskörner mit einschließt.

Die Feststellung, dass sich im Rissbild bis kurz vor dem Ermüdungsversagen keine wesentlichen Veränderungen beobachten lassen und erst bei 90 % der Lebensdauer signifikante Unterschiede auszumachen sind, bestätigt zudem einige der in den vorangegangenen Unterkapiteln gemachten Beobachtungen. Das betrifft die gemessenen SE-Aktivitäten, die ebenfalls bis kurz vor Ende der Lebensdauer keinen Hinweis auf eine nennenswerte Rissbildung im Gefüge liefern. Des Weiteren korreliert das Ergebnis gut mit der lange Zeit unverändert bleibenden Bruchfestigkeit sowie mit der sich gleichermaßen nicht verändernden Steifigkeit im oberen Spannungsbereich aus den Ableitungen der Hysteresen. Allen gemein ist die zum Ende der Lebensdauer fast gleichzeitig einsetzende signifikante Veränderung in den jeweiligen Entwicklungen. Einzig aus dem kurzen Spitzenwert der SE-Aktivität bei der Erstbelastung sowie der fast parallel ablaufenden plötzlichen Versteifung im oberen Spannungsbereich konnten keine Effekte in den Rissbildern entnommen werden. Die festgestellte vertikale Orientierung der entstandenen Risse im Gefüge spiegelt sich dagegen in den Ergebnissen aus dem Messsystem ARAMIS wider. Sie decken sich mit den dort auf der Oberfläche in Form länglicher Rissstrukturen gemessenen Querzugdehnungen.

Allerdings finden sich nicht für alle auf der Makroebene gemachten Beobachtungen entsprechende Erklärungen oder Hinweise in den Mikroskopie-Aufnahmen. Für die in der vertikalen Richtung festgestellte deutliche Steifigkeitsreduzierung im unteren Spannungsbereich konnten auf dieser Betrachtungsebene in den Mikroskopie-Bildern keinerlei Korrelationen bzw. Hinweise gefunden werden. Gleiches gilt für die beobachteten Entwicklungen in den Ultraschallmessungen, sowohl für die Schallgeschwindigkeiten als auch für die Signalamplituden. Selbst aus der in Probenlängsrichtung fortlaufend zunehmenden bleibenden Verformung ließen sich keinerlei signifikanten Merkmale in den Aufnahmen der Gefügestruktur erkennen. Da aber auch die gemessenen Oberflächenverformungen mit ARAMIS in Vertikalrichtung deutliche lokale Dehnungskonzentrationen aufweisen, müssen entsprechende Veränderungen im Gefüge stattgefunden haben. Vermutlich liegt die Ursache für diese vertikalen Effekte eher auf einer anderen Betrachtungsebene. Für die in [MEHMEL & KERN 1962] beschriebene Modellvorstellung zur ermüdungsbedingten Schädigungsausbildung über Rissbildungen im Betongefüge konnte somit in den eigenen Ergebnissen keine Bestätigung gefunden werden. Allerdings wird in [IBUK 2008] von einer experimentellen Bestätigung derartiger Rissausbildungen berichtet.

Die hier vorgestellten Ergebnisse aus der Mikroskopie resultieren jedoch aus der Untersuchung auf einem sehr eingeschränkten Bereich der Tiefe der Betrachtungsebene. Es können nur Risse bzw. Schädigungen erfasst werden, die mit den gewählten Vergrößerungen sichtbar gemacht werden. Die Komponenten und die Merkmale des Materialgefüges erstrecken sich jedoch über einen weiten Bereich der Betrachtungsebenen von der Makroebene bis hin zur Mikroebene. Dies gilt auch für die eingetragenen Gefügeschädigungen. Rissstrukturen lassen sich auch auf weitaus tiefer gehenden Betrachtungsebenen finden. Daher sind die für die genannten vertikalen Effekte verantwortlichen Gefügeveränderungen vermutlich auf der hier gewählten Betrachtungsebene in der Mikroskopie nicht sichtbar bzw. laufen diese auf einer anderen Ebene ab. Unterstützt wird dies durch die Tatsache, dass bei relativ spröden Materialien, wie dem Zementstein bzw. Zementmörtel, eingetragene aus Zug resultierende Schädigungen sich in einzelnen Zugrissen konzentrieren und damit gut sichtbar sind. Veränderungen oder Schädigungen aus Druckbeanspruchung verteilen sich hingegen auf der gesamten Länge

des betreffenden Gefügebereiches und sind daher verschmiert und weniger gut erkennbar. Dies deckt sich mit den festgestellten Rissen aus Querzug, aber den nicht gefundenen Veränderungen aus den lokalen Druckkonzentrationen.

REM (Rasterelektronenmikroskop)

Um das Materialgefüge auch auf einer tieferen Betrachtungsebene untersuchen zu können, wurden drei Proben aus der Mikroskopie zusätzlich präpariert und in einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Dazu wurden jeweils aus den Längsschnitten einer unbeanspruchten, einer bis 10 % und einer bis 90 % zyklisch vorgeschädigten Probe kleinere Teilstücke herausgeschnitten. Für die Untersuchung wurden gezielt Bereiche im Gefüge ausgesucht, in denen einmal lokale Druckspannungskonzentrationen und einmal geringe Druckspannungen vermutet wurden. Die Auswahl der Bereiche erfolgte in Anlehnung an eigene numerische Simulationen mit Gefügemodellen und auch an Erkenntnisse aus den Untersuchungen von [MEHMEL & KERN 1962] und [LUSCHE 1972]. Die *Abbildung 5.18* zeigt beispielhaft den gewählten Gefügeausschnitt der bis 90 % geschädigten Probe mit zwei markierten Untersuchungsbereichen. Für alle drei Proben finden sich die entsprechenden Darstellungen mit den jeweiligen Markierungen aller Untersuchungsbereiche im Anhang B1 in *Abbildung B1 26*.

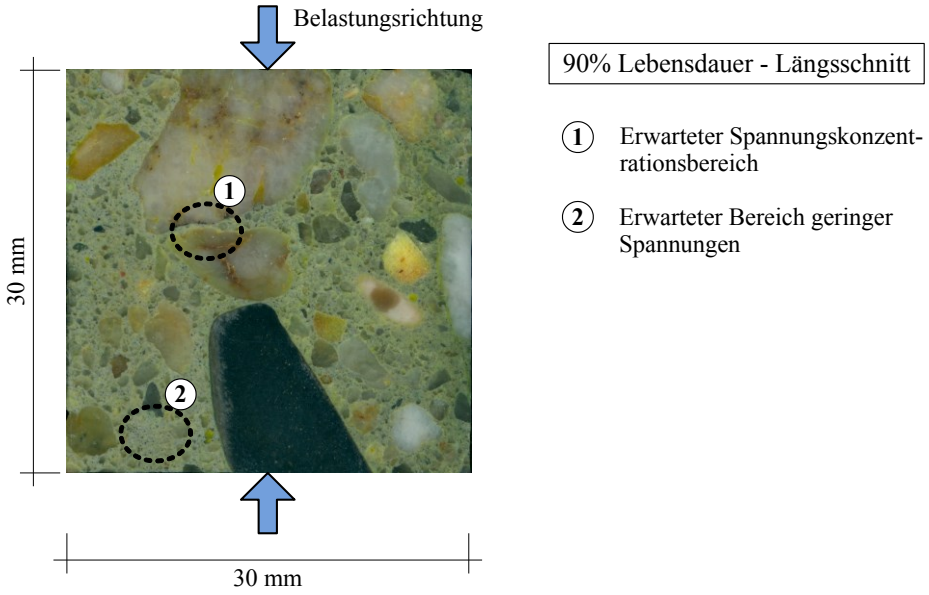

Abbildung 5.18: *Darstellung des Probenausschnitts für die REM-Untersuchung aus einer bis 90 % der Lebensdauer vorgeschädigten Probe mit Markierungen für zwei Untersuchungsbereiche*

In jeder Probe wurden jeweils mehrere Bereiche mit vermuteten Spannungskonzentrationen sowie geringen Spannungen untersucht. Dabei wurde auch mit einem breiten Spektrum an Vergrößerungen gearbeitet. Aufgrund der sehr hohen Vergrößerung mit dem REM konnten dabei, noch wesentlich ausgeprägter als beim Mikroskop, nur einzelne sehr kleine Bereiche des Materialgefüges untersucht werden. Im Hinblick auf die sehr heterogene Gefügestruktur sowie die inhomogene Verteilung der Beanspruchungen und damit auch der Schädigungen, erlauben die gemachten Aufnahmen daher keine belastbare statistische Auswertung.

Auch die Aufnahmen mit dem REM zeigen vielfältige Rissstrukturen im Gefüge. Allerdings ist hier, ebenso wie bei den Untersuchungen am Lichtmikroskop, zu beachten, dass davon auszugehen ist, dass auch aus der Probenpräparation Schädigungen eingetragen sein können.

Eine Unterscheidung bzw. Feststellung, welche Risse aus welcher Ursache resultieren, war hier wie bei der Lichtmikroskopie ebenfalls nicht möglich. Die Vorbereitung und Präparation erfolgte jedoch bei allen Proben in gleicher Weise.

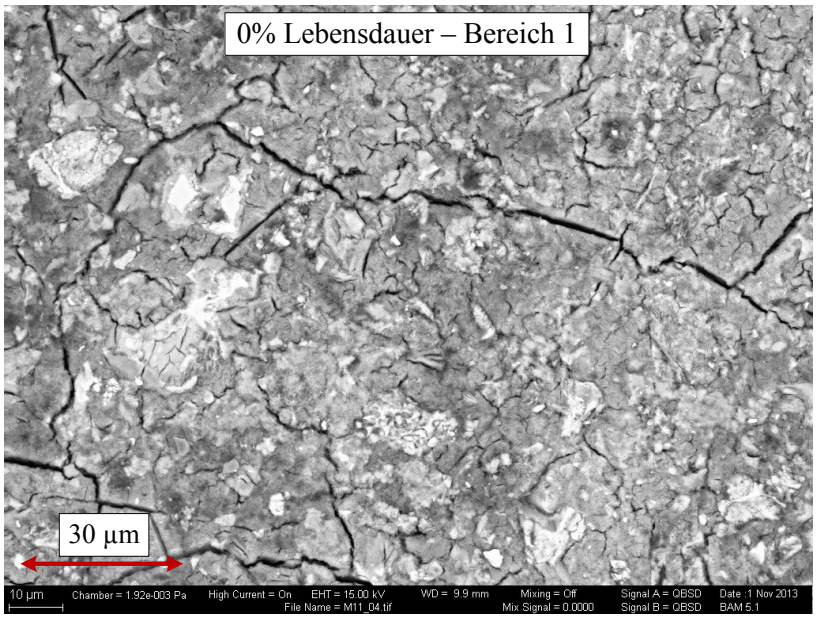

Abbildung 5.19: *Mit dem REM aufgenommenes Rissbild des Zementsteins einer unbeanspruchten Probe in einem Bereich 1 bei hoher Vergrößerung*

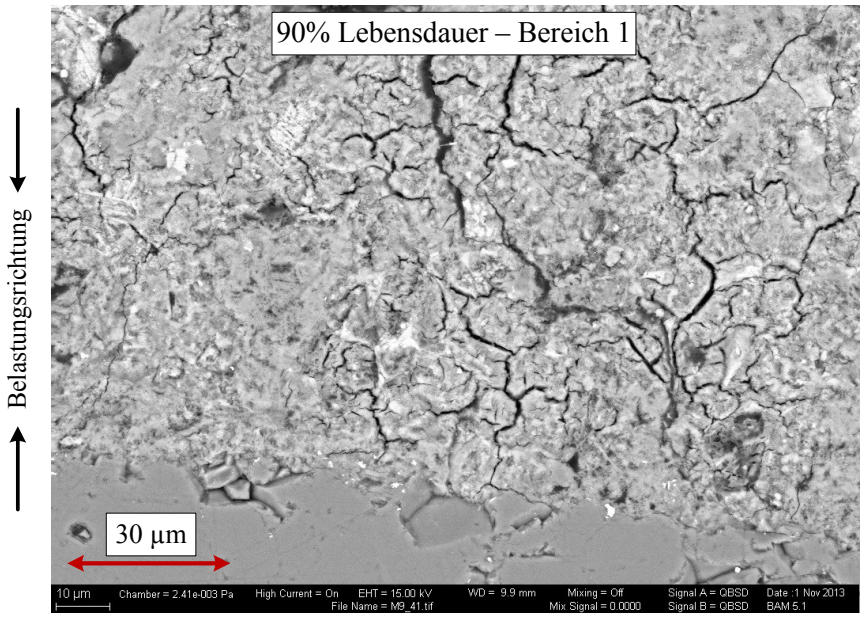

Abbildung 5.20: *REM-Aufnahme des Rissbildes im Zementstein einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe in einem erwarteten Spannungskonzentrationsbereich beim Übergang zu einem Zuschlagskorn*

In *Abbildung 5.19* bis *Abbildung 5.21* sind beispielhaft drei REM-Aufnahmen mit einer mittleren Vergrößerung und typischen Rissbildern wiedergegeben. Die *Abbildung 5.19* zeigt den Zementstein einer mechanisch unbeanspruchten Probe. Dagegen stellen die *Abbildung 5.20*

und *Abbildung 5.21* den Zementstein aus einer bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Probe dar. Während es sich, entsprechend den beiden markierten Bereichen in *Abbildung 5.18*, bei der *Abbildung 5.20* um eine Aufnahme aus einem erwarteten Spannungskonzentrationsbereich handelt, gibt die *Abbildung 5.21* den Zementstein in einem Bereich mit erwartet geringen Spannungen wieder.

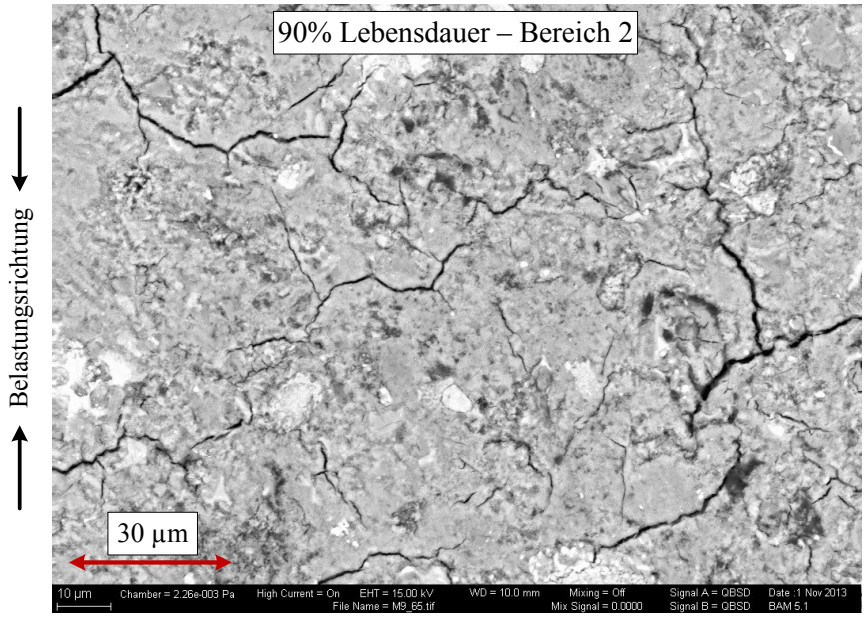

Abbildung 5.21: *REM-Aufnahme des Rissbildes im Zementstein einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe in einem Bereich mit erwarteten geringen Spannungen*

Ähnlich wie auf den drei hier dargestellten REM-Aufnahmen zeigten auch alle anderen gemachten Aufnahmen in der Zementmatrix eine gleichmäßige, dichte und stark verzweigte Rissstruktur, deren Risse ungerichtet in alle Richtungen orientiert sind. Dieses Bild bietet sich so in ähnlicher Weise auf allen untersuchten Ebenen der Vergrößerung. In den Zuschlägen finden sich dagegen nahezu kaum Risse.

Aufgrund der hohen Rissdichte und der ungeordneten Rissstruktur ist es schwer, einen quantitativen Vergleich durchzuführen und entsprechend kleine Unterschiede auszumachen. Eine belastbare statistische Auswertung der Aufnahmen wurde daher nicht durchgeführt. Bei der rein qualitativen Bewertung aller Aufnahmen konnten sowohl zwischen den drei verschiedenen Lebensdauerzuständen als auch zwischen den Bereichen mit erwarteten Spannungskonzentrationen bzw. mit geringen Spannungen keine signifikanten Unterschiede bzw. Veränderungen ausgemacht werden. Für die Rissbreiten wurden dabei zumindest stichprobenartig die Werte ermittelt, die sich in der *Tabelle 5.2* wiederfinden.

Auch hier zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede. Die mittlere Rissbreite liegt auf dieser Betrachtungsebene einheitlich zw. 0,5 und 2 µm. Nur in der bis 90 % geschädigten Probe traten einzelne größere Kontaktrisse auf. Zwischen den erwarteten Spannungskonzentrationsbereichen und den Bereichen geringer Spannungen konnten ebenfalls keine Unterschiede in den Rissbreiten ausgemacht werden. Eine Zusammenstellung weiterer ausgewählter REM-Aufnahmen aus den drei Lebensdauerzuständen findet sich im Anhang B1 in *Abbildung B1 27* bis *Abbildung B1 30*. Dort sind Aufnahmen für beide Untersuchungsbereiche und

für alle drei untersuchten Lebensdauerzustände in jeweils zwei verschiedenen Vergrößerungsstufen gegenübergestellt.

Tabelle 5.2: *Stichprobenartig ermittelte Rissbreiten in den REM-Aufnahmen in dem Zementstein und der Kontaktzone für die drei untersuchten Lebensdauerzustände*

Lebensdauer-zustand	***Zementstein max [µm]***	***Zementstein min [µm]***	***Zementstein mittel [µm]***	***Kontaktzone [µm]***
0%	3	0,1	0,5 – 2,0	wie Zementstein
10%	3	0,1	0,5 – 2,0	wie Zementstein
90%	4	0,1	0,5 – 2,0	max. 15 – 20

Die mit dem REM gemachten Beobachtungen haben letztlich im Wesentlichen keine signifikanten Veränderungen im Gefüge infolge der Ermüdungsbeanspruchung erkennen lassen. Selbst im Bereich der erwarteten Druckkonzentrationen ließ sich keine nennenswerte Auswirkung der ermüdungsbedingten Schädigung feststellen. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss jedoch zum einen, wie bereits erwähnt, die stark inhomogene Verteilung der Gefügebeanspruchungen zusammen mit den wenigen sehr kleinen untersuchten Bereichen berücksichtigt werden. Zum anderen fallen die eingetragenen absoluten Veränderungen in der Gefügestruktur doch sehr klein aus. Die in der entlasteten Probe am Ende der Lebensdauer verbliebene Längsdehnung betrug ca. 0,15 % und die Zunahme in der elastischen Verformbarkeit betrug sogar nur ca. 0,025 %. Selbst wenn man an lokalen Stellen mit Dehnungskonzentrationen ein Vielfaches davon ansetzt, bleiben die resultierenden absoluten Verschiebungen im Gefüge äußerst gering und sind damit vermutlich schwer ausfindig zu machen. Verteilt sich diese unter Druck auch noch, wie bereits angenommen, auf einer entsprechenden Länge im Gefüge und konzentriert sich nicht wie unter Zug in einem einzelnen Riss, sind deren Effekte wohl kaum oder nur schwer erkennbar. Unter der Annahme, dass die mit dem REM festgestellte feine Rissstruktur zumindest teilweise tatsächlich aus dem Gefüge und nicht aus der Probenpräparation stammt, können diese geringen Veränderungen leicht in der vorhandenen Rissstruktur untergehen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungsergebnisse dienten hauptsächlich der Klärung der Frage:

Welche Veränderungen können während des Ermüdungsvorgangs im Materialgefüge festgestellt werden?

Mit Hilfe der Messungen der Oberflächenverformungen konnte die Annahme der extrem inhomogenen Dehnungsverteilung unter Last mit hohen lokalen Konzentrationen sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung nachgewiesen werden. Im Materialgefüge selbst ist bereits vor der ersten mechanischen Beanspruchung eine dichte und feine Rissstruktur vorhanden, die sich aber ausschließlich auf den Zementstein beschränkt. Diese Risse besitzen keine ausgezeichnete Ausrichtung, erstrecken sich bis in sehr tiefe Betrachtungsebenen und sind vermutlich vorrangig ein Resultat aus dem Hydratationsprozess.

Infolge der aufgebrachten Ermüdungsbeanspruchung lassen sich im weiteren Verlauf in dem vorhandenen Rissbild bis kurz vor dem Ermüdungsversagen kaum erkennbare Veränderungen feststellen. Bis auf eine zunehmende vertikale Orientierung im Längsschnitt bleiben alle anderen betrachteten Größen unverändert. Das gilt besonders für die mit dem REM aufgenommen Gefügeausschnitte. Zum Ende der Lebensdauer, spätestens bei 90 %, zeigen sich signifikante Veränderungen im beobachteten Rissbild. Die Mikrorisse nehmen nachweisbar zu, die Risslängen und die Rissbreiten wachsen an. Im Längsschnitt verstärkt sich die vertikale Orientierung der Risse. In dieser Phase sind schließlich vereinzelt auch Zuschlagskörner von der Rissbildung betroffen.

Sowohl die Messung der Oberflächenverformungen als auch die Ergebnisse der Mikroskopie haben zudem die ausgeprägte Anisotropie der durch die einaxiale Ermüdungsbeanspruchung eingetragenen Materialschädigung nachgewiesen.

Die hier genannten Beobachtungen im Materialgefüge weisen weiterhin zum Teil Korrelationen mit Ergebnissen aus den vorangegangenen Kapiteln auf. Der über die Lebensdauer festgestellte Rissentwicklungsprozess deckt sich sehr gut mit den gemessenen SE-Aktivitäten, mit dem Verhalten der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich sowie mit der Entwicklung der statischen Bruchfestigkeit. Vor diesem Hintergrund wird die beobachtete Rissentwicklung nur bestätigt.

Allerdings korrelieren nicht alle in den vorangegangenen Kapiteln beobachteten Verhaltensweisen mit dem Rissentwicklungsprozess. Das betrifft die Entwicklungen speziell der bleibenden Verformungen, der im unteren Spannungsbereich der Hysteresen festgestellten Gefügeauflockerungen sowie der Ultraschallmessungen. Eine mögliche Ursache für diese makroskopischen Veränderungen konnte anhand der durchgeführten Gefügeuntersuchungen nicht festgestellt werden und ist möglicherweise in anderen Effekten zu suchen. Aufgrund dieser Feststellungen ist anzunehmen, dass noch andere Veränderungsvorgänge im Gefüge stattfinden, die weniger durch Rissbildung charakterisiert sind und vorrangig einen starken zeit- und zyklenabhängigen Charakter aufweisen.

Eine naheliegende Vermutung ist, dass im Zementstein auch rein viskose Verformungskapazitäten aktiviert werden. Die nachfolgenden Kapitel werden aber noch weiteren Aufschluss zu den möglichen Ursachen liefern, bevor im Kapitel 6 schließlich eine mögliche Erklärung für die Vorgänge während des Ermüdungsprozesses abgeleitet wird.

5.2 Hochzyklisches Verhalten und Kriechen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Kriechversuchen vorgestellt und zugleich mit den entsprechenden Ergebnissen aus den zuvor vorgestellten UHC-Versuchen verglichen und diskutiert. Die erhaltenen Messergebnisse aus den vier Kriechversuchen weisen insgesamt sehr geringe Abweichungen untereinander auf. Aufgrund von Unterbrechungen im Prüfablauf konnten allerdings die Ergebnisse des ersten Probekörpers nur begrenzt in die Auswertung mit einfließen.

Verformungen

Während der Kriechversuche wurden neben der sich unter der Kriechlast S_m einstellenden Gesamtkriechverformung $\varepsilon_{cr,m}$ auch die bleibenden Dehnungen $\varepsilon_{cr,0}$ im nahezu entlasteten Zustand unter der Grundlast S_0 ermittelt. Diese können als plastischer bzw. visko-plastischer Dehnungsanteil infolge der Kriechbeanspruchung angesehen werden, abgesehen von einem kleinen darin noch enthaltenen visko-elastischen Anteil. Beide Kriechkurven sind im Anhang B2 *Abbildung B2 1* dargestellt und zeigen einen typischen, fortlaufend wachsenden aber abklingenden Kriechverlauf und entwickeln sich nahezu synchron. Das bedeutet, dass der elastische Dehnungsanteil, der der Differenz aus den beiden Kurven entspricht, sich nur unwesentlich verändert und die Veränderung der Gesamtdehnung daher fast ausschließlich aus der Entwicklung der plastischen Verformungen im Material resultiert. Die Änderung des elastischen Dehnungsanteils unter der Kriechlast lag zu Versuchsende im Mittel bei ca. 1,7 %. Im Vergleich mit den in den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe ermittelten Dehnungen zeigt sich, dass die reinen Kriechverformungen $\varepsilon_{cr,0}$ einen wesentlichen Anteil an den gesamten sich im Ermüdungsversuch einstellenden bleibenden Dehnungen $\varepsilon_{f,0}$ ausmachen. Dies ist in dem Diagramm in *Abbildung 5.22 links* wiedergegeben. Ermittelt man den relativen Anteil der bleibenden Kriechdehnungen $\varepsilon_{cr,0}$ an den bleibenden Dehnungen $\varepsilon_{f,0}$ aus den Ermüdungsversuchen, zeigt sich der in *Abbildung 5.22 rechts* dargestellte zeitliche Zusammenhang.

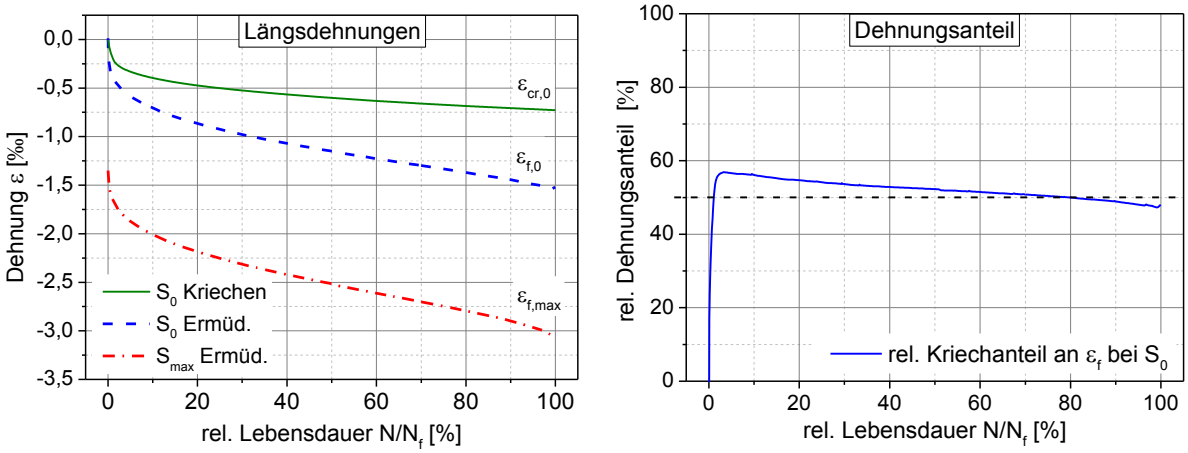

Abbildung 5.22: *Vergleich der bleibenden Kriechdehnung mit den Verformungen aus den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe (links) und relativer Anteil der bleibenden Kriechdehnung an der bleibenden Dehnung aus den Ermüdungsversuchen (rechts)*

Innerhalb des hier betrachteten Zeitraumes stellt sich ein relativ stabiler Zusammenhang ein, bei dem der Kriechanteil ca. die Hälfte der bleibenden Verformungen in den Ermüdungsver-

suchen ausmacht. Die Beobachtungen verdeutlichen zum einen den stark zeitabhängigen Charakter der Kriechverformungen und zugleich die fehlende Wirkung der zyklischen Belastung beim Vergleich mit der bleibenden Ermüdungsdehnung $\varepsilon_{f,0}$ (siehe *Abbildung 5.22 links*, grüne und blaue Kurve). Als Ursache für die Kriechverformungen sind vermutlich vorrangig viskose Verformungen des Zementsteins anzunehmen [LOCHNER 2000]. Dabei ist, wie bei den UHC-Versuchen im Kapitel 5.1 gezeigt, ebenfalls von einer stark inhomogenen Dehnungsverteilung im Gefüge mit stark lokal konzentrierten Dehnungen auszugehen.

Steifigkeiten

Neben den sich einstellenden plastischen Verformungen findet auch eine Veränderung der Steifigkeiten infolge der Kriechbeanspruchung statt. Ermittelt wurden diese als Sekantenmodule über die in *Abbildung 5.23 links* dargestellten Lastrampen, welche exakt denen entsprechen, die auch in den UHC-Versuchen gefahren wurden (vgl. *Abbildung 5.2*). Die Verläufe der beiden ermittelten E-Moduli sind in *Abbildung 5.23 rechts* wiedergegeben und deuten darauf hin, dass auch die Kriechbeanspruchung zu einer Veränderung im Materialverhalten führt. Ähnlich wie bei den in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Verläufen der UHC-Versuche, zeigen die E-Moduli hier die gleiche Charakteristik in ihren Entwicklungen. Im oberen Beanspruchungsbereich findet eine schnelle Versteifung statt, während im unteren Bereich eine mehr zeitabhängige Reduzierung erfolgt.

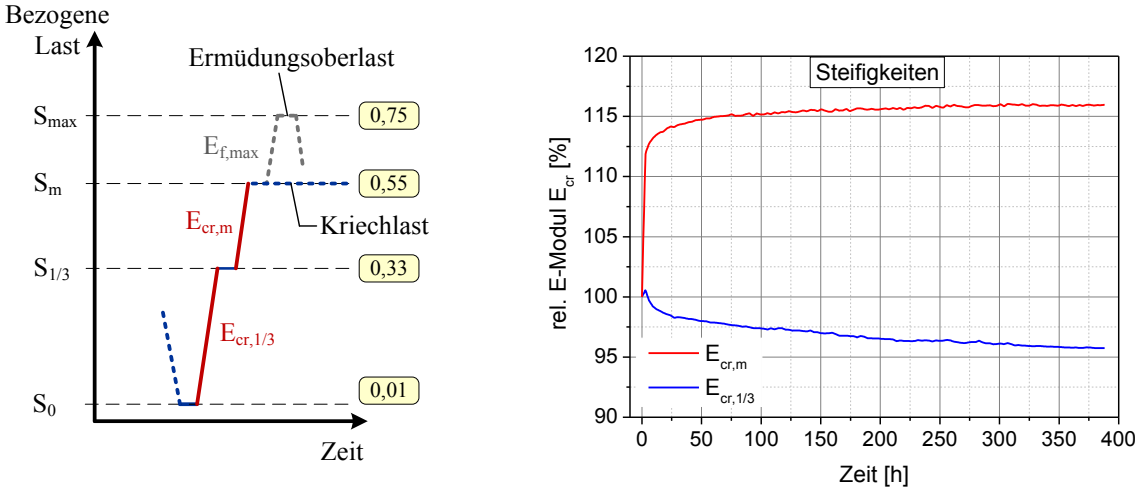

Abbildung 5.23: *Ausschnitt aus dem Lastprogramm mit den beiden Rampen für die E-Modul-Ermittlung (links) und relative Entwicklung der ermittelten E-Moduli über die Dauer der Versuche*

Die Entwicklung des E-Moduls $E_{cr,m}$ im oberen Beanspruchungsbereich ist in der Charakteristik der bei den UHC-Versuchen beobachteten Versteifung sehr ähnlich und auch die Größe der Steigerung kommt der in den UHC-Versuchen sehr nahe. Dabei handelt es sich in beiden Fällen um unterschiedliche Belastungsniveaus. Dementsprechend fallen hier jedoch die Verformungen nur knapp halb so groß aus wie in den UHC-Versuchen. Durch diese Beobachtungen wird die in Kapitel 5.1 getroffene Annahme untermauert, dass die Versteifung weniger ein zeit- und zyklenabhängiger Prozess ist und damit auch keine ausgeprägte Kopplung an die bleibenden Dehnungen aufweist.

Im Gegensatz dazu fällt die Reduzierung des unteren E-Moduls $E_{cr,1/3}$ deutlich kleiner aus als in den UHC-Versuchen. Für dessen Entwicklung lässt sich ein direkter Vergleich zwischen den zyklischen und den Kriechversuchen darstellen. In der *Abbildung 5.24* sind die relativen

Entwicklungen aus beiden Versuchsreihen wiedergegeben. Hier macht sich die fehlende Wirkung des zyklischen Belastungsanteils deutlich bemerkbar. Ähnlich wie bei den Dehnungen wird auch hier die starke Zeit- und Zyklenabhängigkeit der entstandenen Gefügeauflockerung bestätigt, und damit in gewissem Maße auch eine Kopplung an die Vorgänge, die die bleibenden Verformungen hervorrufen. Diese Beobachtungen liefern einen weiteren Hinweis darauf, dass viskose Verformungen im Zementstein eine Auflockerung im unteren Spannungsbereich bedingen.

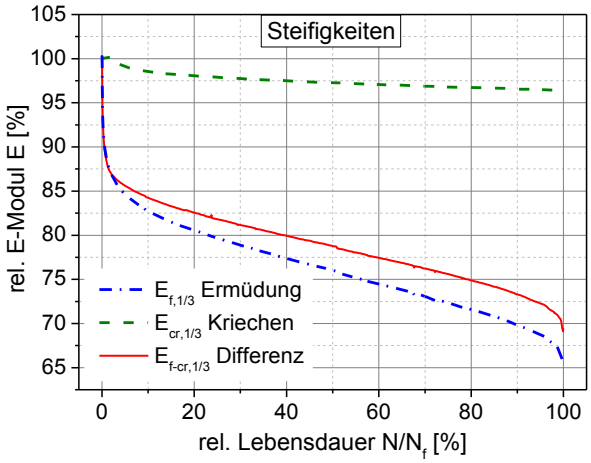

Abbildung 5.24: *Vergleich der Reduzierungen von $E_{1/3}$ aus den Kriech- und den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe, mit Differenzbildung zur Bestimmung des reinen Ermüdungsanteils*

Obwohl die Kriechversuche nicht in einem klimatisierten Kriechstand stattfanden, sondern unter dem normalen Raumklima des Prüflabores, ließ sich keine Auswirkung daraus auf die Messergebnisse ausmachen. Zum einen waren die gemessenen Temperaturschwankungen während der Prüfungen mit max. 2 °C sehr gering und zum anderen zeigten die Messergebnisse aus den Kriechversuchen keinerlei Einflüsse aus den Temperaturveränderungen. Ein weiterer positiver Aspekt aus dieser Prüfkonstellation besteht darin, dass alle anderen Versuche an den kleinen Betonzylindern ebenfalls unter Raumklima in demselben Prüflabor stattgefunden haben. Somit können die Kriechergebnisse besonders gut mit den in Kapitel 5.1 vorgestellten Ergebnissen der Ermüdungsversuche der UHC-Versuchsreihe in Beziehung gesetzt werden.

Hysteresen

Im Anschluss an den jeweiligen Kriechversuch erfolgte im Rahmen einer statischen Nachprüfung die Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowie der statischen Bruchfestigkeit. Für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung wurde dieselbe Hysterese abgefahren wie in den zyklischen UHC-Versuchen auch.

Die auf diese Weise an den vier Probekörpern ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien verlaufen nahezu identisch. In *Abbildung 5.25 links* ist eine dieser Kurven wiedergegeben. Zum Vergleich ist dort eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung von einer vorher nicht beanspruchten Probe (Referenzprobe) sowie von einer bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Probe mit abgebildet. Unter Berücksichtigung der jeweils durch die Vorbeanspruchung eingetragenen plastischen Verformungen, liegen die Kurven entsprechend versetzt zueinander. Es zeigt sich, dass infolge der Dauerbeanspruchung im Kriechversuch neben den plastischen Verformungen auch eine Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung stattgefunden

hat, worauf die zuvor beschriebenen E-Modul-Ergebnisse bereits hingewiesen hatten. Die Veränderungen im Materialverhalten besitzen die gleiche Charakteristik wie unter der zyklischen Beanspruchung, nur dass sie hier nicht so stark ausgeprägt ausfallen wie unter der zyklischen Last. Im unteren Beanspruchungsbereich hat sich eine Steigerung des elastischen Verhaltens vollzogen, während sich hingegen im oberen Beanspruchungsbereich eine Versteifung zeigt.

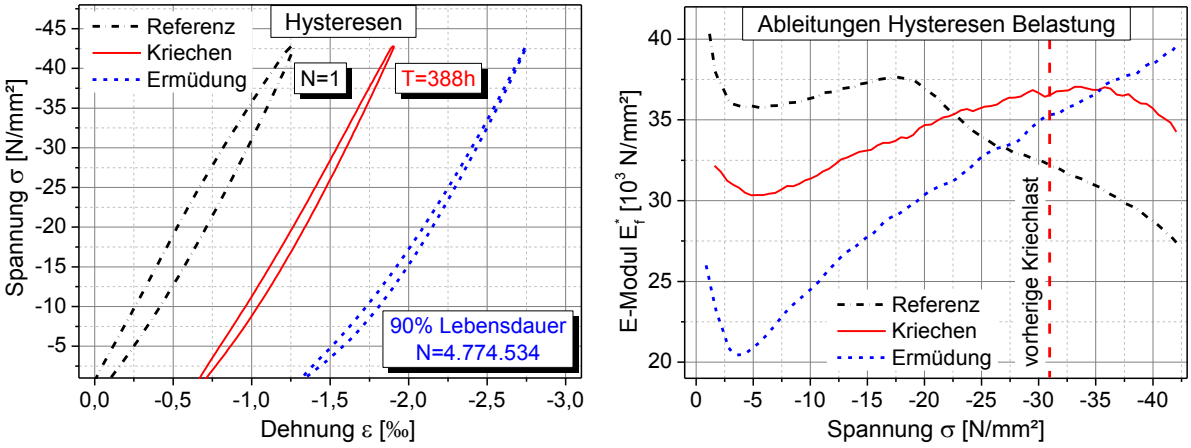

Abbildung 5.25: *Vergleich der in der Nachprüfung mittels einer Hysterese ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Kriechproben mit denen einer ungeschädigten Probe sowie mit einer bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Probe (links), zugehörige 1. Ableitungen (rechts)*

Damit wird die Vermutung bestätigt, dass im Vergleich zu den zyklischen UHC-Versuchen sehr ähnliche Veränderungen im Gefüge stattgefunden haben müssen. Dies wird besonders in der in *Abbildung 5.25 rechts* dargestellten Gegenüberstellung der Ableitungen der Hysteresen deutlich. Die beiden Verläufe der Kriech- und der Ermüdungsprobe unterscheiden sich jeweils sehr deutlich von der Referenzprobe, sind sich aber untereinander qualitativ sehr ähnlich. Die Kriechprobe zeigt ebenfalls eine Auflockerung im unteren und eine Versteifung im oberen Spannungsbereich sowie eine Krümmungsumkehr. Erst oberhalb der vorangegangenen Kriechbeanspruchung verhält sich die Kriechprobe wieder wie der Referenzzustand, was plausibel ist.

Festigkeiten

Die in den Nachprüfungen erreichte mittlere Restbruchfestigkeit der Proben aus den Kriechversuchen ist zusammen mit der Referenzfestigkeit von unbeanspruchten Proben sowie von bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Proben in der *Tabelle 5.3* wiedergegeben.

Tabelle 5.3: *Vergleich der Restbruchfestigkeiten der Kriechproben mit denen unbeanspruchter Proben sowie mit bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Proben*

Bruchgrößen	***Referenzproben (unbeansprucht)***	***Kriechproben (vorgeschädigt)***	***Ermüdungsproben (90% geschädigt)***
Bruchlast F_{cm} [kN]	435,6	435,4	421,8
Bruchspannung f_{cm} [N/mm²]	57,1	57,1	55,3
Änderung [%]	100	100	96,8

Trotz der festgestellten Schädigung des Materials bzw. der Veränderungen in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung findet keine erkennbare Reduzierung der Festigkeit statt. Die meisten zyklisch geprüften Proben der UHC-Versuche hatten nach vergleichbarer Zeit bereits versagt. Aber auch diese zeigten bis kurz vor dem Versagen noch keine Veränderung der Festigkeit.

Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass infolge der Kriechbeanspruchung keine die Festigkeit beeinflussenden Schädigungen eingetragen wurden, sondern vorwiegend viskose Verformungen im Gefüge erzeugt wurden. Zusammen mit den festgestellten Entwicklungen der Dehnungen und der Steifigkeiten deckt sich dieses Verhalten sehr gut mit den Beobachtungen bei den UHC-Versuchen, bevor sich dort das Verhalten und die Prozesse kurz vor dem Ermüdungsversagen deutlich verändern.

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Kriechversuche und deren Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus den zyklischen UHC-Versuchen dienten im Wesentlichen der Klärung der folgenden Fragestellung:

Welchen Anteil hat das Kriechen an den in den durchgeführten Ermüdungsversuchen beobachteten Veränderungen und welche Ursachen hat dies?

Die Ergebnisse der Kriechversuche und der Nachprüfungen zeigen, dass unter einer Dauerdruckbeanspruchung im Beton nicht nur plastische Verformungen erzeugt werden. Auch das Materialverhalten verändert sich, was sich vor allem in einer Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung äußert. Damit wird im Wesentlichen auch die von [MAZZOTTI & SAVOIA 2002] festgestellte Degradation der elastischen Steifigkeit infolge einer Dauerbeanspruchung bestätigt.

Darüber hinaus hat sich herausgestellt, dass die aufgetretenen Veränderungen die gleiche Charakteristik besitzen wie die in Kapitel 5.1 vorgestellten Ergebnisse der zyklischen UHC-Versuche. Besonders deutlich zeigen dies im Vergleich die Spannungs-Dehnungs-Linien der Nachprüfungen und deren Ableitungen. Daher ist anzunehmen, dass hier prinzipiell in gleicher Weise Gefügeveränderungen stattfinden wie unter der Ermüdungsbeanspruchung, was auf einen ebenfalls ganz ähnlichen Schädigungsvorgang hindeutet. Die Ausprägung der beobachteten Veränderungen fällt aber erwartungsgemäß zumeist geringer aus als im zyklischen Fall.

Die vorliegenden Ergebnisse liefern auch eine Bestätigung für die Annahme, dass die Versteifung im oberen Spannungsbereich keinen ausgeprägten viskosen Ursprung besitzt, im Gegensatz zu den Verformungen und der Auflockerung im unteren Spannungsbereich. Zusätzlich bestätigen sie die Annahme, dass in den zyklischen UHC-Versuchen vorwiegend viskose Verformungsanteile im Zementstein aktiviert werden, solange keine Veränderung der Festigkeit eintritt.

Im Endergebnis lässt sich anhand der Beobachtungen feststellen, dass unter andauernden Druckbeanspruchungen Veränderungen und Schädigungen auftreten, die einen wesentlichen Bestandteil der unter Druckschwellbeanspruchung beobachteten Veränderungen und Schädigungen darstellen.

5.3 Ermüdungsverhalten im unteren und oberen hochzyklischen Bereich (LHC – UHC)

Die Ergebnisse der im Kapitel 4.4.3 beschriebenen Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC-Versuche), werden in diesem Kapitel vorgestellt und zugleich mit den bereits im Kapitel 5.1 gezeigten Ergebnissen der UHC-Versuche verglichen und analysiert. Dabei wird vorrangig der Frage nachgegangen, welche Unterschiede und Ähnlichkeiten es in den Schädigungsvorgängen in diesen beiden unterschiedlichen Bereichen des Ermüdungsspektrums gibt. Für die beiden hier verglichenen Versuchsreihen haben sich jeweils im Mittel 12.600 und 4.350.000 Lastzyklen bis zum Ermüdungsversagen ergeben, was einem Unterschied von gut zwei Zehnerpotenzen entspricht.

5.3.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene)

Die Auswertung der einzelnen Versuchsergebnisse war weitestgehend identisch zu denen aus den UHC-Versuchen, so dass eine gute Vergleichbarkeit gegeben ist. Eine Zusammenstellung der entsprechenden Ergebnisse zum Langzeitmaterialverhalten ist in der *Abbildung 5.26* bis *Abbildung 5.28* wiedergegeben. Da die Ergebnisse alle auf die relative Lebensdauer bezogen sind, können die Ergebnisse der LHC-Versuche und der UHC-Versuche zum besseren Vergleich jeweils zusammen in den Diagrammen dargestellt werden. Die zu den in *Abbildung 5.26* bis *Abbildung 5.28* vorgestellten Mittelwertkurven zugehörigen Kurvenscharen der einzelnen Größen aus den LHC-Versuchen finden sich im Anhang B3 in *Abbildung B3 2* bis *Abbildung B3 6*.

Generell weisen alle in den Diagrammen dargestellten Größen im Vergleich zu den Ergebnissen der UHC-Versuche qualitativ sehr ähnliche Verläufe bzw. Entwicklungen auf. Sie liefern damit einen Hinweis darauf, dass es sich in beiden Fällen um einen prinzipiell vergleichbaren Schädigungsvorgang handelt. Absolut betrachtet zeigen sich jedoch in den Entwicklungen der einzelnen Größen Unterschiede in den Ausprägungen der Veränderungen für die beiden Versuchsreihen. In den überwiegenden Fällen findet bei den Versuchen im unteren hochzyklischen Bereich eine nennenswert geringere Veränderung der einzelnen betrachteten Materialeigenschaften statt. Das bedeutet, dass das Materialverhalten durch den Schädigungsprozess im unteren Zyklenbereich vorwiegend weniger stark beeinflusst bzw. verändert wird.

Dabei ist davon auszugehen, dass sich aufgrund der wesentlich kürzeren Versuchslaufzeiten prinzipiell deutlich geringere viskose Verformungskomponenten einstellen können bzw. die Ausprägung zeitabhängiger Veränderungen im Gefüge bedeutend kleiner ist.

Verformungen

Wie fast alle verglichenen Größen, besitzen auch die in *Abbildung 5.26 links* dargestellten Verformungen qualitativ sehr ähnliche Verläufe. Allerdings erreichen die absoluten Verformungen im unteren Zyklenbereich (LHC-Versuche) wesentlich geringere Werte. Die sich einstellende bleibende Verformung $\varepsilon_{f,0}$ erreicht dabei nur ca. die Hälfte der Werte der Verformungen im oberen Zyklenbereich (UHC-Versuche). Dagegen fällt die Gesamtverformung $\varepsilon_{f,max}$ unter der Oberlast im unteren Zyklenbereich im Verhältnis nicht ganz so stark zurück. Dies liegt aber vorrangig an dem absolut gesehen höheren Lastniveau und nicht an einem gesteigerten elastischen Verhalten im Vergleich zu den Versuchen im oberen Zyklenbereich, wie auch die Verläufe der E-Moduli zeigen. Mit dem beobachteten Verhalten wird der zeit- und zyklenabhängige Charakter der Verformungen bestätigt.

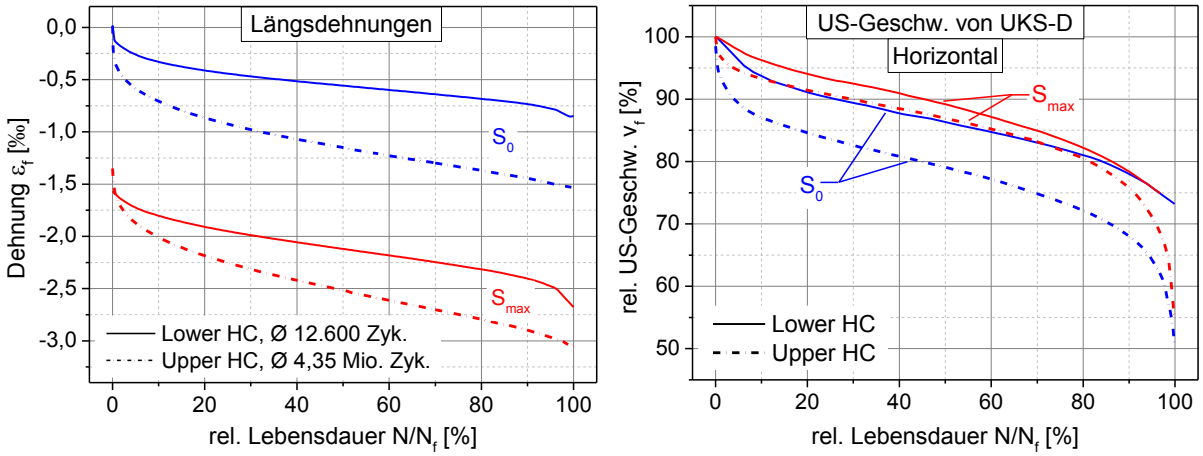

Abbildung 5.26: *Vergleich der Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen auf jeweils zwei Lastniveaus für die Längsdehnungen (links) und für die horizontal gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten (rechts)*

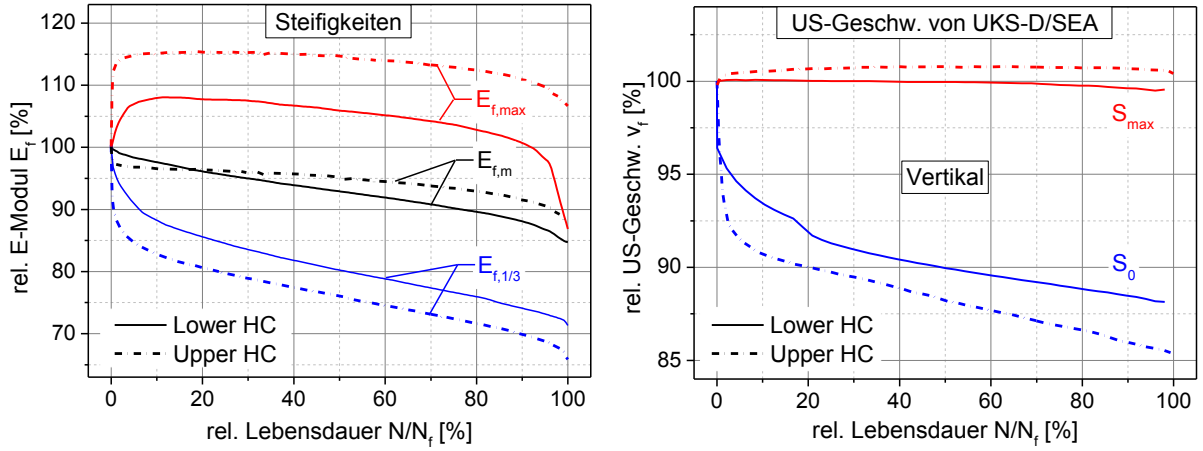

Abbildung 5.27: *Vergleich der Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen für die drei E-Moduli (links) und für die auf zwei Lastniveaus gemessenen vertikalen Ultraschallgeschwindigkeiten (rechts)*

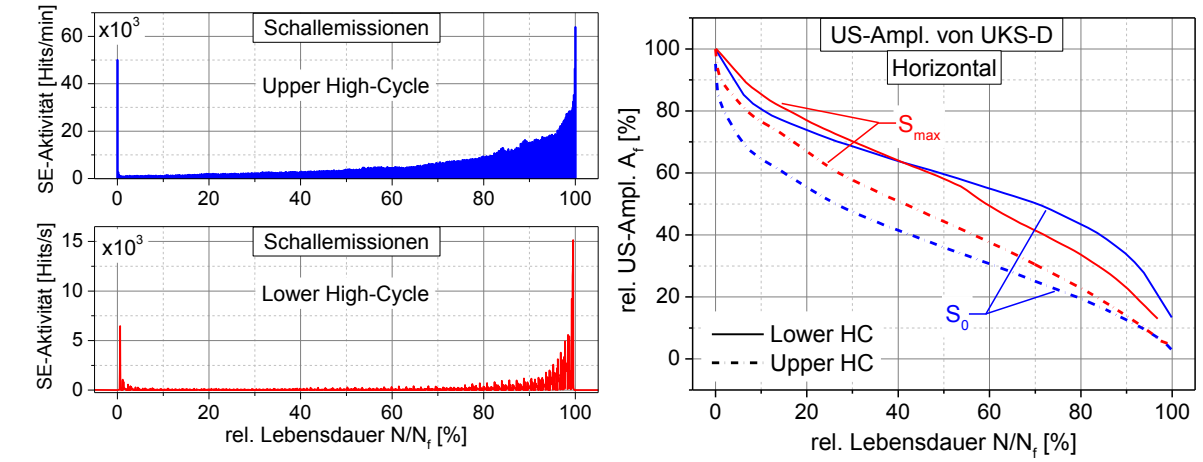

Abbildung 5.28: *Vergleich der Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen für die Schallemissionsaktivität (links) und für die auf zwei Lastniveaus gemessenen horizontalen Ultraschallamplituden (rechts)*

Vor diesem Hintergrund wird die Ursache für die im Vergleich geringeren Verformungen vorrangig in der deutlich geringeren Ausprägung zeitabhängiger viskoser Verformungsanteile zu finden sein. Da jedoch die Proben trotzdem versagen, sind die viskosen Verformungsanteile vermutlich nicht in erster Linie ursächlich für die zum Versagen führende Schädigung des Gefüges verantwortlich.

Steifigkeiten

In gleicher Weise wie die Verformungen zeigen auch die drei betrachteten E-Moduli qualitativ sehr ähnliche Entwicklungen wie diejenigen aus den UHC-Versuchen. Für einen Vergleich der Steifigkeiten zwischen den beiden Versuchsreihen ist der unterste E-Modul $E_{f,1/3}$ am besten geeignet, da dieser in beiden Fällen auf den gleichen absoluten Lastniveaus ermittelt wurde. Wie die *Abbildung 5.27 links* zeigt, stellt sich in den LHC-Versuchen eine nennenswert geringere Reduzierung in der Steifigkeit ein, was auf eine geringere Auflockerung bzw. dort wirksame Schädigung des Materialgefüges hindeutet. Dieses Verhalten weist auch hier auf eine deutliche Zeit- und Zyklenabhängigkeit hin. Es korreliert zudem sehr gut mit den geringer ausfallenden bleibenden Verformungen und bestätigt die in Kapitel 5.1 vermutete Kopplung zwischen der Auflockerung und den bleibenden Verformungen.

Die beiden anderen E-Moduli $E_{f,m}$ und $E_{f,max}$ wurden dagegen, absolut betrachtet, zwischen anderen Lastniveaus ermittelt als in den UHC-Versuchen. Aber auch sie weisen beide qualitativ sehr ähnliche Verläufe zu den Ergebnissen aus den UHC-Versuchen auf. Dies gilt somit auch für den Effekt der Versteifung im obersten Beanspruchungsbereich, der hier zwar ebenfalls auftritt, aber, ähnlich wie die Reduzierung im unteren Bereich, deutlich geringer ausfällt. Mehr Aufschluss darüber, ob die verminderte Versteifung trotz oder wegen der höheren Gefügebeanspruchung entsteht, geben im nachfolgenden Kapitel die Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Linien.

Im Bezug auf den E-Modul $E_{f,max}$ bleibt anzumerken, dass sich die Entwicklungen bei vier Probekörpern deutlich von denen der anderen unterschieden haben. Dies zeigt die im Anhang B3 *Abbildung B3 3 rechts* dargestellte zugehörige Kurvenschar von $E_{f,max}$, bei der diese „Ausreißer“ Steigerungen bis auf 150 % erreichten. Was die Ursache für diesen Effekt war, konnte nicht geklärt werden. Im Hinblick auf die ansonsten sehr ähnlich verlaufenden Entwicklungen der E-Moduli wurde entschieden, diese vier „Ausreißer“ von $E_{f,max}$ nicht in die weitere Betrachtung der Ergebnisse mit einzubeziehen.

Insgesamt deuten die Vergleiche der E-Moduli auf einen etwas anderen Gefügezustand bei den LHC-Versuchen im Vergleich zu den UHC-Versuchen hin.

Schallemissionen (SEA)

Auch die in *Abbildung 5.28 links* veranschaulichten Schallemissionsaktivitäten besitzen in beiden Versuchsreihen qualitativ sehr ähnliche Entwicklungen. Allerdings sind absolute Vergleiche der Messwerte nicht möglich, da in beiden Versuchsreihen versuchsbedingt Unterschiede bei den als Bezugsgröße verwendeten Zeitintervallen vorlagen. Im Verhältnis zur Bruchphase weist jedoch der vorangegangene Schallemissionsverlauf des LHC-Versuches eine geringere Aktivität auf, als dies beim UHC-Versuch der Fall ist. Die anderen im Anhang B3 *Abbildung B3 1* dargestellten Verläufe der Schallemissionsaktivität für LHC und UHC-Versuche bestätigen diese Beobachtung. Dies gibt möglicherweise einen Hinweis darauf, dass insgesamt eine geringere Schallemissionen hervorrufende Rissanzahl bzw. Rissdichte während der LHC-Versuche in den Proben erzeugt wird. Unter der Annahme, dass die zuvor beschriebenen geringeren viskosen Verformungsanteile zu insgesamt weniger Lastumlagerungen führen, ist zu vermuten, dass der Lastabtrag im Vergleich in weniger Bereichen im

Gefüge mit höheren Beanspruchungen konzentriert ist. Die Bildung von Rissen wäre daher vergleichsweise auf einen in Summe kleineren Bereich im Gefüge beschränkt, was sich auch mit den Beobachtungen der anderen Messgrößen decken würde.

Ultraschallsignale (US)

Ein vergleichbares Verhalten zwischen den LHC und den UHC-Versuchen stellen auch die Ultraschallmessungen dar, die in den *Abbildung 5.26* bis *Abbildung 5.28 rechts* wiedergegeben sind. Sie zeigen ebenfalls insgesamt geringer ausgeprägte Veränderungen als bei den UHC-Versuchen und besitzen zudem weniger Unterschiede zwischen der Oberlast S_{max} und der Unterlast S_0. Trotzdem verdeutlichen sie in gleicher Weise die Anisotropie der ermüdungsbedingten Schädigung.

In der horizontalen Richtung erfahren sowohl die Schallgeschwindigkeiten als auch die Signalamplituden generell geringere Reduzierungen als in den UHC-Versuchen. Das deutet ebenfalls auf eine insgesamt geringere Gefügeschädigung über den Querschnitt der Proben hin. Dies würde sich mit den Feststellungen aus den Schallemissionen decken und ebenfalls für eine verstärkt nur lokalisiert auftretende Gefügeschädigung infolge verminderter Lastumlagerungen sprechen. Der Unterschied zwischen der Schallgeschwindigkeit unter Unterlast S_0 und Oberlast S_{max} fällt hier zudem geringer aus als bei den UHC-Versuchen. Eine Begründung dafür kann möglicherweise auch in den geringeren viskosen Verformungen gefunden werden. Damit würde auch hier eine Kopplung im Verhalten zwischen den viskosen Verformungen und den horizontalen Ultraschallmessungen plausibel erscheinen.

Bei den vertikalen Messungen fallen die Veränderungen der Schallgeschwindigkeiten im Bezug zu den UHC-Versuchen insgesamt auch geringer aus, was ebenfalls sehr gut mit den bereits beschriebenen Beobachtungen bei den Steifigkeiten korreliert. Die unter der Grundlast S_0 ermittelte Schallgeschwindigkeit stellt eine besonders gut vergleichbare Größe dar, da sie in beiden Versuchsreihen auf demselben absoluten Lastniveau ermittelt wurde. Deren im Vergleich zu den UHC-Versuchen geringer ausfallende Reduzierung während des Ermüdungsvorgangs, spricht ebenfalls für eine in vertikaler Richtung insgesamt über die Probe geringere Schädigung. Als Ursache erscheinen auch hier die geringeren viskosen Verformungen plausibel, die zu weniger Auflockerungen bei der Entlastung führen, was sich so auch im Verhalten des E-Moduls $E_{f,1/3}$ in *Abbildung 5.27 links* widerspiegelt.

Bei der zweiten vertikalen Messung unter der Oberlast S_{max} handelt es sich zwar absolut gesehen um ein anderes Lastniveau, relativ betrachtet ist es aber jeweils die Maximalbeanspruchung in den beiden Versuchsreihen. Dementsprechend verhält sich unter S_{max} in beiden Fällen die vertikale Schallgeschwindigkeit sehr ähnlich und zeigt hier nur eine etwas weniger ausgeprägte Veränderung über die Lebensdauer. Das Verhalten korreliert nicht mit dem der Verformungen, des E-Moduls $E_{f,1/3}$ sowie den anderen US-Messungen. Dafür weist es aber eine gute Korrelation mit dem E-Modul $E_{f,max}$ und der Schallemission auf. Somit wird die Annahme einer Überdrückung aller auflockernden, in vertikaler Richtung wirksamen Gefügeschädigungen, sowohl in den LHC- als auch in den UHC-Versuchen bestätigt. Das leicht unterschiedliche Verhalten kann prinzipiell in der geringer ausfallenden Versteifung unter der Oberlast S_{max} begründet liegen (*Abbildung 5.27 links*), über deren Ursachen die Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Linien mehr Aufschluss geben werden.

Die im Vergleich zur Steifigkeit verhältnismäßig wesentlich kleiner ausfallende bzw. nicht stattfindende Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeit kann möglicherweise auch über den sehr geringen Anteil der ursächlichen Zementsteinbereiche an der Gesamtlauflänge des Signals durch die Probe begründet werden. Eine entsprechende detailliertere Beschreibung für diesen Zusammenhang wurde im vorangegangenen Kapitel 5.1.1 auf S.102 dargelegt.

5.3.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene)

Auch in den Versuchen der LHC-Versuchsreihen wurden entsprechend dem im Kapitel 4.4.3 vorgestellten Lastprogramm in regelmäßigen Abständen Hysteresen gefahren, aus denen die Energieeinträge ermittelt wurden.

Hysteresen

Für den Vergleich der Entwicklungen in den Hysteresen wurden für vier ausgewählte Lebensdauerzustände jeweils einzelne typische Hysteresen aus einem LHC- und einem UHC-Versuch ausgesucht und gegenübergestellt. Die *Abbildung 5.29* zeigt die jeweiligen Hysteresen einmal für den ungeschädigten Zustand bei 0 % sowie für die bis 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer vorgeschädigten Zustände mit den zugehörigen Zyklenzahlen. Wie bereits die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Ergebnisse, deuten auch die Entwicklungen in den Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Hysteresen auf einen prinzipiell gleichen Schädigungsprozess in den LHC- und UHC-Versuchen hin. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung verändert sich in den LHC-Versuchen fast in gleicher Weise wie bei den UHC-Versuchen und zeigt qualitativ fast identische Verläufe. Dies beinhaltet die Krümmungsumkehr, die Aufweichung im unteren und die Versteifung im oberen Beanspruchungsbereich. Dabei liegt im Falle der drei zyklisch geschädigten Zustände jeweils fast ein Faktor von 10^3 zwischen den Zyklenzahlen der beiden dargestellten Kurven. Die wesentlichsten Unterschiede sind zum einen das höhere Beanspruchungsniveau und zum anderen die deutlich geringer ausfallenden bleibenden Verformungen in den LHC-Versuchen.

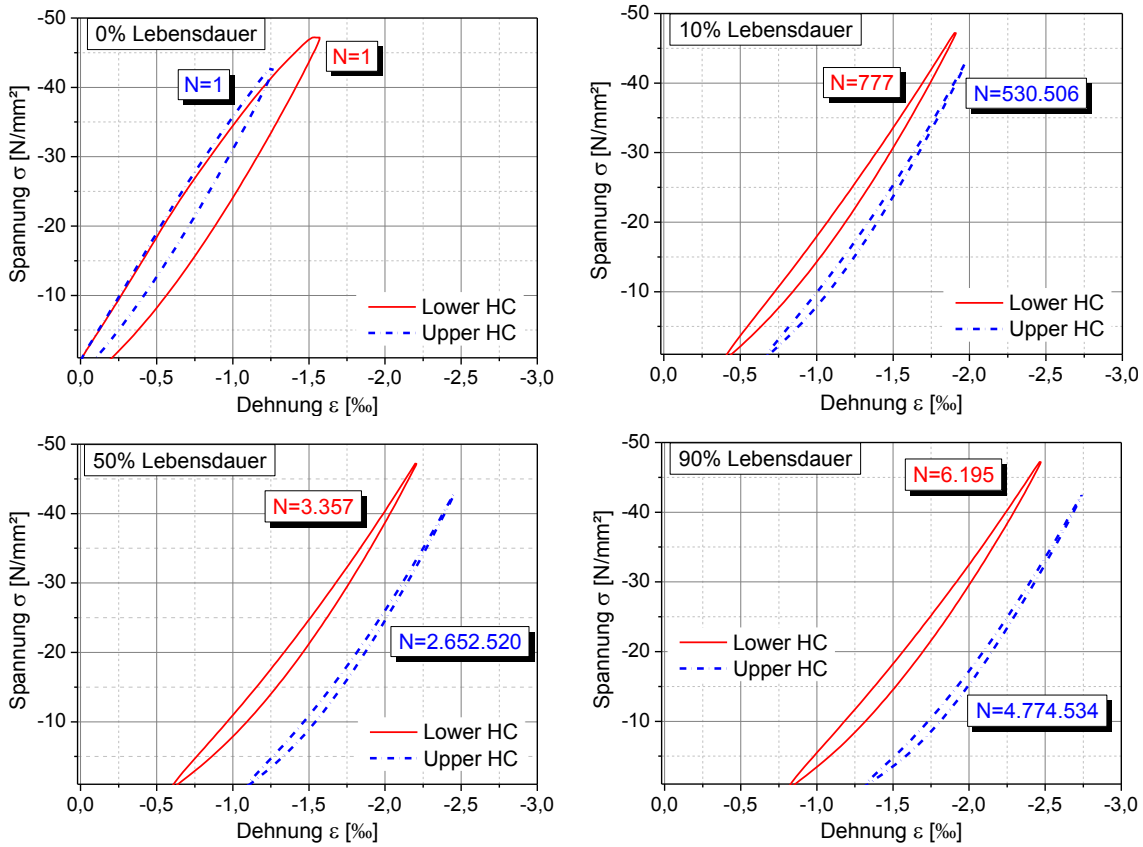

Abbildung 5.29: *Direkter Vergleich von Hysteresekurven aus einem LHC-Versuch mit Hysteresekurven aus einem UHC-Versuch im ungeschädigten Zustand und bei 10 %, 50 % und bei 90 % der Lebensdauer*

Die geringeren bleibenden Verformungen sind, wie bereits beschrieben, in erster Linie durch die wesentlich kürzeren Versuchslaufzeiten bedingt. Weitere Diagramme mit Entwicklungen von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den LHC-Versuchen finden sich im Anhang B3 in *Abbildung B3 7*.

Neben der Entwicklung der Hysteresen selbst, zeigen erwartungsgemäß auch deren Ableitungen im Vergleich mit den UHC-Versuchen eine sehr ähnliche Form und Charakteristik in ihrer Entwicklung. Eine beispielhafte Gegenüberstellung typischer Kurven aus einem LHC- und einem UHC-Versuch sind in der *Abbildung 5.30* wiedergegeben. Im Detail weisen sie aber ebenfalls Unterschiede auf.

Als wesentlichster Unterschied stellt sich dabei heraus, dass hier die Veränderung der Materialsteifigkeit nun auch im oberen Spannungsbereich stattfindet. Das heißt, es werden Schädigungen im Material hervorgerufen, die auch bei hohen Spannungen im Gefüge wirksam sind und eine Reduzierung der Materialsteifigkeit bedingen. Des Weiteren fällt, wie bereits bei den Sekantenmodulen in *Abbildung 5.27 links* zu erkennen war, die Reduzierung der Steifigkeit im gering belasteten Zustand kleiner aus und auch die Versteifung im obersten Spannungsbereich ist weniger stark ausgeprägt als in den UHC-Versuchen.

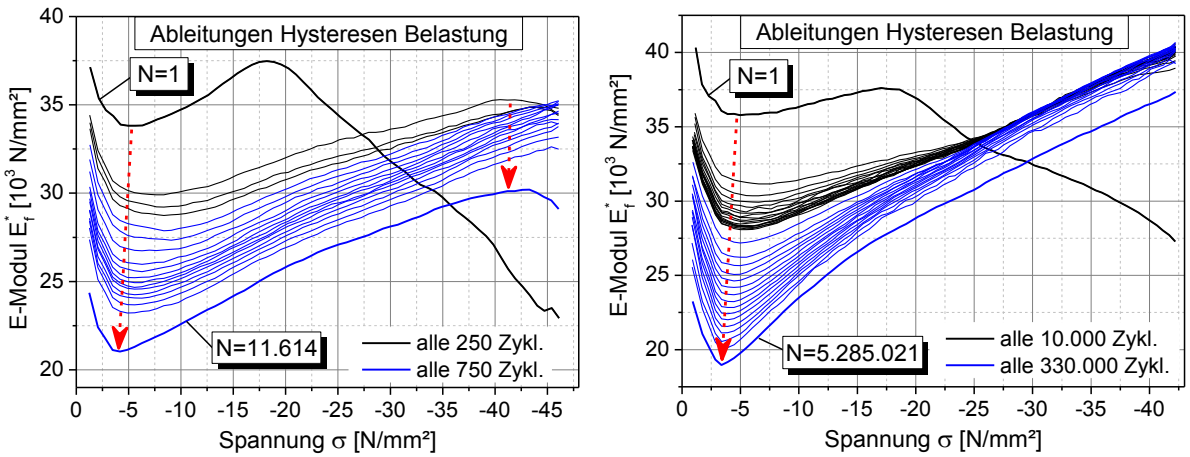

Abbildung 5.30: *Beispielhafte Entwicklung der 1. Ableitung der Belastungskurven aus den Hysteresen während der Lebensdauer, dargestellt über die Spannung, von einem LHC-Versuch (links) im Vergleich mit einem UHC-Versuch (rechts)*

Die beobachtete weniger starke Reduzierung der Steifigkeit im unteren Spannungsbereich lässt sich gut mit geringeren viskosen Verformungskomponenten im Gefüge in Verbindung bringen. Beides korreliert gut mit den gemessenen kleineren bleibenden Verformungen. Dagegen deutet die im oberen Spannungsbereich nun ebenfalls stattfindende fortlaufende Reduzierung der Steifigkeit auf zusätzliche Veränderungen im Gefüge hin. Derartige Vorgänge waren in den UHC-Versuchen in geringem Maße erst am Ende der Lebensdauer zu beobachten. Dort setzte nachweislich parallel zum Abfall der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich ein signifikanter Zuwachs an Mikrorissen im Materialgefüge ein.

Es ist daher anzunehmen, dass aufgrund der höheren Oberlast S_{max} der LHC-Versuche, speziell in Gefügebereichen mit lokalen Spannungskonzentrationen derart hohe Spannungen im Zementstein hervorgerufen werden, dass dort frühzeitig eine Schädigung durch Mikrorisse einsetzt. Die Folge daraus ist ein beschleunigter und mehr lokal angesiedelter Schädigungsprozess. Infolgedessen können sich weniger viskose Verformungen ausbilden, was die Deh-

nungsmessungen bestätigen, und es finden weniger Lastumlagerungen statt. Die Spannungsspitzen bleiben zwangsläufig mehr lokal konzentriert und die Schädigungen im Gefüge bilden sich weniger gleichmäßig verteilt nur im Bereich der lokalen Beanspruchungskonzentrationen aus.

Um diese Annahme zu den Ursachen genauer zu überprüfen, wurden speziell die während dem Durchlaufen der Hysteresen gemessenen Schallemissionsaktivitäten ausgewertet und verglichen. Dazu wurden die auftretenden Schallemissionen aus einem LHC-Versuch mit denen aus einem UHC-Versuch gegenübergestellt. Dieser Vergleich erfolgte zum einen für die Erstbeanspruchung bei Versuchsbeginn und zum anderen für den Zeitpunkt bei ca. 4,5 % der Lebensdauer. Zu diesem Lebensdauerzeitpunkt sind die SE-Aktivitäten jeweils wieder auf ein Minimum zurückgegangen, wie *Abbildung 5.28 links* zeigt. Um einen direkten Vergleich der Messergebnisse zu ermöglichen, wurde der Schwellwert bei der Auswertung der zu vergleichenden Versuche einheitlich auf 55 dB gesetzt. Die entsprechenden Zeitausschnitte mit den jeweiligen SE-Aktivitäten und den zugehörigen Spannungsverläufen sind für einen LHC- und einen UHC-Versuch in der *Abbildung 5.31* wiedergegeben.

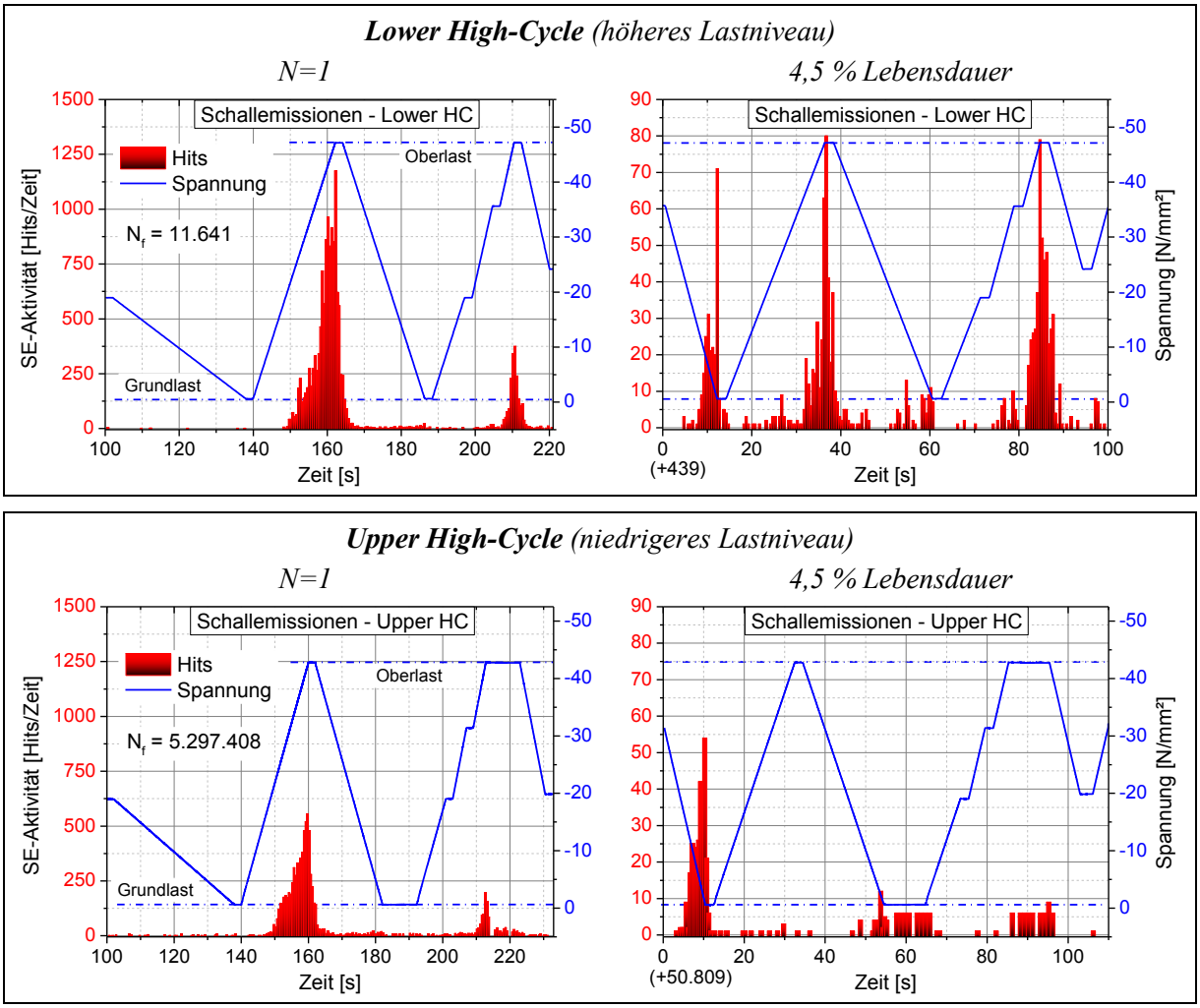

Abbildung 5.31: *Gegenüberstellung der Schallemissionsaktivitäten für einen LHC-Versuch (oben) und einen UHC-Versuch (unten) während der ersten Belastungshysterese (links) und während der Belastungshysterese bei 4,5 % Lebensdauer (rechts)*

In beiden Fällen zeigt sich deutlich die enorme SE-Aktivität infolge der Erstbelastung (*Abbildung 5.31 links*), wobei sich auch sehr signifikant herausstellt, dass die SE-Aktivität erst nach Überschreiten der Spannung der zuvor gefahrenen E-Modul-Rampe einsetzt. Auffällig ist bereits hier die überproportional höhere SE-Aktivität beim LHC-Versuch. Während die Beanspruchung beim LHC-Versuch nur um ca. 7,5 % höher ist als beim UHC-Versuch (UHC = 75 % und LHC = 82,5 %), erhöht sich die SE-Aktivität von max. 550 Hits/s auf max. 1.170 Hits/s um gut 100 %. Diese Beobachtung untermauert bereits die Annahme, dass im Vergleich zu den UHC-Versuchen in den LHC-Versuchen zusätzliche, das Gefüge schädigende Veränderungsprozesse im Beton stattfinden.

Bei der zweiten dargestellten Hysterese (*Abbildung 5.31 rechts*), die bei ca. 4,5 % der Lebensdauer gefahren wurde, befinden sich die SE-Aktivitäten auf einem Minimum in ihrer Entwicklung. Der unter der Oberlast S_{max} festgestellte Versteifungsprozess ist zu diesem Zeitpunkt bereits weitestgehend abgeschlossen (siehe auch *Abbildung 5.27 links*).

Im Ausschnitt des UHC-Versuchs (*Abbildung 5.31 unten rechts*) zeigt sich eine erhöhte Aktivität bei der Entlastung, wohingegen bei der Belastung nahezu keine SE-Aktivitäten detektiert werden. Beide Beobachtungen korrelieren sehr gut mit den Ergebnissen aus den Ableitungen der Hysteresen der UHC-Versuche (*Abbildung 5.30 rechts*). Unter der Oberlast S_{max} findet keine Veränderung der Steifigkeit statt und es ist dabei auch nur ein Minimum an SE-Aktivität festzustellen. Im unteren Spannungsbereich hingegen weisen die Ableitungen der Hysteresen eine fortlaufende Auflockerung des Gefüges auf und die SEA erfasst währenddessen bei der Entlastung eine erhöhte SE-Aktivität. Damit wird die Annahme untermauert, dass bei den UHC-Versuchen unter der Oberlast S_{max} kaum Mikrorisse erzeugt werden, sondern vielmehr viskose Verformungen im Zementstein. Diese wiederum erzeugen bei der Entlastung Eigenspannungen im Gefüge, welche zur Auflockerung des entlasteten Gefüges führen und dabei auch Schallemissionen erzeugen.

Der LHC-Ausschnitt (*Abbildung 5.31 oben rechts*) weist zwar ebenfalls eine ähnlich hohe SE-Aktivität bei der Entlastung auf, zeigt aber zugleich eine noch höhere SE-Aktivität bei beiden nachfolgenden Belastungen. Diese erhöhte SE-Aktivität in den Belastungen beträgt ein Vielfaches dessen, was in den UHC-Versuchen zu messen war und korreliert ebenfalls sehr gut mit den Feststellungen bei den Ableitungen der Hysteresen (*Abbildung 5.30 links*). Die dort beobachtete fortlaufende Reduzierung der Steifigkeit unter der Oberlast S_{max} und die zugleich festgestellte stark erhöhte SE-Aktivität zu diesem Zeitpunkt bestätigen die Annahme, dass hier weniger viskose Verformungen aktiviert werden, sondern vielmehr das Gefüge durch Mikrorissbildung zerstört wird.

Die hier vorgestellten SEA-Ausschnitte, zusammen mit den Ableitungen der Hysteresen, untermauern eindeutig die Annahme, dass unter der Oberlast S_{max} in den LHC-Versuchen das Materialgefüge durch Mikrorisse zerstört wird. Sie bestätigen zugleich die in Kapitel 5.1 getroffenen Annahmen, dass im Gegensatz dazu unter der im Vergleich geringeren Oberlast S_{max} in den UHC-Versuchen keine oder kaum Gefügezerstörungen durch Mikrorissbildung stattfindet. Stattdessen werden dort eher viskose Verformungen im Zementstein aktiviert.

Bei den hier angenommenen Gefügeschädigungen, die sich in den LHC-Versuchen unter der Oberlast S_{max} einstellen, handelt es sich vermutlich vorrangig um parallel zur Lastrichtung orientierte Mikrorisse. Diese sind besonders im belasteten Zustand wirksam. Der eigentliche zu Versuchsbeginn ablaufende Versteifungsprozess erfolgt vermutlich ähnlich wie in den UHC-Versuchen, wird aber sofort durch die lokal hervorgerufenen Schädigungen im Bereich der Spannungskonzentrationen wieder abgeschwächt.

Die hier getroffenen Annahmen decken sich insgesamt sehr gut mit den anderen Beobachtungen im Langzeitmaterialverhalten der LHC- und UHC-Versuche (*Abbildung 5.26* bis *Abbildung 5.28*). Sie liefern zugleich eine mögliche und plausible Erklärung für das unterschiedliche Verhalten bei den Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Linien aus den Hysteresen zwischen den UHC- und den LHC-Versuchen (*Abbildung 5.30*). Einzig die Vergleiche der SE-Aktivitäten über die Lebensdauer in *Abbildung 5.28 links* spiegeln die Annahmen nicht deutlich wider. Da es sich jedoch um extrem unterschiedlich lange Betrachtungszeiträume handelt, hier absolute Werte und keine relativen Entwicklungen verglichen werden sowie verschiedene Bezugszeiträume für die Ermittlung der SE-Aktivität angesetzt wurden, ist deren Aussage beim Vergleich eingeschränkt. Dagegen sind die in *Abbildung 5.31* verwendeten Zeitausschnitte für einen Vergleich im Hinblick auf spezielle Unterschiede in den Schädigungsvorgängen wesentlich besser geeignet.

Für die in diesem Abschnitt gezeigten Ableitungen der Hysteresen finden sich im Anhang B3 Diagramme, dargestellt über die Dehnungen statt über die Spannungen, sowohl für die Be- als auch die Entlastungskurven in *Abbildung B3 8* und *Abbildung B3 9*. Dort sind sie im Vergleich mit Verläufen aus UHC-Versuchen gegenübergestellt. Darüber hinaus befinden sich dort auch zusätzlich weitere Ableitungen anderer Proben (Anhang B3 *Abbildung B3 10* und *Abbildung B3 11*).

Eingetragene Energien

Die aus den Hysteresen, entsprechend der in Kapitel 5.1.2 vorgestellten Darstellung *Abbildung 5.8 links*, ermittelten Verläufe der Energieeinträge sind in der *Abbildung 5.32* wiedergegeben. Für den Gesamtenergieeintrag $w_{f,d}$ aus den LHC-Versuchen zeigt sich im Vergleich zu den UHC-Versuchen ein wesentlich kleinerer Energiebetrag. Da diese Größe vorwiegend durch die plastischen und viskosen Verformungsanteile geprägt wird, ist dies im Hinblick auf die in *Abbildung 5.26 links* gezeigten Verformungen gut nachvollziehbar. Bei der zweiten Energiegröße $w_{f,d2}$, die alleine die Änderung der Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreibt, ergibt sich dagegen ein fast gleicher Verlauf mit einem nahezu identischen Endwert. Der Schädigungsvorgang hat auf diese Größe in beiden Fällen unabhängig von den sehr unterschiedlichen Zyklenzahlen im Prinzip die gleiche Auswirkung.

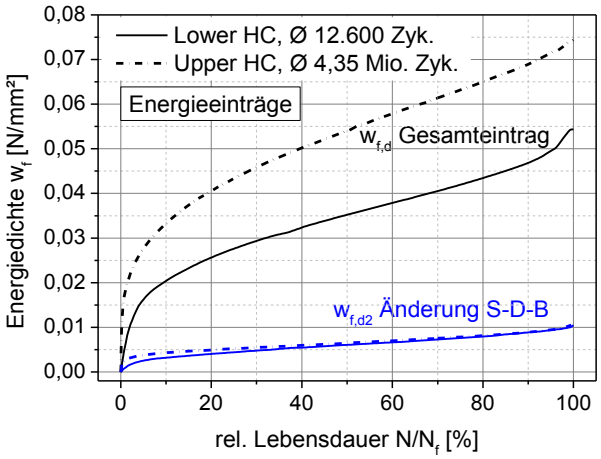

Abbildung 5.32: *Vergleich der beiden für die LHC und UHC-Versuche aus den Hysteresen ermittelten Entwicklungen der Energieanteile*

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Feststellungen zu den sehr unterschiedlichen Schädigungszuständen bei den LHC- und UHC-Versuchen besteht jedoch die Frage, ob es sich tatsächlich um einen derartigen Zusammenhang handelt oder nicht doch um eine zufällige Konstellation. Sollte dieser Zusammenhang aber wirklich bestehen, könnte es sich bei diesem Energiewert um eine repräsentative Größe handeln, die in der Lage ist, den Schädigungszustand unabhängig vom Beanspruchungsniveau zu beschreiben. Eine endgültige Aussage dazu kann jedoch anhand der zwei einzelnen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Beanspruchungsniveaus nicht getroffen werden. Dazu wären entsprechend weiterführende experimentelle Untersuchungen notwendig.

5.3.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene)

Im Gegensatz zu den im Kapitel 5.1.3 beschriebenen UHC-Versuchen haben bei den LHC-Versuchen auf der Ebene des Materialgefüges nur die Untersuchungen der Oberflächenverformungen mit Hilfe des Messsystems ARAMIS stattgefunden. Untersuchungen mit dem Mikroskop oder dem REM hat es aufgrund des hohen Aufwands nicht gegeben.

Oberflächenverformungen

In gleicher Weise wie in den UHC-Versuchen erfolgte die Messung der Oberflächenverformungen auch in zwei Versuchen der LHC-Versuchsreihe mit dem Messsystem ARAMIS, welches im Kapitel 4.3.2 vorgestellt wurde. Die untersuchte Messfläche hatte, wie in den UHC-Versuchen auch, eine Breite von ca. 80 mm und eine Höhe von ca. 140 mm, und befand sich in vertikaler Richtung ausgerichtet an der Probenmitte. Ermittelt wurden so die Dehnungskomponenten quer und parallel zur Probenlängsachse sowie die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises.

Typische aus diesen Messungen gewonnene Ergebnisse sind beispielhaft in *Abbildung 5.33* für die Dehnungen quer zur Belastungsrichtung und in *Abbildung 5.34* für die Dehnungen parallel zur Belastungsrichtung dargestellt. Eine umfangreichere Darstellung der Messergebnisse inklusive der Vergleichsdehnungen nach von Mises findet sich im Anhang B3 in der *Abbildung B3 12* und *Abbildung B3 13*.

Im Vergleich mit den Ergebnissen aus den UHC-Versuchen in Kapitel 5.1.3 zeigt sich auch hier insgesamt ein sehr ähnliches Bild in der Verteilung der Dehnungen. Trotz einer leicht veränderten Messkonfiguration lassen sich darin qualitativ kaum Unterschiede ausmachen. Die Dehnungsverteilung ist in gleicher Weise wie bei den UHC-Versuchen sehr inhomogen und richtungsabhängig, was die Anisotropie der eingetragenen Schädigung widerspiegelt. Im Detail gelten für die Erläuterung dieser Messergebnisse dieselben Erklärungen wie bei den, in Kapitel 5.1.3 vorgestellten, Ergebnissen der UHC-Versuche, auf die an dieser Stelle verwiesen sei. Die im Vorangegangenen beschriebenen Unterschiede in den Schädigungszuständen des Materialgefüges zwischen LHC- und UHC-Versuchen konnten in diesen Messungen nicht festgestellt werden. Um derartige Unterschiede nachzuweisen, sind diese Messungen jedoch nicht fein genug und beschränken sich zudem nur auf die Probenoberfläche.

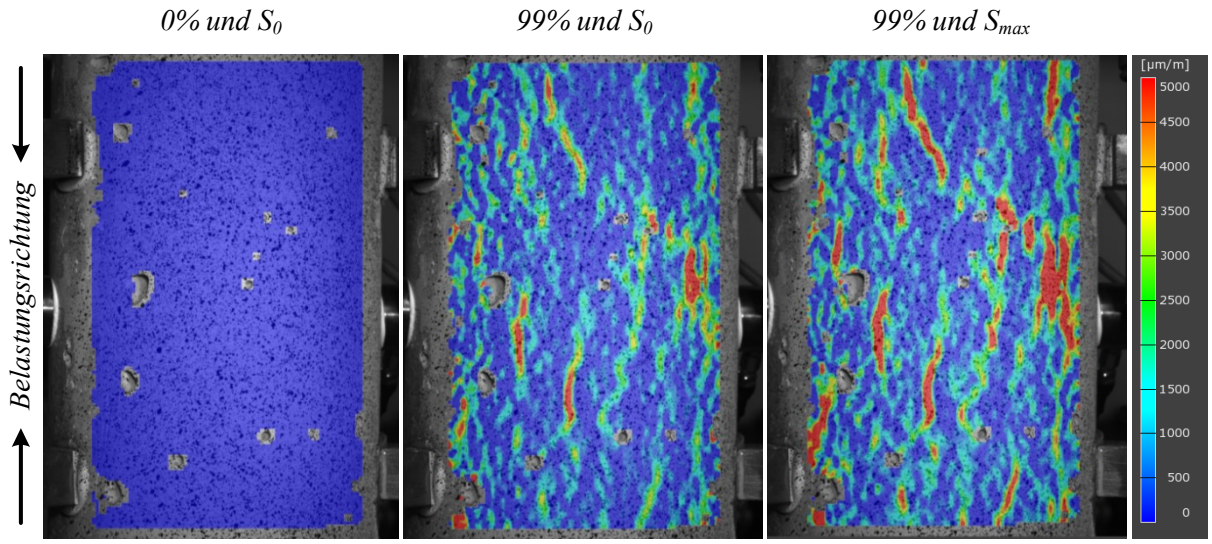

Abbildung 5.33: *Verteilung der horizontalen Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0 (links), zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (Mitte) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

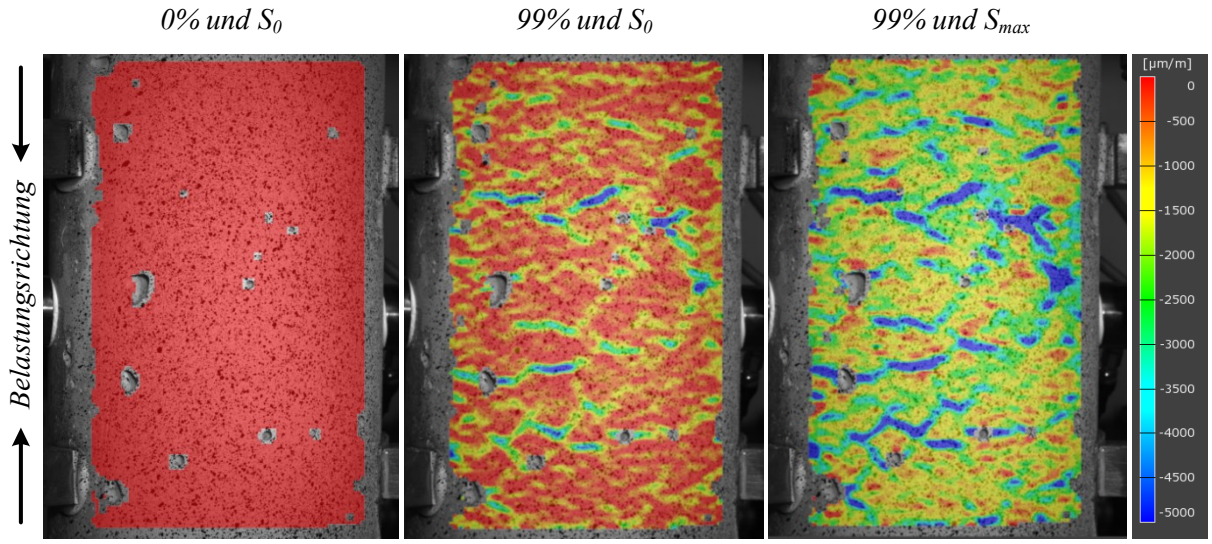

Abbildung 5.34: *Verteilung der vertikalen Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0 (links), zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (Mitte) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

5.3.4 Schlussfolgerungen

Dem in diesem Kapitel durchgeführten Vergleich der Versuchsergebnisse aus den LHC- und UHC-Versuchen hat im Wesentlichen folgende Fragestellung zugrundegelegen:

Verlaufen die Ermüdungsvorgänge im unteren und oberen hochzyklischen Bereich ähnlich bzw. welche Unterschiede gibt es?

Im Endergebnis haben alle hier verglichenen Messungen sowohl des Langzeitmaterialverhaltens, des Kurzzeitmaterialverhaltens als auch des Gefügezustandes qualitativ sehr ähnliche

Entwicklungen in ihren Verläufen bzw. Zuständen aufgewiesen. In nahezu allen Messungen zeichnen sich dieselben Charakteristika im Vergleich zu den UHC-Versuchen ab. Daher deuten die Ergebnisse darauf hin, bzw. es kann aus diesem Grund davon ausgegangen werden, dass der Schädigungsprozess bei den beiden hier untersuchten Zyklenbereichen der LHC- und UHC-Versuche prinzipiell von gleicher Natur ist.

Im Detail zeigen beide Prozesse jedoch gewisse Unterschiede in der Art und Ausprägung der ermüdungsbedingten Veränderungen, wie besonders die Vergleiche in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 verdeutlicht haben. Eigentlich weisen alle betrachteten Größen im Vergleich zu den UHC-Versuchen eine nennenswert geringere Ausprägung in den Veränderungen auf. Das Materialgefüge scheint daher im Falle der LHC-Versuche insgesamt weniger stark bzw. auf eine andere Weise geschädigt zu sein, so dass zu vergleichbaren Zeitpunkten ein anderer Schädigungszustand im Gefüge vorherrscht, als es in den UHC-Versuchen der Fall ist. Speziell die Ableitungen der Hysteresen weisen deutlich auf Unterschiede im Schädigungsprozess hin. Trotzdem führt der Prozess auch bei den LHC-Versuchen letztlich zum Ermüdungsversagen, allerdings unter einem höheren Beanspruchungsniveau.

Die prinzipielle Ursache für dieses Verhalten liegt vermutlich in der Ausbildung zu hoher lokaler Spannungskonzentrationen infolge der höheren äußeren Beanspruchung. Sie führen lokal zu Überschreitungen von Tragfähigkeiten, wodurch es im Vergleich frühzeitig zu sehr lokalen Schädigungen im Gefüge kommt, so dass sich ein beschleunigter und mehr lokal angesiedelter Schädigungsprozess einstellt. In der Folge bilden sich insgesamt erheblich weniger zeitabhängige viskose Verformungskomponenten aus. Damit verbunden ist natürlich eine stark verminderte Umlagerung von Beanspruchungen im Gefüge. Der Lastabtrag im Materialgefüge ist also deutlich ungleichmäßiger verteilt als in den UHC-Versuchen, was zu einer weniger gleich verteilten Ausbildung der Gefügeschädigungen führt. Aufgrund der höheren Oberlast S_{max} ist des Weiteren auch die Spannung im Gefüge größer und daher ist auch mehr elastische Energie im Material gespeichert, die letztlich für den Bruch im Moment des Versagens der Probe bereit steht. Es erscheint daher nachvollziehbar, dass für ein Versagen der Probe ein geringerer Schädigungszustand im Vergleich zu den UHC-Versuchen ausreicht.

Mit den in diesem Kapitel gemachten Beobachtungen und getroffenen Schlussfolgerungen werden zugleich die im Kapitel 5.1 angesetzten Annahmen zu den Vorgängen in den UHC-Versuchen bestätigt. Speziell die Annahme vorrangig viskoser Verformungen im Zementstein im oberen Spannungsbereich ohne signifikante Mikrorissbildung wird untermauert.

5.4 Vergleich von statischem und zyklischem Verhalten

In diesem Kapitel findet ein Vergleich des Materialverhaltens von Beton unter statischen und unter zyklischen Beanspruchungen statt, die jeweils bis zum Versagen des Materials führen. Dabei wird der Fragestellung nachgegangen, in wieweit es während des Schädigungsvorgangs Ähnlichkeiten im Materialverhalten gibt und ob die eingetragene Schädigung bei statischer Beanspruchung gleich oder zumindest vergleichbar mit der Schädigung aus zyklischen Beanspruchungen ist. Dazu werden die Ergebnisse aus den in Kapitel 4.4.2 beschriebenen statischen Versuchen mit den in vorangegangenen Kapiteln bereits vorgestellten Ergebnissen aus den zyklischen Versuchen verglichen und analysiert.

Verformungen

Als erstes wurden die Verformungen aus den statischen Versuchen mit denen aus den rein zyklisch bis zum Ermüdungsversagen gefahrenen Versuchen der LHC- und UHC-Versuchsreihen gegenübergestellt, die sich jeweils bis kurz vor dem Versagen im Beton eingestellt haben. Dabei werden zusätzlich auch die aus den Kriechversuchen ermittelten Verformungen berücksichtigt. Aus den jeweiligen Versuchen wurden zum einen die Gesamtdehnung ε_{ges} bestimmt und zum anderen die beiden darin enthaltenen Anteile der bleibenden plastischen Dehnung ε_{pl} sowie die reversibel elastische Dehnung ε_{el}. Beispielhaft lassen sich diese drei Dehnungskomponenten sowohl für den statischen als auch für die beiden zyklischen Beanspruchungsfälle an den Hysteresekurven in *Abbildung 5.37* ablesen bzw. auch im Anhang B4 in *Abbildung B4 2* für den statischen Fall.

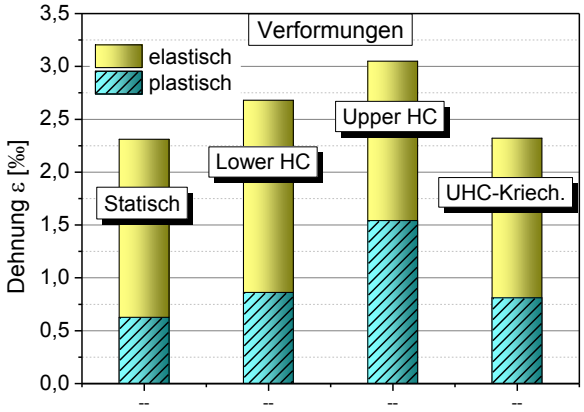

Abbildung 5.35: *Gegenüberstellung der verschiedenen Dehnungsanteile im Moment des Versagens bzw. kurz vor dem Versagen aus den einzelnen Versuchsreihen*

Die gemittelten Werte der Dehnungsanteile aus den verschiedenen Versuchsreihen sind in der *Abbildung 5.35* gegenübergestellt. Darin zeigt sich, dass die absoluten Dehnungen bis zum Versagen sich jeweils deutlich unterscheiden und entsprechend der Vorstellung im Fall der UHC-Versuche am größten ausfallen. Aber auch die einzelnen Dehnungsanteile sind unterschiedlich groß. Nach Abziehen der Kriechanteile von den UHC-Versuchen ergibt sich zwar absolut eine fast gleiche Gesamtdehnung wie im statischen Fall, allerdings sind die einzelnen Anteile auch dann noch verschieden zueinander. Für die plastischen Dehnungen stellt sich im UHC-Fall der größte und im statischen Fall der kleinste Wert ein, wie die Gegenüberstellung der einzelnen Werte in *Tabelle 5.4* zeigt.

Tabelle 5.4: *Vergleich der konkreten gemittelten Werte der verschiedenen Dehnungsanteile aus den einzelnen Versuchsreihen*

Dehnung	***statisch***	***Lower-HC***	***Upper-HC***	***UHC-Kriechen***
Gesamt ε_{ges} [‰]	2,31	2,68	3,05	2,32
Elastisch ε_{el} [‰]	1,69	1,82	1,51	1,51
Plastisch ε_{pl} [‰]	0,62	0,86	1,54	0,81

Die Kriechversuche haben außerdem gezeigt, dass dort nicht alleine plastische Verformungen eingetragen werden, sondern auch Schädigungen bzw. Veränderungen im Materialgefüge erzeugt werden. Deshalb kann ein Vergleich im Rahmen einer Schädigungsbetrachtung nicht ohne die Berücksichtigung dieser Kriechanteile erfolgen. Vor diesem Hintergrund ergeben sich bei der Betrachtung der Verformungen in den statischen, LHC- und UHC-Versuchen deutliche Unterschiede. Das gilt sowohl für die Gesamtverformung bis zum Bruch als auch für die Zusammensetzung dieser aus elastischen und plastischen Anteilen. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass es sich, ähnlich wie bereits bei den LHC- und UHC-Versuchen im Kapitel 5.3 festgestellt, in allen drei Beanspruchungsfällen um entsprechend unterschiedliche Schädigungszustände im Gefüge handelt.

In einem zweiten Schritt wurden die Verformungen aus den rein statischen Versuchen auch mit denen aus den statischen Nachprüfungen der verschieden stark zyklisch vorgeschädigten Proben verglichen, die im Rahmen der Abbruchversuche der UHC-Versuchsreihe durchgeführt wurden. Dort wurden bis 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigte Proben anschließend einer weggeregelten statischen Nachprüfung unterzogen.

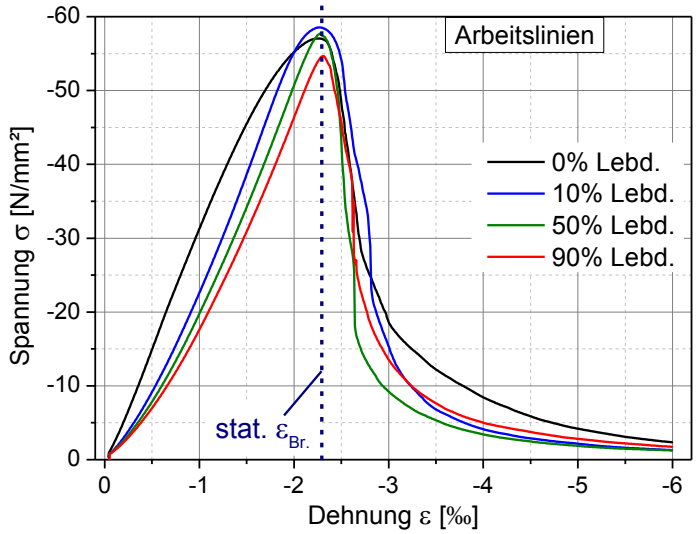

Abbildung 5.36: *Vergleich der vollständigen Arbeitslinien von unterschiedlich stark zyklisch vorgeschädigten sowie von ungeschädigten Proben ohne Dehnungsanteile aus der Vorschädigung*

Die aus diesen Versuchen gewonnenen vollständigen Arbeitslinien wurden bereits im Kapitel 5.1.2 in der *Abbildung 5.9* vorgestellt und im Hinblick auf die unterschiedlichen Auswirkungen der zyklischen Vorschädigungen auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen diskutiert. Im Bezug auf die Bruchdehnungen zeigte sich dort bereits, dass sich infolge der zyklischen

Vorschädigung in Abhängigkeit vom Grad der Vorschädigung entsprechend größere Dehnungen einstellen als im rein statischen Fall. Werden dagegen alleine die Verformungen der statischen Prüfungen ohne die zyklischen Anteile betrachtet, ergeben sich für die gemittelten Arbeitslinien die in *Abbildung 5.36* dargestellten Verläufe. Dort zeigt sich für alle vier untersuchten Schädigungszustände eine nahezu identische Bruchdehnung, obwohl sich die jeweiligen Spannungs-Dehnungs-Linien wesentlich unterscheiden.

Besonders vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Proben entweder ohne eine mechanische Vorbeanspruchung oder gar mit einer zyklischen Vorschädigung bis zu 90 % der Lebensdauer geprüft wurden, ist dies ein interessantes Ergebnis. Das bedeutet, dass der Beton nahezu unabhängig vom Grad der zyklischen Vorschädigung in der Lage ist, zusätzlich die gleiche statische Bruchdehnung aufzunehmen wie ein mechanisch ungeschädigter Beton. Diese Feststellung spricht für vorrangig viskose Verformungsanteile in den bleibenden zyklischen Verformungen und untermauert damit die in Kapitel 5.1 getroffenen Annahmen.

Tabelle 5.5: *Vergleich der konkreten gemittelten Werte der verschiedenen Dehnungsanteile aus den einzelnen Versuchsreihen mit verschiedenen zyklischen Vorschädigungsgraden*

Dehnung	***0% (statisch)***	***10% (zykl.-stat.)***	***50% (zykl.-stat.)***	***90% (zykl.-stat.)***
Gesamt $\varepsilon_{Br.}$ [‰]	2,31	2,87	3,19	3,27
Statisch ε_{Br} [‰]	2,31	2,27	2,28	2,30
Zyklisch ε_{pl} [‰]	-	0,6	0,91	0,97

Die *Tabelle 5.5* gibt die gemittelten Werte der einzelnen Dehnungsanteile aus den statischen Nachprüfungen der verschieden stark zyklisch vorgeschädigten Probekörper wieder, inklusive des zyklischen Anteils.

Steifigkeiten

Es werden die in den LHC- und UHC-Versuchen kurz vor dem Ermüdungsversagen erreichten Steifigkeitsreduzierungen mit den bei einem reinen statischen Bruch erreichten Steifigkeitsreduzierungen verglichen. Um dies zu ermöglichen, wurden ungeschädigte Proben weggeregelt bis zum Bruch gefahren, dort abgefangen und wieder entlastet. Anschließend wird die Probe in gleicher Weise nochmal bis zur Maximallast gefahren und wieder entlastet. Auf diese Weise wird in der Probe der Schädigungszustand im statischen Bruchmoment eingetragen, so dass die Reststeifigkeit für diesen Zustand ermittelt werden kann. In der *Abbildung 5.37* sind zwei so aus einem statischen Versuch gewonnene Hysteresekurven abgebildet, zusammen mit zwei kurz vor dem Ermüdungsversagen gemessenen Hysteresekurven aus einem LHC- und einem UHC-Ermüdungsversuch. Im Anhang B4 in *Abbildung B4 2* findet sich eine separate Darstellung der statischen Hysteresekurve.

Die Steifigkeit in den statischen Prüfungen wurde, wie in den Ermüdungsversuchen auch, als Sekantenmodul $E_{1/3}$ zwischen der Grundlast S_0 und 1/3 der statischen Bruchlast bestimmt. Dieser wurde einmal an der Belastungs- und einmal an der Entlastungsrampe der zweiten statischen Hysteresekurve ermittelt. In dieser Phase ist infolge der ersten Belastungsrampe der Schädigungszustand für den statischen Bruch in die Probe eingetragen und für diesen Zustand wurden die resultierenden Reststeifigkeiten errechnet.

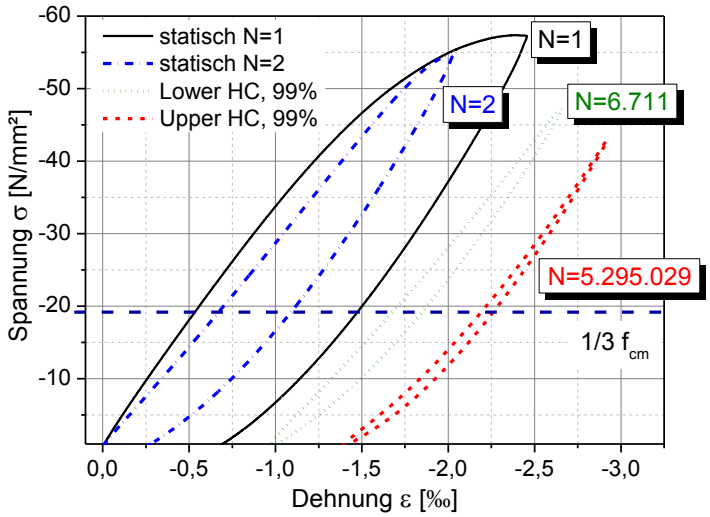

Abbildung 5.37: *Erste und zweite Hysteresekurve aus einer statischen Belastung sowie je eine Hysteresekurve aus einem LHC und einem UHC-Versuch kurz vor dem Ermüdungsversagen*

In der *Tabelle 5.6* sind die so ermittelten Steifigkeitsreduzierungen im statischen Fall mit den entsprechenden ebenfalls an den Hysteresen bestimmten Steifigkeitsreduzierungen aus den zyklischen Versuchen gegenübergestellt. Diese sind entsprechend der *Abbildung 5.37* an der jeweiligen Hysterese kurz vor dem Ermüdungsversagen ermittelt worden.

An den ermittelten Werten zeigt sich, dass die bis zu diesem Moment eingetragenen Schädigungen in allen drei Beanspruchungsfällen zu verschieden groß ausfallenden Reduzierungen der Materialsteifigkeiten führen. Berücksichtigt man im Fall der UHC-Versuche die im Kriechversuch festgestellte Reduzierung der Steifigkeit von ca. 4 %, bleiben die resultierenden Werte für den zyklischen Anteil trotzdem unter denen für den statischen Fall. Da aber beide Anteile Bestandteil der eingetragenen Materialschädigung sind, die letztlich zum Ermüdungsversagen führt, ist eine solche Trennung zum Zwecke des Vergleichs mit dem statischen Fall nicht gerechtfertigt. Für den E-Modul in der Entlastungsrampe im statischen Fall muss genau genommen sogar berücksichtigt werden, dass dort bereits ein zweites Mal eine Maximallast angefahren wurde. Trotzdem stellt sich eine geringere Reduzierung der Steifigkeit ein.

Tabelle 5.6: *Vergleich der Steifigkeitsreduzierungen bei statischer Belastung sowie bei zyklischer Belastung für LHC und UHC-Versuche kurz vor dem Ermüdungsversagen*

E-Modul	***Statisch***	***Hyst. LHC 99%***	***Hyst. UHC 99%***
Bel. $E^{0}_{1/3}$ [%]	100 (N=1)	100	100
Bel. $E^{D}_{1/3}$ [%]	76,4 (N=2)	70,3	62,5
Entl. $E^{D}_{1/3}$ [%]	64,4 (N=1)	58,1	57,8

Die sich in den gemessenen E-Modul-Reduzierungen widerspiegelnden Schädigungen weisen für alle drei betrachteten Beanspruchungsfälle unterschiedlich große Werte auf. Sie decken sich somit mit den vorrangegangenen Beobachtungen zu den Verformungen. Daher ist davon auszugehen, dass die jeweiligen Schädigungszustände beim Versagen von unterschiedlichem Charakter sind, was im Einklang mit den Feststellungen aus Kapitel 5.3 steht.

Eingetragene Energien

Mit Hilfe der in den verschiedenen Versuchsreihen bestimmten Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden die jeweils eingetragenen Energien ermittelt. Die unter statischer Beanspruchung eingetragenen Energien wurden mit den unter zyklischer bzw. zyklisch-statischer Beanspruchung eingetragenen Energien verglichen, um weitere Rückschlüsse auf die Schädigungszustände infolge statischer und zyklischer Beanspruchungen zu ermöglichen. Im Wesentlichen wurden in den statischen und in den zyklischen Versuchen drei verschiedene Energiegrößen bestimmt, die im Folgenden schrittweise miteinander verglichen werden.

In einem ersten Schritt wurden die jeweils im Moment des Versagens in die Proben irreversibel eingetragenen Energieanteile verglichen, ohne die Berücksichtigung reversibler elastischer Energieanteile. Die *Abbildung 5.38* veranschaulicht links für den statischen Fall und rechts für den zyklischen Fall die betrachteten Energieanteile. Im statischen Fall wurde die Probe bis zur Bruchlast gefahren und anschließend wieder entlastet, so dass anhand der so ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung die in *Abbildung 5.38 links* grau markierte Fläche als in der Probe verbliebene Energie ermittelt werden konnte. Eine beispielhafte Messkurve findet sich dazu im Anhang B4 in *Abbildung B4 2*. Für den zyklischen Fall wurde, wie bereits im Kapitel 5.1.2 vorgestellt, der Energieeintrag anhand der Hysteresekurven ermittelt, welcher sich aus den beiden in *Abbildung 5.38 rechts* grau markierten Flächen zusammensetzt. Im Anhang B4 ist in *Abbildung B4 3* dazu eine entsprechende gemessene Schar an Hysteresekurven abgebildet.

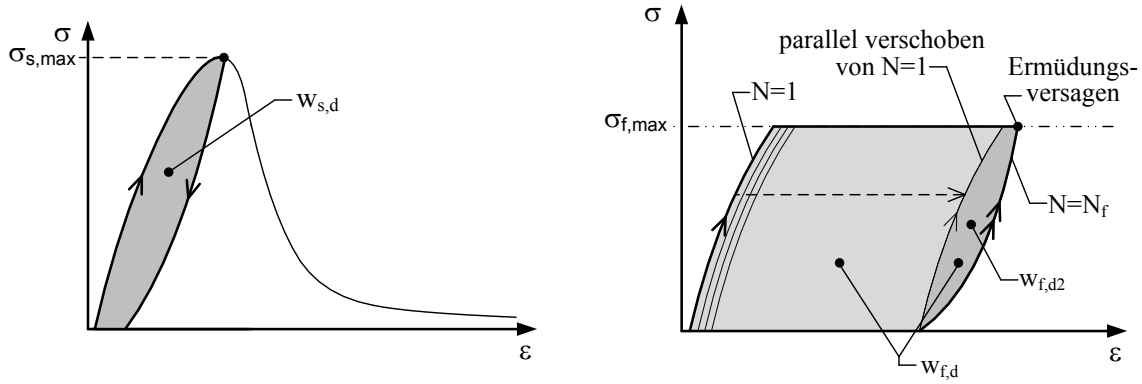

Abbildung 5.38: *Schematische Darstellung der ermittelten irreversiblen Energieeinträge anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den statischen Fall (links) und anhand der Hysteresekurven für den zyklischen Fall (rechts)*

Der Vergleich der ermittelten Energiewerte w_d ist in *Abbildung 5.39* wiedergegeben, wobei darin zusätzlich für die zyklischen Versuche auch noch der Anteil $w_{f,d2}$ dargestellt ist, der sich aus der Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Line ergibt.

Bereits die Vergleiche zwischen LHC- und UHC-Versuchen in Kapitel 5.3.2 hatten unterschiedliche Energieeinträge gezeigt. Als wesentliche Ursache dafür wurde auf die starke Prägung der betreffenden Energiegröße durch zeitabhängige visko-plastische Vorgänge geschlossen. Daher erscheint es auch nur konsequent, dass im Vergleich in *Abbildung 5.39* die statischen Versuche den geringsten Energieeintrag aufweisen. Die sehr kurzweilige statische Beanspruchung erlaubt es nicht, dass sich visko-plastische Komponenten in nennenswerten Größen ausbilden können. Damit stehen die Ergebnisse auch im Einklang mit den vorherigen Feststellungen zu den Verformungen und den Steifigkeiten.

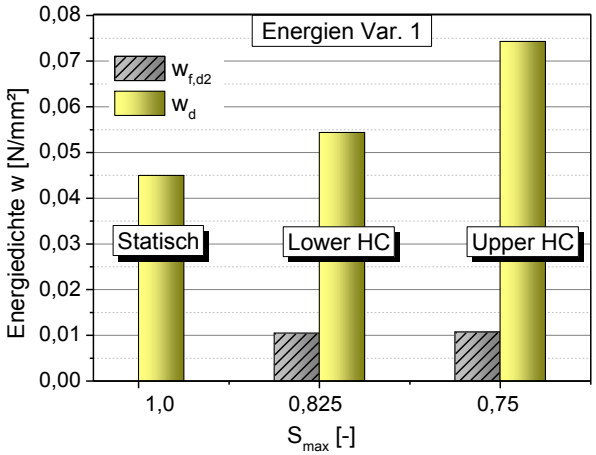

Abbildung 5.39: *Gegenüberstellung der aus den statischen und zyklischen Versuchen ermittelten irreversiblen Energieanteile mit Darstellung der Komponente $w_{f,d2}$ für die zyklischen Versuche*

In Anlehnung an die Arbeit von [PFANNER 2002] wurden in einem zweiten Schritt Energiegrößen verglichen, die sich im Zustand des Bruches jeweils genau bei der entsprechenden Oberlast der zyklischen Beanspruchung einstellen. Eine Veranschaulichung der betreffenden Energiegrößen ist in der *Abbildung 5.40* wiedergegeben. Im statischen Fall wird hierzu aus der vollständigen Arbeitslinie die Energie ermittelt, die im Nachbruchbereich beim Erreichen der entsprechenden Oberspannung aus dem zyklischen Versuch eingetragen ist. Für den Vergleich mit den LHC-Versuchen wird also bei einer höheren Spannung im Nachbruchbereich der statischen Arbeitslinie abgelesen als bei den UHC-Versuchen.

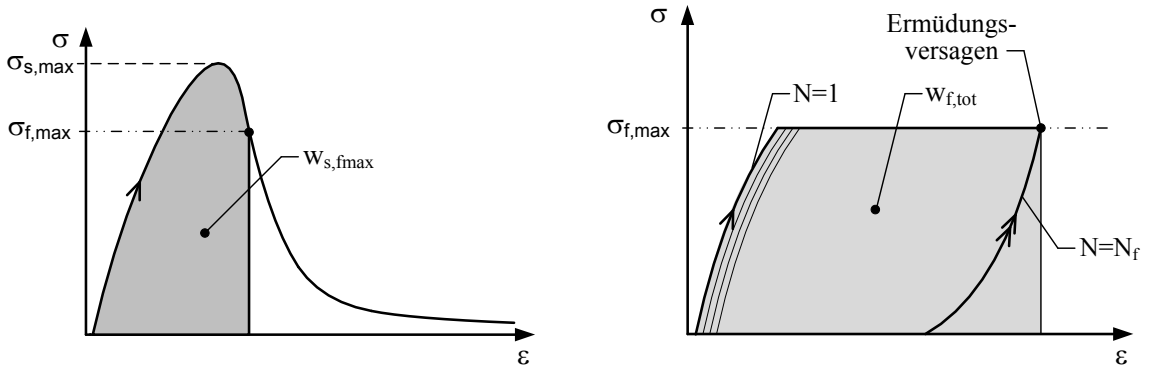

Abbildung 5.40: *Schematische Darstellung der ermittelten Energieeinträge $w_{s,fmax}$ anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den statischen Fall (links) und $w_{f,tot}$ anhand der Hysteresekurven für den zyklischen Fall (rechts)*

Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Energiegrößen werden hier die im jeweiligen Zustand reversibel in der Probe gespeicherten elastischen Energieanteile mit eingeschlossen. So ergeben sich die in *Abbildung 5.41* dargestellten Energiewerte. Für die LHC- und UHC-Versuche findet sich dort die Gegenüberstellung mit dem entsprechenden Wert aus der statischen Arbeitslinie sowie zusätzlich auch der Energiewert im Moment der statischen Versagenslast.

Generell zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie im ersten Energievergleich. Im zyklischen Fall ist der Eintrag immer größer als im statischen Fall, und das mit zunehmender Tendenz bei

höheren Zyklenzahlen. Trotz Berücksichtigung des jeweiligen Nachbruchbereiches der statischen Arbeitslinie spielen auch hier wieder die visko-plastischen Anteile eine entscheidende Rolle und führen so zu den größten Energieeinträgen bei den UHC-Versuchen.

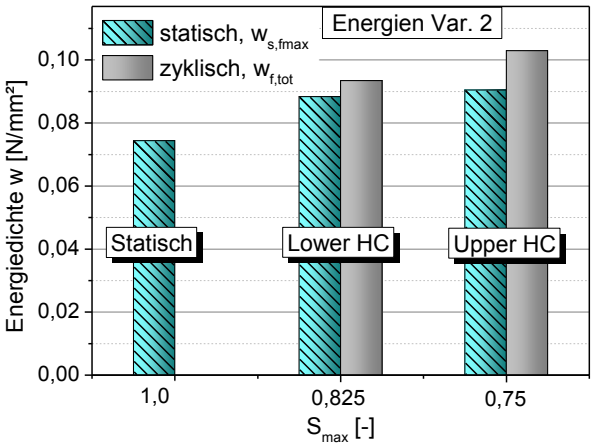

Abbildung 5.41: *Gegenüberstellung der aus den zyklischen Versuchsreihen ermittelten Energieanteile $w_{f,tot}$ mit den entsprechenden aus der statischen Arbeitslinie bestimmten Energieanteilen $w_{s,fmax}$*

Als letzte Energiegröße wurden noch die vollständigen Bruchenergien ermittelt und verglichen, allerdings nur für die statischen und die UHC-Versuche. Hierfür wird, wie in *Abbildung 5.42 links* veranschaulicht, im statischen Fall die Energie unter der kompletten Arbeitslinie ermittelt, für die sich beispielhaft im Anhang B4 in *Abbildung B4 1* eine entsprechende Messkurve findet.

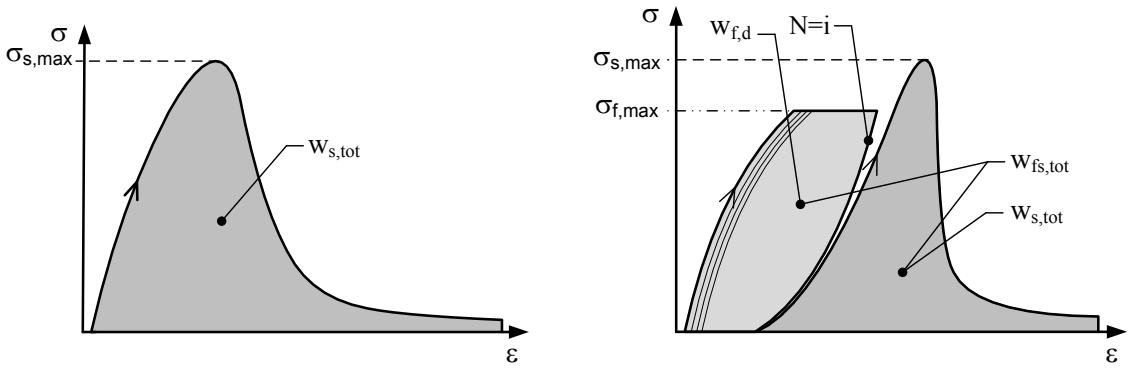

Abbildung 5.42: *Schematische Darstellung der ermittelten Bruchenergie anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den statischen Fall (links) und anhand der Hysteresekurven sowie der Spannungs-Dehnungs-Linie aus der Nachprüfung für den zyklischen Fall (rechts)*

Für die zyklischen Beanspruchungen war die Bestimmung der vollständigen Bruchenergie nur über eine zyklische Vorschädigung mit anschließender statischer Nachprüfung in Form eines weggeregelten Bruchversuches möglich. Die *Abbildung 5.42 rechts* veranschaulicht schematisch die Ermittlung der entsprechenden Energieanteile. Im Rahmen dieser Vergleichsbetrachtung wurden schließlich aus der UHC-Versuchsreihe Proben bis 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigt und dann der statischen Nachprüfung unterzogen. Bei-

spielhafte Kurvenverläufe aus den UHC-Versuchen für die drei Lebensdauerzustände sind im Anhang B4 in *Abbildung B4 4* und in *Abbildung B4 5* dargestellt.

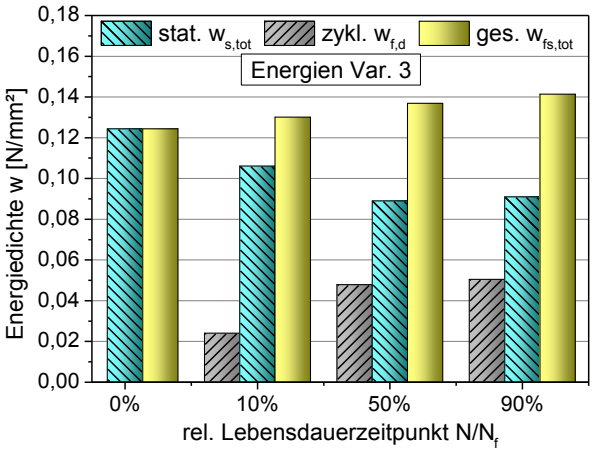

Abbildung 5.43: *Gegenüberstellung der aus den verschieden stark zyklisch vorgeschädigten Proben ermittelten Energieanteile der UHC-Versuchsreihe mit der aus den statischen Versuchen bestimmten Bruchenergie*

Im Großen und Ganzen zeigt sich beim Vergleich in *Abbildung 5.43* ein vergleichbares Bild wie bei den beiden zuvor dargestellten Energievergleichen. Je höher die zyklische Vorschädigung ist bzw. je mehr Zyklen die Proben erfahren haben, umso größer ist die gesamte aufzubringende Bruchenergie. Die einzelnen Energieanteile zeigen zwar eine Abnahme im statischen Anteil mit zunehmender Vorschädigung, jedoch erfolgt zugleich eine größere Zunahme im zyklischen Anteil. Hierdurch wird die zuvor schon festgestellte Abhängigkeit von der zyklischen Beanspruchung besonders deutlich. Die konkreten Werte für alle hier vorgestellten Energieanteile sind im Anhang B4 in der *Tabelle B4 1* bis *Tabelle B4 3* aufgeführt.

Schlussfolgerungen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse und Vergleiche dienten in erste Linie zur Klärung der Fragestellung:

Inwieweit gibt es zwischen statischer und zyklischer Beanspruchung Ähnlichkeiten im Schädigungsverhalten und sind die eingetragenen Schädigungen vergleichbar?

Sowohl bei den Verformungen, als auch bei den Steifigkeiten und den Energieeinträgen zeigen sich nennenswerte Unterschiede zwischen den statischen und den beiden zyklischen Beanspruchungsvarianten. Die einzelnen Beobachtungen decken sich miteinander und deuten in gleicher Weise auf gewisse Unterschiede in den jeweiligen Schädigungsvorgängen hin. Ein besonderes Augenmerk bei der Bewertung liegt hier auf den untersuchten Energieeinträgen. Alle drei Vergleiche von verschiedenen Energieanteilen haben qualitativ das gleiche Ergebnis geliefert, und zwar unterschiedlich große eingetragene Energiemengen in Abhängigkeit von der Beanspruchung. Im statischen Fall sind die Einträge am geringsten und im zyklischen Fall werden sie mit zunehmender Zyklenzahl bzw. Versuchsdauer immer größer. Die Ergebnisse dieser Energievergleiche sowie auch die der Vergleiche von Dehnungen und Steifigkeiten decken sich mit Effekten im Materialverhalten, die bereits bei den in Kapitel 5.3 vorgestellten Vergleichen zwischen den LHC- und UHC-Versuchen festgestellt wurden. Sie weisen gleich-

ermaßen auf jeweils unterschiedliche Schädigungszustände im Gefüge der untersuchten Proben für die statischen, die LHC- und die UHC-Versuche hin. Das bedeutet, dass der konkrete Schädigungszustand im Materialgefüge und damit auch die eingetragene Energiemenge abhängig sind vom Typ der aufgebrachten Beanspruchung. Dies gilt sowohl für den Zustand im Moment des Versagens als auch für die gesamte vorhergehende Phase des Schädigungseintrages. Eine wesentliche Rolle bei diesen Unterschieden scheinen zeitabhängige Vorgänge, wie viskose Verformungskomponenten, im Material zu spielen, was sich bereits bei den Vergleichen der LHC- und UHC-Versuche in Kapitel 5.3 herauskristallisiert hatte.

Dies wird auch besonders deutlich, wenn man die beiden in *Abbildung 5.40* dargestellten Belastungssituationen näher betrachtet. Im statischen Fall hat eine kurzzeitig wirkende Beanspruchung das Gefüge in einen Belastungszustand versetzt, in dem das Gefüge die Last $F_{f,max}$ nicht mehr ertragen kann. Hingegen wird im zyklischen Fall das Gefüge erst durch stark zeit- und zyklenabhängige Veränderungen solange verändert, bis schließlich ein Zustand im Gefüge erreicht ist, der diese Last $F_{f,max}$ ebenfalls nicht mehr tragen kann. Infolge der sehr unterschiedlichen Veränderungen handelt es sich in beiden Fällen um zwei verschiedene Gefügezustände, die jedoch beide unter der Last $F_{f,max}$ nicht mehr tragfähig sind. Vor diesem Hintergrund erscheint es daher auch gut nachvollziehbar, dass im statischen Fall ein noch geringerer Energieeintrag stattfindet.

Eine widerspruchsfreie Bestätigung der in Kapitel 3.4 vorgestellten Theorie von [PFANNER 2002] zur Gleichheit von Schädigungszuständen und Energieeinträgen kann mit den hier vorgestellten experimentellen Ergebnissen nicht geliefert werden. Selbst eine mögliche Korrektur der zyklischen Ergebnisse durch Abzug eines Kriechanteils würde hier ebenfalls zu keinem entsprechenden Ergebnis führen. Der zyklische Rest wäre im Falle der UHC-Versuche dann kleiner als das jeweilige statische Ergebnis. Da die Untersuchungen zum Kriechverhalten in Kapitel 5.2 außerdem gezeigt hatten, dass die Kriechbeanspruchung selbst zu Veränderungen im Materialverhalten und zu Schädigungen im Gefüge beiträgt, wäre eine solche Differenzierung nicht gerechtfertigt.

Abschließend bleibt aber zu berücksichtigen, dass es sich nur um drei verschiedene Beanspruchungskonfigurationen und eine Betonmixtur handelt, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden und auf die sich die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen stützen.

5.5 Ermüdungsverhalten von Klein- und Großproben

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.4.5 beschriebenen Versuche an den großen Betonzylindern vorgestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt in der Versuchsauswertung auf den zyklischen Versuchen. Die Ergebnisse aus den statischen Prüfungen an den großen Proben werden dagegen nur am Rande betrachtet. Bei der Analyse der Versuchsergebnisse von den großen Betonzylindern findet auch ein Vergleich mit den in Kapitel 5.3 vorgestellten Ergebnissen der LHC-Versuche statt. In diesem Rahmen wird der Frage nachgegangen, ob sich der Schädigungsvorgang auf dieser Betrachtungsskala in den Großproben generell in gleicher Weise zeigt, wie er in den Versuchen mit den Kleinproben beobachtet wurde. In diesem Zusammenhang wird vor allem auch untersucht, welche Unterschiede sich im Materialverhalten zwischen diesen beiden Skalen der Betrachtungsebene zeigen. Neben den beiden Fragestellungen wird aber auch überprüft, ob sich der Schädigungsvorgang mit denselben Messtechniken gleichermaßen erfassen lässt, wie es in den Versuchen mit den Kleinproben der Fall gewesen ist. Allerdings muss bei der Bewertung der vorgestellten Ergebnisse berücksichtigt werden, dass sie lediglich aus zwei zyklischen Versuchen stammen. Daher ist eine belastbare Untersuchung des Größeneinflusses unter zyklischen Beanspruchungen nicht möglich und auch die Aussagekraft der hier gewonnenen Erkenntnisse ist eingeschränkt.

Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Versuchsauswertung erfolgten, soweit es möglich war, identisch bzw. vergleichbar zu den LHC- und UHC-Versuchsreihen. Trotzdem gibt es Unterschiede zwischen den Versuchskonfigurationen der zyklischen Versuche an den Großproben und den Kleinproben, weshalb deren Ergebnisse zum Teil nur eingeschränkt vergleichbar sind. Zum einen erlaubte die Prüfmaschine für die Versuche an den Großproben nur eine deutlich geringere Prüffrequenz von 1 Hz gegenüber 5 Hz bei den Kleinproben. Zum anderen mussten, wie im Kapitel 4.4.5 bereits beschrieben, die zyklischen Lastniveaus im Vergleich zu den LHC-Versuchen reduziert werden, um ausreichende und vergleichbare Zyklenzahlen zu erreichen. Dies ist zum einen ein Resultat der geringeren Prüffrequenz aber vermutlich zum Teil auch eine Konsequenz aus dem Größeneffekt. Dieser zeigte sich schon in den Ergebnissen der statischen Prüfungen, bei denen die großen Proben im Mittel eine um ca. 8 % geringere Festigkeit erreichten als die zugehörigen kleinen Probekörper. Ein Vergleich der konkreten Festigkeitswerte findet sich im Anhang B5 in *Tabelle B5 1*. Bei der nachfolgenden Darstellung der Versuchsergebnisse findet, wie auch schon in den Kapiteln 5.1 und 5.3, eine Unterteilung in die Kategorien Langzeitmaterialverhalten, Kurzzeitmaterialverhalten und Gefügezustände statt.

5.5.1 Langzeitmaterialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung (Makroebene)

Die Vergleiche für die Versuchsergebnisse zum Langzeitverhalten der großen Probekörper mit den kleinen Probekörpern aus der LHC-Versuchsreihe sind in *Abbildung 5.44* bis *Abbildung 5.46* wiedergegeben. Aus versuchs- und messtechnischen Gründen gab es an den großen Proben, anders als an den kleinen Proben der LHC- und UHC-Versuche, keine Messungen der horizontalen Signalamplituden sowie der vertikalen Ultraschallgeschwindigkeiten.

Der Schädigungsvorgang zeigt sich in den Großproben generell in der gleichen Weise wie in den Kleinproben auch. Dies spiegeln die in *Abbildung 5.44* bis *Abbildung 5.46* dargestellten Ergebnisse der Großproben gut wider, die in ihren Verläufen prinzipiell dieselbe Charakteristik wie die Verläufe der kleinen Proben aus den LHC-Versuchen zeigen. Trotz der relativ ähnlichen Zyklenzahlen weisen die einzelnen Verläufe im direkten Vergleich jedoch teilweise nennenswerte Unterschiede auf.

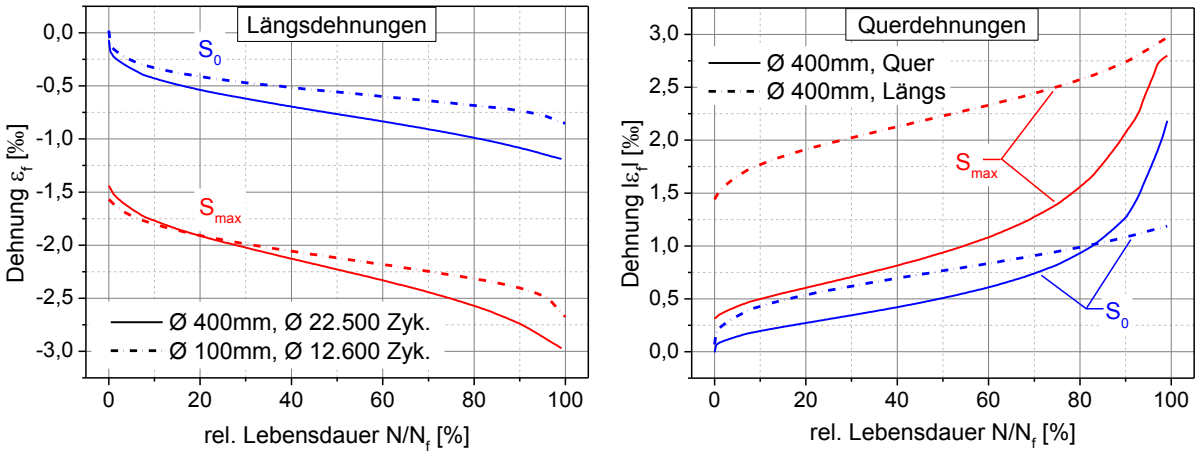

Abbildung 5.44: *Vergleich der Ergebnisse von den Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche auf jeweils zwei Lastniveaus für die Längsdehnungen (links) und Vergleich der Längs- und Querdehnungen an den Großproben (rechts)*

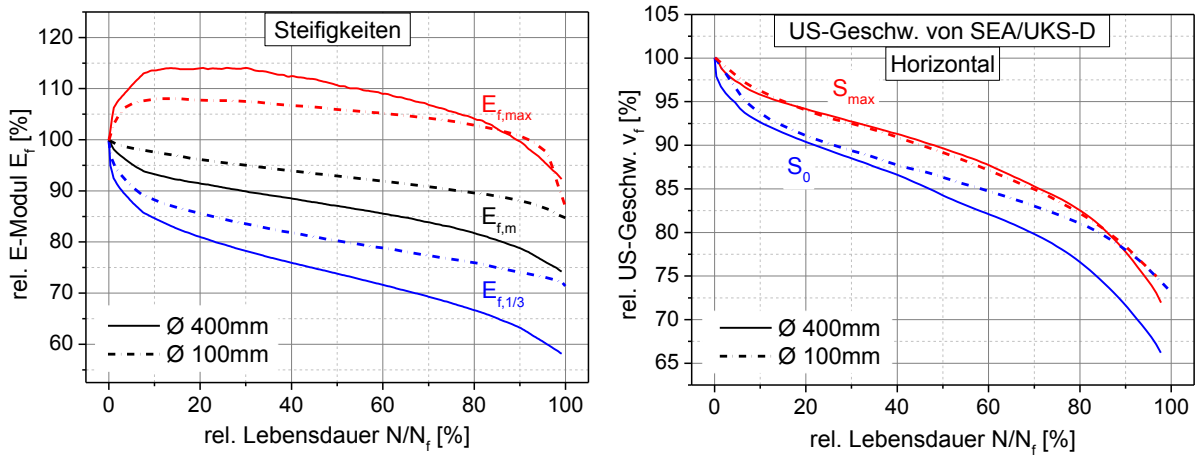

Abbildung 5.45: *Vergleich der Ergebnisse von den Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche für die drei E-Moduli (links) und für die auf zwei Lastniveaus gemessenen horizontalen Ultraschallgeschwindigkeiten (rechts)*

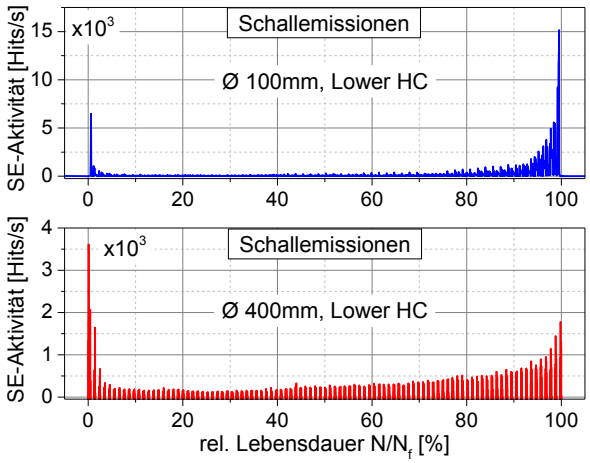

Abbildung 5.46: *Vergleich der Ergebnisse von den Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche für die Schallemissionsaktivität*

Bei der Bewertung der Ergebnisse müssen aber zwei Aspekte mit beachtet werden. Einerseits führte die geringere Prüffrequenz bei den Großproben im Vergleich zu den Kleinproben zu deutlich längeren Laufzeiten. Andererseits handelt es sich bei den Großproben um ein niedrigeres Lastniveau. Daher muss davon ausgegangen werden, dass sich hier zusammen mit dem Einfluss der Probengröße mehrere Effekte überlagern und sich deren Auswirkungen auf die einzelnen Versuchsergebnisse wohl nicht voneinander trennen lassen. Die zu den beiden zyklischen Versuchen zugehörigen einzelnen Ergebniskurven finden sich im Anhang B in der *Abbildung B5 1* bis *Abbildung B5 5*.

Verformungen

Die erreichten Längsdehnungen sind im Vergleich zu den kleinen Proben insgesamt größer. Da aber die Versuchsdauer im Mittel deutlich größer gewesen ist, kommen natürlich auch höhere zeitabhängige Dehnungsanteile zum Tragen. Am Ende erreicht die Gesamtdehnung sogar fast den Wert aus den UHC-Versuchen, während die bleibende Dehnung unterhalb der aus den UHC-Versuchen bleibt. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass diese hohe Gesamtdehnung alleine auf die geringere Prüffrequenz zurückzuführen ist. Vielmehr ist davon auszugehen, dass hier auch ein Effekt aus der unterschiedlichen Probengröße eine Rolle spielt und letztlich zu größeren Dehnungen geführt hat.

Neben den Längsdehnungen wurden an den Großproben zusätzlich die Querdehnungen gemessen. Da in den Versuchen mit den kleinen Probekörpern keine Querdehnungsmessung stattgefunden hat, ist an dieser Stelle kein Vergleich möglich und es stehen nur die Ergebnisse von den zwei geprüften Großproben zur Verfügung. Diese sind zusammen mit den Verläufen der zugehörigen Längsdehnungen in *Abbildung 5.44 rechts* wiedergegeben. Sie zeigen in ihrer Entwicklung prinzipiell ein etwas anderes Verhalten als die Längsdehnungen. Die Abhängigkeit vom Belastungsniveau auf dem sie gemessen wurden, fällt deutlich geringer aus als in der Längsrichtung. Bis gut zweidrittel der Lebensdauer erfolgt ein geringer und gleichmäßiger Zuwachs in den Gesamt- und den bleibenden Dehnungen. Anschließend gehen beide Kurven in der Endphase der Lebensdauer in einen stetig anwachsenden Verlauf über, welcher wesentlich stärker ausfällt als bei den Längsdehnungen.

Der Zuwachs in den Querdehnungen resultiert vorwiegend aus bleibenden Anteilen, die in der Endphase sogar schnell einen größeren Wert erreichen als die zugehörigen bleibenden Längsdehnungen. Dies kann eigentlich nur durch eine Auflockerung der Gefügestruktur in Form von Rissen hervorgerufen werden. Relativ gut deckt sich diese Entwicklung in den Querdehnungen mit den Beobachtungen in der Mikrorissentwicklung bei den UHC-Versuchen, die in Kapitel 5.1.3 vorgestellt wurden, obwohl es sich hier um einen wesentlich kürzeren Ermüdungsprozess handelt. Dort konnte ein erkennbarer Zuwachs in der Rissstruktur, in Form von Rissbreiten und Gesamtrisslänge, auch erst in den Schnitten der bis 90 % der Lebensdauer vorgeschädigten Proben festgestellt werden, aber noch nicht in den bis 50 % vorgeschädigten Proben. Bei den festgestellten Rissen handelte es sich vorrangig um vertikal orientierte Risse, die einen direkten Einfluss auf die Querdehnung besitzen aber weniger auf die Längsdehnungen. Vor diesem Hintergrund wären sie letztlich eine Erklärung für die großen bleibenden Querdehnungen, die größer ausfallen als die durch den Längsdruck erzeugten Druckstauchungen im Materialgefüge.

Steifigkeiten

Wie die *Abbildung 5.45 links* zeigt, setzt in den großen Proben eine stärkere Reduzierung und eine ebenfalls etwas stärkere Steigerung in den einzelnen gemessenen Steifigkeiten ein. Prinzipiell ähneln diese Unterschiede denen, wie sie beim Vergleich zwischen den LHC- und

UHC-Versuchen in Kapitel 5.3 festgestellt wurden. Eine Ursache dafür liegt sicher in der vergleichsweise längeren Versuchsdauer der Großproben. Aber sogar im Vergleich mit den UHC-Versuchen werden die unteren zwei E-Moduli der großen Proben am Ende stärker verringert. Ähnlich den Dehnungen kann auch dieser Unterschied zu den kleinen Proben nicht nur auf die geringere Prüffrequenz oder die im Mittel etwas höhere Zyklenzahl zurückgeführt werden.

Schallemissionen (SEA)

Die beispielhaft in *Abbildung 5.46* wiedergegebenen Schallemissionsergebnisse für einen großen und einen kleinen Betonzylinder erlauben generell keine quantitativen Vergleichsbetrachtungen. Qualitativ zeigen beide aber die gleiche Entwicklung in der Schallemissionsaktivität, weshalb prinzipiell in den kleinen und den großen Proben der gleiche Schädigungsvorgang angenommen werden kann. Ein Unterschied vor dem Hintergrund der verschiedenen Probengrößen kann hier jedoch aufgrund der Messweise und der Anzahl der Versuche nicht herausgelesen werden.

Ultraschallsignale (US)

Die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten erfolgten aus technischen Gründen bei den Großproben mit Hilfe der SEA, hingegen bei den Kleinproben in den LHC-Versuchen mit dem UKS-D. Generell zeigen die Messungen mit dem UKS-D im Vergleich größere Reduzierungen an, wie zum Beispiel die Ergebnisse in Anhang B1 in *Abbildung B1 1* zeigen. Trotzdem fällt im Vergleich in *Abbildung 5.45 rechts* die Reduzierung der Ultraschallgeschwindigkeit bei den Großproben unter Oberlast S_{max} gleich und unter Grundlast S_0 sogar deutlich größer aus. Diese Entwicklung deckt sich gut mit den Beobachtungen bei den Steifigkeiten, wo der Unterschied bei $E_{f,1/3}$ auch besonders groß ausfällt. Auch hier zeigt sich im zusätzlichen Vergleich mit den UHC-Versuchen noch eine etwas größere Reduzierung in der Schallgeschwindigkeit. Diese beiden Ergebnisse sind vor allem auch gut vergleichbar, da beide Versuchsreihen mit der SEA gemessen wurden. Sie weisen wie die anderen Messgrößen auf einen signifikanten Einfluss aus der Probengröße hin.

5.5.2 Kurzzeitmaterialverhalten unter monotoner Beanspruchung (Makroebene)

Ebenso wie in den LHC- und UHC-Versuchen mit den kleinen Proben wurden auch bei den großen Proben während der Versuche in regelmäßigen Abständen Hysteresen gefahren.

Hysteresen

Für den Vergleich der Entwicklungen in den Hysteresen zwischen den Großproben und den Kleinproben werden wie bei dem Vergleich von LHC- und UHC-Versuchen in Kapitel 5.3.2, einzelne ausgewählte Kurven für vier verschiedene Lebensdauerzustände gegenübergestellt. In der *Abbildung 5.47* sind für den ungeschädigten Zustand bei 0 % sowie für die bis 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer vorgeschädigten Zustände die Hysteresenkurven einer Großprobe mit den Kurven einer Kleinprobe dargestellt. Die jeweiligen abgebildeten Hysteresen und deren Entwicklungen sind nicht exakt gleich. Die Großproben besitzen ein deutlich niedrigeres absolutes Spannungsniveau, was durch die niedrigere Festigkeit aber auch das herabgesetzte zyklische Lastniveau bedingt ist. Qualitativ betrachtet zeigt sich jedoch eine sehr ähnliche Entwicklung in der Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Diese spiegeln aber auch die bereits festgestellten zunehmend größeren bleibenden und auch elastischen Dehnungen bei den Großproben wider. Im Anhang B finden sich in *Abbildung B5 6* die beiden Diagramme mit den kompletten Entwicklungen der Spannungs-Dehnungs-Linien.

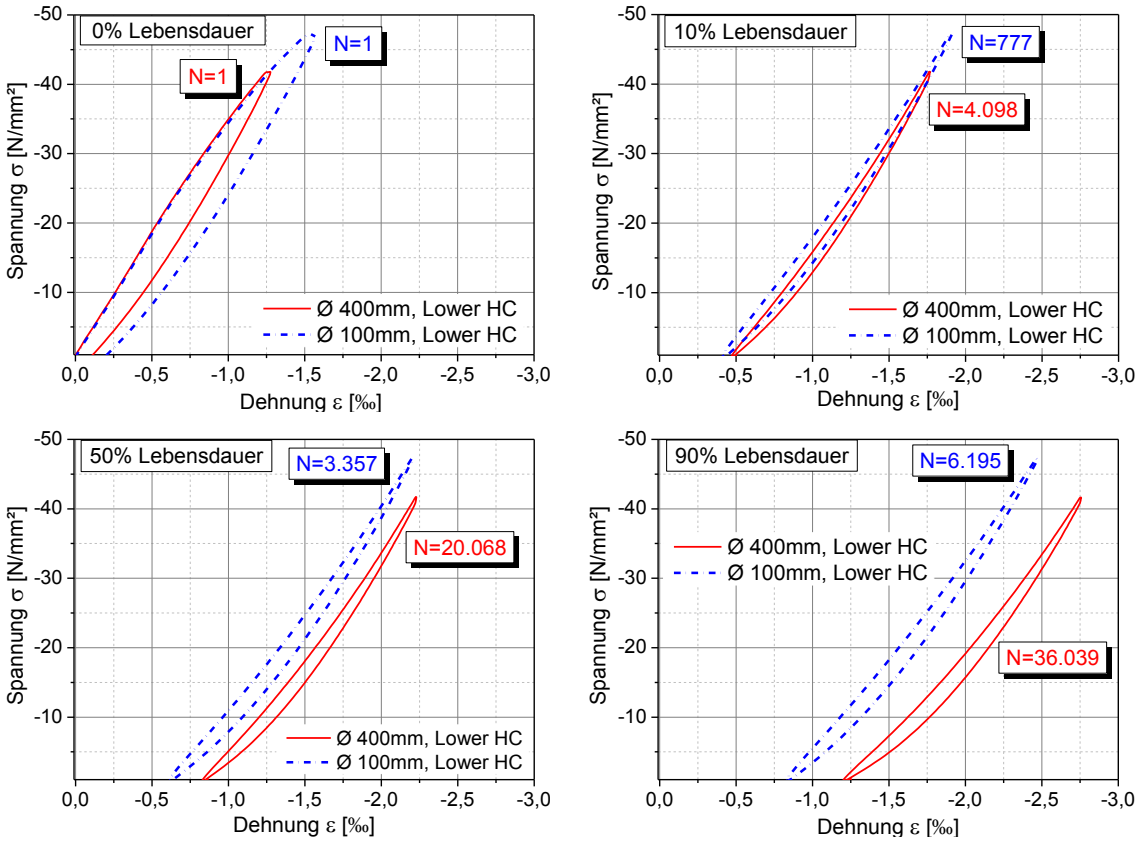

Abbildung 5.47: *Direkter Vergleich einer Hysteresekurve von einer Großprobe mit einer Hysteresekurve einer Kleinprobe aus einem LHC-Versuch im ungeschädigten Zustand und bei 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer*

Eingetragene Energien

Erwartungsgemäß zeigt sich in *Abbildung 5.48* für die Gesamtenergie $w_{f,d}$ im Vergleich zu den kleinen Proben der LHC-Versuche ein größerer Eintrag, was durch die ebenfalls größeren Verformungen bedingt ist.

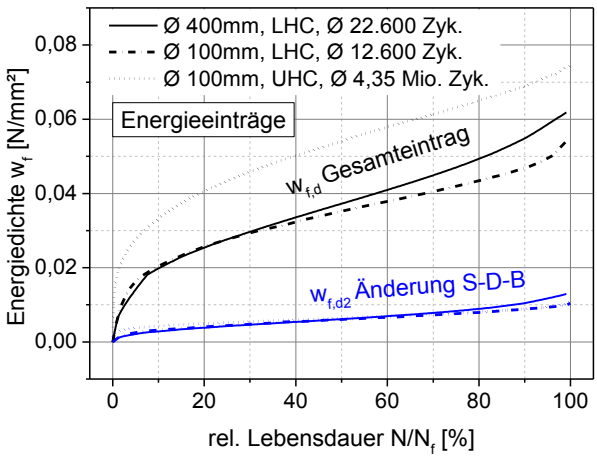

Abbildung 5.48: *Vergleich der beiden aus den Hysteresen ermittelten Entwicklungen der Energieanteile für die Versuche an den Großroben sowie die LHC und UHC-Versuche an den Kleinproben*

Allerdings bleibt die Gesamtenergie deutlich unter der aus den UHC-Versuchen. Dagegen entwickelt sich die zweite Energiegröße $w_{f,d2}$, die alleine die Änderung der Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreibt, sehr ähnlich zu den LHC- und UHC-Versuchen. Sie erreicht dann aber zum Lebensdauerende hin doch einen etwas größeren Endwert. Ob sich dieser Unterschied der kleineren Prüffrequenz oder dem Größeneinfluss bzw. beidem zuordnen lässt, bleibt allerdings offen.

5.5.3 Zustände im Materialgefüge (Mikro- und Mesoebene)

An den großen Probekörpern erfolgte die Untersuchung der Zustände im Materialgefüge aufgrund des Aufwandes und der geringen Anzahl an Versuchen ausschließlich über die Messung der Oberflächenverformungen mit dem System ARAMIS.

Oberflächenverformungen

Vor dem Hintergrund der deutlich größeren Probekörper ergab sich für die Messung der Oberflächenverformungen eine im Vergleich zu den kleinen Probekörpern abweichende Messkonfiguration. Diese beinhaltet eine deutlich größere Messfläche von ca. 310 mm Breite und ca. 345 mm Höhe. Damit verbunden war schließlich auch eine geringere Ortsauflösung bzw. Genauigkeit in den Ergebnissen, verglichen mit den Messungen an den kleinen Probekörpern. Die Bewertung der gewonnenen Ergebnisse ist daher nur in qualitativer Form möglich. In ähnlicher Weise wie bei der Vorstellung der Ergebnisse bei den kleinen Probekörpern, sind in der *Abbildung 5.49* und *Abbildung 5.50* beispielhafte Ergebnisse aus der Endphase des Ermüdungsversuches dargestellt. Die *Abbildung 5.49* zeigt die horizontalen Dehnungskomponenten bei 99 % der Lebensdauer, wobei links die bleibenden Verformungen unter der Grundlast S_0 abgebildet sind und rechts die Gesamtdehnung unter der Oberlast S_{max}. Beide unterscheiden sich nur geringfügig, was sich gut mit den Messungen der Querdehnungen deckt. In der *Abbildung 5.50* finden sich dagegen die parallel zur Belastungsrichtung entstandenen vertikalen Dehnungskomponenten, die ebenfalls bei 99 % der Lebensdauer einmal unter der Grundlast S_0 und einmal unter der Oberlast S_{max} erfasst wurden. Diese zeigen, anders als die Querdehnungen, einen sichtbaren Unterschied zwischen dem belasteten und dem unbelasteten Zustand, was sich ebenso gut mit den Messungen der Längsdehnungen in *Abbildung 5.44 links* deckt. Generell zeigen die Aufnahmen erwartungsgemäß sowohl bei den Querdehnungen als auch bei den Längsdehnungen die gleichen inhomogenen Dehnungsverteilungen wie sie in Kapitel 5.1.3 und Kapitel 5.3.3 bei den kleinen Probekörpern beobachtet wurden. Quantitative Unterschiede, die auf einen Effekt aus der Probengröße oder auch der geringeren Prüffrequenz resultieren, lassen sich aus diesen Messergebnissen aber nicht ableiten. Sie belegen nur, dass der Lastabtrag in den großen Proben genauso inhomogen erfolgt wie bei den kleinen Probekörpern und sich dabei eine deutliche Anisotropie einstellt.

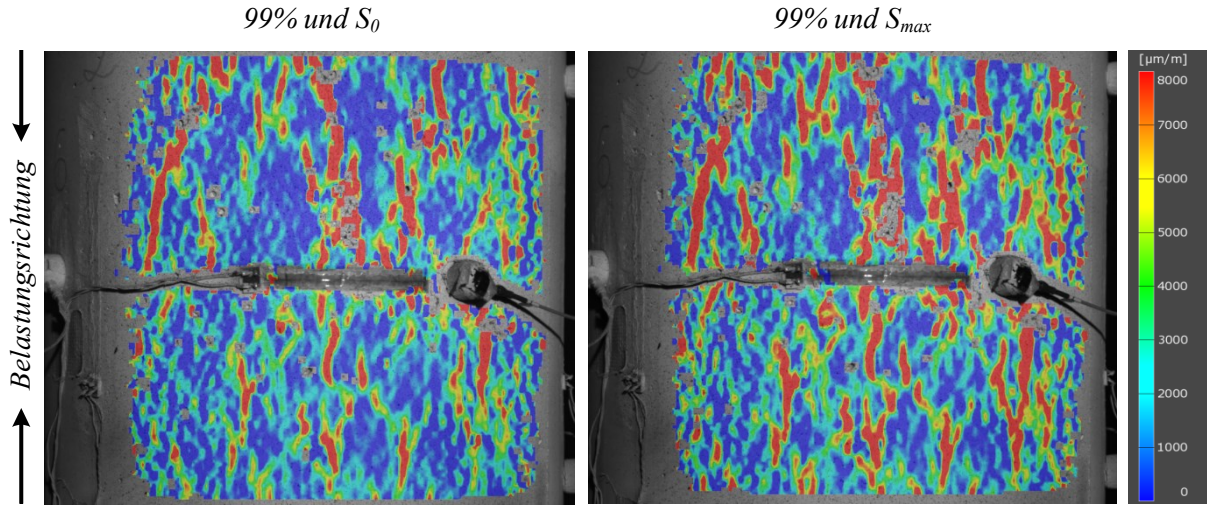

Abbildung 5.49: *Verteilung der horizontalen Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (links) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

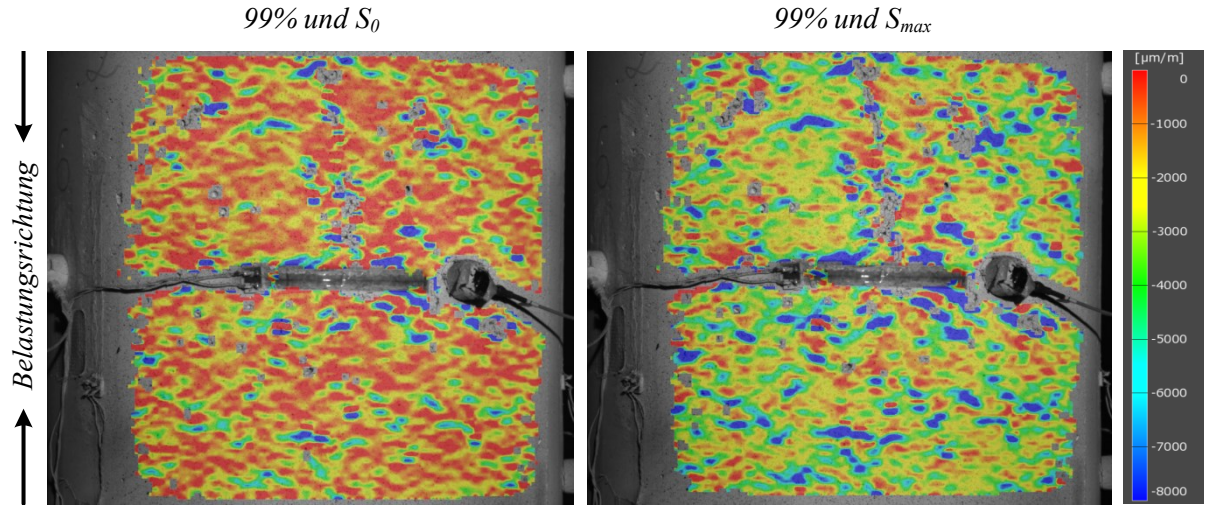

Abbildung 5.50: *Verteilung der vertikalen Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 (links) und unter der Oberlast S_{max} (rechts)*

5.5.4 Schlussfolgerungen

Die verhältnismäßig wenigen Versuche an den großen Probekörpern dienten vorrangig dem Zweck, der Frage nachzugehen:

Welchen Einfluss hat die Skalierung beim Beton auf das Ermüdungsverhalten und den dazugehörigen Schädigungsvorgang?

Im Großen und Ganzen zeigen die großen Proben sowohl in den statischen als auch in den zyklischen Prüfungen ein ähnliches Verhalten wie die kleinen Probekörper. Allerdings weisen die verschiedenen Messergebnisse bei den statischen und den zyklischen Prüfungen im Einzelnen teils deutliche Unterschiede zwischen den kleinen und den großen Proben auf.

In den gemessenen statischen Festigkeiten gibt es eindeutige Unterschiede zwischen den kleinen und den großen Proben, die ziemlich sicher der veränderten Probengröße zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich um eine ca. 8 % geringere mittlere Festigkeit, die die großen Proben gezeigt haben. Ein konkreter Faktor für den Größeneffekt kann aber wegen der geringen Anzahl an Versuchen und den großen Streuungen in den Ergebnissen nicht angegeben werden.

Unter zyklischer Beanspruchung zeigt sich der Schädigungsprozess bei den großen Probekörpern in gleicher Weise wie bei den kleinen Probekörpern. Trotzdem ergeben sich auch hier teils deutliche Unterschiede zwischen den beiden Probengrößen. Am Ende der Lebensdauer stellen sich bei den Verformungen, bei den horizontalen Ultraschallgeschwindigkeiten und auch bei den Reduzierungen der E-Module im unteren Spannungsbereich Veränderungen ein, die sich wesentlich von denen bei den Kleinproben unterscheiden. Sie sind nicht nur größer als die aus den vergleichbaren LHC-Versuchen, sondern übertreffen teilweise sogar jene aus den bedeutend länger gelaufenen UHC-Versuchen.

Es kann aber nicht eindeutig zugeordnet werden, aus welchem Einfluss diese Unterschiede resultieren. Klar ist aber, dass die beobachteten Unterschiede nicht alleine auf die im Vergleich zu den Versuchen an den kleinen Proben kleinere Prüffrequenz und die reduzierten Lastniveaus zurückgeführt werden können. Das haben besonders auch die Vergleiche mit den Ergebnissen aus den UHC-Versuchen gezeigt. Vielmehr ist anzunehmen, dass auch die Skalierung dabei eine wesentliche Rolle spielt, deren Auswirkungen sich schließlich mit denen aus der Prüffrequenz und den Lastniveaus überlagern bzw. vermischen. Daher kann besonders anhand dieser wenigen Versuche keine konkrete Aussage über den Größeneffekt unter zyklischen Beanspruchungen getroffen werden. Aufgrund der Beobachtungen kann aber festgestellt werden, dass die Skalierung nicht nur bei statischen, sondern auch bei zyklischen Beanspruchungen einen Einfluss auf das Materialverhalten hat. Darüber hinaus wurde ebenfalls nachgewiesen, dass der Schädigungsvorgang auch an den großen Proben mit denselben Messtechniken wie bei den kleinen Probekörpern beobachtet werden kann.

Prinzipiell lässt sich aus den hier gemachten Beobachtungen zumindest ableiten, dass sich der Größeneffekt bei größeren Probekörpern in einer geringeren statischen und zusätzlich geringeren zyklischen Beanspruchbarkeit gegenüber kleineren Proben widerspiegelt.

Kapitel 6

Die Schädigungsevolution im Beton

Auf Grundlage der im vorangegangenen Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse und Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen werden in diesem Kapitel weiterführende Erkenntnisse im Bezug auf die Schädigungsevolution im Beton abgeleitet. Dazu werden zu Beginn die wesentlichen experimentellen Erkenntnisse zum Ermüdungsvorgang dargelegt und zugleich mit Hilfe numerischer Simulationen ergänzt. Auf Basis aller experimentell und numerisch gewonnenen Erkenntnisse wird schließlich eine Beschreibung abgeleitet, wie der Ablauf des Ermüdungsprozesses im Betongefüge vermutlich vonstattengeht. Anschließend werden in diesem Zusammenhang nachfolgend auch einige prinzipielle Aspekte zum Thema der Ermüdungsschädigung im Beton diskutiert. Des Weiteren erfolgt eine Betrachtung aller in den Experimenten eingesetzten Messmethoden und der daraus gewonnenen Größen im Hinblick darauf, wie gut ihre Eignung als Schädigungs- und Lebensdauerindikator ist und wie sich deren Messbarkeit darstellt. Zum Abschluss des Kapitels wird schließlich ein empirischer Ansatz vorgestellt, der in der Lage ist, die beobachteten ermüdungsbedingten Entwicklungen besonders relevanter Materialgrößen abzubilden.

6.1 Prinzipielle experimentelle und theoretische Erkenntnisse zum Ermüdungsvorgang im Beton

Numerische Feststellungen

Um den prinzipiellen Lastabtrag sowie die Beanspruchungsverteilung innerhalb des Materialgefüges besser verstehen zu können, wurden ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen numerische Berechnungen durchgeführt. Hierfür wurde vereinfachend eine linear-elastische Berechnung an einem 2-dimensionalen Gefügeausschnitt auf Mesoebene mit Hilfe des FEM-Programms ANSYS durchgeführt. Da es nur um ein qualitatives Verständnis zum Belastungszustand im Materialgefüge ging, sollte dieser Ansatz völlig ausreichend sein, um die prinzipiellen Zusammenhänge wiederzugeben. Soweit als möglich sind die Modellierung und die Berechnung an die Bedingungen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen angepasst.

Als erstes wurde die 3-dimensionale Geometrie des Betons auf Mesoebene für einen Würfel mit 100 mm Kantenlänge (RVE) vereinfachend mit Kugeln als Zuschlägen erzeugt, welche in *Abbildung 6.1 links* dargestellt ist. Dies erfolgte in Anlehnung an [WANG, KWAN ET AL. 1999], [HÄFNER, ECKARDT ET AL. 2006] und [WRIGGERS & MOFTAH 2006]. Die Kornverteilung wurde entsprechend der Fuller-Sieblinie mit Körnern von 2 mm bis 16 mm bestimmt, wobei ein Zuschlagsanteil von 70 % angesetzt wurde. Aus dem 3-dimensionalen Modell wurde für die numerische Berechnung schließlich ein 2-dimensionaler Ausschnitt mit 50 mm Kantenlänge extrahiert, der in *Abbildung 6.1 rechts* wiedergegeben ist.

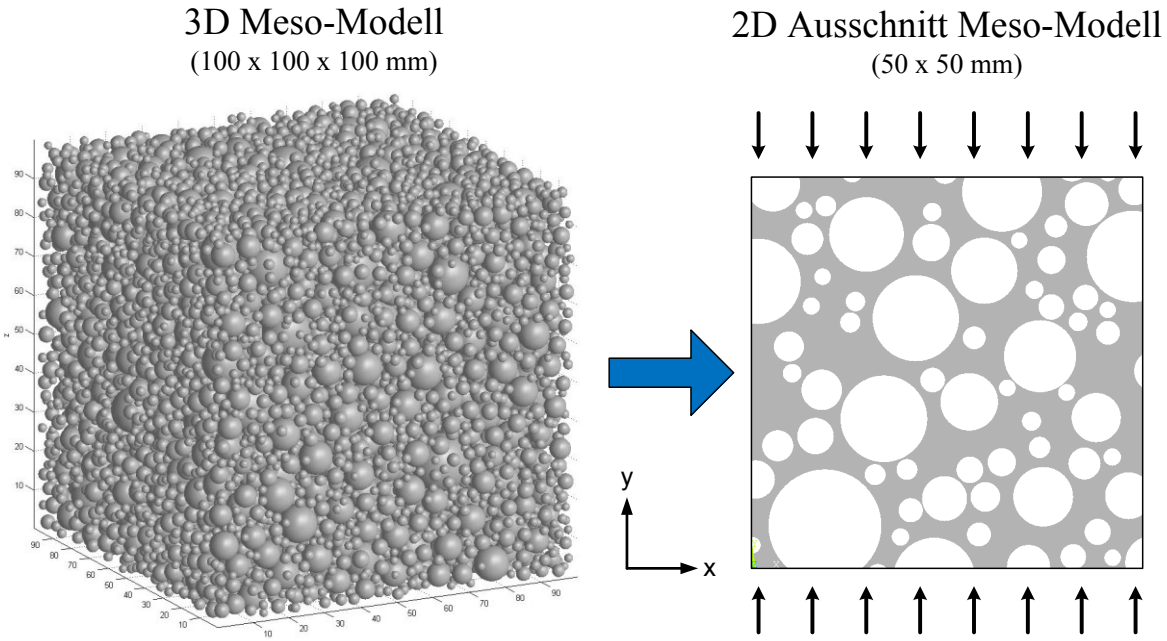

Abbildung 6.1: *3-dimensionale Modellierung der Zuschlagsanordnung nach der Fuller-Kornverteilung mit 16 mm Größtkorn und 70 % Zuschlagsanteil (links), erzeugter 2-dimensionaler Schnitt aus einem Teilbereich des Würfels zur Simulation des Lastabtrags mit ANSYS (rechts)*

Bei den beiden betrachteten Materialphasen handelt es sich zum einen um die großen Zuschlagskörner und zum anderen um den Zementmörtel, der die Matrix aus den feinen Zuschlagsanteilen und dem Zementstein widerspiegelt. Die für die numerischen Berechnungen notwendigen Materialwerte für die einzelnen Phasen wurden aus der Literatur entnommen. Nach Auswertungen im Hinblick auf Normalbeton von [KWAN, WANG ET AL. 1999], [ECKARDT, HAEFNER ET AL. 2004], [WILHELM 2006], [WRIGGERS & MOFTAH 2006], [KIM & ABU AL-RUB 2011] und weiteren, sind die in *Tabelle 6.1* aufgeführten Materialwerte für die Berechnung ausgewählt worden.

Tabelle 6.1: *Aus der Literatur abgeleitete Materialeigenschaften für die Zuschläge und den Zementmörtel für Normalbeton im numerischen Modell*

Phase	***E-Modul [N/mm²]***	***Querdehnzahl [-]***
Zementmörtel	20.000	0,2
Zuschlag	60.000	0,2

Die vertikale Beanspruchung des Gefügeausschnittes wurde in Form einer eingeprägten Verschiebung der oberen Modellkante aufgebracht. Dies wurde vor dem Hintergrund gewählt, da im Gefüge vorrangig eine inhomogene Spannungsverteilung herrscht, aber ein weitgehend gleichmäßiger Verschiebungszustand. In Verbindung zu den Ermüdungsversuchen wurde eine Verschiebung verwendet, die einer Beanspruchung von ca. σ_y = 48 N/mm² entspricht und damit gleich der Oberlast S_{max} in den LHC-Versuchen ist.

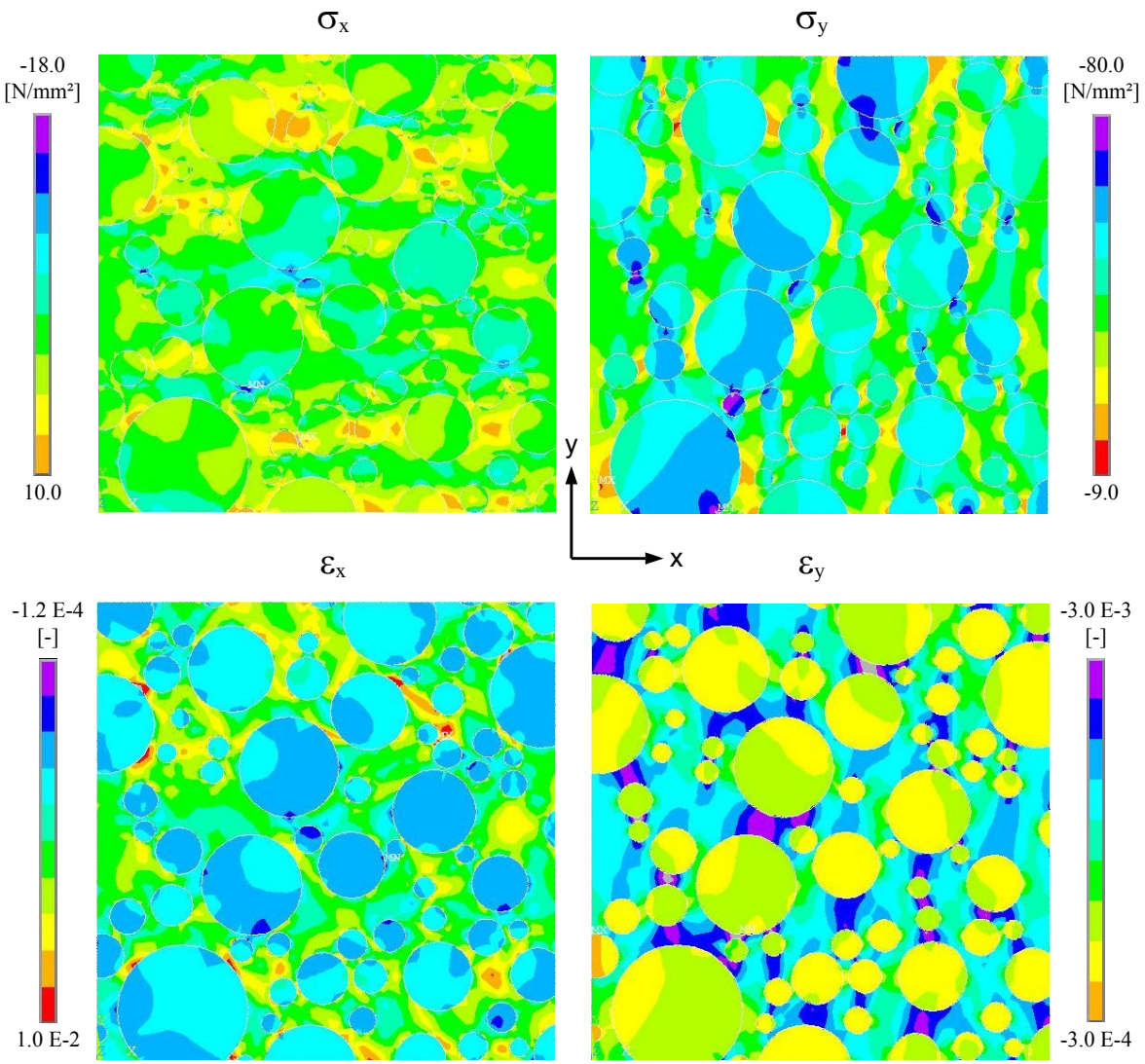

Abbildung 6.2: *Ergebnisse aus der linear-elastischen Berechnung mit ANSYS für eine vertikale Beanspruchung. Oben die inhomogene Spannungsverteilung in x-Richtung (links) und in y-Richtung (rechts). Unten die zugehörige inhomogene Dehnungsverteilung in x-Richtung (links) und in y-Richtung (rechts)*

Die Ergebnisse für die Verteilungen der Spannungen und der Dehnungen in x- und y-Richtung sind in *Abbildung 6.2* veranschaulicht. Sie zeigen deutlich, dass sich prinzipiell aufgrund der ungleichen Steifigkeiten im Gefüge eine komplexe und sehr inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilung einstellt. Es ist außerdem gut zu erkennen, wie die steiferen Zuschläge die vertikalen Druckbeanspruchungen förmlich anziehen, so dass diese an den Körnern entlang durch das Gefüge verlaufen (*Abbildung 6.2 oben rechts*). Das Resultat sind lokal teils sehr hohe Druckspannungskonzentrationen, speziell zwischen großen Zuschlägen. Auf diese Weise sind lokale Überschreitungen von Materialfestigkeiten möglich, bei Beanspruchungen, die makroskopisch deutlich unterhalb der Druckfestigkeit des Betons liegen. Auch nennenswerte Zugspannungen, vorrangig horizontal orientiert, werden dabei im Gefüge lokal erzeugt. Im Bereich der hohen Druckspannungen stellen sich im Zementmörtel zwangsläufig teils sehr hohe negative Dehnungskonzentrationen ein, wohingegen die Zuschläge selbst nur geringe Dehnungen erfahren (*Abbildung 6.2 unten rechts*). Diese numerischen Ergebnisse stehen im Einklang mit den gemachten experimentellen Beobachtungen.

Experimentelle Beobachtungen

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen haben im Bezug auf den ermüdungsbedingten Schädigungsvorgang im Beton verschiedene Fakten und Erkenntnisse geliefert.

Ganz allgemein haben die Versuche gezeigt bzw. bestätigt, dass es sich beim Ermüdungsprozess im Beton um einen relativ komplexen Vorgang handelt, der das Materialverhalten in vielfältiger Weise beeinflusst und verändert. Beim makroskopischen Langzeitverhalten sind alle beobachteten Materialeigenschaften während des Ermüdungsvorgangs einem mehrphasigen nichtlinearen Evolutionsprozess unterworfen. Dabei findet überwiegend eine Degradation der Materialeigenschaften während der Lebensdauer statt. Die ermüdungsbedingten Veränderungen im Materialgefüge spiegeln sich in unterschiedlich starken Ausprägungen in den einzelnen untersuchten Materialeigenschaften wider.

Entsprechend der heterogenen Gefügestruktur des Betons konnten innerhalb des Materialgefüges auch sehr inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilungen festgestellt werden. Darin enthalten sind auch Bereiche mit sehr hohen lokalen Konzentrationen von Spannungen und Dehnungen, wobei sich ausschließlich im Zementmörtel bzw. Zementstein die hohen Dehnungskonzentrationen einstellen. Dies zeigen auch die vorangegangenen numerischen Simulationen.

Die durch die einaxiale Ermüdungsbeanspruchung in den Beton eingetragene Materialschädigung besitzt eine ausgeprägte Anisotropie. Sie äußert sich in stark richtungsabhängigen Veränderungen der einzelnen Materialeigenschaften sowie auch in an der Belastungsrichtung ausgerichteten Veränderungen im Materialgefüge selbst.

Auch im Kurzzeitmaterialverhalten spiegeln sich die ermüdungsbedingten Gefügeveränderungen wider. Sie führen zu einer über die Lebensdauer fortlaufenden deutlichen Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons, die in gleicher Weise wie die anderen Materialeigenschaften einem Evolutionsprozess unterworfen ist. Besonders an der Spannungs-Dehnungs-Beziehung zeigen sich zudem die zum Teil stark vom Beanspruchungsniveau abhängigen, unterschiedlich ausfallenden Veränderungen im Materialverhalten. Im Wesentlichen weisen sie mit auf verschiedene im Gefüge ablaufende Veränderungsprozesse hin. Aus dem Verhalten der einzelnen beobachteten Materialeigenschaften lässt sich zum einen auf stark zeit- und zyklenabhängige, also viskose Veränderungsprozesse im Gefüge schließen. Zum anderen weisen die Ergebnisse auch auf ausgesprochen zeit- und zyklenunabhängige Prozesse hin, die vorrangig durch die Höhe der Beanspruchung bestimmt werden.

Im Vergleich zeigen die Proben in den LHC- und UHC-Versuchen und auch die Großproben unter den aufgebrachten Ermüdungsbeanspruchungen prinzipiell sehr ähnliche Verhaltensweisen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den währenddessen im Materialgefüge abspielenden Vorgängen um ähnliche Prozesse handelt, was für einen vergleichbaren Ermüdungsprozess spricht. Neben den Ermüdungsversuchen haben zudem aber auch die Kriechversuche relativ ähnliche Veränderungen, auch in Form von Schädigungen inklusive einer Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung, hervorgebracht.

Im Detail gibt es zwischen allen Beanspruchungsfällen aber doch Unterschiede. Die bis zum Versagen eingetragenen Energien und auch der Schädigungszustand an sich differieren in allen Fällen. Höhere Lasten sowie geringere Laufzeiten und Lastzyklen bedingen unter anderem geringer ausgeprägte zeitabhängige viskose Veränderungen. Dadurch werden geringere Energiemengen bis zum Versagen eingetragen und auch der Schädigungsgrad erscheint weniger stark ausgeprägt, was auch die statischen Versuche verdeutlicht haben.

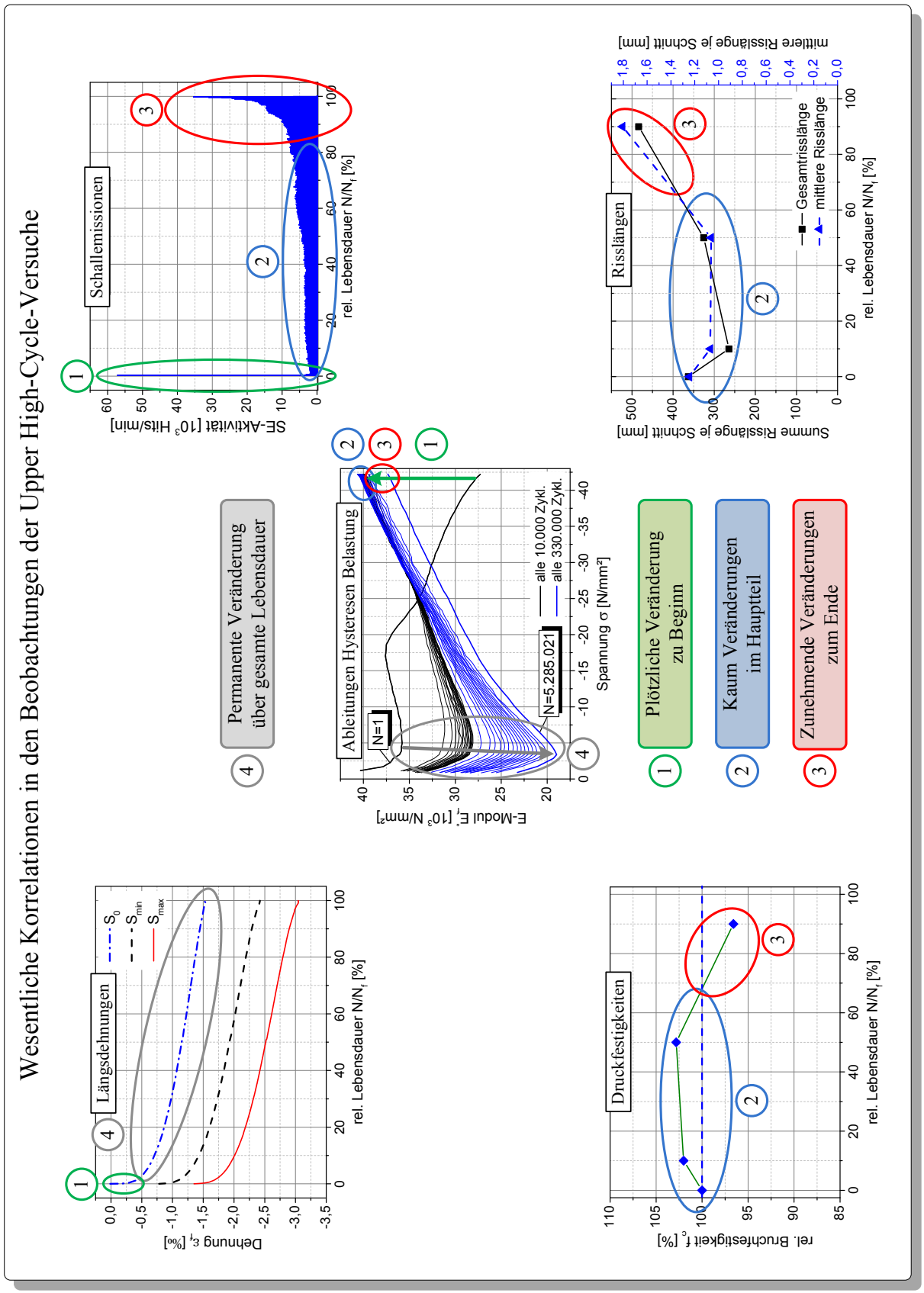

Abbildung 6.3: *Grafische Veranschaulichung wesentlicher Korrelationen in den Versuchsergebnissen aus den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe*

Wesentliche Hinweise auf die möglichen Ursachen der verschiedenen festgestellten Phänomene des Ermüdungsprozesses lassen sich aus einer genaueren Betrachtung der einzelnen Korrelationen in den gewonnenen Untersuchungsergebnissen gewinnen. Diese liefern schließlich die Grundlagen für die im nachfolgenden Kapitel 6.2 abgeleitete Beschreibung der möglichen Abläufe im Materialgefüge während des Ermüdungsvorgangs.

Eine entscheidende Rolle bei der Analyse der Zusammenhänge spielen die Entwicklungen der Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Linien aus den Hysteresen sowie die aus den Vergleichen mit den anderen Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnisse. Wichtige Zusammenhänge aus den Ergebnissen der UHC-Versuche sind in der Zusammenstellung in *Abbildung 6.3* veranschaulicht. Die entscheidenden Erkenntnisse, die sich aus diesen Ergebnissen auch im Zusammenhang mit denen der anderen Versuchsreihen ableiten lassen, sind folgende:

Es ist anzunehmen, dass unter den untersuchten äußeren Druckbeanspruchungen im Zementstein des Betons eine fortlaufende sowie stark zeit- und zyklenabhängige Entwicklung von viskosen Verformungen hervorgerufen wird. Sowohl die makroskopischen bleibenden Verformungen als auch die im unteren Spannungsbereich entstehende Auflockerung (Steifigkeitsreduzierung) weisen eine entsprechende Charakteristik auf und scheinen mit ihnen verknüpft bzw. ursächlich aus ihnen hervorgerufen zu sein. Untermauert wird diese Annahme durch die im Vergleich gewonnenen Erkenntnisse aus den LHC-Versuchen und den Kriechversuchen. Sie deckt sich außerdem mit den Angaben in [LOCHNER 2000], wo dem Zementstein viskoses Fließverhalten und den Zuschlägen dagegen elastisches Verhalten zugeschrieben wird. Darüber hinaus entspricht sie in Teilen auch dem Modellansatz von [MEHMEL & KERN 1962], die den Zementstein als hoch-viskose Phase definieren.

Des Weiteren findet offensichtlich eine ausgeprägte und die Tragfähigkeit des Gefüges beeinflussende Rissbildung in den UHC-Versuchen erst am Ende der Lebensdauer statt. Zum Ausdruck kommt dies durch die nahezu unveränderte Steifigkeit im oberen Spannungsbereich, die geringe SE-Aktivität, die unveränderte Bruchfestigkeit und das kaum veränderte Rissbild im Materialgefüge. All diese Beobachtungen haben bis kurz vor Ende der Lebensdauer Bestand, bevor dort alle genannten Größen zu deutlichen Veränderungen übergehen. Untermauert werden diese Feststellungen zusätzlich durch den Vergleich mit den Beobachtungen aus den LHC-Versuchen. Zugleich wird mit diesen Feststellungen die Ursache der bleibenden Verformungen sowie der Auflockerungen im unteren Spannungsbereich in viskosen Veränderungsprozessen unterstützt und bestärkt. Im Gegenzug scheint die stattfindende Auflockerung im unteren Spannungsbereich nicht mit einer ausgeprägten Rissbildung verknüpft zu sein.

Die zu Beginn der Lebensdauer festzustellende Versteifung ist sehr plötzlich, korreliert mit einer ebenfalls nur kurzzeitig sehr hohen SE-Aktivität zu Beginn, findet sich aber nicht in einer feststellbaren wesentlichen Veränderung im Rissbild wieder. Allenfalls ein ebenfalls plötzlicher Anstieg in den bleibenden Verformungen kann ausgemacht werden. Eine Ursache bzw. auch eine Kopplung der Versteifung mit den viskosen Verformungen scheint aber prinzipiell nicht vorhanden zu sein.

6.2 Der Schädigungsprozess im Beton unter Ermüdungsbeanspruchung

Auf Grundlage der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten experimentellen Beobachtungen und Erkenntnisse wird im Folgenden eine Beschreibung der möglichen Abläufe während des hochzyklischen Ermüdungsvorgangs unter Druckschwellbeanspruchungen im Gefüge des Normalbetons vorgestellt. Der Ermüdungsvorgang wird dazu im Wesentlichen in die bereits bekannten drei Phasen unterteilt, die in der *Abbildung 6.4* dargestellt sind, und zusätzlich in den unbeanspruchten Ausgangszustand.

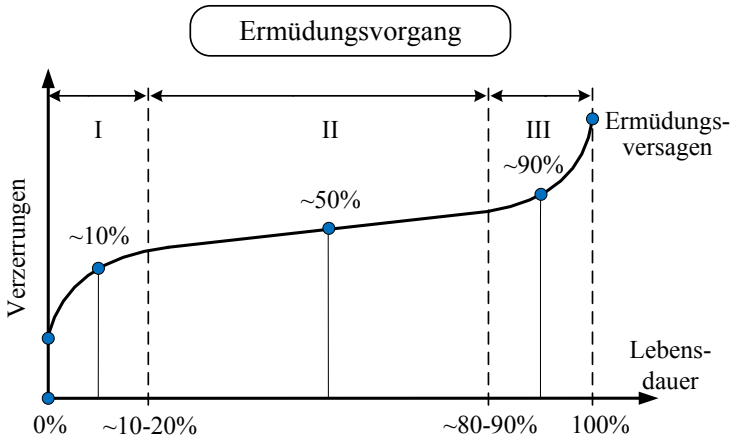

Abbildung 6.4: *Schematische Darstellung der drei Phasen des Ermüdungsvorgangs sowie der Entnahmezeitpunkte für die durchgeführten Gefügeuntersuchungen, auf die in diesem Kapitel zur Erklärung eingegangen wird*

6.2.1 Phase 0 – Der Ausgangszustand

Der Ausgangszustand des unbeanspruchten, aber bereits erhärteten Betons stellt eigentlich kein ungeschädigtes Materialgefüge dar, sondern zeigt vielmehr einen auf vielfältige Weise bereits vorgeschädigten Zustand des Gefüges. Neben zahlreichen Luft-, Gel- und Kapillarporen im Zementstein sowie teilweisen Vorschädigungen in den Zuschlägen, ist dieser Zustand äußerlich vorwiegend durch Mikrorisse im Zementstein sowie der Kontaktzone (ITZ) charakterisiert. Diese Mikrorissstruktur setzt sich, wie in den experimentellen Untersuchungen festgestellt und in *Abbildung 6.5* veranschaulicht, über viele Betrachtungsebenen hinfort. Sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch unter dem REM konnte diese Mikrorissstruktur im Zementstein und der ITZ festgestellt werden, die keine bevorzugte Orientierung aufwies. Auf der wesentlich tieferen Betrachtungsebene des REMs zeigten die Risse sogar eine deutlich feinere und dichtere Struktur.

Zu berücksichtigen ist zwar, dass durch die Probenpräparation im Rahmen der Untersuchungen auch zusätzliche Schädigungen in das Gefüge eingetragen wurden [KUSTERMANN 2005], dies liefert aber keine alleinige Erklärung für die festgestellte Rissstruktur. Da die Risse zudem keine ausgeprägte Orientierung aufweisen, spricht dies weniger für ein Ergebnis aus der Bearbeitung, sondern vielmehr für ein Resultat aus dem Hydratationsprozess und dem dazugehörigen Schwinden. Wie bereits vielfach in der Literatur beschrieben [HSU 1963; BAZANT 1986; VAN MIER 1997; KUSTERMANN 2005; THIENEL 2008], kann besonders bei Normalbeton

davon ausgegangen werden, dass infolge des Hydratationsprozesses und des Schwindens im Zementstein zum Teil beträchtliche Eigenspannungen in Form von vorwiegend beliebig orientierten Zugbeanspruchungen entstehen. Deren Ausprägung wird je nach Betonzusammensetzung und Aushärtungsbedingungen unterschiedlich groß sein. Diese Eigenspannungen werden sich teilweise in beliebig gerichteten Zugrissen im Zementstein sowie der ITZ entspannen und über viele Betrachtungsebenen hinweg verteilt sein.

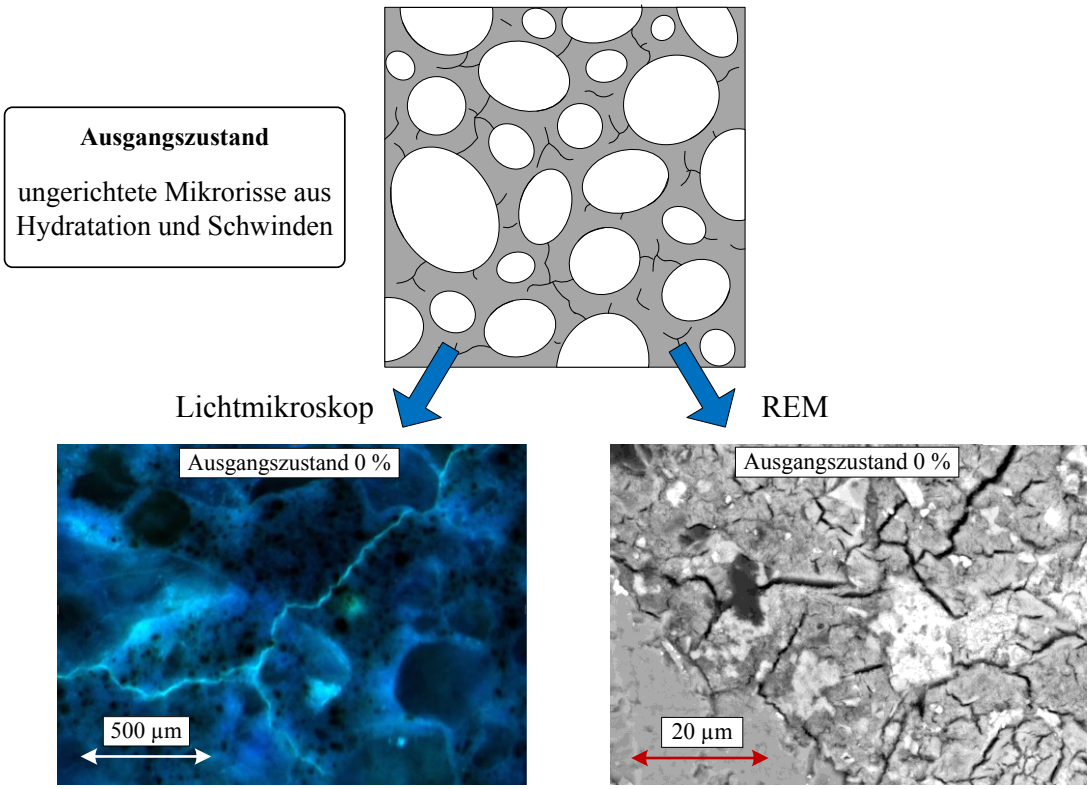

Abbildung 6.5: *Veranschaulichung des vorhandenen Risszustandes im unbeanspruchten Ausgangszustand des Zementsteins infolge Schwinden und Hydratation, sowie entsprechende Beispielaufnahmen vom Lichtmikroskop und vom REM*

Da die Risse bereits während des Hydratationsprozesses entstehen, besteht weiterhin die Möglichkeit, dass aus der fortlaufenden Hydratation auch Hydratationsprodukte wie CSH-Kristallfasern in die Risse hinein bzw. über die Risse hinweg wachsen können. Die durchgeführten REM-Aufnahmen haben Hinweise darauf gegeben. Derartige Rissüberbrückungen erlauben schließlich die Übertragung von Spannungen über die Risse hinweg. Somit stellt sich der unbeanspruchte Ausgangszustand des Betons als ein „vorgeschädigter“ Zustand dar, der durch eine vielfältige Mikrorissstruktur im Zementstein sowie einen Eigenspannungszustand im Gefüge gekennzeichnet ist. Wobei anzunehmen ist, dass eine Übertragung von Spannungen über die Mikrorisse hinweg bis zu einem bestimmten Grad möglich ist.

6.2.2 Phase I – Die ausgleichende Entwicklung

Im Rahmen des durch zyklische Druckbeanspruchungen induzierten Ermüdungsvorgangs ist die Phase I im Wesentlichen durch das Verhalten des Betons von der ersten Belastung an bis zum Moment, der bei ca. 10 – 20 % der Ermüdungslebensdauer erreicht ist, charakterisiert. Diese Phase lässt sich als eine Art Ausgleichsphase beschreiben, und das während dieser

Phase in den hochzyklischen Ermüdungsversuchen beobachtete Materialverhalten ist in der *Abbildung 6.6* zusammengestellt.

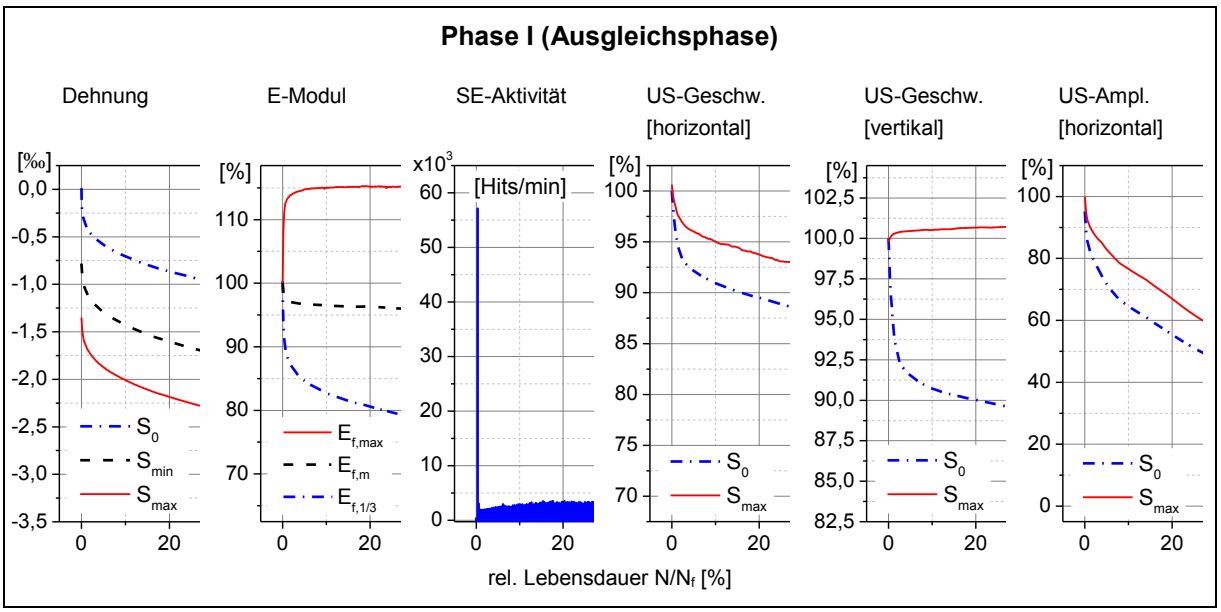

Abbildung 6.6: *Zusammenstellung der in den UHC-Versuchen in der Phase I gemessenen Entwicklungen bei den Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten und -Amplituden*

Erstbelastungen

Durch das erste Aufbringen der Druckbeanspruchung zu Beginn des Ermüdungsvorgangs wird das Materialgefüge erstmals einer derartigen Belastung ausgesetzt. Aufgrund der sehr inhomogenen Gefügestruktur wird sich eine ebenfalls sehr inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilung innerhalb des Betongefüges einstellen. Dies wird durch die in den Versuchen gemessenen Oberflächendehnungen mit ARAMIS, den in *Abbildung 6.2* gezeigten numerischen Simulationen sowie auch z. B. durch die Untersuchungen von [LUSCHE 1972] bestätigt. Innerhalb des Gefüges wird dabei ein breites Spektrum an lokalen Spannungskonzentrationen mit unterschiedlich hohen Beanspruchungsniveaus entstehen. Aufgrund der räumlichen Anordnung der heterogenen Gefügestruktur bilden sich zudem infolge der einaxialen äußeren Beanspruchung innerhalb des Gefüges lokale Beanspruchungen aus, die in beliebige Raumrichtungen orientiert sein können. Daraus resultieren zwangsläufig neben Druck- auch Zugbeanspruchungen sowie mehraxiale Beanspruchungszustände im Gefüge.

In der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehung war zu Beginn eine schlagartige Versteifung im oberen Spannungsbereich zu beobachten (*Abbildung 6.3*). Sie erfolgt schnell und zeigt kaum eine Zeit- und Zyklenabhängigkeit. Außerdem korreliert sie gut mit dem kurzen Spitzenwert der SE-Aktivität und auch in den bleibenden Verformungen kann ein großer plötzlicher Anstieg verzeichnet werden (*Abbildung 6.6*). Eine signifikante Veränderung im Rissbild und auch in der Druckfestigkeit ist jedoch nicht zu beobachten (*Abbildung 6.3*).

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass mit dem Aufbringen der Erstbelastung alle zeitunabhängigen plastischen Verformungsprozesse im Materialgefüge aktiviert werden, die sich bis zum Erreichen der Oberlast S_{max} auslösen lassen. Dabei können unter anderem lokale Spannungskonzentrationen dazu führen, dass bereits bei sehr geringen äußeren Beanspruchungen lokal im Gefüge Tragfähigkeiten überschritten und plastische Verformungen sowie auch

Schädigungen ausgelöst werden. Vor dem Hintergrund der beschriebenen experimentellen Beobachtungen ist außerdem anzunehmen, dass die festgestellte Versteifung vermutlich aus einmaligen Setzungseffekten in der bereits im Ausgangszustand vorhandenen Rissstruktur im Zementstein resultiert. Eine Rolle spielen dabei vermutlich Prozesse im Gefüge, wie das Zerstören der zum Teil vorhandenen, noch aus dem Hydratationsprozess stammenden Zementbestandteile, welche in die Risse hineingewachsen sind oder diese gar überbrücken. Darüber hinaus werden sich die vorrangig in Beanspruchungsrichtung gegenüberliegenden und zum Teil stark zerklüfteten Kontaktflächen der Risse ineinander einarbeiten, wobei sich Ecken und Ränder abreiben. Noch vorhandene Eigenspannungen im Gefüge können zudem zusammen mit der aufgebrachten Beanspruchung in gewissem Rahmen zusätzliches Risswachstum im Zementstein auslösen. All diese Prozesse sind zum größten Teil nach wenigen Lastzyklen abgeschlossen, liefern eine Erklärung für die hohe SE-Aktivität und führen zugleich zu keiner wesentlichen Veränderung im Rissbild. Darüber hinaus führen sie im weiteren Verlauf der Lebensdauer zu keinen nennenswerten Veränderungen mehr.

Beobachtungen während der Phase I

Die beschriebene stark inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilung im Betongefüge bleibt prinzipiell auch unter der zyklischen Beanspruchung während der Phase I erhalten, was auch die entsprechenden Oberflächenmessungen mit ARAMIS wiedergeben (Anhang B1 *Abbildung B1 16* und *Abbildung B1 17*). Innerhalb dieser Phase I des Ermüdungsvorgangs weisen die meisten gemessenen makroskopischen Größen eine anfänglich starke Veränderung auf, die zum Ende der Phase I hin abklingt und dort in einen stabilen Evolutionsprozess übergeht. Die entsprechenden Ausschnitte aus den Verläufen der UHC-Versuche sind in der *Abbildung 6.6* dargestellt. Darüber hinaus erfährt auch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung generell eine deutlich fortlaufende Veränderung, die besonders stark im Bezug auf die der Erstbeanspruchung ausfällt (*Abbildung 5.6* und Anhang B1 *Abbildung B1 11*). Es kommt sogar frühzeitig zu einer Umkehr der Krümmung des Belastungsastes. Im unteren Spannungsbereich findet dabei über die gesamte Phase I hinweg eine fortlaufende Auflockerung (Steifigkeitsreduzierung) statt (*Abbildung 6.3*). In gleicher Weise stellt sich eine fortlaufende Zunahme der bleibenden Verformungen ein. Hingegen findet nach der plötzlichen Versteifung im oberen Spannungsbereich zu Beginn nahezu keine weitere Veränderung an dieser Stelle mehr statt (*Abbildung 6.3*). Auch die SE-Aktivität geht nach der anfänglichen Spitze auf ein stabiles Minimum zurück (*Abbildung 6.6*). Kaum eine Veränderung über die gesamte Phase I kann im Prinzip bei der Druckfestigkeit (*Abbildung 5.10*) und auch im untersuchten Rissbild im Gefüge festgestellt werden (*Abbildung 5.15*).

Generell lässt sich daher festhalten, dass ein ausgeprägtes Risswachstum während der Phase I nicht stattzufinden scheint. Die sich trotzdem innerhalb dieser Phase entwickelnden Veränderungen in einigen Materialeigenschaften resultieren entweder aus einmaligen Setzungseffekten oder sind in viskosen Verformungen des Zementsteins begründet.

Als Grundlage für eine Beschreibung der Vorgänge im Betongefüge unter Ermüdungsbeanspruchungen soll zuvor kurz das prinzipielle Verhalten des Zementsteins bzw. auch des Zementmörtels unter Zug- und unter Druckbeanspruchungen betrachtet werden. Wie bereits beschrieben wurde, entstehen im Betongefüge infolge der Heterogenität zum Teil Bereiche mit hohen lokalen Zug- aber auch hohen Druckbeanspruchungen, die schließlich zu Veränderungen des Zementsteins führen. Wie die *Abbildung 6.7* aber schematisch veranschaulicht, ist die Veränderung im Zementstein in beiden Fällen von sehr unterschiedlichem Charakter. Dies steht im Einklang mit den im Kapitel 3.1 beschriebenen Erkenntnissen zum Verhalten des Betons unter monotonen Zug- und Druckbeanspruchungen.

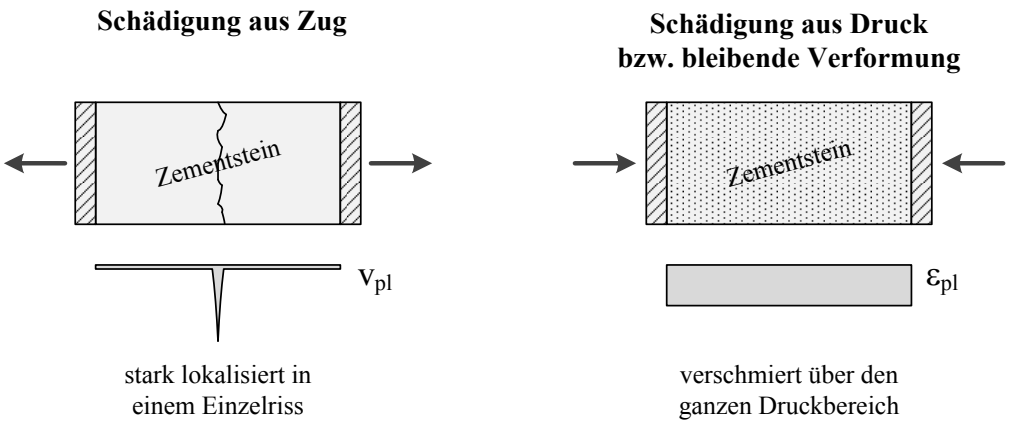

Abbildung 6.7: *Schematische Veranschaulichung der unterschiedlichen Schädigungsausbildung im Zementstein bzw. -mörtel infolge von Zug- (links) und infolge von Druckbeanspruchungen (rechts)*

Infolge der Zugbeanspruchung findet letztlich eine sehr stark lokalisierte Schädigungsausbildung in Form eines bzw. weniger Risse statt. Dagegen verteilt bzw. verschmiert sich unter Druckbeanspruchung die verändernde oder auch schädigende Auswirkung auf den gesamten betroffenen Bereich des Zementsteins, bevor es dort beim Bruch auch zu einer Lokalisierung kommt. Das hat zur Folge, dass die sich in Rissen äußernde Schädigung aus Zugbeanspruchungen gut im Gefüge zu identifizieren ist, während die verschmierte Schädigung aus Druckbeanspruchungen kaum feststellbar ist.

Vorgänge im Gefüge bei der Belastung

Basierend auf der zuvor beschriebenen Schädigungscharakteristik sowie den Feststellungen und Beobachtungen aus den experimentellen Untersuchungen, lässt sich die folgende Erklärung für die dabei im Betongefüge ablaufenden Vorgänge als mögliche Ursache ableiten.

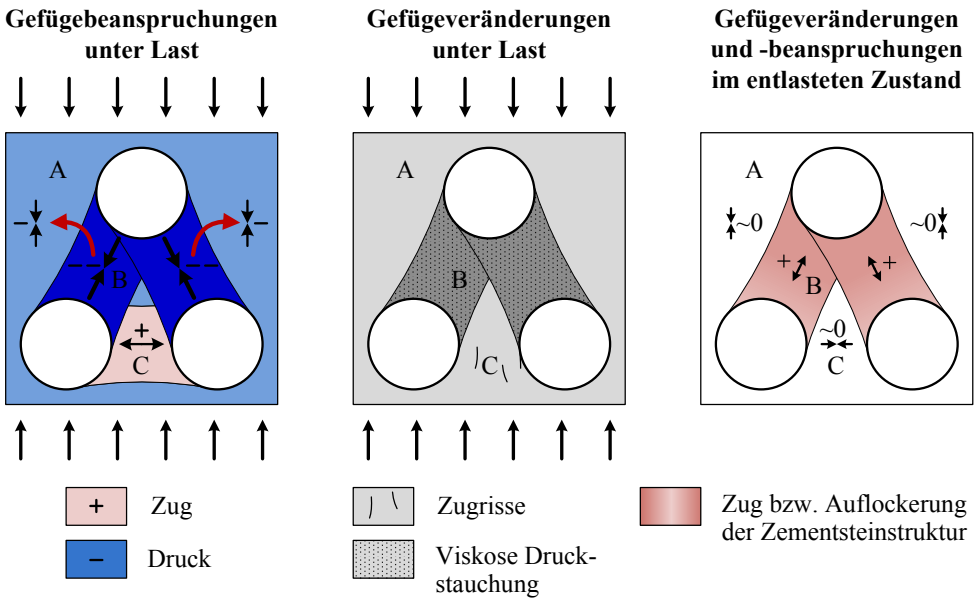

Abbildung 6.8: *Schematische Veranschaulichung der prinzipiellen Beanspruchungsverteilung im Betongefüge in der Phase I infolge einaxialer Druckschwellbeanspruchungen mit resultierender Schädigungsausbildung*

Prinzipiell findet während der Phase I, ausgehend von der sich zu Beginn der Ermüdungsbeanspruchung im Gefüge einstellenden sehr inhomogenen Spannungsverteilung, ein Belastungsausgleich im Gefüge statt, in Form einer Umlagerung von lokalen Spannungskonzentrationen. Die *Abbildung 6.8* soll dies stark vereinfacht und prinzipiell erläutern.

Beginnend in den Bereichen mit den höchsten lokalen Spannungskonzentrationen (B) werden durch sehr lokale Veränderungen im Zementstein in Form von vorrangig viskosen Verformungen die Beanspruchungsspitzen reduziert und in umliegende Bereiche (A) umgelagert. Infolge der einaxialen vertikalen äußeren Druckbeanspruchung entstehen im Gefüge auch Zugbeanspruchungen (C), die vorrangig horizontal orientiert sind. Überschreiten diese die Zugfestigkeit, entzieht sich das Material durch Ausbildung von bevorzugt vertikalen Mikrorissen dem Lastabtrag. Diese Rissbildung ist im hochzyklischen Fall offenbar sehr gering. Sie spiegelt sich in der ebenfalls geringen aber vorhandenen SE-Aktivität wider (*Abbildung 6.6*) und zeigt sich besonders in der beobachteten Veränderung in der Häufigkeitsverteilung der Rissrichtungen im Probenlängsschnitt (Anhang B1 *Abbildung B1 24*). Hier kann eine zunehmende vertikale Orientierung ausgemacht werden. Allerdings kann die beobachtete veränderte Verteilung der Häufigkeiten, wie im Kapitel 5.1.3 beschrieben, auch aus einer Reduzierung der horizontalen Risse als Folge der bleibenden vertikalen Verformungen resultieren. Die Ultraschallgeschwindigkeit wird von diesen vertikalen Mikrorissen vorwiegend in der horizontalen Richtung beeinflusst.

Die zahlreichen vorhandenen lokalen Druckkonzentrationen (B) im Betongefüge sind vermutlich der Hauptauslöser für die festgestellten makroskopischen Veränderungen im Materialverhalten. Wie es die *Abbildung 6.8* andeutet, sind diese Druckkonzentrationen (B) zwar vorrangig vertikal orientiert, können aber aufgrund der räumlichen Gefügestruktur auch horizontale Komponenten besitzen. In diesen Bereichen werden keine Mikrorisse erzeugt, sondern vorwiegend visko-elastische und visko-plastische Verformungen im Zementstein aktiviert. Sie sind möglicherweise das Resultat aus Ineinanderschieben bzw. Umorientieren von Zementsteinpartikeln, aus Gleitvorgängen im Zementstein sowie aus Auspressen bzw. Umlagern von physikalisch gebundenem Wasser im Zementstein [KNOBLAUCH & SCHNEIDER 1995; LOCHNER 2000; BOCKHOLD 2005; THIENEL 2008; ANDERS 2013]. Insgesamt handelt es sich dabei um eine Art Anpassung des Gefüges an den neuen höheren Beanspruchungszustand infolge der einaxialen Druckbeanspruchung. Diese resultiert fast ausschließlich aus den Veränderungen im Zementstein und bedingt zugleich eine Erhöhung der Anisotropie im Material. Letztendlich handelt es sich wohl im Prinzip um dieselben Vorgänge, die sich im Rahmen des Kriechens im Beton abspielen und stark zeitabhängig sind. Die weniger hoch beanspruchten umliegenden Gefügebereiche (A) bleiben währenddessen dagegen eher elastisch bzw. sind mit geringeren viskosen Verformungsanteilen behaftet.

Vorgänge im Gefüge bei der Entlastung

Wird das so geschädigte Gefüge wieder entlastet, verformen sich besonders die Gefügebereiche (A) weitgehend elastisch zurück, die einer geringeren Beanspruchung ausgesetzt waren und somit keine oder kaum viskose Verformungen oder gar Schädigung erfahren haben (*Abbildung 6.8 rechts*). Für die mit Zugrissen geschädigten Bereiche (C) bedeutet dies vorrangig ein weitestgehendes Schließen der Risse, woraus jedoch wiederum Zwangsbeanspruchungen infolge nicht mehr vollständig schließbarer Risse entstehen können. Für die Bereiche mit Veränderungen aus hohen Druckbeanspruchungen (B) hat dies hingegen einen anderen Effekt. Da dort visko-plastische Verformungen eingetragen wurden, lassen sie sich nicht einfach wieder zurückverformen. Trotzdem konnten in den Aufnahmen vom Lichtmikroskop und auch vom REM keine erhöhte Rissbildung, speziell mit horizontaler Orientierung, in

derartigen Bereichen im Gefüge ausgemacht werden. Es wird daher angenommen, dass sich entweder Zugbeanspruchungen in diesen Bereichen einstellen oder die sehr feine im REM beobachtete Rissstruktur diese Verformungen aufnimmt. Realistisch ist wohl eine Kombination aus beidem. Eine Aktivierung speziell der orthogonal zur Druckbeanspruchung liegenden feinen Risse findet, wie zuvor beschrieben, schon bei der Erstbeanspruchung statt. Berücksichtigt man die Größenordnung der eingetragenen Verformungen und zugleich ein Verschmieren der Entlastungsverformung über die vorhandene Rissstruktur, so wird schnell klar, dass diese Veränderungen im Gefüge nur sehr klein sind. Sie können daher kaum ausgemacht werden, was sich mit den experimentellen Beobachtungen deckt, die keine sichtbaren Veränderungen erkennen ließen.

Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Die in den Ermüdungsversuchen beobachteten Veränderungen in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons während der Phase I lassen sich auf Grundlage der zuvor beschriebenen lokalen Vorgänge und Veränderungen im Materialgefüge gut nachvollziehen. Ursächlich sind dafür in erster Linie die Veränderungen in den Bereichen mit hohen Druckkonzentrationen (B).

Im oberen Spannungsbereich findet, wie zuvor bereits beschrieben, schon im Rahmen der Erstbeanspruchungen die Versteifung durch vorrangig einmalige Setzungseffekte innerhalb der vorhandenen Rissstruktur im Zementstein statt. Im weiteren Verlauf sind unter Last die entsprechenden Risse immer überdrückt und speziell im Bereich der Druckkonzentrationen (B) werden vorwiegend spannungs- und zeitabhängige viskose Verformungen aktiviert. Diese führen zwar fortlaufend zu bleibenden Verformungen und einer Lastumlagerung innerhalb des Gefüges, nicht aber zu einer Veränderung der Steifigkeit des Zementsteins. Denn die Steifigkeit des Gefüges bleibt im oberen Spannungsbereich nach den ersten Belastungen zu Beginn unverändert, trotz wachsender Verformungen (siehe auch *Abbildung 6.3*).

Im untersten Beanspruchungsbereich stellt sich hingegen ein anderer Effekt ein. Da sich die weniger stark viskos verformten Druckbereiche (A) im entlasteten Zustand weiter zurückverformen wollen, als es die stärker veränderten Druckbereiche (B) wollen oder können, ergibt sich die zuvor beschriebene Auflockerung für das Gefüge im unteren Beanspruchungsbereich. Das Resultat ist eine fortlaufende Reduzierung der Gefügesteifigkeit im untersten Beanspruchungsbereich, die, wie in den Versuchen festgestellt, in direktem Zusammenhang mit den bleibenden Verformungen steht (siehe *Abbildung 6.3*). Aufgrund dessen, dass im Betongefüge bzw. im Zementstein ein breites Spektrum an lokalen Veränderungsgraden vorliegt, ergibt sich für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ein stetiger Verlauf. Dieser besitzt im untersten Spannungsbereich einen zunehmend flachen Anstieg, der mit steigender Spannung immer weiter in einen steileren Abstieg übergeht. Da es sich um zwei gegenläufige Phänomene handelt, bedingen diese schließlich frühzeitig eine Krümmungsumkehr im Belastungsast der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons (siehe auch *Abbildung 5.6* oder *Abbildung 6.3*).

Veränderung des Langzeitmaterialverhaltens

Auch die zeitliche Entwicklung der makroskopischen Materialeigenschaften (*Abbildung 6.6*) innerhalb der Phase I können anhand der beschriebenen Vorgänge im Materialgefüge weitgehend erklärt werden. Zu Beginn des Ermüdungsvorgangs werden als erstes die Bereiche im Gefüge mit den höchsten Spannungskonzentrationen (B) bleibend verformt bzw. verändert. Infolge dessen entstehen auch makroskopisch bleibende Verformungen. Mit fortschreitender Zyklenzahl finden auf diese Weise eine zunehmende Reduzierung der Spannungsspitzen und damit eine Umlagerung von Beanspruchungen in weniger stark ausgelastete Gefügebereiche

(A) statt. Die viskosen Verformungskapazitäten des Zementsteins sind dabei lokal teilweise zum Großteil aktiviert und bedingen umgekehrt auch eine Reduzierung der sie aktivierenden lokalen Spannungen. Nach und nach entwickelt sich so ein zunehmend ausgeglichener Spannungszustand im Gefüge, der sich in einem reduzierten Schädigungsfortschritt niederschlägt. Damit verbunden ist sowohl ein fortschreitendes Abklingen in der Entwicklung der bleibenden Verformungen als auch eine entsprechende Stabilisierung in der Reduzierung der Steifigkeit im unteren Spannungsbereich (*Abbildung 6.3* und *Abbildung 6.6*).

Ähnliches gilt auch für die Entwicklungen bei den Größen aus den US-Messungen. In horizontaler Richtung zeigt die US-Geschwindigkeit im belasteten und im entlasteten Zustand eine abfallende Entwicklung, wobei diese unter oberster Last wesentlich geringer ausfällt (*Abbildung 6.6*). Sie kann aber nicht vorrangig durch eine Zunahme vertikaler Mikrorisse bedingt sein. Vermutlich resultiert sie vielmehr aus einer Kombination der Auswirkungen vertikaler Mikrorisse und horizontaler Komponenten der aus hohen Druckspannungen hervorgerufenen Veränderungen im Zementstein. Dies würde die Ähnlichkeiten zur Entwicklung der Längsdehnungen erklären. Auch für den festgestellten Zusammenhang zwischen den verschiedenen vertikalen Steifigkeiten und den unterschiedlichen Entwicklungen der horizontalen US-Geschwindigkeiten in den verschiedenen Spannungsbereichen würde diese Beziehung eine Erklärung liefern. In ähnlicher Weise zeigt sich dieses Verhalten auch in den Verläufen der horizontal gemessenen Signalamplituden, die jedoch deutlich sensibler auf die Gefügeschädigungen reagieren (*Abbildung 6.6*).

Die Entwicklung der vertikal gemessenen US-Geschwindigkeiten steht in direktem Zusammenhang zu den ebenfalls vertikal gemessenen Steifigkeiten (*Abbildung 6.6*). Unter oberster Last sind alle Druckschädigungen weitgehend überdrückt und die Gefügesteifigkeit ist gesteigert, was zu einer geringfügigen Steigerung der vertikalen US-Geschwindigkeit führt. Diese spiegelt allerdings nicht die deutliche Erhöhung der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich wider (*Abbildung 6.6*). Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen wurde jedoch bereits in Kapitel 5.1.1 auf Seite 102 vorgestellt. Hingegen im entlasteten Zustand sind die Druckschädigungen in Form von Gefügeauflockerungen alle aktiv und führen so zu einer deutlichen Reduzierung der vertikalen US-Geschwindigkeit, die eine gute Korrelation zur Entwicklung der Steifigkeit im untersten Spannungsbereich aufweist.

Fazit

Insgesamt lässt sich sagen, dass sich am Ende der Phase I im Bezug auf die Erstbeanspruchung ein deutlich ausgeglichener Spannungszustand im Gefüge infolge lokaler Gefügeschädigungen und zugehöriger Lastumlagerungen eingestellt hat. Die Gefügeschädigungen bestehen dabei weniger aus Mikrorissen infolge von Zugbeanspruchungen, als vielmehr aus lokalen viskosen Verformungen im Zementstein verbunden mit Auflockerungen infolge von erhöhten Druckbeanspruchungen. Als Folge der ausgleichenden Vorgänge im Bezug auf die Spannungsverteilung innerhalb des Materialgefüges, geht der Ermüdungsvorgang am Ende der Phase I in einen stabilisierten Evolutionsprozess über.

6.2.3 Phase II – Die stabile Entwicklung

Die Phase II des Ermüdungsprozesses erstreckt sich in den durchgeführten Versuchen prinzipiell von ca. 20 % bis ca. 80 % der Ermüdungslebensdauer und lässt sich als stabile Phase beschreiben. Für die hochzyklischen Ermüdungsversuche ist das in der Phase II beobachtete Materialverhalten in der *Abbildung 6.9* zusammengestellt.

Beobachtungen während der Phase II

Während dieser Phase weisen die Entwicklungen der einzelnen Materialeigenschaften überwiegend einen stabilisierten konstanten Evolutionsprozess auf. Er stellt letztlich eine Fortsetzung der am Ende der Phase I erreichten Entwicklungen dar.

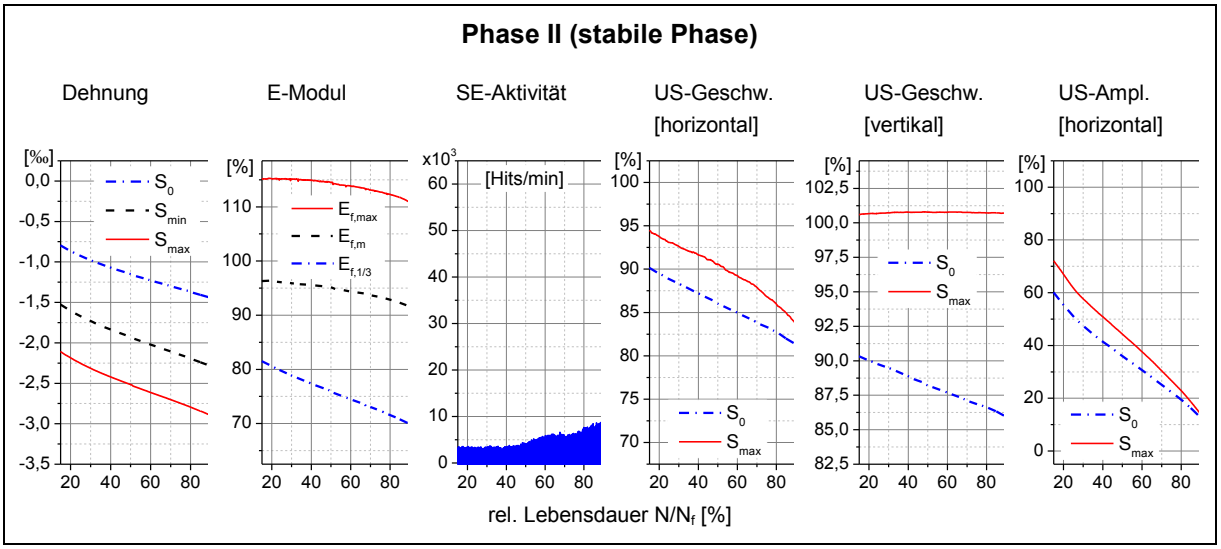

Abbildung 6.9: *Zusammenstellung der in den UHC-Versuchen in der stabilen Phase II gemessenen Entwicklungen bei den Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten und US-Amplituden*

In den Messungen der Oberflächenverformungen mit ARAMIS spiegeln sich in dieser Phase zum einen die erhöhten Gesamtverformungen wider, aber zugleich auch die zunehmende inhomogene Verteilung der Dehnungen (Anhang B1 *Abbildung B1 16* und *Abbildung B1 17*). Diese veranschaulichen somit die in der Phase I stattgefundenen lokalen Gefügeschädigungen infolge der Reduzierung der Spannungskonzentrationen. Innerhalb der Phase II findet bei den Oberflächenverformungen sowohl eine fortlaufende kontinuierliche Steigerung der Gesamtverformung statt, als auch eine weitere Erhöhung der Inhomogenität. Dementsprechend verändert sich auch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung während dieser Phase konstant weiter. Diese resultiert im Wesentlichen aus der sich konstant fortsetzenden Auflockerung (Steifigkeitsreduzierung) im unteren Spannungsbereich (*Abbildung 6.3*), die sich anschaulich im unteren E-Modul $E_{f,1/3}$ äußert (*Abbildung 6.9*). Auch die bleibenden Verformungen nehmen stetig weiter zu. Im Gegensatz dazu bleibt auch in der Phase II die Steifigkeit im oberen Spannungsbereich weiterhin fast unverändert stabil, was genauso auch für die Druckfestigkeit gilt (*Abbildung 6.3*). Passend zu diesen Beobachtungen bleibt die SE-Aktivität weiterhin auf einem niedrigen Niveau und nimmt nur langsam und stetig etwas zu (*Abbildung 6.9*). Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass die Schallemissionen vermutlich nicht nur aus dem Wachstum und der Neubildung von Mikrorissen resultieren, sondern auch durch Reibungsvorgänge an bereits existierenden Rissufern erzeugt werden können. Im Einklang damit stehend, konnte auch im bei 50 % der Lebensdauer untersuchen Rissbild im Gefüge keine signifikante Veränderung festgestellt werden (*Abbildung 6.3*). Lediglich eine weitere Steigerung der Orientierung der Risse im Längsschnitt parallel zur Belastungsrichtung hat sich gezeigt (Anhang B1 *Abbildung B1 24*).

Ganz ähnlich wie in der Phase I scheint auch in der Phase II kein ausgeprägtes Risswachstum stattzufinden. Die hier trotzdem zu beobachtenden Veränderungen in den Materialeigenschaften werden in der Phase II durch dieselben Vorgänge hervorgerufen, die bereits in der Phase I Ursache für die Veränderungen waren. Diese liegen damit ebenfalls vorrangig in viskosen Verformungen des Zementsteins begründet.

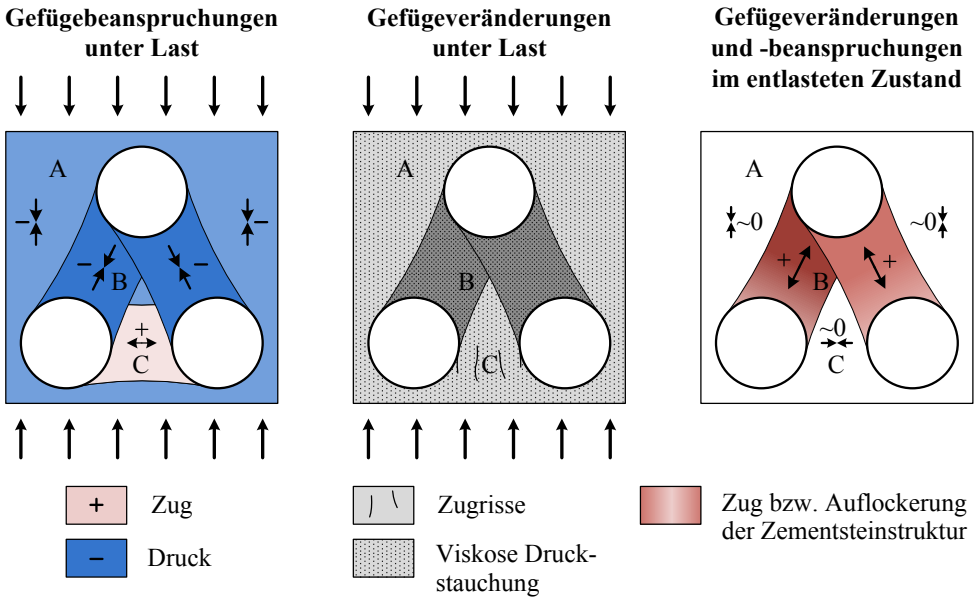

Abbildung 6.10: *Schematische Veranschaulichung der prinzipiellen Beanspruchungsverteilung im Betongefüge in der Phase II infolge einaxialer Druckschwellbeanspruchungen mit resultierender Schädigungsausbildung*

Vorgänge im Gefüge

Prinzipiell setzten sich also die in der Phase I beschriebenen Veränderungsprozesse auch in der Phase II weiter fort, nur mit einer veränderten Ausprägung. Die *Abbildung 6.10* soll die entsprechenden Prozesse im Materialgefüge vereinfacht schematisch veranschaulichen. Zu Beginn der Phase II liegt im Gefüge ein durch lokale Schädigungen bzw. viskose Verformungen im Vergleich relativ ausgeglichener Spannungszustand mit deutlich geringeren Spannungsspitzen bzw. Spannungskonzentrationen vor (*Abbildung 6.10 links*). Die Spannungsspitzen im Druckbereich (B) sind vorrangig durch viskose Verformungen im Zementstein reduziert und umgelagert worden und in den Zugbereichen (C) sind die höchsten Spannungsspitzen durch Mikrorisse abgebaut. Aufgrund der Spannungsumlagerung sind die höchsten Beanspruchungen im Gefüge nun auf einen breiteren Bereich verteilt. Infolgedessen liegen die höchsten Gefügebeanspruchungen nun auf einem insgesamt niedrigeren Beanspruchungsniveau, als dies zuvor bei Beginn der Phase I der Fall gewesen ist. Dementsprechend ist auch der Zuwachs an Schädigungen bzw. viskosen Verformungen auf ein deutlich geringeres Niveau reduziert als in der vorangegangenen Phase I. Hinzu kommt, dass sich die verbliebenen viskosen Verformungskapazitäten des Zementsteins in den am stärksten veränderten Druckbereichen (B) immer langsamer aktivieren lassen oder auch schon teils aufgebraucht sind. Im Ausgleich dazu betrifft der Schädigungszuwachs nun aber einen breiteren Bereich im Gefüge, als dies in der Phase I der Fall war, was in *Abbildung 6.10 Mitte* veranschaulicht ist. Die prinzipiellen Vorgänge zur Schädigungsausbildung unter Druck- und Zugbeanspruchungen sind auch hier noch dieselben wie in der Phase I. Infolge der reduzierten Druckkonzentratio-

nen gehen auch die daraus resultierenden Zugbeanspruchungen zurück. Da aber durch die damit verbundene Lastumlagerung an anderer Stelle Beanspruchungen erhöht werden und infolge der zunehmenden Längsstauchung auch die Querdehnung gesteigert wird, werden vermutlich auch hier in geringem Maße Mikrorisse im Gefüge gebildet.

Dieser stabilisierte aber weiterlaufende Veränderungsprozess des Materialgefüges bedingt in gleicher Weise wie in der Phase I eine entsprechende fortlaufende Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung (*Abbildung 5.6* und *Abbildung 6.3*) sowie auch der anderen beschriebenen Materialeigenschaften (*Abbildung 6.9*). Der nach wie vor sehr geringe Zuwachs an Mikrorissen spiegelt sich dabei in der nur geringfügig ansteigenden SE-Aktivität (*Abbildung 6.9*), der weiterhin stabilen Steifigkeit im oberen Spannungsbereich (*Abbildung 6.3*), der immer noch unveränderten Druckfestigkeit (*Abbildung 6.3*) sowie dem kaum feststellbar verändertem Rissbild im Gefüge (*Abbildung 6.3*) wider. Entsprechend den vorwiegend horizontal orientierten Zugbeanspruchungen im Gefüge stellt sich hauptsächlich nur eine weitere Zunahme der Mikrorisse mit vertikaler Orientierung ein (Anhang B1 *Abbildung B1 24*). Der stetige Zuwachs an viskosen Verformungen bedingt dagegen weiterhin eine Zunahme der bleibenden Verformungen (*Abbildung 6.3* oder *Abbildung 6.9*) sowie der Auflockerung im unteren Spannungsbereich (*Abbildung 6.3*). Beides führt im Wesentlichen, wie auch schon in der Phase I, zu den entsprechenden Veränderungen in den Ultraschallmessungen (*Abbildung 6.9*).

Fazit

Insgesamt führen die Vorgänge im Betongefüge in der Phase II dazu, dass die am Ende der Phase I erreichten Entwicklungsprozesse der Gefügeveränderungen und der Materialeigenschaften über die gesamte Phase II hinweg eine stabilisierte und überwiegend konstante Evolution aufweisen. Dies zeigt sich besonders in der Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung, die sich in gleicher Weise wie in der Phase I, jedoch in geringerem Maße, weiter verändert. Der Schädigungsprozess ist auch in der Phase II nur bedingt durch die Bildung von Mikrorissen infolge von Zugspannungen gekennzeichnet. Hauptsächlich ist dieser weiterhin durch lokale viskose Verformungen im Zementstein infolge erhöhter Druckbeanspruchungen verursacht, verbunden mit lokalen Auflockerungen des Zementsteins. Diese Gefügeschädigungen zeigen im Bezug auf die Größe des Probekörpers selbst noch keine Lokalisation in Form von Makrorissen oder Bruchflächen, sondern verteilen sich im gesamten Bereich des Probekörpers, in dem die entsprechende Ermüdungsbeanspruchung vorherrscht.

6.2.4 Phase III – Die instabile Entwicklung

Die dritte und letzte Phase des Ermüdungsprozesses beginnt bei ca. 80 % bis 90 % der Ermüdungslebensdauer und endet schließlich mit dem Ermüdungsversagen des Materials unter der jeweiligen Ermüdungsbeanspruchung. Sie lässt sich als instabile Phase beschreiben, die dadurch gekennzeichnet ist, dass fast alle Materialeigenschaften während der Phase III eine mehr oder weniger ausgeprägte Beschleunigung in ihrer Entwicklung aufweisen. Die *Abbildung 6.11* zeigt die Zusammenstellung des beobachteten Materialverhaltens in der Phase III aus den hochzyklischen Ermüdungsversuchen.

Beobachtungen während der Phase III

Die stabilen oder auch konstanten Entwicklungen aus der Phase II gehen hier nahezu alle in einen instabilen Entwicklungsprozess über. In der Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung setzen neben den vorhandenen Veränderungsprozessen nun auch zusätzliche Veränderungen ein (*Abbildung 5.6* und *Abbildung 6.3*). Dabei erfährt die bisher lineare Entwick-

lung der Auflockerung im unteren Spannungsbereich, genauso wie die der bleibenden Verformungen, eine erkennbare nichtlineare Steigerung (*Abbildung 6.3* und *Abbildung 6.11*). Erstmals setzt in dieser Phase nun auch eine Reduzierung der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich ein sowie auch eine Reduzierung der Druckfestigkeit (*Abbildung 6.3*). Passend dazu geht auch die SE-Aktivität in einen fast exponentiellen Anstieg über (*Abbildung 6.11*). Im Einklang mit diesen Beobachtungen ist nun auch erstmalig ein deutlicher Zuwachs in der Mikrorissstruktur festzustellen (*Abbildung 6.3*). In erster Linie lassen sich wesentlich mehr, längere und breitere Risse ausmachen, die zudem vorwiegend alle vertikal ausgerichtet sind (*Abbildung 5.15* und Anhang B1 *Abbildung B1 24*).

Darüber hinaus kann in dieser Phase schließlich bei den gemessenen Oberflächenverformungen mit ARAMIS eine deutliche Zunahme der lokalen Dehnungskonzentrationen ausgemacht werden (Anhang B1 *Abbildung B1 16* und *Abbildung B1 17*). Dies zeigt sich besonders bei den Querdehnungen senkrecht zur Belastungsrichtung. In Übereinstimmung mit den festgestellten Mikrorissen werden zum einen gesteigerte Dehnungswerte erreicht und zum anderen konzentrieren sich diese in Form von längeren überwiegend vertikal ausgerichteten rissartigen Linien.

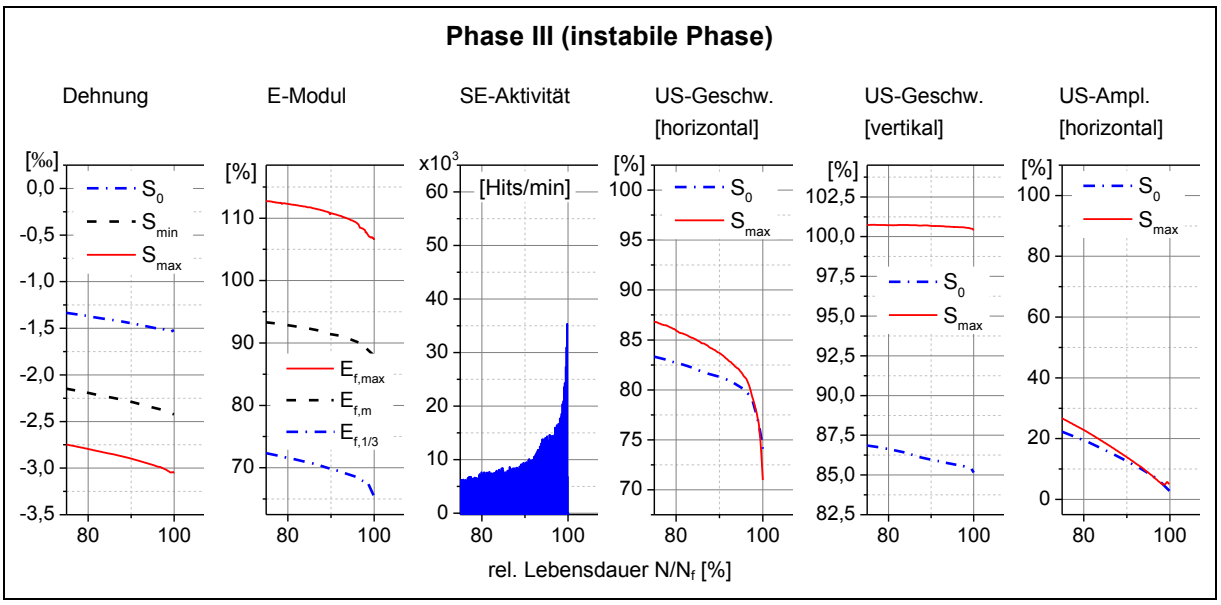

Abbildung 6.11: *Zusammenstellung der in den UHC-Versuchen in der instabilen Phase III gemessenen Entwicklungen bei den Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten und US-Amplituden*

Äußerlich waren diese Veränderungen schon zu Beginn der Phase III in den meisten Versuchen an oberflächlichen feinen Risstrukturen zu erkennen, die ebenfalls vorrangig vertikale Ausrichtungen besessen haben. Die Querdehnungsmessungen aus den Versuchen an den Großproben belegen zudem eine überproportionale Zunahme der Querdehnung, die allerdings dort schon etwas vor der Phase III einsetzt (*Abbildung 5.44*). Auch sie untermauert die zunehmende Gefügezerstörung hauptsächlich durch Mikrorisse.

Diese Beobachtungen bestätigen außerdem den Zusammenhang zwischen der Zunahme von Mikrorissen im Betongefüge mit den Veränderungen der Steifigkeit im oberen Spannungsbereich, der SE-Aktivität sowie der Druckfestigkeit.

Vorgänge im Gefüge

Was letztendlich genau der Auslöser für dieses instabile Verhalten ist, konnte anhand der Untersuchungen nicht geklärt werden. Klar ist aber, dass aufgrund der inhomogenen Ausgangssituation zu Beginn der Ermüdungsbeanspruchung, beim Übergang in die Phase III zwar ein relativ ausgeglichener Spannungszustand, aber zugleich ein extrem inhomogen verteilter Dehnungszustand bzw. Schädigungsgrad im Gefüge vorliegt. Dies belegen auch die mit ARAMIS gemessenen Dehnungskonzentrationen in den Oberflächenverformungen (Anhang B1 *Abbildung B1 16* und *Abbildung B1 17*). Des Weiteren steht fest, dass das beobachtete Hauptmerkmal der in der Phase III stattfindenden Veränderungen im Gefüge ein einsetzendes Wachstum von Mikrorissen mit vorwiegend vertikaler Ausrichtung ist. Es ist also anzunehmen, dass durch entsprechende Veränderungen im Materialgefüge ein solcher Zustand von Querzugspannungen erzeugt wird, dass ein derartiges Risswachstum ausgelöst wird. Als ursächliche Veränderungen kommen dafür mehrere Möglichkeiten in Frage.

- Zum einen können speziell in Bereichen mit konzentrierten Stauchungen aus Druckspannungen auch derart hohe Querdehnungen erzeugt werden, dass dort letztlich irgendwann die Querzugfestigkeit des Zementsteins überschritten wird.
- Zum anderen können im Bereich des vorrangig direkt und vertikal orientierten Lastabtrags (siehe auch *Abbildung 6.2 rechts*) genau diese hohen Druckstauchungen bei Spannungskonzentrationen zu Umlagerungen von Beanspruchungen führen. Das Resultat sind im Wesentlichen ungünstiger geneigte und weniger vertikal orientierte Kraftstreben im Betongefüge. Diese führen zwangsläufig auch zu höheren Querzugbeanspruchungen und zum Entzug des Bereiches aus dem Lastabtrag.
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass zu diesem Zeitpunkt einzelne lokale Bereiche im Zementstein so hohe akkumulierte Verformungs- bzw. Schädigungszustände erreicht haben, dass es dort lokal zu einem plötzlichen Abfall der Tragfähigkeit kommt. Die Folge ist ein verstärkter Entzug dieser Bereiche aus dem Lastabtrag im Gefüge.

Tatsächlich ist in der Realität eher eine Kombination aus den genannten Vorgängen vorstellbar und anzunehmen. Denkbar sind aber auch andere Veränderungen im Gefüge als mögliche Ursache.

Das Grundprinzip im Ablauf scheint aber generell klar zu sein und ist bei den verschiedenen möglichen Ursachen nahezu das gleiche. Beginnend mit der Phase III finden irgendwo im Material einzelne lokale Schädigungen des Gefüges durch Querzugrisse oder Tragfähigkeitsveränderungen statt. Daraus folgt ein Entzug dieses Bereiches aus dem Lastabtrag im Gefüge. Verbunden ist damit zwangsläufig eine gesteigerte Umlagerung von Beanspruchungen innerhalb des Gefüges. Die Folge daraus ist zum einen eine zusätzliche Erhöhung der Längsstauchung, die direkt zu einer Steigerung der damit verbundenen Beanspruchungen in Querrichtung durch Querdehnungen sowie Querzugspannungen führt. Zum anderen führt die gesteigerte Umlagerung auch zu einer vermehrten Überbeanspruchung weiterer Gefügebereiche, die dadurch ihrerseits auch eine beschleunigte Schädigungsentwicklung erfahren. In diesen entstehen schließlich in gleicher Weise Mikrorisse, aufgrund dessen sie sich ebenfalls zunehmend dem Lastabtrag im Betongefüge entziehen.

Mit diesen Vorgängen wird bereits der progressive und instabile Versagensvorgang eingeleitet. Die beschriebenen Effekte beschleunigen sich gegenseitig, so dass es zu einer zunehmend progressiven Schädigungsentwicklung kommt. Insgesamt handelt es sich dabei um einen kaskadenförmig ablaufenden Prozess aus Entziehen und Umlagern der inneren Gefügebean-

spruchungen, bis schließlich irgendwann keine ausreichende Tragfähigkeit der geschädigten Gefügestruktur für die einwirkende Beanspruchung mehr vorhanden ist.

Das Hauptcharakteristikum der Phase III ist also ein progressiver Veränderungsprozess, der sich schließlich, wie schematisch in *Abbildung 6.12* veranschaulicht, in einem entsprechenden Wachstum vorrangig vertikal orientierter Mikrorisse im Materialgefüge äußert.

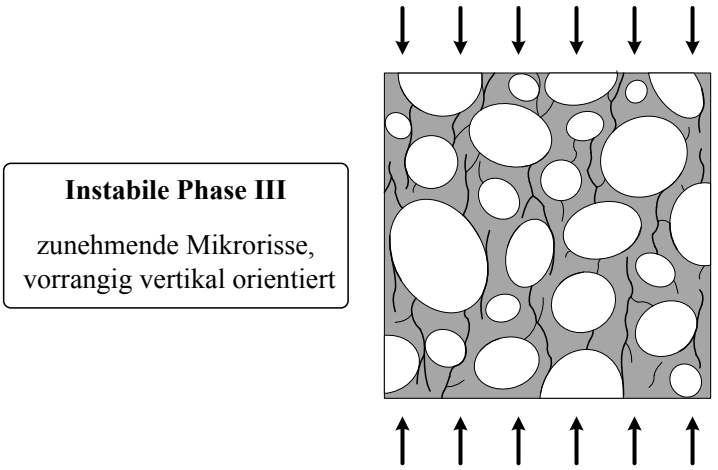

Abbildung 6.12: *Graphische Darstellung des in der Phase III einsetzenden Wachstums von Mikrorissen im Zementstein und der Kontaktzone mit vorrangiger Orientierung parallel zur Lastrichtung*

Eine Bestätigung zu der Annahme des prinzipiellen Ablaufes findet sich vor allem darin, dass die Veränderung des Materialverhaltens und auch das Versagen des Betons nicht schlagartig einsetzen. Stattdessen beginnen sie erst langsam und gehen dann in einen exponentiellen Anstieg über, was sich mehr oder weniger stark ausgeprägt in den meisten der gemessenen Materialeigenschaften widerspiegelt (*Abbildung 6.11*). Vor allem das zunehmende Wachstum der vertikalen Mikrorisse findet sich in den Messergebnissen wieder. Sie erklären die exponentiell zunehmende SE-Aktivität (*Abbildung 6.11*), die abfallende Steifigkeit im oberen Spannungsbereich (*Abbildung 6.3*), die abfallende Druckfestigkeit (*Abbildung 6.3*), die zunehmende Längsdehnung (*Abbildung 6.11*) sowie auch die bei den Großproben beobachtete Zunahme der Querdehnungen (*Abbildung 5.44*).

Relativ unberührt von den Veränderungen bleiben dagegen nur die US-Geschwindigkeiten in der vertikalen Richtung (*Abbildung 6.11*). Zum Teil liegt dies sicher an den vorrangig vertikal ausgerichteten Mikrorissen. Wie aber schon bei der Phase I festgestellt, geben die vertikalen US-Geschwindigkeiten nicht vollständig das Verhalten der vertikal gemessenen Materialsteifigkeiten wieder.

Ermüdungsbruch

Am Ende der Phase III ist schließlich ein so hoher Schädigungsgrad im Betongefüge erreicht, dass es zu ausgeprägten Lokalisationen bei den Gefügeschädigungen kommt, wie in *Abbildung 6.13* veranschaulicht. Dabei vereinigen sich nach und nach die Mikrorissstrukturen und immer weniger Gefügebereiche beteiligen sich am Lastabtrag. Im Moment des Ermüdungsversagens ist letztlich ein Zustand des Betongefüges erreicht, der nicht mehr in der Lage ist, die jeweilig aufgebrachte Beanspruchung aufzunehmen. Hierbei bilden sich schlagartig Makrorisse und damit auch Bruchflächen im Betongefüge aus (Anhang B1 *Abbildung B1 15*).

Während des Versagens wird auch die zu diesem Zeitpunkt noch im Gefüge gespeicherte elastische Energie freigesetzt und dem Bruchprozess mit zugeführt.

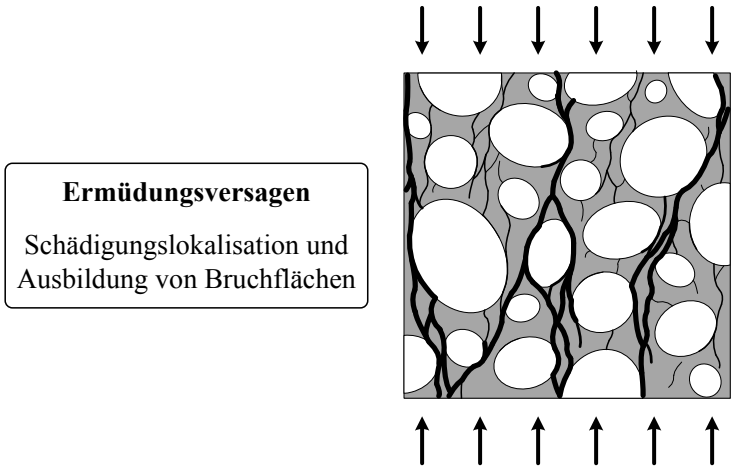

Abbildung 6.13: *Graphische Darstellung der kurz vor dem Ermüdungsversagen stattfindenden starken Lokalisation der Mikrorissbildung, mit Ausbildung von Makrorissen und Bruchflächen als Folge*

6.2.5 Schlussfolgerungen und abschließende Bemerkungen

Eine wesentliche Feststellung und damit ein entscheidendes Merkmal des untersuchten hochzyklischen Ermüdungsprozesses ist, dass der Vorgang in der Phase I und II offensichtlich kaum durch Mikrorissbildung bedingt ist. Die sehr ausgeprägten Veränderungen der meisten Materialeigenschaften während der Phase I und II sind vermutlich vielmehr in Strukturveränderungen des Zementsteins begründet, die sich in viskosen Verformungen äußern. Diese liegen so im Wesentlichen auch dem Kriechverhalten des Betons zugrunde. Erst in der Phase III ist eine signifikante Bildung von Mikrorissen festzustellen, die das Materialverhalten deutlich beeinflussen.

Gerade in den viskosen Vorgängen liegt wohl auch die Feststellung begründet, dass der sich im Betongefüge einstellende Schädigungszustand abhängig ist von der Höhe der Beanspruchung. Damit ist zugleich auch die Abhängigkeit von der zeitlichen Dauer des Ermüdungsvorgangs verbunden. Darauf deuten zumindest die Ergebnisse der statischen und der LHC- sowie UHC-Versuche hin, wie z. B. die Ergebnisse in Kapitel 5.3 zeigen. Die Ursache dafür kann in zwei Tatsachen gefunden werden.

- Zum einen die unterschiedlich langen Zeiträume der Versagensvorgänge, in denen zeitabhängige Prozesse im Material aktiviert werden können. Dies ist besonders zwischen den durchgeführten statischen und den zyklischen Versuchen der Fall.
- Zum anderen die unterschiedliche Höhe der Beanspruchung im Moment des Ermüdungsversagens. Dies ist vor allem bei den durchgeführten LHC- und UHC-Versuchen der Fall.

Die Länge der Laufzeit hängt natürlich direkt von der Höhe der Beanspruchung ab. Je länger der Vorgang läuft, umso mehr zeitabhängige Prozesse können hauptsächlich im Zementstein aktiviert werden. Es entstehen größere viskose Verformungen, wodurch auch wesentlich

ausgeprägtere Beanspruchungsumlagerungen im Gefüge möglich sind. Das Resultat ist ein gleichmäßiger beanspruchtes Materialgefüge. Im Falle der kurzen LHC-Versuche bedingt vermutlich gerade die Höhe der Beanspruchung lokale Spannungsspitzen im Gefüge, die dort bereits in der Phase I und II Mikrorisse erzeugen. Die frühzeitig einsetzende Schädigung durch Risse führt zu einem verkürzten Ermüdungsprozess und zwangsläufig zu einer geringen Ausprägung viskoser Verformungen und entsprechender Lastumlagerungen.

Durch die Beanspruchungshöhe ist zudem auch der Zustand des Versagens bestimmt. Da das Versagen in den statischen, den LHC- und UHC-Versuchen jeweils unter einer anderen absoluten äußeren Beanspruchung des Betongefüges erfolgt, erscheint es nur nachvollziehbar, dass dabei auch jeweils ein anderer Schädigungszustand im Gefüge erforderlich ist, um das Versagen der Probe auszulösen. Hinzu kommt, dass bei den verschiedenen Beanspruchungen auch immer eine andere Menge an elastischer Energie im Material gespeichert ist, die zur Bildung von Rissen und damit zum Bruch des Gefüges zur Verfügung steht. Daraus ließe sich sogar ableiten, dass bei Ermüdungsbeanspruchungen im Beton vorwiegend die Höhe der Oberspannung für den notwendigen Schädigungszustand im Gefüge zum Versagen verantwortlich zu sein scheint. Allerdings kann diese Annahme anhand der durchgeführten Versuche nicht überprüft werden.

Aus der Literatur kann entnommen werden, dass im Vergleich zu Normalbetonen, wie er auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, bei Betonen mit deutlich höheren Festigkeiten wie HPC oder UHPC eine merklich geringere Ausprägung der Phasen I und III beobachtet werden kann [PETKOVIC & ROSSELAND 1992; KIM & KIM 1996; WEFER 2010]. Dies kann zum Teil mit den beschriebenen Vorgängen des Ermüdungsprozesses nachvollzogen werden. Das Gefüge des hochfesten Betons ist deutlich dichter und homogener, und besitzt zudem wesentlich geringere Steifigkeitsunterschiede. Demzufolge ist die Ausprägung von Spannungskonzentrationen deutlich geringer als im Normalbeton. Die Folge ist, dass dieses Betongefüge wesentlich weniger Potential für lokale Schädigungskonzentrationen sowie den Abbau von Spannungsspitzen und die Umlagerung von Gefügebeanspruchungen besitzt. Insgesamt resultiert daraus ein spröderes Materialverhalten und zugleich eine geringere Ausprägung der Phasen I und III.

Obwohl es sich bei den in dieser Arbeit unter der Ermüdungsbeanspruchung festgestellten Vorgängen in der Phase I und II scheinbar im Prinzip um dieselben Strukturveränderungen handelt, die beim Kriechen ablaufen, sind deren verändernde Auswirkungen unterschiedlich groß. Im Vergleich zur monotonen Dauerbeanspruchung führt eine zyklische Last offenbar zu einer verstärkten Aktivierung und Akkumulation viskoser Verformungskomponenten und zugleich zu einer größer ausgeprägten Auflockerung des Zementsteins. Diese Unterschiede spiegeln sich in den beobachteten deutlich größeren bleibenden Verformungen (*Abbildung 5.22*) sowie in der wesentlich stärkeren Reduzierung der Steifigkeit im unteren Spannungsbereich (*Abbildung 5.24*) der Ermüdungsversuche wider. Infolge dieser Ungleichheiten können zyklische Druckschwellbeanspruchungen Schädigungszustände erzeugen, die ein Versagen bedingen, während eine vergleichbare Kriechbeanspruchung einen stabilen Gefügezustand anstrebt.

Bezüglich der hier vorgestellten Beschreibung zum Ermüdungsvorgang bleibt folgendes zu berücksichtigen. Der beschriebene Ablauf des Vorgangs im Betongefüge konnte im Rahmen der durchgeführten Ermüdungsversuche und Untersuchungen zum Teil direkt nachgewiesen werden. Er basiert aber auch auf Hypothesen, die auf Grundlage der vorhandenen experimentellen Beobachtungen abgeleitet wurden. Eine Überprüfung dieser Hypothesen durch entsprechende weiterführende experimentelle Untersuchungen wäre wünschenswert.

6.3 Die Ermüdungsschädigung im Beton

In diesem Kapitel sollen einige prinzipielle Aspekte zum Thema der Schädigung im Zusammenhang mit Beton betrachtet werden. Dabei finden sowohl die experimentellen Ergebnisse als auch die im vorangegangenen Kapitel angestellten Überlegungen zum Schädigungsprozess Eingang in die Betrachtung. Der Fokus liegt hier auf der ermüdungsbedingten Schädigung infolge von Druckbeanspruchungen.

Allgemeine Feststellungen

Sowohl die experimentellen Beobachtungen als auch die vorangegangene Erläuterung zum Schädigungsvorgang haben verdeutlicht, dass es sich bei der Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchungen um einen Veränderungsprozess des Betongefüges handelt, der in vielfältiger Art und Weise Auswirkungen auf den Zustand des Materialgefüges hat. Dabei laufen im Gefüge verschiedene Veränderungen ab, die teils sehr unterschiedliche zeitliche Entwicklungen aufweisen. Daraus resultieren zwangsläufig auch unterschiedlich stark ausfallende und ablaufende Veränderungen der makroskopischen Materialeigenschaften. Vor diesem Hintergrund stellen sich im Bezug auf die Schädigung von mechanisch beanspruchten Festkörpern die folgenden prinzipiellen Fragestellungen:

Was ist Materialschädigung?

-und-

Wie kann Materialschädigung festgestellt und quantifiziert werden?

Allgemeine Definitionen

In der Literatur ist der Begriff der Schädigung nicht eindeutig definiert, da er natürlich abhängig ist von der jeweiligen Fachdisziplin, der betreffenden Problematik und auch der Betrachtungsebene. Im Bezug auf die Schädigung von Festkörpern wird in Anlehnung an [LEMAITRE 1992] die Schädigung eines Werkstoffs als progressiver physikalischer Prozess betrachtet, der durch zwei wesentliche Merkmale charakterisiert ist [PETRYNA 2004]:

- Schädigung entsteht in Folge der Einwirkung von mechanischen Belastungen
- Schädigung führt letztendlich zur mechanischen Zerstörung des Materials, zum Materialversagen oder zum Bruch

Im Rahmen der Schädigungsmechanik von Festkörpern wird Schädigung mit der Bildung und dem Wachstum von Mikrorissen oder Mikrofehlstellen verknüpft [LEMAITRE 1992; ALTENBACH & SKRZYPEK 1999; LEMAITRE & DESMORAT 2005]. Diese Veränderungen finden auf einer sehr tiefen Betrachtungsebene, vornehmlich der Mikroebene, statt, wobei Bindungen von Atomen, Molekülen oder Kristallen zerstört werden [PETRYNA 2004]. Darin bedingt liegt zum einen die Tatsache, dass die Schädigung als solche in der Regel nicht direkt feststellbar bzw. messbar ist. Zum anderen ist eine Quantifizierung der Schädigung des Materials an ihnen nicht bzw. kaum praktisch durchführbar.

Die im Material erzeugten Schädigungen wirken sich natürlich auf die Materialeigenschaften und das Materialverhalten aus. Deren Veränderungen repräsentieren schließlich die makroskopisch feststellbaren Folgen der Materialschädigungen [LEMAITRE & DESMORAT 2005]. Sie ermöglichen es, im Gegensatz zu der direkten Betrachtung der Schädigung selbst, indirekt die Wirkung, den Umfang sowie die Stärke der Schädigung zu erfassen und auch zu quantifizie-

ren. Nach [LEMAITRE 1992; ALTENBACH & SKRZYPEK 1999; LEMAITRE & DESMORAT 2005] können die Veränderungen der in *Tabelle 6.2* aufgelisteten Materialeigenschaften mit der Schädigung eines Materials verknüpft werden.

Tabelle 6.2: *Einige durch die Materialschädigung beeinflusste Materialeigenschaften nach [LEMAITRE & DESMORAT 2005]*

Materialeigenschaften	
• E-Modul	• Kriechdehnrate
• Fließgrenze	• Ultraschallgeschwindigkeit
• Härte	• Elektrischer Widerstand
• Dichte	

Beobachtete Schädigungen im Beton

Auch die im Beton auftretenden Schädigungen lassen sich kaum bzw. nur schwer direkt beobachten. Daher ist bisher noch weitgehend unklar, was genau alles im Materialgefüge unter Ermüdungsbeanspruchungen abläuft. Die Ergebnisse der Untersuchungen legen jedoch nahe, dass Mikrorisse nur zum Teil für die festgestellten Veränderungen im Materialverhalten verantwortlich sind. Auf den hier betrachteten Ebenen kann eine Beschreibung der Schädigung allein auf Grundlage der Mikrorisse den ermüdungsbedingten Veränderungsprozess der Materialeigenschaften nicht erfassen. Daher laufen offensichtlich noch weitere ermüdungsbedingte Veränderungsprozesse speziell im Zementstein ab. Dazu gehören zumindest auch viskose Verformungen, die vermutlich aus Prozessen wie Gleitungen, Umlagerungen und Umorientierungen von Partikeln des Zementsteins stammen. Eine Quantifizierung dieser Schädigungen ist aber kaum möglich.

Beobachtete Auswirkungen beim Beton

In den einzelnen Materialeigenschaften spiegeln sich zwar die makroskopischen Folgen der Materialschädigungen wider, allerdings werden sie durch die Schädigungen zum Teil sehr unterschiedlich stark beeinflusst.

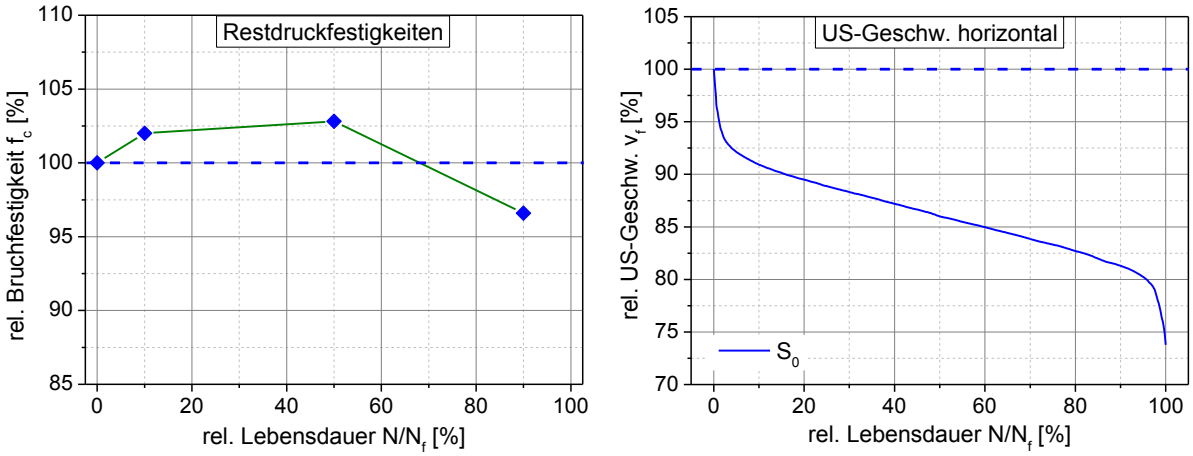

Abbildung 6.14: *Unterschiedliche Auswirkungen der Schädigung auf die Entwicklung der Druckfestigkeit (links) sowie auf die Entwicklung der horizontalen Ultraschallgeschwindigkeit (rechts)*

Das heißt, sie geben den Schädigungszustand bzw. den Schädigungsgrad des Betons jeweils verschieden stark ausgeprägt wieder. Zudem sind, wie in den Versuchen beobachtet, die zeitlichen Entwicklungen der einzelnen Veränderungen im Materialgefüge sehr unterschiedlich. Das äußert sich schließlich darin, dass sich auch die makroskopischen Materialeigenschaften während des Ermüdungsvorgangs zum Teil auf sehr unterschiedliche Weise entwickeln. Besonders gut verdeutlichen dies z. B. die in *Abbildung 6.14* gegenübergestellten Entwicklungen der gemessenen Druckfestigkeit und der Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit über die Lebensdauer. Im Hinblick darauf stellt sich natürlich die Frage:

Welche Materialeigenschaft oder Materialgröße ist ein gutes Maß bzw. eine geeignete Bezugsgröße für den Schädigungszustand im Beton?

Eine nahe liegende Antwort zur Erfassung der Schädigung und ihrer Wirkung auf der makroskopischen Ebene liegt in der Betrachtung der resultierenden Antwort des Materials auf eine mechanische Beanspruchung in Form der sich einstellenden Verformungen. Daraus resultiert letztlich die Erfassung der Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Bezug auf den Ausgangszustand. Prinzipiell entspricht dies der Verwendung der bereits in *Tabelle 6.2* mit aufgeführten Materialsteifigkeit als Messgröße für die Schädigung, so wie sie auch vielfach in der Kontinuumsschädigungsmechanik angesetzt wird [LEMAITRE 1992; ALTENBACH & SKRZYPEK 1999; LEMAITRE & DESMORAT 2005].

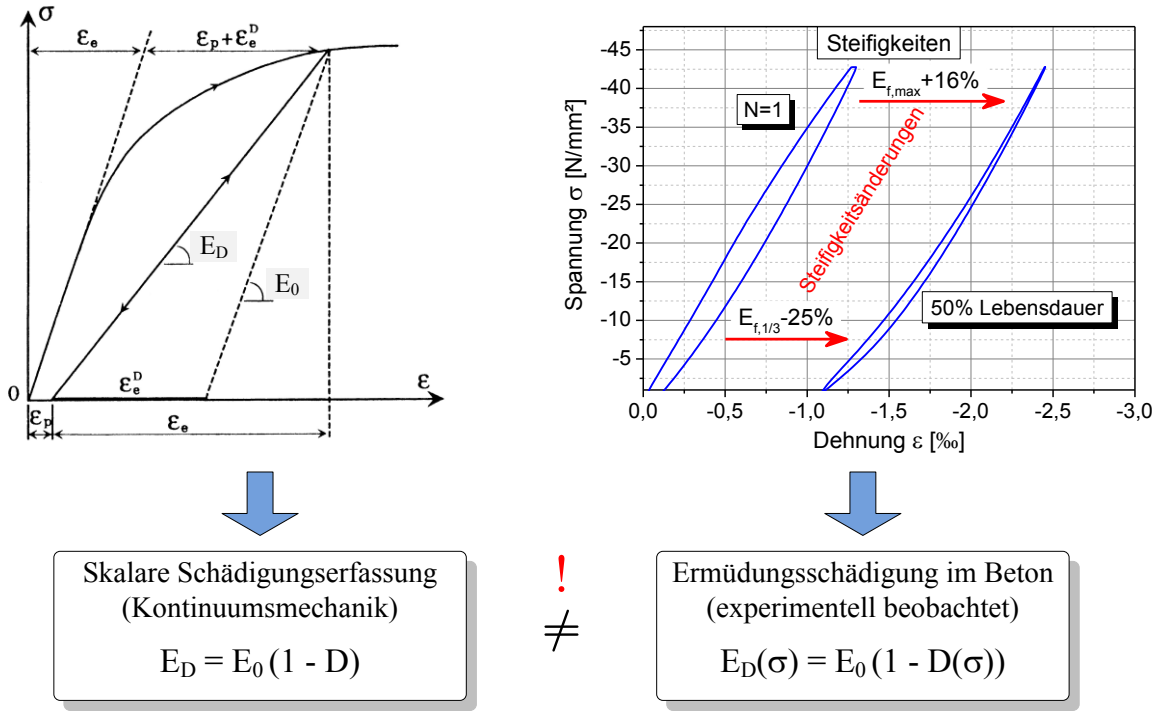

Abbildung 6.15: *Abbildung der Schädigung in der Kontinuumsschädigungsmechanik über eine skalare E-Modul-Reduzierung aus [ALTENBACH & SKRZYPEK 1999] (links) und in den Ermüdungsversuchen tatsächlich im Beton festgestellte ungleichmäßige Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung*

Allerdings wird in der Kontinuumsschädigungsmechanik der isotrope Schädigungszustand in der Regel anhand der Veränderung einer einzelnen Steifigkeitsgröße (E-Modul E) abgebildet, wie in *Abbildung 6.15 links* veranschaulicht ist. Im Gegensatz dazu haben aber die durchge-

führten Ermüdungsversuche gezeigt, dass sich die gesamte Spannungs-Dehnungs-Beziehung auf teils sehr unterschiedliche Weise verändert (*Abbildung 6.15 rechts*). Es besteht dabei eine Abhängigkeit zwischen der Auswirkung der Materialschädigung und der jeweiligen Spannung. Ganz besonders deutlich ist dieser Zusammenhang aus den Entwicklungen der Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen geworden, was zum einen in der *Abbildung 6.16* und zum anderen auch im Anhang B1 in *Abbildung B1 12 rechts* sehr anschaulich dargestellt ist. Die aus der Schädigung resultierende Veränderung in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons kann also nicht auf eine einzelne skalare Größe reduziert werden. Vielmehr muss dazu die gesamte Spannungs-Dehnungs-Beziehung betrachtet werden. Und wie die verschiedenen Versuchsreihen in Kapitel 5.2 und 5.3 zusätzlich gezeigt haben, gilt diese Feststellung nicht nur für die hochzyklische Ermüdung von Beton, sondern auch für die Ermüdung im unteren hochzyklischen Bereich und sogar auch für das hier untersuchte Kriechen.

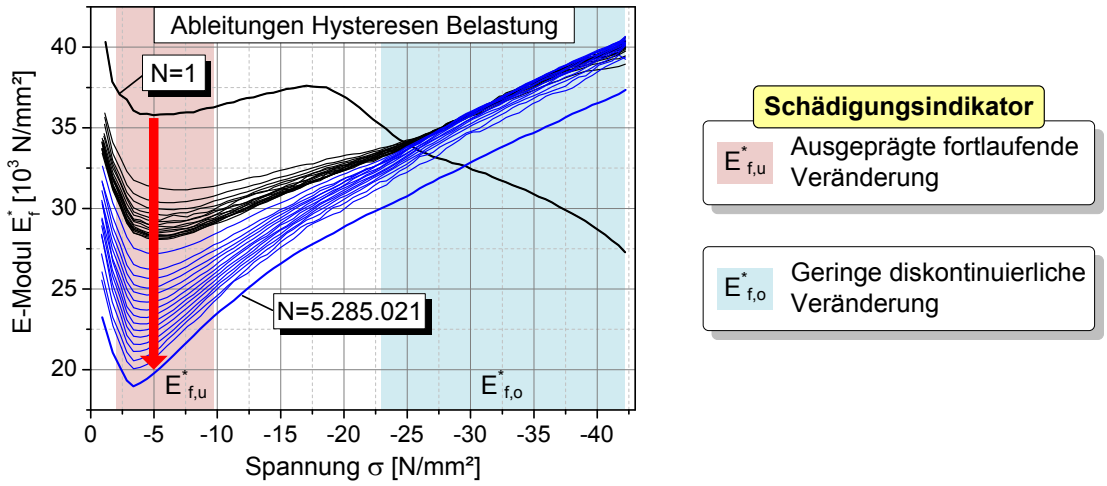

Abbildung 6.16: *Ungleichmäßig ausgeprägte Veränderungen in den Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen während der Lebensdauer mit fortlaufender und am stärksten ausgeprägter Veränderung im unteren Spannungsbereich*

Aus der Betrachtung der Entwicklungen in den Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen lässt sich jedoch ablesen, welche Größe die ermüdungsbedingte Schädigungsevolution im Beton am deutlichsten widerspiegelt. Wie bereits im Kapitel 6.1 beschrieben wurde und zusätzlich in der *Abbildung 6.16* veranschaulicht ist, zeigt die Steifigkeit im untersten Spannungsbereich ($E^*_{f,u}$) die signifikanteste Veränderung infolge des Ermüdungsvorgangs, in Verbindung mit einem ausgeprägt fortlaufenden Charakter. Daraus lässt sich schließen, dass die Entwicklung der Steifigkeit $E^*_{f,u}$ den Schädigungszustand im Beton besonders gut wiedergibt. Diese Größe stellt damit ein gutes Maß für den Schädigungsgrad bzw. einen geeigneten Schädigungsindikator dar.

Eine alternative Betrachtung, wie die verschiedenen festgestellten ermüdungsbedingten Veränderungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons erfasst werden können, wird schließlich im Kapitel 6.5 beschrieben.

Feststellungen und Schlussfolgerungen

Aus den vorangegangenen Betrachtungen heraus können folgende Feststellungen für die (ermüdungsbedingte) Schädigung in Beton getroffen werden.

- Es gibt keine eindeutige Definition für die lastbedingte Materialschädigung in Festkörpern, besonders nicht bei Beton.
- Die erzeugte Materialschädigung hat keine gleichmäßig ausgeprägte Auswirkung auf die einzelnen (makroskopischen) Materialeigenschaften.
- Daher kann der Grad der Materialschädigung nicht gleichermaßen gut anhand der einzelnen (makroskopischen) Materialeigenschaften quantifiziert bzw. bestimmt werden.
- Für die Quantifizierung der Schädigung existiert kein absolutes Maß, daher kann in der Regel nur eine relative Betrachtung im Bezug auf einen festgelegten Referenzzustand erfolgen.
- Die Auswirkung der Schädigung auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons kann nicht anhand einer skalaren Größe mit Bezug auf den E-Modul erfasst werden.
- Die Entwicklung der Steifigkeit im untersten Spannungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung gibt den ermüdungsbedingten Schädigungszustand im Beton am deutlichsten wieder.
- Der Ermüdungsprozess im Beton unter Druckbeanspruchungen unterscheidet sich aufgrund der starken Heterogenität und der damit verbundenen Wechselwirkungen der einzelnen Bestandteile wesentlich von den entsprechenden Vorgängen in Metallen.

Da die durch Ermüdungsbeanspruchungen im Beton erzeugte Schädigung sich zum Teil sehr unterschiedlich auf die einzelnen Materialeigenschaften auswirkt, ist eine Bewertung im Hinblick auf die schädigende Wirkung auch situationsabhängig. Dies ist letztlich davon abhängig, welche ermüdungsbedingte Veränderung welcher Materialeigenschaft(en) einen schädigenden Einfluss in der jeweiligen Tragstruktur und der jeweiligen Beanspruchungssituation hat.

Soll eine Bewertung eines aus Ermüdungsbeanspruchungen resultierenden Schädigungszustandes erfolgen, sind prinzipiell zwei Fragestellungen zu klären:

- ***Schädigungszustand***: Wie stark ist die relevante Materialeigenschaft(en) zum jeweiligen Zeitpunkt verändert und damit der aktuelle Schädigungszustand bestimmt?
- ***Lebensdauerzeitpunkt***: An welchem relativen Lebensdauerzeitpunkt im Hinblick auf die ertragbare Lastzyklenzahl befindet sich das Material gerade, um die Restlebensdauer bestimmen zu können?

Welche Eignungen die in den Versuchen untersuchten Materialeigenschaften im Hinblick auf die Beurteilung des Schädigungszustandes und des Lebensdauerzeitpunktes aufweisen, wird im anschließenden Kapitel analysiert.

6.4 Indikatoren und Messbarkeit der Ermüdungsschädigung

Vor dem Hintergrund der im vorangegangenen Kapitel angestellten Betrachtungen zur Schädigung im Beton, findet in diesem Kapitel eine Bewertung der in den Experimenten durchgeführten Messungen statt. Hierzu wird auf Grundlage der in den Kapiteln 5.1 bis 5.5 vorgestellten Auswertungen eine Betrachtung im Hinblick auf die Eignung der einzelnen Messgrößen als Schädigungs- sowie als Lebensdauerindikator für Ermüdungsbeanspruchungen durchgeführt. Dabei werden zum einen die gemessenen Größen untereinander vergleichend betrachtet und bewertet, und zum anderen wird auch auf deren Praxistauglichkeit eingegangen. Das Hauptaugenmerk der Betrachtung liegt hier allerdings auf dem Schädigungszustand.

Anforderungen an einen Indikator

Generell lassen sich für einen guten Indikator im Bezug auf die beiden hier betrachteten Zustandsgrößen die folgenden Anforderungen festhalten.

- ***Schädigungsindikator:*** Ein guter Indikator für den Schädigungszustand zeichnet sich durch eine möglichst große und schädigungssynchrone relative Veränderbarkeit über die gesamte Lebensdauer aus. Zugleich besitzt er dabei eine im Verhältnis dazu möglichst geringe Streuung, die sich zum Beispiel in Form einer geringen Standardabweichung widerspiegelt. Darüber hinaus sollte er, wie in Kapitel 5.4 festgestellt, auch die Unterschiede in den Schädigungszuständen zwischen LHC- und UHC-Versuchen widerspiegeln.
- ***Lebensdauerindikator:*** Auch für den relativen Lebensdauerzeitpunkt zeichnet sich ein guter Indikator durch eine möglichst große relative Veränderbarkeit in Kombination mit einer vergleichsweise geringen Streuung über die gesamte Lebensdauer aus. Im Gegensatz zum Schädigungsindikator muss dieser sich aber nicht schädigungssynchron, sondern viel mehr möglichst linear über die Lebensdauer entwickeln. Des Weiteren sollte sich der Indikator bei Ermüdungsbeanspruchungen unterschiedlicher Höhe weitestgehend gleich verhalten und im Idealfall zum Ermüdungsversagen hin einen möglichst gleichen Endwert anstreben.

Vergleich und Bewertung der Messungen

Nicht alle in den Versuchen gemessenen und anschließend ausgewerteten Größen können gleichermaßen statistisch ausgewertet und verglichen werden. Während einige Größen sowohl qualitativ als auch quantitativ betrachtet und verglichen werden können, lassen sich andere aufgrund ihrer Eigenschaften oder der geringen Anzahl an Messungen nur begrenzt bewerten und mit den anderen vergleichen. Deshalb sind nur einige Größen in die statistische Auswertung eingegangen und auch bei diesen ist zu berücksichtigen, dass sie zum Teil jeweils auf einer sehr unterschiedlichen Anzahl an Messungen basieren. Dies ist eine Konsequenz daraus, dass nicht alle Messungen gleichzeitig an jedem Versuch durchgeführt werden konnten.

In die statistische Auswertung eingegangen sind die Ergebnisse der gemessenen Verformungen, der Steifigkeiten, der Energien, der Zyklenzahlen und der Ultraschallmessungen. Für die Schallemissionsmessungen, die Restbruchfestigkeiten und die Mikrorissbetrachtung mittels Lichtmikroskopie und REM findet dagegen nur eine qualitative Bewertung statt. Beispielhaft zeigt die *Abbildung 6.17 links* und *rechts* die Kurvenscharen zweier verschiedener Größen mit deutlich erkennbar sehr unterschiedlichen Streuungen. Für alle anderen betrachteten Größen finden sich die zugehörigen Kurvenscharen im Anhang B1 *Abbildung B1 5* bis *Abbildung B1 10* und B3 *Abbildung B3 2* bis *Abbildung B3 6*.

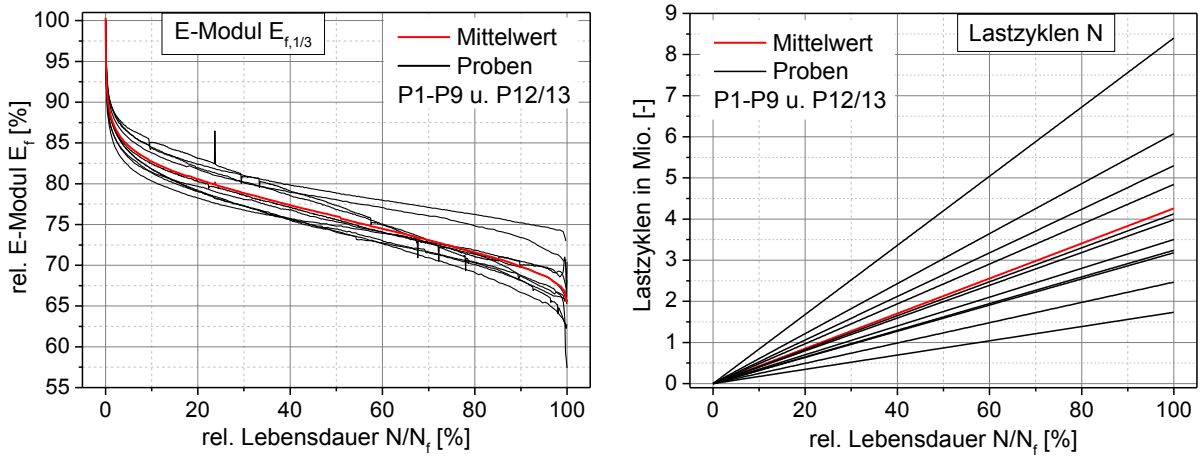

Abbildung 6.17: *Beispielhafte Kurvenscharen aus den UHC-Versuchen für die Entwicklung des E-Moduls (links) und die Zyklenzahlen (rechts) bezogen auf die Lebensdauer*

Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde als erstes der Verlauf der Standardabweichung s über die Lebensdauer der einzelnen Größen ermittelt. Da es sich dabei jedoch um eine einheitenbehaftete Größe handelt, eignet sich diese selbst nicht für den Vergleich mit anderen Größen. Für diese Problematik bietet sich normalerweise der Variationskoeffizient v_{var} an. Aber auch er eignet sich in diesem speziellen Falle nicht, um die gewünschte Beurteilung über die Qualität einer Größe als Schädigungsindikator in einem Vergleich zu erlauben. Denn wie bereits zuvor erwähnt, spielt neben der Streuung auch die Höhe der absoluten Änderung der betrachteten Größe über die Lebensdauer eine entscheidende Rolle. Außerdem führen Größen, die gegen den Wert Null laufen, bei dieser Berechnung zu exponentiell ansteigenden Variationskoeffizienten. Ursache für diese Problemstellung ist die Besonderheit, dass hier nicht nur die Verteilung von Werten einer entsprechenden Größe zu einem bestimmten Zeitpunkt untersucht wird, sondern auch deren zeitliche Entwicklung über die gesamte Lebensdauer.

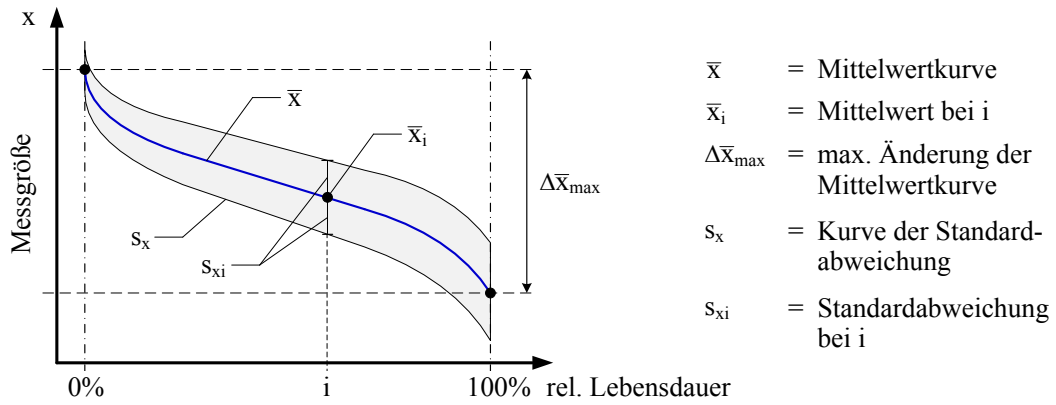

Abbildung 6.18: *Schematische Veranschaulichung der einzelnen Größen zur Bestimmung des bezogenen Variationskoeffizienten bez. v_{var} anhand einer gemittelten Messkurve mit zugehörigen Streuungen*

Dies wurde gelöst, indem die Werte der Standardabweichung nicht wie beim Variationskoeffizienten (siehe *Gleichung 6.1*) durch den jeweiligen Mittelwert $\bar{x}$ dividiert wurden, sondern durch die maximale absolute Änderung des Mittelwertes $\Delta\bar{x}_{max}$ während der Lebensdauer.

Damit ergibt sich eine um die Einheiten bereinigte und vergleichbare Größe, die sowohl die Größe der Streuungen als auch die Größe der absoluten Änderung berücksichtigt und im Rahmen dieser Arbeit als bezogener (bez.) Variationskoeffizient bez. v_{var} bezeichnet wird (siehe *Gleichung 6.2*). Eine Veranschaulichung findet sich diesbezüglich in *Abbildung 6.18*.

Variationskoeffizient: $$v_{\mathrm{var}} = \frac{s_x}{\bar{x}} \qquad (6.1)$$

Bezogener (bez.) Variationskoeffizient: $$bez.\ v_{var} = \frac{s_x}{\Delta\bar{x}_{max}} \qquad (6.2)$$

Der bezogene (bez.) Variationskoeffizient wurde für die verschiedenen Messgrößen sowohl für die Ermüdungsversuche im Lower-High-Cycle Bereich als auch die im Upper-High-Cycle Bereich bestimmt. Die entsprechenden Kurvenverläufe über die Lebensdauer sind vergleichend in den Diagrammen der *Abbildung 6.19* und *Abbildung 6.20* zusammengestellt. In den Diagrammen findet sich zusätzlich in der Legende die Angabe über die der Auswertung zugrunde liegende Anzahl der jeweiligen Messungen.

Verformungen: Der bez. Variationskoeffizient für die beiden Verformungen $\varepsilon_{f,0}$ und $\varepsilon_{f,max}$ zeigt jeweils sowohl in den LHC- als auch in den UHC-Versuchen nahezu gleiche Verläufe. Dies liegt an den in beiden Fällen sehr ähnlichen relativen Entwicklungen und Streuungen der beiden Verformungsgrößen. Allerdings liegt der bez. Variationskoeffizient in den LHC-Versuchen deutlich über dem in den UHC-Versuchen, was aber prinzipiell so auch für alle anderen betrachteten Größen gilt. Die Verformungen in den UHC-Versuchen erreichen deutlich größere Werte als in den LHC-Versuchen (siehe *Tabelle 6.3*), was sich in der Zusammensetzung der Verformungen aus mehreren verschiedenen Anteilen begründet. Außerdem ist es notwendig, die Verformungen von Beginn an mit zumessen, was zumindest eine permanente Applizierung mit Messtechnik erfordert. Aufgrund dieser Tatsachen und wegen der im Verhältnis zu den meisten anderen Größen relativ großen bez. Variationskoeffizienten eignen sich die Verformungen nur sehr eingeschränkt als Schädigungsindikator.

Steifigkeiten: Im Gegensatz zu den Verformungen weisen die drei jeweils betrachteten E-Moduli sowohl in den LHC- als auch in den UHC-Versuchen sehr unterschiedliche Verläufe in den bez. Variationskoeffizienten auf. Für die beiden E-Moduli $E_{f,m}$ und $E_{f,max}$ kann aufgrund der Größe und der teils sehr ungleichmäßigen Verläufe der bez. Variationskoeffizienten direkt abgeleitet werden, dass diese beiden nicht als Schädigungsindikator geeignet sind. Dies liegt vorrangig an den geringen absoluten Änderungen der Größen während der Lebensdauer und der im Verhältnis dazu relativ großen Streuungen. Aus der Betrachtung der Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung wird dies besonders ersichtlich (*Abbildung 6.3*). Trotzdem liefert speziell der hier verwendete Sekantenmodul $E_{f,max}$ aufgrund seines signifikanten Verlaufes zu Beginn der Lebensdauer mit dem Stagnieren in seiner Zunahme einen guten Hinweis darauf, wann die Phase I der Lebensdauer abgeschlossen ist. Alle drei E-Moduli erreichen am Ende in den LHC-Versuchen etwas andere Endwerte in der relativen Entwicklung als in den UHC-Versuchen (siehe *Tabelle 6.3*). Die Unterschiede sind dabei aber im Verhältnis zu denen bei den anderen untersuchten Größen noch gering.

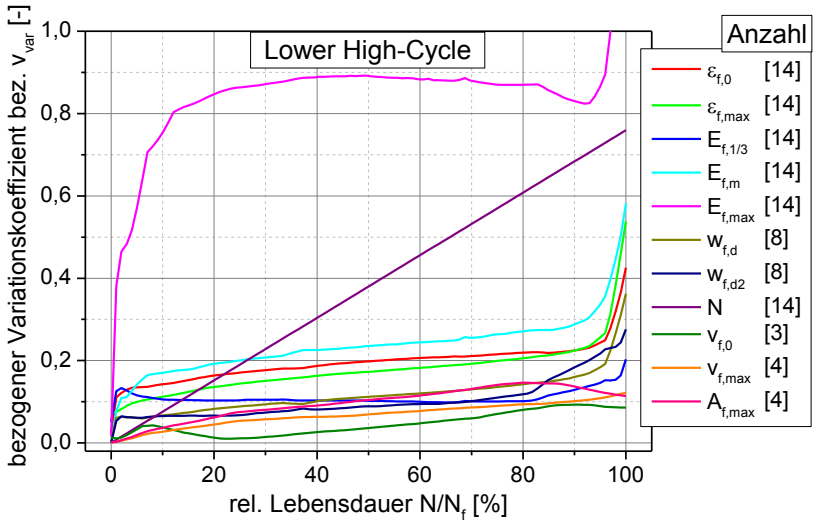

Abbildung 6.19: *Vergleich der Entwicklungen der bez. Variationskoeffizienten über die Lebensdauer für die verschiedenen Messgrößen aus den LHC-Versuchen*

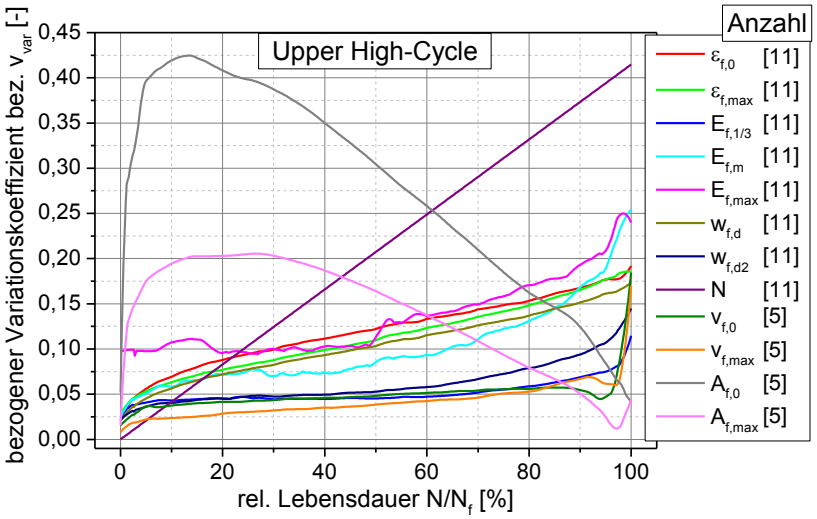

Abbildung 6.20: *Vergleich der Entwicklungen der bez. Variationskoeffizienten über die Lebensdauer für die verschiedenen Messgrößen aus den UHC-Versuchen*

Der E-Modul $E_{f,1/3}$ weist, im Gegensatz zu den beiden zuvor betrachteten E-Moduli, in beiden Beanspruchungsfällen mit den geringsten bez. Variationskoeffizienten auf. Weiterhin besitzt dieser in beiden Fällen den konstantesten Verlauf aller bez. Variationskoeffizienten über die gesamte Lebensdauer. Dies macht ihn prinzipiell zu einem gut geeigneten Schädigungsindikator, was bei der Betrachtung der zugehörigen Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (*Abbildung 6.3* und *Abbildung 6.15*) bereits ersichtlich war. Neben den geringen bez. Variationskoeffizienten zeigt der E-Modul $E_{f,1/3}$ zudem bei unterschiedlich hohen Beanspruchungen verschieden große Endwerte in den Steifigkeitsreduzierungen. Bei den beiden hier untersuchten Beanspruchungsfällen hat dies im Mittel zu 6 % mehr Steifigkeitsreduzierung in den UHC-Versuchen geführt. Damit spiegelt der E-Modul auch die in Kapitel 5.4 festgestellten Unterschiede in den Schädigungszuständen für verschiedene Ermüdungsbeanspruchungen wider.

Die Ermittlung des E-Moduls basiert zwar auf der Dehnungsmessung und auf einer Referenzmessung zu Beginn der Lebensdauer, erfordert aber keine permanente Messung bzw. Applizierung, sondern kann partiell zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen. Allerdings werden definierte Belastungsrampen benötigt.

Energien: Der bez. Variationskoeffizient für den Gesamtenergieeintrag $w_{f,d}$ zeigt zwar in den LHC-Versuchen einen geringen und zum Energieeintrag $w_{f,d2}$ sehr ähnlichen Verlauf, liegt jedoch dagegen in den UHC-Versuchen mit im oberen Bereich und ist deutlich höher als der von $w_{f,d2}$. Da $w_{f,d}$ vor allem durch die Gesamtverformung $\varepsilon_{f,max}$ bestimmt wird, ist es nur schlüssig, dass $w_{f,d}$ im Hinblick auf seine Eignung als Schädigungsindikator den Verformungen gleich kommt.

Dagegen weist die Energiegröße aus der Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Linie $w_{f,d2}$ sowohl bei den LHC- als auch bei den UHC-Versuchen einen der niedrigsten sowie auch einen der konstantesten Verläufe des bez. Variationskoeffizienten auf. Die Besonderheit bei dieser Energiegröße ist aber, dass sie im Mittel bei den LHC- und den UHC-Versuchen auf nahezu den identischen Endwert zuläuft (siehe *Tabelle 6.3*) und auch zuvor einen sehr ähnlichen Verlauf aufweist, wie bereits in Kap. 5.3.2 dargestellt wurde. Diese Tatsache steht jedoch der in Kapitel 5.4 gemachten Feststellung über die unterschiedlichen Schädigungszustände bei LHC- und UHC-Versuchen entgegen. Vor diesem Hintergrund stellt $w_{f,d2}$ zwar prinzipiell einen guten Schädigungsindikator dar, vermag aber letztlich nicht, die unterschiedlichen Schädigungszustände der LHC- und UHC-Versuche zu erfassen.

Ob sich dieses hier beobachtete spezielle Verhalten von $w_{f,d2}$ auch bei anderen als den hier betrachteten Ermüdungsbeanspruchungen einstellt oder hier nur aus einer speziellen Konstellation resultiert, ist offen und zu klären. Die Bestimmung von $w_{f,d2}$ gestaltet sich ähnlich wie die des E-Moduls. Sie basiert auf der Dehnungsmessung, erfordert eine Referenzmessung zu Beginn, benötigt definierte Belastungsrampen und kann partiell zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden.

Zyklenzahlen: Die Versuche haben schnell gezeigt, dass die Ermüdungslastspielzahlen eine Größe mit einer der größten Streuungen innerhalb der Versuche sind. Dies ist auch in vielfältiger Weise aus verschiedener Literatur zur Thematik ersichtlich. Die Verläufe der beiden bez. Variationskoeffizienten in den Diagrammen in *Abbildung 6.19* und *Abbildung 6.20* weisen dementsprechend mit die höchsten und auch veränderlichsten Werte auf. Bereits der in Kapitel 4.4.4 in *Abbildung 4.28* vorgestellte Vergleich der Ermüdungslastspielzahlen, bei der Entwicklung einer geeigneten Methode zum gezielten Abbruch von Versuchen, hat sehr deutlich herausgestellt, dass Lastzyklen als Schädigungsindikator sehr ungeeignet sind. Darüber hinaus erfordern sie, ähnlich wie die Bestimmung der Verformungen, eine permanente Messung bzw. Zählung.

Ultraschallmessungen: Bei den Ultraschallmessungen sind zum einen die Messungen der Schallgeschwindigkeiten sowie der Signalamplituden und zum anderen die Messungen orthogonal sowie parallel zur Beanspruchungsrichtung zu unterscheiden. Da in allen Fällen nur sehr wenige und besonders im Vergleich zu den zuvor diskutierten Größen zu unterschiedlich viele Messungen vorliegen, ist eine statistische Auswertung und vor allem ein repräsentativer Vergleich mit den anderen Größen nicht realisierbar. Trotzdem finden sich zumindest für die aus den wenigen Messungen ermittelten Werte die bez. Variationskoeffizienten mit in den Diagrammen der *Abbildung 6.19* und *Abbildung 6.20*. Es handelt sich dabei jedoch allein um Größen aus den horizontalen Messungen, da die vertikalen nur sehr selten durchgeführt wurden. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den LHC- und UHC-Versuchen zu ermöglichen, wurden nur die Messungen verwendet, die in beiden Versuchsreihen mit dem gleichen Mess-

system (UKS-D) erzeugt wurden. Für eine Bestimmung des bez. Variationskoeffizienten standen im Falle der LHC-Versuchen unter der Grundlast S_0 nicht ausreichend Messungen zur Verfügung.

Die Ultraschallamplituden zeigen prinzipiell eine große Sensitivität gegenüber der Schädigung, da sie von 100 % zu Beginn auf nahezu 0 % beim Ermüdungsversagen zurückgehen. Dementsprechend weist der bez. Variationskoeffizient bei den LHC-Versuchen mit einen der geringsten und auch konstantesten Werte auf, wobei dieser nur auf vier Messungen basiert. Allerdings hat sich auch herausgestellt, dass die Amplitude besonders empfindlich gegenüber der Ankopplung und vor allem auch Veränderungen dieser über die Zeit ist. Damit können die extremen Streuungen in den Verläufen der Amplituden bei den sehr lang laufenden UHC-Versuchen erklärt werden. Hier konnte eine dauerhaft konstante Ankopplung nicht in ausreichender Weise realisiert werden. Die Unterschiede in den Endwerten bei LHC- und UHC-Versuchen zeigen eine Erfassung der verschiedenen Schädigungszustände durch die Ultraschallamplituden. Damit bietet die Amplitude der Ultraschallmessungen prinzipiell die Voraussetzungen für einen sehr guten Schädigungsindikator, allerdings nur unter der Bedingung einer guten und dauerhaft konstanten Ankopplung der Sensoren.

Dagegen weisen die Ultraschallgeschwindigkeiten keine derart ausgeprägte Sensitivität gegenüber der Ankopplung auf, sind dafür aber auch nicht ganz so sensitiv im Bezug auf die Schädigung. Ihre bez. Variationskoeffizienten zeigen in *Abbildung 6.19* und *Abbildung 6.20* für die LHC- und die UHC-Versuche jeweils die geringsten Werte und mit die konstantesten Verläufe. Obwohl es sich um deutlich weniger Messungen als bei den Verformungen, Steifigkeiten oder Energien handelt, zeichnen sich diese durch besonders geringe Streuungen aus. Die Endwerte der relativen Schallgeschwindigkeiten streben bei den UHC-Versuchen mit ca. 52 % einen wesentlich geringeren Wert an, als bei den LHC-Versuchen mit ca. 73 %. Sie spiegeln damit in gleicher Weise wie die Amplituden die verschiedenen Schädigungszustände wider. Vor diesem Hintergrund eignen sich die Schallgeschwindigkeiten ebenfalls gut als Schädigungsindikator. Sie weisen zugleich im Vergleich zum E-Modul $E_{f,1/3}$ eine noch größere Sensitivität bezüglich der unterschiedlichen Schädigungszustände im Materialgefüge bei den LHC- und UHC-Versuchen auf.

Die Messung der Signalamplituden und der Schallgeschwindigkeiten kann wie bei den E-Moduli oder Energien partiell zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen und erfordert ebenfalls eine Referenzmessung zu Beginn. Allerdings benötigen sie im Gegensatz zu den anderen keine speziellen Belastungsrampen. Es ist aber zumindest im Hinblick auf die hier verwendete Messtechnik auf eine dauerhaft konstante Ankopplungssituation zu achten.

Schallemissionsmessungen: Da die Messung der Schallemissionen im Gegensatz zu den Ultraschallmessungen ein passives Verfahren ist, das einzelne lokale Ereignisse detektiert, sind die absoluten Werte der Messungen extrem stark von der Anzahl, der Position und auch der Ankopplung der Sensoren abhängig. Aus diesem Grund gibt es keine Einzelkurven und Mittelwertverläufe, die eine statistische Auswertung wie bei den anderen Größen ermöglichen. Daher erfolgt an dieser Stelle allein eine qualitative Betrachtung. Wie in den Kapiteln 5.1.1 und 5.3.1 oder auch 5.5.1 schon gezeigt, weisen die Messungen der Schallemissionsaktivitäten (Hitrate) zwar absolut sehr unterschiedliche Werte auf, liefern aber zugleich auch sehr charakteristische und in ihrer Form vor allem immer sehr ähnliche Verläufe. Als Schädigungsindikator eignen sich diese Verläufe mit einem Peak am Anfang und am Ende und dem flachen Verlauf im mittleren Bereich allerdings kaum. Jedoch erlaubt der sehr ausgeprägte Anstieg im Verlauf der Hitrate kurz vor dem Ermüdungsversagen eben diese Phase vor dem Versagen sehr gut zu detektieren. Auf dieser Grundlage wurden sehr erfolgreich die Ermüdungsversuche in der UHC-Versuchsreihe für die anschließenden zerstörenden Nachprüfun-

gen in der Phase III vor dem Ermüdungsversagen angehalten. Die Messung der Schallemissionen kann wie bei den Ultraschallmessungen ebenfalls partiell zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen, wobei eine Referenzmessung zu Beginn sowie definierte Belastungsrampen zweckmäßig sind.

Restbruchfestigkeiten: Zu den statischen Restfestigkeiten der Proben bei verschiedenen Lebensdauerzuständen liegen im Rahmen der hier durchgeführten Versuche nicht ausreichend viele Ergebnisse vor, um eine statistische Auswertung zu erlauben. Die in Kapitel 5.1.2 in *Abbildung 5.10* gezeigten Ergebnisse (siehe auch Anhang B1 *Abbildung B1 3*) belegen jedoch, dass sich die Restfestigkeit nur in geringem Maße ändert. Dies erfolgt zudem erst durch eine leichte Erhöhung und ganz zum Schluss durch eine mäßige Verringerung der Festigkeitswerte. Berücksichtigt man dabei die normalen Streuungen bei Betondruckfestigkeiten, folgt sehr schnell, dass die Betondruckfestigkeit kein geeigneter Schädigungsindikator ist, zumal es sich auch um eine zerstörende Prüfmethode handelt.

Mikrorisse: Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen zu den Mikrorisszuständen mittels Lichtmikroskop und REM sind für den Zweck der Schädigungsidentifikation nur eingeschränkt geeignet. Zum einen sind mit jeweils nur zwei Probekörpern je untersuchtem Schädigungszustand die geringste Anzahl an Stichproben für eine Messung genommen worden. Zum anderen haben die Experimente außerdem gezeigt, dass die eingetragenen Schädigungen im Materialgefüge generell sehr inhomogen verteilt sind, die durchgeführten Mikrorissuntersuchungen dagegen aber nur sehr kleine lokale Bereiche zu betrachten vermögen. Es ist daher schwer mit dieser Methode repräsentative Ergebnisse der einzelnen Gefügezustände und damit auch zwischen den Proben vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Trotzdem haben die Untersuchungen eine charakteristische Entwicklung in den Mikrorisszuständen erkennen lassen. Jedoch zeigt das Rissbild im Betongefüge bei der hier untersuchten hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchung erst mit Beginn der Phase III nennenswerte erkennbare Veränderungen. Davor ist eine ermüdungsbedingte Veränderung nicht feststellbar gewesen. Vor diesem Hintergrund ist das Mikrorissbild nicht besonders geeignet, um den Schädigungszustand zu erfassen. Einzig die Ergebnisse der Rissrichtungen haben im Verlaufe der Lebensdauer zumindest einen Hinweis darauf gegeben, in welcher Richtung die Beanspruchung stattgefunden hat. Berücksichtigt man den im Verhältnis sehr hohen Aufwand bei der Durchführung dieser zerstörenden Untersuchung im Vergleich zu den gewonnenen Erkenntnissen zum Schädigungszustand, kann geschlussfolgert werden, dass diese Methoden in diesem Zusammenhang nicht geeignet sind, um einen brauchbaren Indikator für den Schädigungszustand des Betons zu liefern.

Ergebnis: Als geeignetste Indikatoren für den Schädigungszustand im Rahmen dieser Betrachtung haben sich der E-Modul $E_{f,1/3}$, die Ultraschallgeschwindigkeiten und bei entsprechender Umsetzung auch die Ultraschallamplituden herausgestellt (*Tabelle 6.3*). Mit leichten Einschränkungen kann auch die Energiegröße $w_{f,d2}$ als geeigneter Schädigungsindikator angesehen werden.

Für den relativen Lebensdauerzeitpunkt hingegen bieten die Energiegröße $w_{f,d2}$ und die Ultraschallamplituden die geeignetsten Indikatoren. Letztere sollten bei entsprechend guter Umsetzung sogar einen sehr guten Lebensdauerindikator darstellen. Daneben liefern mit leichten Einschränkungen aber auch die Ultraschallgeschwindigkeiten sowie der E-Modul $E_{f,1/3}$ geeignete Lebensdauerindikatoren (*Tabelle 6.3*).

Es bleibt aber prinzipiell bei der vergleichenden Auswertung zu berücksichtigen, dass die Phase der Bruchflächenbildung am Ende der Lebensdauer durch zufällige Schädigungslokali-

sation und Ausbildung von makroskopischen Bruchflächen charakterisiert ist und damit per se zu sehr hohen Streuungen in den Ergebnissen in diesem Bereich führt. Dies gilt besonders für Größen, die auf Grundlage der Dehnungen ermittelt wurden, da diese ganz wesentlich von der oberflächennahen Rissbildung beeinträchtigt werden. Eine realistische Bewertung und ein Vergleich der einzelnen hier betrachteten Größen sind daher in der Endphase der Ermüdungslebensdauer ab ca. 90 % nur bedingt möglich.

Tabelle 6.3: *Vergleich und Bewertung der verschiedenen Messgrößen im Hinblick auf die Eignung als Schädigungs- und Lebensdauerindikator auf Basis der LHC- und UHC-Versuche mit Mittelwerten*

Parameter	***Größe***	***Schädigungs-indikator***		***Endwert LHC***	***Endwert UHC***	***Lebensdauer-indikator***
		Lower HC	***Upper-HC***			***LHC+UHC***
Verformungen	$\varepsilon_{f,0}$ [‰]	weniger gut	weniger gut	0,85	1,54	ungeeignet
	$\varepsilon_{f,max}$ [‰]	weniger gut	weniger gut	2,68	3,05	ungeeignet
E-Modul	$E_{f,1/3}$ [%]	gut	gut	71	65	weniger gut
	$E_{f,m}$ [%]	weniger gut	weniger gut	84	88	ungeeignet
	$E_{f,max}$ [%]	weniger gut	weniger gut	99	106	ungeeignet
Energien	$w_{f,d}$ [N/mm²]	gut	weniger gut	0,0544	0,0743	weniger gut
	$w_{f,d2}$ [N/mm²]	[1]gut	[1]gut	0,0105	0,0107	gut
Zyklenzahlen	N [-]	ungeeignet	ungeeignet	12.600	4,35 Mio.	ungeeignet
Ultraschall	$v_{f,0}$ [%]	gut	gut	73,2	50	weniger gut
	$v_{f,max}$ [%]	gut	gut	74	54,5	weniger gut
	$A_{f,0}$ [%]	-	[2]ungeeignet	13	2,7	gut
	$A_{f,max}$ [%]	gut	[2]ungeeignet	12	4,5	gut
Schallemission	Hitrate	weniger gut	ungeeignet	-	-	ungeeignet
Bruchfestigkeit	f_c	-	ungeeignet	-	-	-
Mikroskopie		-	ungeeignet	-	-	-
REM		-	ungeeignet	-	-	-

[1] weniger gut geeignet um die unterschiedlichen Schädigungszustände zwischen LHC und UHC zu differenzieren

[2] Ergebnis im Rahmen dieser Untersuchungen, bei guter dauerhafter Ankopplung prinzipiell sehr gute Eignung möglich

Anwendbarkeit in der Praxis

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen fanden alle unter stabilen und idealen Laborbedingungen statt, so dass die auf dieser Basis gewonnenen Erkenntnisse nicht zwangsläufig auf die Praxis übertragen werden können. Dies gilt besonders für die in diesem Kapitel angestellten Betrachtungen für einen geeigneten Schädigungs- und Lebensdauerindikator. Denn je nach den örtlichen Gegebenheiten sowie der Belastungscharakteristik eines Bauwerks sind einige der genannten Untersuchungsmethoden nicht mehr anwendbar oder

einfach nicht geeignet. Hinzu kommt außerdem, dass es sich in der Regel um bewehrten Beton in der Praxis handelt, im Gegensatz zu den hier untersuchen Probekörpern.

Die beiden im Labor als mit am besten geeignet identifizierten Größen E-Modul $E_{f,1/3}$ und Energiegröße $w_{f,d2}$ basieren neben einer genauen Messung der Dehnungen bzw. Verformungen auch auf einer definierten Beanspruchungssituation. Hierfür müsste zu beliebigen Zeitpunkten eine klar definierte Be- bzw. auch Entlastungsrampe gefahren werden, was an vielen Bauwerken einfach nicht möglich sein wird. Dagegen erlaubt die Ultraschallmessung eine von der Belastungssituation relativ unabhängige Untersuchung und ermöglicht es zugleich, gezielt bestimmte Stellen oder Bereiche des Tragwerks zu untersuchen, was bei den beiden anderen Größen kaum möglich ist. Bei einer entsprechend qualitativen und dauerhaften Umsetzung der Ankopplung, ggf. auch mit fest installierten Sensoren, lassen sich mit Sicherheit neben den Schallgeschwindigkeiten auch die Signalamplituden verwertbar messen. Beide Größen stellen bei den hier verglichenen Messgrößen die besten Indikatoren für den Schädigungszustand und auch für den relativen Lebensdauerzeitpunkt dar.

Vor diesem Hintergrund ist die Ultraschallmessung für die Anwendung in der Praxis die geeignetste Messmethode. Die restlichen in *Tabelle 6.3* aufgeführten Größen stellen aus Sicht des Autors aufgrund der Sensitivität sowie der Umsetzbarkeit weniger geeignete Größen für die Identifikation des Schädigungszustandes und des Lebensdauerzeitpunktes in der Praxis dar, was im speziellen Einzelfall aber auch anders sein kann.

Schlussfolgerung und Fazit

Die in diesem Kapitel durchgeführten Vergleiche und Bewertungen sollten vorrangig zur Klärung der Fragestellung dienen:

Welche Größe ist am besten als Schädigungs- bzw. Lebensdauerindikator geeignet und welche Messmethode bietet eine praxisgerechte Lösung, um den jeweiligen Zustand zu bestimmen?

Aus diesem Kapitel lässt sich schlussfolgern, dass keine der hier betrachteten Größen bzw. Messmethoden einen wirklich idealen Indikator sowohl für den Schädigungszustand als auch für den Lebensdauerzeitpunkt des Ermüdungsvorgangs von Beton liefert. Die erhoffte bzw. gewünschte Genauigkeit zur Bestimmung des jeweiligen Zustandes der Schädigung und der Lebensdauer wies keine der Größen auf. Als mit am geeignetsten für den Schädigungszustand hat sich die Steifigkeit im unteren Spannungsbereich in Form des E-Modul $E_{f,1/3}$ gezeigt. Dessen Ermittlung wird in der Praxis jedoch selten realisierbar sein. An dieser Stelle bietet die Ultraschallmessung eine praxisfreundliche Lösung sowie zum Teil sogar besser als Indikator geeignete Messgrößen. Deren Messung ist im Vergleich relativ unproblematisch umzusetzen. Je nach der Art und der Güte der Umsetzung, kann sie mit der Messung der Signalamplitude sogar eine wesentlich höhere Sensitivität bieten. und damit zugleich einen guten Schädigungs- und Lebensdauerindikator liefern.

Generell bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass die hier gemachten Beobachtungen nur an einem Beton, nur für einstufige Ermüdungsbeanspruchungen und auch nur für zwei verschiedene Beanspruchungsniveaus gewonnen wurden. Inwieweit sich diese Ergebnisse im Einzelnen auch auf andere Ermüdungsbeanspruchungen und auch Betone übertragen lassen, kann an dieser Stelle nicht belastbar geklärt werden und ist möglichst durch weitere Untersuchungen zu belegen.

6.5 Ansätze zur Abbildung der Schädigungsevolution

Aus den beiden vorangegangenen Unterkapiteln ist hervorgegangen, welche Entwicklungen im Rahmen der Ermüdungsbetrachtung von Beton eine herausgehobene Relevanz besitzen und somit auch einer Abbildung über entsprechende Ansätze bedürfen. Dabei haben sich im Wesentlichen zwei Schwerpunkte hervorgetan:

I. Die Erfassung der ermüdungsbedingten Veränderung des Materialverhaltens (hervorgegangen aus Kapitel 6.3)

II. Die Erfassung des Schädigungszustandes über einen Schädigungsindikator (hervorgegangen aus Kapitel 6.4)

Aus Kapitel 6.3 geht bezüglich Schwerpunkt I. hervor, dass sich die ermüdungsbedingte Materialschädigung in einer Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung äußert. Im Falle des Betons, der durch Ermüdungsbeanspruchungen im Druckbereich belastet wird, kann diese Veränderung jedoch nicht durch einen skalaren Schädigungswert erfasst werden. Vielmehr benötigt eine Beschreibung dieser Veränderung mehrere Parameter. Daher werden hier die aus den experimentellen Untersuchungen ermittelten wesentlichen Größen betrachtet, durch deren Entwicklung die tatsächliche ermüdungsbedingte Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons charakterisiert ist. Die *Abbildung 6.21* veranschaulicht, durch welche Größen, die in den experimentellen Untersuchungen ermittelt wurden, die Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung bestimmt wird. Für deren in den Versuchen beobachteten Entwicklungen werden entsprechende Evolutionsgleichungen abgeleitet, die ihr Verhalten näherungsweise abbilden können.

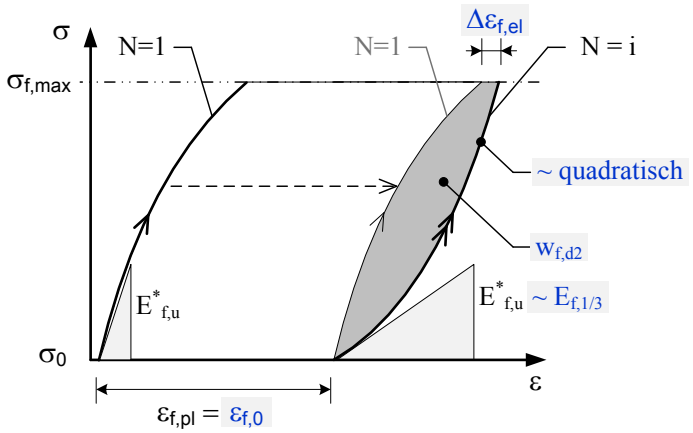

Abbildung 6.21: *Schematische Veranschaulichung der wesentlichen Größen, die die ermüdungsbedingte Veränderung des Materialverhaltens charakterisieren, blau hervorgehoben*

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, findet die am signifikantesten ausgeprägte Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung im unteren Spannungsbereich statt. Diese wird durch die Entwicklung der dortigen Steifigkeit $E^*_{f,u}$ beschrieben. In den experimentellen Untersuchungen wurde diese Größe zwar nicht explizit gemessen, sie kann aber gut mit dem im unteren Spannungsbereich gemessen Sekantenmodul $E_{f,1/3}$ erfasst werden. Des Weiteren handelt es sich bei den charakteristischen Größen um den Energieeintrag $w_{f,d2}$, der sich aus der Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Linie ergibt, den Zuwachs im elastischen Verfor-

mungsanteil $\Delta\varepsilon_{f,el}$ sowie die bleibende Verformung $\varepsilon_{f,0}$. Darüber hinaus kommt noch die Feststellung aus Kapitel 5.3 hinzu, dass in den Ermüdungsversuchen die Spannungs-Dehnungs-Beziehung im geschädigten Zustand einen annähernd quadratischen Zusammenhang zwischen den Dehnungen und den Spannungen aufweist.

Im Bezug auf Schwerpunkt II. hat sich im Kapitel 6.4 herausgestellt, dass für eine Bestimmung und Erfassung von ermüdungsbedingten Schädigungszuständen sowie Lebensdauerzeitpunkten im Beton die Ultraschallmessung am besten geeignet ist. Dies war das Resultat im Hinblick auf die Praxistauglichkeit und basiert auf dem Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messmethoden. Vor diesem Hintergrund werden auch für die in den Versuchen beobachteten Entwicklungen der Ultraschallgeschwindigkeiten v_f sowie für deren Signalamplituden A_f entsprechende Evolutionsgleichungen abgeleitet.

Die Grundlage für die Ableitung der Evolutionsgleichungen bildet eine Funktion, die einen s-förmigen Verlauf besitzt und somit die charakteristische 3-phasige Entwicklung während des Ermüdungsvorgangs wiedergeben kann. Verwendet wurde dazu der in *Gleichung 6.3* dargestellte gebrochen rationale Ansatz mit 5 Parametern.

Evolutionsgleichung:
$$f(x) = C_1 + \frac{C_2}{x + C_3} + \frac{C_4}{x + C_5} \qquad (6.3)$$

Der prinzipielle charakteristische Verlauf dieser Funktion ist in *Abbildung 6.22* dargestellt. Dieser Funktionsansatz wurde als Grundlage für die Beschreibung aller ausgewählten Messgrößen verwendet.

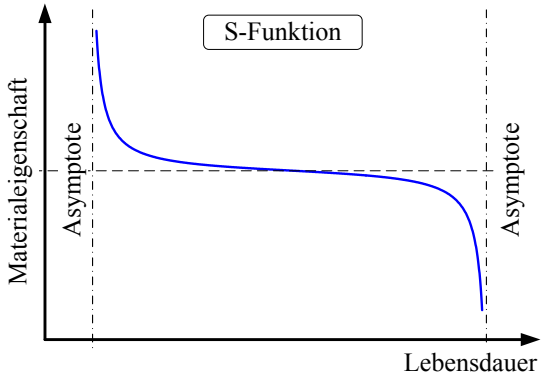

Abbildung 6.22: *Allgemeine Darstellung des verwendeten gebrochen rationalen Funktionsansatzes zur Abbildung s-förmiger Evolutionskurven*

Die Anpassung des allgemeinen Ansatzes an die jeweiligen experimentell ermittelten gemittelten Kurvenverläufe der einzelnen Größen erfolgte mittels einer nichtlinearen Regressionsanalyse, die mit Hilfe des Programms MATLAB durchgeführt wurde.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Abtastrate über die Lebensdauer hinweg in den LHC-Versuchen gegenüber den UHC-Versuchen, eigenen sich die Messergebnisse der LHC-Versuche nur eingeschränkt für die Ableitung von Evolutionskurven. Die Qualität der abgeleiteten Funktionen im Bezug auf das tatsächliche Verhalten wäre in diesem Fall deutlich

geringer. Vor diesem Hintergrund wurden nur die gemittelten Messergebnisse der UHC-Versuche für die Bestimmung von Evolutionsgleichungen herangezogen. Die ermittelten Parameter für die Evolutionsgleichungen der einzelnen Größen, die die Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung charakterisieren, sind in der *Tabelle 6.4* wiedergegeben.

Tabelle 6.4: *Ermittelte Parameter für die Evolutionsgleichungen der relevanten Größen, die die ermüdungsbedingte Veränderung des Materialverhaltens beschreiben*

Messgröße	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
ε_0	122,9	2,0	2,8	24.845	-1.894
$\Delta\varepsilon_{el}$	-0,021	1,4	14,9	10	-142,8
$E_{1/3}$	156,9	11,3	0,68	44.252	-596
$w_{d,2}$	-0,0012	-0,0071	2,1	-1,2	-209

Für die Evolutionsgleichungen der einzelnen Ultraschallgrößen, die zur Bestimmung des Schädigungszustandes sowie Lebensdauerzeitpunktes dienen, sind die ermittelten Parameter hingegen in *Tabelle 6.5* zusammengestellt. Als Grundlage für die Ableitung der Evolutionsgleichungen wurden nur die Messergebnisse verwendet, die mit dem Ultraschall-Messsystem UKS-D ermittelt wurden. Ursache dafür war zum einen, dass nur das UKS-D gleichzeitig eine Ermittlung der Signalgeschwindigkeit und der Signalamplitude erlaubte. Zum anderen lieferte es gegenüber den Ergebnissen aus dem Schallemissionssystem sensitivere Messungen bezüglich der Ermüdungsschädigung.

Tabelle 6.5: *Ermittelte Parameter für die Evolutionsgleichungen der relevanten Größen für eine Zustandsbestimmung anhand von Ultraschallmessungen*

Messgröße	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
US $v_{f,0}$	83,6	147,4	8,6	450,3	-115,4
US $v_{f,max}$	88,4	216	16,6	286,5	-109,2
US $A_{f,0}$	253,6	149,4	3,9	92.346	-470
US $A_{f,max}$	142,7	533,6	14,1	20.777	-245

Vollständige Anpassungen an die gemittelten Messkurven waren nicht möglich. Die Anpassung der einzelnen Parameter erfolgte im Hinblick darauf, dass eine gute Näherung der Kurvenverläufe im relevanten mittleren Bereich der Lebensdauer erreicht werden konnte. Die größten Abweichungen gibt es daher im Bereich zu Beginn und zum Ende des Ermüdungsvorgangs. Diese besitzen jedoch im Vergleich eine geringere Relevanz bei der Beschreibung und Erfassung des Ermüdungsvorgangs.

Beispielhafte Verläufe der bestimmten Evolutionsgleichungen zusammen mit den zugehörigen Messkurven sind für den E-Modul $E_{f,1/3}$ sowie die Ultraschallgeschwindigkeit $v_{f,0}$ in der *Abbildung 6.23* dargestellt. Zu erkennen ist in den Vergleichen eine gute Anpassung der einzelnen Verläufe an die experimentellen Beobachtungen über den größten Bereich der Lebensdauer. Für die restlichen Größen sind die Verläufe der Evolutionsgleichungen zusammen mit den entsprechenden Messkurven im Anhang C in der *Abbildung C1 1* bis *Abbildung C1 3* wiedergegeben.

Ein Vergleich des hier vorgestellten gebrochen rationalen Ansatzes mit dem von [PFANNER 2002] verwendeten polynominalen Ansatz für die Evolutionsgleichung hat ergeben, dass der hier verwendete Ansatz insgesamt eine bessere Näherung der betrachteten Messverläufe ermöglicht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der von Pfanner angewendete Ansatz nur zur Beschreibung von Dehnungsentwicklungen formuliert wurde.

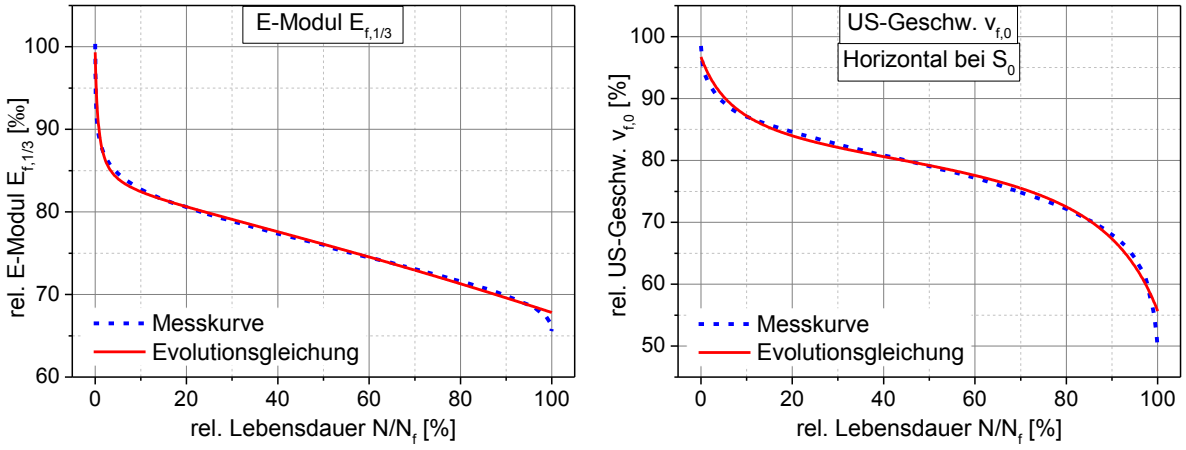

Abbildung 6.23: *Darstellung der abgeleiteten Funktionsgleichungen zusammen mit den zugehörigen Messkurven der UHC-Versuche für die Entwicklung des E-Moduls im unteren Beanspruchungsbereich (links) sowie für die Entwicklung der horizontalen US-Geschwindigkeit unter Grundlast S_0 (rechts)*

Schlussfolgerung und Fazit

Generell lässt sich feststellen, dass die hier entwickelten Ansätze in der Lage sind, die Entwicklungen von wesentlichen Materialeigenschaften bzw. Verhaltensweisen, die im Rahmen dieser Arbeit experimentell ermittelt wurden, gut anzunähern. Die abgeleiteten Evolutionsgleichungen für die charakteristischen Größen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung erlauben somit eine weitgehende Erfassung deren ermüdungsbedingter Veränderungen. Darüber hinaus ermöglichen die Evolutionsgleichungen der einzelnen Ultraschallgrößen, zumindest für die hier betrachteten Ermüdungsbeanspruchungen, eine relativ genaue Bestimmung von Schädigungszuständen sowie Lebensdauerzeitpunkten, z. B. im Rahmen von Zustandserfassungen. An dieser Stelle sind schließlich die Grenzen der vorliegenden Arbeit erreicht. Weiterführende Entwicklungen und Modellbildungen bleiben nachfolgenden Arbeiten vorbehalten.

Diesbezüglich bietet der vorgestellte Ansatz jedoch die Grundlage und das Potential, die ermüdungsbedingten Veränderungen auch für andere Betone sowie auch andere Beanspruchungskonstellationen zu erfassen. Des Weiteren stellt der vorgestellte Ansatz auch eine Grundlage für mögliche weiterführende Modellierungen im Rahmen der Ermüdung von Beton dar. Beispiele dafür wären die Abbildung der Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in einem Materialmodell oder auch ein Konzept zur Zustandserfassung unter Einbeziehung der Ultraschallmessungen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stand der Ermüdungsvorgang im Beton unter hochzyklischen Druckschwellbeanspruchungen. Die im Kapitel 3 dargestellte Literaturauswertung hat gezeigt, dass bezüglich der Ermüdung von Beton generell noch viele offene Fragestellungen bestehen. Besonders im Bezug auf den Ermüdungsvorgang an sich herrscht noch ein großes Wissensdefizit. Dass auch eine praktische Notwendigkeit im Hinblick auf die Ermüdungsthematik sowie auf bessere Kenntnisse zum Ermüdungsverhalten vorliegt, wurde im Kapitel 1.1 und 3.2.1 dargelegt. Da der Beton vorwiegend zum Abtrag von Druckbeanspruchungen eingesetzt wird, ist besonders sein Ermüdungsverhalten unter Druckbeanspruchungen von Interesse. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen dieser Arbeit im Wesentlichen drei Kernthemen behandelt:

- Anhand von systematischen und umfangreichen experimentellen Untersuchungen wurde ein tieferer Einblick in den ermüdungsbedingten Schädigungsvorgang innerhalb des Betons gewonnen.
- Auf Grundlage der experimentellen Beobachtungen wurde anschließend der Schädigungsvorgang analysiert sowie bewertet. In diesem Zusammenhang wurde eine mögliche Beschreibung für die ermüdungsbedingte Schädigungsevolution im Betongefüge abgeleitet und vorgestellt.
- Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen der beiden ersten Kernthemen wurde schließlich ein empirischer Ansatz vorgestellt, der die Schädigungsevolution anhand besonders relevanter Materialgrößen abzubilden vermag.

Aus der Bearbeitung dieser drei Kernthemen wurden eine Reihe von Ergebnissen und Erkenntnissen gewonnen, die die entsprechenden Antworten auf die im Kapitel 1.2 formulierten konkreten Fragestellungen liefern.

In den durchgeführten Versuchen wurden unbewehrte Betonzylinder mit Druckschwellbeanspruchungen beaufschlagt. Da es in erster Linie um die prinzipiellen Vorgänge während des Ermüdungsvorgangs ging, wurde nur ein Normalbeton in einstufigen Dauerschwingversuchen auf zwei Beanspruchungsniveaus untersucht. Dafür kamen begleitend umfangreiche Mess- und Untersuchungstechniken zum Einsatz. Eine Besonderheit der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Konzeptes, um im Rahmen der durchgeführten Ermüdungsversuche gezielt und relativ genau, bestimmte Lebensdauerzustände zu erzeugen, unabhängig von der Zyklenzahl.

Aus den durchgeführten experimentellen Untersuchungen sowie den darauf aufbauenden theoretischen Betrachtungen wurden schließlich die nachfolgend beschriebenen konkreten Erkenntnisse gewonnen.

Experimentell gewonnene Erkenntnisse zum Schädigungsprozess (Kapitel 5.1)

Die wesentlichste Feststellung aus dem untersuchten Ermüdungsvorgang ist, dass die ermüdungsbedingte Materialschädigung zu einer Veränderung der gesamten Spannungs-Dehnungs-Beziehung führt, womit die Beobachtungen von [MEHMEL & KERN 1962] und [JINAWATH 1974] bestätigt werden. Wie fast alle anderen beobachteten Materialeigenschaften ist sie von Beginn an einem fortlaufenden Evolutionsprozess unterworfen. Nach der frühzeitig einsetzenden Krümmungsumkehr im Belastungsast, stellt sich dabei in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ein annähernd quadratischer Zusammenhang zwischen den Dehnungen und den Spannungen ein.

Hauptsächlich wirkt sich die ermüdungsbedingte Materialschädigung auf den untersten Spannungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus. Trotzdem wird aber das gesamte Materialverhalten bis in den Nachbruchbereich verändert, was sich in einer zunehmenden Versprödung sowie einer Abnahme der Bruchenergie äußert. Eine Veränderung der Bruchfestigkeit konnte in diesem Zusammenhang erst in der Phase III des Ermüdungsvorgangs festgestellt werden, was sich mit den Beobachtungen von [MEHMEL & KERN 1962] und [HOHBERG 2004] deckt. Im Ergebnis lässt sich sagen, dass eine an einem zuvor unbeanspruchten Beton ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehung für das Verhalten eines zyklisch beanspruchten Betons nicht mehr repräsentativ ist.

Innerhalb des heterogenen Betongefüges stellt sich infolge der Druckbeanspruchung eine extrem inhomogene Dehnungsverteilung mit teils sehr hohen lokalen Dehnungskonzentrationen sowohl parallel als auch orthogonal zur Belastungsrichtung ein. Diese bilden sich speziell im weicheren Zementstein aus. Damit werden auch die Ergebnisse von [LUSCHE 1972] sowie die aus den numerischen Simulationen auf der Mesoebene bestätigt.

Bereits vor einer mechanischen Beanspruchung ist im Zementstein des Betons anscheinend eine ausgeprägte sehr feine Rissstruktur vorhanden, die vermutlich aus dem Hydratationsprozess resultiert. Die Mikrorisse bewegen sich im Bereich weniger µm und auch darunter. Im Ermüdungsvorgang spielen sie offensichtlich eine wichtige Rolle.

Während des Ermüdungsvorgangs konnte ein nennenswertes Wachstum in der Mikrorissstruktur nicht festgestellt werden. Die Hauptursache für die ermüdungsbedingten Veränderungen im Materialverhalten in Form eines Wachstums von Mikrorissen kann damit nicht bestätigt werden [IBUK 2008] und liegt daher offensichtlich woanders. Erst in der Phase III des Ermüdungsvorgangs setzt ein nachweislicher Zuwachs innerhalb der Mikrorissstruktur ein. Die währenddessen stattfindende Rissbildung in der Phase III ist eindeutig vorrangig parallel zur Belastung orientiert und findet überwiegend im Zementstein statt. Eine ausgeprägte Ausbildung von orthogonal zur Lastrichtung orientierten Mikrorissen, die oberhalb und unterhalb der Zuschlagskörner liegen, wurde nicht festgestellt. Damit können diese als Ursache für die beobachteten Steifigkeitsänderungen sowie die Änderung der Spannungs-Dehnungs-Linie nicht bestätigt werden, so wie es von [MEHMEL & KERN 1962] angenommen und von [IBUK 2008] beobachtet wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungen weisen darauf hin, dass die in den Versuchen festgestellten ermüdungsbedingten Veränderungen im Materialverhalten, speziell in der Phase I und II, vorrangig das Resultat viskoser Verformungsprozesse im Zementstein sind.

Darüber hinaus bestätigen fast alle Ergebnisse eine ausgeprägte Anisotropie der ermüdungsbedingten Materialschädigung im Beton.

Experimentell gewonnene Erkenntnisse zu den Einflussgrößen (Kapitel 5.2 – 5.5)

Der Vergleich von den Ermüdungsversuchen im oberen hochzyklischen Bereich mit zusätzlichen Ermüdungsversuchen im unteren hochzyklischen Bereich hat gezeigt, dass der Ermüdungsvorgang in beiden Fällen sehr ähnliche Charakteristika aufweist. Dies spiegelt sich in den Entwicklungen fast aller gemessenen Größen wider. Im Detail sind aber Unterschiede festzustellen. Der Ermüdungsvorgang scheint im unteren hochzyklischen Bereich, im Gegensatz zu dem im oberen hochzyklischen Bereich, durch ein frühzeitig einsetzendes Mikrorisswachstum bereits in der Phase I und II gekennzeichnet zu sein. Dieses bildet sich dafür weniger gleich verteilt, sondern vielmehr lokal konzentriert aus. Viskose Verformungsprozesse im Zementstein können sich dagegen wesentlich weniger ausbilden.

Der konkrete Schädigungszustand im Materialgefüge und damit auch die eingetragene Energiemenge sind abhängig vom Typ der aufgebrachten Beanspruchung. Geringere Ermüdungslasten mit längeren Laufzeiten führen zu stärkeren Schädigungszuständen im Gefüge und zu höheren Energieeinträgen. Daraus folgt, dass die bis zum Versagen notwendige Energie also verschieden und nicht immer gleich groß ist.

Basierend auf dieser Beobachtung konnte eine Gleichheit von Schädigungszuständen und zugehörigen Energieeinträgen zwischen statischen und zyklischen Beanspruchungen sowie auch zwischen verschiedenen zyklischen Beanspruchungen nicht bestätigt werden. Eine experimentelle Bestätigung der diesbezüglichen Annahme von [PFANNER 2002] war daher nicht möglich.

Neben den zyklischen Beanspruchungen hat sich herausgestellt, dass auch eine entsprechende reine Kriechbeanspruchung zu einer Veränderung der Steifigkeiten sowie der Spannungs-Dehnungs-Beziehung führt. Es entstehen ähnliche Veränderungen bzw. Schädigungen wie unter Ermüdung, nur weniger stark ausgeprägt. Die durch das Kriechen erzeugten Veränderungen und Schädigungen sind, teils wesentlicher, Bestandteil der unter Druckschwellbeanspruchungen beobachteten Schädigungen und Veränderungen. Vor diesem Hintergrund lässt sich ein Kriechanteil nicht einfach von einem zyklischen Anteil trennen.

Eine vergleichende Betrachtung im Bezug auf unterschiedliche Skalierungen der Probekörper hat ergeben, dass sich der Einfluss der Probengröße nicht nur im statischen, sondern auch im zyklischen Beanspruchungsfall wiederfindet. Dabei zeigten sich teils deutliche Unterschiede, die insgesamt jeweils zu einer geringeren Beanspruchbarkeit bei den größeren Proben im statischen und im zyklischen Beanspruchungsfall führten. Eine konkrete Beziehung konnte jedoch anhand der geringen Versuchszahlen nicht abgeleitet werden.

Ergebnisse aus den theoretischen Betrachtungen (Kapitel 6)

Grundlage für die durchgeführten theoretischen Betrachtungen waren in erster Linie die in Kapitel 5 vorgestellten eigenen experimentellen Beobachtungen.

Auf deren Basis wurde eine Beschreibung auf der Mesoebene abgeleitet, die die möglichen Abläufe im Materialgefüge während des gesamten Ermüdungsvorgangs wiedergibt. Sie deckt sich mit den meisten experimentellen Beobachtungen und liefert zugleich eine Erklärung für die Ursachen der Mehrzahl der beobachteten makroskopischen Veränderungen.

Im Bezug auf die Materialschädigung an sich haben die experimentellen Untersuchungen außerdem verdeutlicht, dass sich diese kaum direkt beobachten, geschweige denn quantifizieren lässt. Lediglich ihre verändernden Auswirkungen auf die verschiedenen Materialeigenschaften repräsentieren die makroskopisch feststellbaren Folgen der Materialschädigung.

Die Beeinflussung der einzelnen Materialeigenschaften durch die Materialschädigung fällt sehr unterschiedlich aus, so dass sie dementsprechend den Schädigungsgrad verschieden stark ausgeprägt bzw. teilweise auch nur bedingt wiedergeben. Deswegen kann der Grad der Materialschädigung nur anhand bestimmter (makroskopischer) Materialeigenschaften relativ gut quantifiziert werden.

Wie die experimentellen Untersuchungen bestätigt haben, resultiert die ermüdungsbedingte Materialschädigung in einer Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons. Eine Erfassung der Materialschädigung über die Veränderung der Steifigkeit anhand einer skalaren Größe bildet jedoch nicht die tatsächliche schädigungsbedingte Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ab. Dazu finden nachweislich zu unterschiedliche Veränderungen innerhalb der Spannungs-Dehnungs-Beziehung statt. Die in der Kontinuumsmechanik übliche Erfassung der Materialschädigung über eine auf die Steifigkeit bezogene skalare Größe, entspricht zumindest beim ermüdungsbeanspruchten Beton im Druckbereich bei Weitem nicht der Realität. Diese Feststellung gilt nicht nur für Druckschwellbeanspruchungen im oberen hochzyklischen Bereich, sondern auch für den unteren hochzyklischen Bereich und sogar für das hier untersuchte Kriechen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen und auch in den theoretischen Betrachtungen konnte kein absolut idealer Schädigungs- bzw. Lebensdauerindikator für die ermüdungsbedingte Materialschädigung im Beton gefunden werden. Keine der betrachteten Größen zeigte die gewünschte bzw. erforderliche Genauigkeit zur Bestimmung des Schädigungsgrades bzw. des relativen Lebensdauerzeitpunktes. Viele der betrachteten Größen sind prinzipiell nicht als Indikator geeignet. Hervorgetan haben sich aber die Steifigkeit im unteren Spannungsbereich sowie die Ultraschallgeschwindigkeiten und die Ultraschallamplituden, welche sich als generell geeignete Indikator-Größen herausstellten. Für die Praxis am besten geeignet ist allerdings die Ultraschallmessung. Bei entsprechender Art und Güte der Umsetzung der Messung, und damit auch der Realisierung einer verwertbaren Amplitudenmessung, bietet sie eine sehr hohe Sensitivität. Die Ultraschallmessung liefert aufgrund dieser Tatsachen sowohl einen guten Schädigungs- als auch zugleich einen guten Lebensdauerindikator. In dem durchgeführten Vergleich stellt sie daher die am besten geeignete Messmethode bzw. Indikator-Größe dar.

In diesem Zusammenhang hat sich ebenfalls herausgestellt, dass eine Abschätzung bzw. Bestimmung des aktuellen Schädigungszustandes oder Lebensdauerzeitpunktes anhand von zuvor ermittelten Bruchlastzyklen in keiner Weise eine annähernd realistische Abschätzung des Zustandes erlaubt. Die Streuungen sind einfach viel zu groß, selbst unter Laborbedingungen.

Abschließend konnte auf Grundlage eines gebrochen rationalen Ansatzes, im Rahmen der empirischen Beschreibung, die beobachtete ermüdungsbedingte Entwicklung von Materialgrößen abgebildet werden. Dies erfolgte für Größen, die sich zuvor als besonders relevant herausgestellt hatten. Dabei wurden Evolutionsgleichungen für diejenigen Größen abgeleitet, die die Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung charakterisieren sowie für die Größen, die sich als Schädigungs- bzw. Lebensdauerindikator zur Zustandserfassung als geeignet erwiesen hatten.

7.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nur eine sehr eingeschränkte Konstellation von Ermüdungsbeanspruchungen und Betonzusammensetzung untersucht werden. Sowohl die durchgeführten

experimentellen Untersuchungen als auch die anschließenden theoretischen Betrachtungen lieferten daher nur für einen sehr geringen Teil der im Bezug auf den Ermüdungsvorgang von Beton offenen Fragestellungen mögliche Antworten. Darüber hinaus haben sich aus den Untersuchungen auch neue, zusätzliche Fragestellungen ergeben, die es noch zu klären gilt. Vor diesem Hintergrund besteht, wie im Kapitel 3 beschrieben, nach wie vor ein umfangreicher Bedarf an Forschungen auf dem Gebiet der Betonermüdung und besonders im Bezug auf den Ermüdungsvorgang.

Aus der Vielzahl an möglichen Fragestellungen sollen an dieser Stelle nur für einige spezielle Fragestellungen, die sich im Rahmen dieser Arbeit ergeben haben, mögliche Anregungen für weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen auf diesem Gebiet gegeben werden.

Experimentelle Untersuchungen

Vor dem Hintergrund der sehr eingeschränkten Konstellation von Beanspruchungen und Betonzusammensetzung sind natürlich generell vergleichbare Untersuchungen unter anderen Beanspruchungsniveaus sowie an anderen Betonen erstrebenswert. Dabei wären die Überprüfung der Übertragbarkeit der hier gemachten Feststellungen sowie die Untersuchung möglicher Unterschiede von Interesse.

Im Speziellen gilt dies für weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Dabei ist von Interesse, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede es gibt. Vor allem für andere Betone mit höheren Festigkeiten sowie auch für Lasten, die höhere und auch etwas niedrigere Bruchlastzyklen erzeugen, als die hier untersuchten UHC-Versuche. In dem Zusammenhang kann auch eine Überprüfung der hier betrachteten Energiegröße $w_{f,d2}$ für andere Konstellationen erfolgen.

Bezüglich der hier vorgestellten Untersuchungen der Gefügezustände des Betons, speziell der in Kapitel 5.1.3, sind ebenfalls vielfältige weiterführende Untersuchungen möglich. Das gilt besonders für Versuche mit Anlehnung an das hier entwickelte Konzept zum Abbruch von Ermüdungsversuchen bei bestimmten relativen Lebensdauerzeitpunkten. Zum einen sind in diesem Zusammenhang Ermüdungsversuche von Interesse, die sich im Lastzyklenbereich der in Kapitel 5.3 vorgestellten LHC-Versuche bewegen. Dabei sollte der Beton ähnlich umfangreichen Gefügeuntersuchungen unterzogen werden, wie bei den in Kapitel 5.1.3 vorgestellten UHC-Versuchen. Sie würden eine Überprüfung der hier getroffenen Annahmen bezüglich der Vorgänge im Gefüge über lokale frühzeitige Schädigungen in Form von Mikrorissen erlauben. Zum anderen bieten vergleichbare Untersuchungen der Gefügezustände in Ermüdungsversuchen, die höhere Bruchlastzyklen erreichen, als die vorgestellten UHC-Versuche, die Möglichkeit, die getroffenen Annahmen ausgeprägter viskoser Verformungen und vernachlässigbarer Mikrorissbildung zu überprüfen. Darüber hinaus sind natürlich vergleichbare Untersuchungen der Gefügezustände anderer Betone, speziell höherfester Betone, zur Prüfung der Übertragbarkeit der vorgestellten Feststellungen zu den Gefügeveränderungen zweckmäßig. Zur Bestätigung der getroffenen Annahmen zum Verhalten und den Veränderungen im Gefüge des Zementsteins, stellen des Weiteren gezielte Untersuchungen an reinem Zementstein nützliche Ergänzungen dar. Das betrifft vor allem die Überprüfung viskoser Verformungen ohne Mikrorissbildung sowie die davon unbeeinflusste Steifigkeit.

Auch im Bereich der Kriechversuche bieten sich weitere Untersuchungen zur Erweiterung der gewonnenen Erkenntnisse an. In erster Linie betrifft dies umfangreichere Kriechversuche mit vergleichbaren Messungen wie in den entsprechenden Ermüdungsversuchen. Das gilt vor allem für die Erfassung der schädigenden Wirkung der Dauerbeanspruchung im Vergleich zur Ermüdungsbeanspruchung, auch in der Gefügestruktur.

Ein weiteres Themenfeld mit vielen Wissenslücken sind mehraxiale Ermüdungsbeanspruchungen. Aufbauende Untersuchungen speziell zu der Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowie zu den Veränderungen im Materialgefüge stellen diesbezüglich vielfältige Forschungsmöglichkeiten dar.

Neben der Betrachtung des Ermüdungsvorgangs auf der Materialebene liegen zudem kaum Ergebnisse von Untersuchungen auf der Bauteilebene vor. Zweckmäßig wäre eine gezielte Betrachtung des Prozesses von lokalen Ermüdungsschädigungen, verbunden mit der Umlagerung von Beanspruchungen. Dabei sind weniger bauteilspezifische Ergebnisse von Interesse, als vielmehr der Umlagerungsprozess an sich. In diesem Zusammenhang bietet sich auch eine systematische Überprüfung und Bewertung hier vorgestellter oder auch weiterer Schädigungsindikatoren und Messtechniken am Bauteil an.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen hat sich die Ultraschallmessung als eine sehr praktikable Methode zur Feststellung des Schädigungszustandes herausgestellt. Nützlich sind daher systematische Untersuchungen an weiteren Betonen sowie unter anderen Beanspruchungsniveaus, um die Eignung weiter zu verifizieren sowie um eine verlässliche Datenbasis für die entsprechenden Zusammenhänge zu gewinnen. Auch die Umsetzung einer dauerhaft zuverlässigen Messung der Signalamplitude unter Ermüdungsbeanspruchungen bildet Möglichkeiten für weitere Betrachtungen.

Um die Vorgänge innerhalb des Betongefüges während des Ermüdungsprozesses noch besser verstehen zu können, fehlen zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden, die eine versuchsbegleitende Beobachtung der Gefügeveränderungen ermöglichen. Denkbar wäre eine entsprechende CT-Einrichtung zusammen mit einer Prüfeinrichtung oder ähnliches.

Theoretische Betrachtungen

Neben dem vielfältigen Bedarf an experimentellen Untersuchungen zum Ermüdungsvorgang besteht in gleicher Weise auch der Bedarf sowie auch umfangreiches Potential für weitere Betrachtungen auf theoretischer Basis.

Eine Möglichkeit bieten die in Kapitel 6.5 vorgestellten Evolutionsansätze zur Abbildung der Entwicklungen von Materialgrößen. Diese könnten auf andere Betone sowie weitere Beanspruchungsniveaus übertragen bzw. angepasst werden und auch Eingang in entsprechende Materialmodelle finden.

Eine wesentliche Bedeutung kommt der modellhaften Erfassung und Abbildung der ermüdungsbedingten Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons zu, um diese letztlich ebenfalls in entsprechende Materialgesetze für den Beton einzubinden. Dies gilt natürlich auch für andere Betone und andere Beanspruchungsniveaus. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen zum Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Beziehung könnte eine solche Modellierung auf Grundlage des in Kapitel 6.5 vorgestellten Ansatzes zur Erfassung der wesentlichen Veränderungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung erfolgen. Denkbar ist hier aber auch eine Modellierung auf Basis rheologischer Elemente, ähnlich wie [KESSLER-KRAMER 2002] es für die Ermüdung unter Zugbeanspruchungen entwickelt hat.

Wie aus der Einleitung bereits hervorgegangen ist, stellt das Gebiet der Zustandsbewertung bezüglich ermüdungsgeschädigten Betons ein Themenfeld mit besonderem Forschungsbedarf dar. Dies ist speziell im Hinblick auf die Infrastrukturbauwerke von Bedeutung. In dem Themenfeld inbegriffen sind vor allem die Entwicklung von Methoden, Verfahren und Konzepten zur zuverlässigen Zustandserfassung ermüdungsbeanspruchter Betonbauteile sowie die darauf aufbauende Abschätzung von Restlebensdauern. Die gewonnenen Erkenntnisse zum Ermüdungsprozess sowie die in Kapitel 6.5 vorgestellten Ansätze zur Abbildung der Schädigungs-

evolution und zur Erfassung von Schädigungsindikatoren stellen mögliche Grundlagen für derartige Entwicklungen dar.

Des Weiteren hat die Literaturauswertung in Kapitel 3 gezeigt, dass numerische Modellierungen von Beton auf der Mesobene viel Potential besitzen. Aufgrund der realitätsnahen Erfassung der heterogenen Gefügestruktur ermöglichen sie nicht nur eine gute Abbildung der Vorgänge im Gefüge, sondern bieten auch die Möglichkeit zum besseren Verständnis der Abläufe. Daher ist die Anwendung auf Ermüdungsprobleme durchaus denkbar und vielversprechend. Mit Hilfe einfacher Materialgesetze für die einzelnen Komponenten, wie z. B. einem viskosen Ansatz für den Zementstein verbunden mit unterschiedlichem Verhalten im Druck- und Zugbereich, sollte eine Simulation des prinzipiellen Verhaltens in der Phase I und II des Ermüdungsprozesses realisierbar sein.

Literaturverzeichnis

ALLICHE, A. (2004). "*Damage model for fatigue loading of concrete*." International Journal of Fatigue 26(9): 915-921.

ALTENBACH, H. & J. J. SKRZYPEK (1999). *Creep and damage in materials and strucutres*, Springer-Verlag, Wien New York.

ANDERS, I. (2013). *Stoffgesetz zur Beschreibung des Kriech- und Relaxationsverhaltens junger normal- und hochfester Betone*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Publishing.

ANDERS, S. (2007). *Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover.

ASLANI, F. & R. JOWKARMEIMANDI (2012). "*Stress-strain model for concrete under cyclic loading*." Magazine of Concrete Research 64(8): 673-685.

AWAD, M. E. & K. H. HILSDORF (1971). *Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained loads*, University of Illinios, Urbana.

BAHN, B. Y. & C. T. HSU (1998). "*Stress-Strain Behavior of Concrete under Cyclic Loading*." ACI Materials Journal 95(2): 178-193.

BAZANT, Z. P. (1986). *Mathmatical modeling of creep and shrinkage of concrete*. Creep and shrinkage of concrete: Mathematical modeling (RILEM Report), Northwestern University, Illinois.

BAZANT, Z. P. (2000). "*Size effect*." Int. J. Solids an Structures 37: 69-80.

BAZANT, Z. P. & B. H. OH (1983). "*Crack band theory for fracture of concrete*." Materials and Structures 16(93): 155-177.

BAZANT, Z. P., M. TABBARA, ET AL. (1990). "*Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites*." Journal of Engineering Mechanics 116(8): 1686-1705. (zitiert nach VAN MIER, J. G. M. (1997))

BOCKHOLD, J. (2005). *Modellbildung und numerische Analyse nichtlinearer Kriechprozesse in Stahlbetonkonstruktionen unter Schädigungsaspekten*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

BREITENBÜCHER, R., H. IBUK, ET AL. (2007). "*Veränderung der Steifigkeit und des Dehnungsverhaltens von Normalbeton bei zyklischer Druckschwellbeanspruchung mit Ruhephasen*." Beton- und Stahlbetonbau 102(2): 80-87.

BUXBAUM, O. (1992). *Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile*, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf.

CAO, J. & D. D. L. CHUNG (2001). "*Degradation of the bond between concrete and steel under cyclic shear loading, monitored by contact electrical resistance measurement*." Cement and Concrete Research 31(4): 669-671.

CEB-FIP (1993). *Model Code 1990. Design Code*. Comité Euro-International du Béton - Bulletins d'Information. Thomas Telford Services Ltd. London.

CEB-FIP (2012). *Model Code 2010*. Final draft. Bulletin 65.

CEB (1988). *Fatigue of concrete structures - State of the art report*. Comite Euro-International du Beton. Bulletin d'information No. 188. Lausanne.

CORNELISSEN, H. A. W. & H. W. REINHARDT (1984). "*Uniaxial tensile fatigue of concrete under constant-amplitude and programme loading*." Magazine of Concrete Research 36(129): 216-226.

CORNELISSEN, H. A. W. & G. TIMMERS (1981). *Fatigue of plain concrete in uniaxial tension and in alternating tension-compression experiment and results*. Report 5-81-7. Delft University of Technology.

CURBACH, M. & K. SPECK (2007). *Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von Ultra-Hochfestem Beton (UHPC) - Zweiaxiale Druckfestigkeit*. Arbeitsbericht zum Forschungsvorhaben CU 37/6-1 der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Technische Universität Dresden.

DE BORST, R. (2002). "*Fracture in quasi-brittle materials: a review of continuum damage-based approaches*." Engineering Fracture Mechanics 69(2): 95-112.

DESMORAT, R. (2006). "*Damage and fatigue*." Geomechanics in energy production: 849-877.

DESMORAT, R., F. RAGUENEAU, ET AL. (2007). "*Continuum damage mechanics for hysteresis and fatigue of quasi-brittle materials and structures*." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 31(2): 307-329.

DIN 1045-2 (2008). *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*. *Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1048-5 (1991). *Prüfverfahren für Beton*. *Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 45667 (1969). *Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 50100 (1978). *Dauerschwingversuch - Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1766 (2000). *Prüfverfahren*. *Referenzbetone für Prüfungen*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1992-1-1 (2011). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. *Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1992-2 (2010). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. *Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 12350 (2000). *Prüfung von Frischbeton*. *Teil 1 bis 7*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 12390-2 (2001). *Prüfung von Festbeton*. *Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 12390-3 (2002). *Prüfung von Festbeton*. *Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.

DRAGON, A., D. HALM, ET AL. (2000). "*Anisotropic damage in quasi-brittel solids: modelling, computational issues and application*." Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering 183: 331-352. (zitiert nach ALLICHE, A. (2004))

DUDA, H. (1991). *Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung*. Heft 419. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin.

DYDUCH, K., M. SZERSZEŃ, ET AL. (1994). "*Experimental investigation of the fatigue strength of plain concrete under high compressive loading*." Materials and Structures 27(9): 505-509.

ECKARDT, S. (2009). *Adaptive heterogeneous multiscale models for the nonlinear simulation of concrete*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.

ECKARDT, S., S. HAEFNER, ET AL. (2004). *Simulation of the fracture behavior of concrete using continuum damage models at the mesoscale*. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2004. Jyväskyylä.

FEHLING, E., M. SCHMIDT, ET AL. (2005). *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. Heft 1. Universität Kassel.

FEHLMANN, P. (2012). *Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken*. Dissertation, ETH Zürich.

FINCK, F. (2005). *Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart.

FITIK, B. (2012). *Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich*. Dissertation, Technische Universität München, München.

GAEDE, K. (1962). *Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck - Schwellbeanspruchung*. Heft 144. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.

GAEDICKE, C., J. ROESLER, ET AL. (2009). "*Fatigue crack growth prediction in concrete slabs*." International Journal of Fatigue 31(8-9): 1309-1317.

GAO, L. & T. T. C. HSU (1998). "*Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading*." ACI Materials Journal 95: 7.

GÖHLMANN, J. (2009). *Zur Schädigungsberechnung an Betonkonstruktionen für Windenergieanlagen unter mehrstufiger und mehraxialer Ermüdungsbeanspruchung*. Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, Hannover.

GRASSL, P. & R. REMPLING (2008). "*A damage-plasticity interface approach to the meso-scale modelling of concrete subjected to cyclic compressive loading*." Engineering Fracture Mechanics 75(16): 4804-4818.

GROßE, C. U. (1996). *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*. Dissertation, Universität Stuttgart.

GRÜNBERG, J., M. HANSEN, ET AL. (2007). "*Ermüdungsbeanspruchungen von Betonbrücken unter zunehmendem Schwerverkehr*." Beton- und Stahlbetonbau 102(9): 596-606.

GRÜNBERG, J., L. LOHAUS, ET AL. (2007). "*Mehraxiales mechanisches Ermüdungsmodell von Ultra-Hochfestem Beton: Experimentelle und analytische Untersuchungen*." Beton- und Stahlbetonbau 102(6): 388-398.

GUO, L.-P., A. CARPINTERI, ET AL. (2009). "*Fatigue damage of high performance concrete through a 2D mesoscopic lattice model*." Computational Materials Science 44(4): 1098-1106.

GUO, L.-P., A. CARPINTERI, ET AL. (2010). "*Experimental and numerical investigations on fatigue damage propagation and life prediction of high-performance concrete containing reactive mineral admixtures*." International Journal of Fatigue 32(2): 227-237.

HÄFNER, S., S. ECKARDT, ET AL. (2006). "*Mesoscale modeling of concrete: Geometry and numerics*." Computers & Structures 84(7): 450-461.

HAIBACH, E. (2002). *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

HEGGER, J., T. ROGGENDORF, ET AL. (2014). *Ermüdungsverhalten von Beton unter zyklischer Beanspruchung aus dem Betrieb von Windkraftanlagen*. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart.

HERWIG, A. (2008). *Reinforced Concrete Bridges under increased Railway Traffic Loads - Fatigue Behavior and Safety Measurements*. PhD, Lausanne.

HILLERBORG, A. (1983). *Analysis of one single crack*. Fracture Mechanics of Concrete. F. H. Wittmann, Elsevier.

HILLERBORG, A., M. MODÉER, ET AL. (1976). "*Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*." Cement and Concrete Research 6(6): 773-782.

HILSDORF, H. K. & C. E. KESLER (1966). "*Fatigue strength of concrete und varying flexural stresses*." ACI Journal 63: 1059-1076. (zitiert nach PFANNER, D. (2002) und PFISTER, T. (2007))

HOHBERG, R. (2004). *Zum Ermüdungsverhalten von Beton*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.

HOLMEN, J. O. (1979). *Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading*. PhD thesis, The Norwegian Institute of Technology, The University of Trondheim, Norway.

HOOI, T. T. (2000). "*Effects of passive confinement on fatigue properties of concrete*." Magazine of Concrete Research 52(1): 7-15.

HORDIJK, D. A. (1991). *Local approach to fatigue of concrete*. PhD thesis, University of Technology, Delft.

HSU, T. T. C. (1963). "*Mathematical analysis of shrikage stresses in a model of hardened concrete*." Journal of American Concrete Institute 60(3). (zitiert nach KUSTERMANN, A. (2005) und VAN MIER, J. G. M. (1997))

HSU, T. T. C. (1981). "*Fatigue of Plain Concrete*." ACI Journal 78(4): 292-305.

IBUK, H. (2008). *Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbelastung*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

JANSEN, D. C. & S. P. SHAH (1997). "*Effect of length on compressive strain softening of concrete*." ASCE, Journal of Engineering Mechanics 123(1): 25-35.

JINAWATH, P. (1974). *Cumulative fatigue damage of plain concrete in compression*. PhD thesis, University of Leeds. (zitiert nach PFISTER, T. (2007) und GÖHLMANN, J. (2009))

KACHANOV, M. (1958). "*On the time to failure under creep conditions*." Izv. AN SSSR(8): 26-31. (zitiert nach PETRYNA, Y. (2004))

KESSLER-KRAMER, C. (2002). *Zugverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.

KIM, J.-K. & Y.-Y. KIM (1996). "*Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete*." Cement and Concrete Research 26(10): 1513-1523.

KIM, S.-M. & R. K. ABU AL-RUB (2011). "*Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites*." Cement and Concrete Research 41(3): 339-358.

KINDRACHUK, V. M., M. THIELE, ET AL. (2015). "*Constitutive modeling of creep-fatigue interaction for normal strength concrete under compression*." International Jounal of Fatigue, accepted.

KLAUSEN, D. (1978). *Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt.

KNOBLAUCH, H. & U. SCHNEIDER (1995). *Bauchemie*, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf.

KÖHLER, M., S. JENNE, ET AL. (2012). *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

KÖNIG, G. & I. DANIELEWICZ (1994). *Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen gemäß CEB-FIP Model Code 1990*. Heft 439. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin.

KÖNIG, G., N. V. TUE, ET AL. (2001). *Hochleistungsbeton - Bemessung, Herstellung und Anwendung*, Verlag Ernst und Sohn, Berlin. (zitiert nach ANDERS, S. (2007))

KUPFER, H. (1973). *Das Verhalten von Beton unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. Heft 229, Verlag von Wilhelm und Sohn, Berlin

KUSTERMANN, A. (2005). *Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

KWAN, A. K. H., Z. M. WANG, ET AL. (1999). "*Mesoscopic study of concrete II: nonlinear finite element analysis*." Computers & Structures 70(5): 545-556.

LEMAITRE, J. (1992). *A course on damage mechanics*, Springer-Verlag, Berlin.

LEMAITRE, J. & R. DESMORAT (2005). *Engineering damage mechanics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

LINDORF, A. (2011). *Ermüdung des Verbundes von Stahlbeton unter Querzug*. Dissertation, Technische Universität Dresden.

LOCHNER, F. W. (2000). *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf.

LOHAUS, L., M. WEFER, ET AL. (2011). "*Ermüdungsbemessungsmodell für normal-, hoch- und ultrahochfeste Betone*." Beton- und Stahlbetonbau 106(12): 836-846.

LUSCHE, M. (1972). *Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leitbeton mit geschlossenem Gefüge*. Heft 39, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf

MAEKAWA, K., N. FUKUURA, ET AL. (2007). "*Path-dependent high cycle fatigue modeling of joint interfaces in structural concrete*." Journal of Advanced Concrete Technology 6(1): 227-242.

MARIGO, J. J. (1985). "*Modelling of brittle and fatigue damage for elastic material by growth of microvoids* " Engineering Fracture Mechanics 21(4): 861-874.

MATSUMOTO, K., Y. SATO, ET AL. (2008). "*Mesoscopic analysis of mortar under high-stress creep and low-cycle fatigue loading*." Journal of Advanced Concrete Technology 6(2): 337-352. (zitiert nach NAGAI, K. & K. MATSUMOTO (2010))

MAZZOTTI, C. & M. SAVOIA (2002). "*Nonlinear creep, possion's ratio and creep-damage interaction of concrete in compression*." ACI Materials Journal 99(5): 450-457. (zitiert nach BOCKHOLD, J. (2005))

MEHMEL, A. & E. KERN (1962). *Elastische und Plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung*. Heft 153. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Verlag von Wilhelm und Sohn, Berlin.

MUCHA, S. (2003). "*Determination of crack growth in diffrent high strength concretes caused by fatigue loading*." Lacer 8: 153-164.

MUCHA, S. (2004). "*Nondestructive experimental approach to HPC fatigue damage*." Lacer 9: 17.

MÜLLER, F. P., E. KEINTZEL, ET AL. (1983). *Dynamische Probleme im Stahlbeton*. Heft 342, Verlag von Wilhelm und Sohn, Berlin.

MURDOCK, J. W. (1965). *A critical review of research on fatigue of plain concrete*. Bulletin 475. University of Illinois.

NAGAI, K. & K. MATSUMOTO (2010). *Static and fatigue failure simulation of concrete material bei dirscrete analysis*. FraMCoS-7, Seoul, Korea Concrete Institute.

NAUBEREIT, H. & J. WEIHERT (1999). *Einführung in die Ermüdungsfestigkeit*, Carl Hanser Verlag, München Wien.

NIEDERLEITHINGER, E., P. SHOKOUHI, ET AL. (2011). *Überwachung innerer Schädigungen in Beton mittels Coda-Wellen-Interferometrie*. 52. DAfStb - Forschungskolloquium, Berlin.

OH, B. H. (1991a). "*Cumulative damage theory of concrete under variable-amplitude fatigue loadings*." ACI Materials Journal 88(1): 41-48.

OH, B. H. (1991b). "*Fatigue-life distributions of concrete for various stress levels*." ACI Materials Journal 88(2): 122-128.

PAPA, E. & A. TALIERCIO (1996). "*Anisotropic damage model for the multiaxial static and fatigue behaviour of plain concrete*." Engineering Fracture Mechanics 55(2): 163-179.

PEERLINGS, R. H. J. (1999). *Enhanced damage modelling for fracture and fatigue*. PhD thesis, Eindhoven University od Technology, The Netherlands.

PETERSEN, C. (2013). *Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*, Springer Vieweg, Wiesbaden.

PETKOVIC, C. & S. ROSSELAND (1992). *High strength concrete SP3 - Fatigue, Report 3.2 Fatigue of high strength concrete*. SINTEF Structural Engineering - FCB. Trondheim.

PETRYNA, Y. (2004). *Schädigung, Versagen und Zuverlässigkeit von Tragwerken des Konstruktiven Ingenieurbaus*. Habilitation, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag.

PETRYNA, Y. S., D. PFANNER, ET AL. (2002). "*Reliability of reinforced concrete structures under fatigue*." Reliability Engineering & System Safety 77(3): 253-261.

PFANNER, D. (2002). *Zur Degradation von Stahlbetonbauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

PFISTER, T. (2007). *Ein Ermüdungsschädigungsmodell für Zuverlässigkeitsanalysen von Stahlbetontragwerken*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

PÖLLING, R. (2000). *Eine praxisnahe, schädigungsorientierte Materialbeschreibung von Stahlbeton für Strukturanalysen*, Ruhr-Universität Bochum.

REMPLING, R. & P. GRASSL (2008). "*A parametric study of the meso-scale modelling of concrete subjected to cyclic compression*." Computers and Concrete 5(4): 359-373.

RILEM (1984). "*Long term random dynamic loading of concrete structures. Report by RILEM Commitee 36-RDL*." Materials and Structures 17(1): 1-28.

ROELFSTRA, P. E., H. SADOUHI, ET AL. (1985). "*Le béton numérique (Numerical concrete)*." Materials and Structures 18: 327-335. (zitiert nach VAN MIER, J. G. M. (1997))

ROGGE, A. (2003). *Materialverhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung*. Dissertation, Technische Universität München, München.

ROSSI, J. G. M. VAN MIER, ET AL. (1992). "*The dynamic behaviour of concrete: influence of free water*." Materials and Structures: 509-514.

SAITO, M. & S. IMAI (1983). "*Direct Tensile Fatigue of Concrete by the use of Friction Grips*." ACI Journal: 431-437.

SCHICKERT, G. (1980). *Schwellenwerte beim Betondruckversuch*. Forschungsbericht 70, Bundesanstalt für Materialforschung Berlin.

SCHICKERT, G. & H. WINKLER (1977). *Versuchserbegnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung*. Heft 277. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Verlag von Wilhelm und Sohn, Berlin.

SCHLÄFLI, M. (1999). *Ermüdung von Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton*. PhD thesis, EPFL Lausanne.

SCHLANGEN, E. & J. G. M. VAN MIER (1992). "*Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures*." Materials and Structures 25(9): 534-542.

SCHNEIDER, S., D. VÖCKER, ET AL. (2012). "*Zum Einfluss der Belastungsfrequenz und der Spannungsgeschwindigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit von Beton*." Beton- und Stahlbetonbau 107(12): 836-845.

SCHOLZ, U., D. NECHVATAL, ET AL. (1995). *Versuche zum Verhalten von Beton unter dreiachsiger Kurzzeitbeanspruchung*. Heft 447. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

SCHURR, D. P., J.-Y. KIM, ET AL. (2011). "*Damage detection in concrete using coda wave interferometry*." NDT&E International 44: 728-735.

SCHWABACH, E. (2005). *Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.

SHAH, S. P. (1984). "*Predictions of cumulative damage for concrete and reinforced concrete* " Matériaux et Constructions 17(97).

SHAH, S. P. & S. CHANDRA (1970). "*Fracture of concrete subjected to cyclic and sustained loading*." ACI Journal 67: 816-825.

SHAH, S. P. & B. MU (2004). *Fatigue of concrete subjected to biaxial loading in the compression region*. COE Report No. 24. University of Illinios.

SIEMON, A. (2006). *Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung*. Dissertation, Universität Kassel.

SPECK, K. (2008). *Beton unter mehraxialer Beanspruchung*. Dissertation, Technische Universität Dresden.

SPOONER, D. C. & J. W. DOUGILL (1975). "*A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading*." Magazine of Concrete Research 27(92): 151-160.

SU, E. C. M. & T. T. C. HSU (1988). "*Biaxial compression fatigue and discontinuity of concrete*." ACI Materials Journal 85: 178-188.

SURESH, S. (1994). *Fatigue of materials*, Cambridge University Press.

TALIERCIO, A. & E. GOBBI (1996). "*Experimental investigations on the triaxial fatigue behaviour of plain concrete*." Magazine of Concrete Research 48(176): 157-172.

TEPFERS, R., C. FRIDEN, ET AL. (1977). "*A study of the applicability to the fatigue of concrete of the Palmgren-Miner partial damage hypothesis*." Magazine of Concrete Research 29(100): 123-130.

TEPFERS, R. & T. KUTTI (1979). "*Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete*." ACI Journal 76(5): 635-652.

TEWORTE, F. (2014). *Zum Querkrafttragverhalten von Spannbetonträfern unter Ermüdungsbeanspruchung*. Dissertation, RWTH Aachen.

THIENEL, K.-C. (2008). *Werkstoffe des Bauwesens - Festbeton*, Universität der Bundeswehr München.

THUN, H. (2006). *Assesment of fatigue resistance and strength in existing concrete structures*. PhD thesis, University of Technology Lulea, Sweden.

TOUMI, A., A. BASCOUL, ET AL. (1998). *Microscopical observation of mode I crack propagation in concrete subjected to fatigue*. FraMcoS-3.

TUE, N. V. & S. MUCHA (2006). "*Ermüdungsfestigkeit von hochfestem Beton unter Druckbeanspruchung*." Bautechnik 83(7): 497-504.

UNGER, J. F. & S. ECKARDT (2011). "*Multiscale modelling of concrete - From mesoscale to macroscale*." Computational Methods in Engineering 18(3): 341-393.

VAN LEEUWEN, J. & A. J. M. SIEMES (1979). *Miner's rule with respect to plain concrete*. Heron, Delft. 24(1). IBBC-TNO, Netherland.

VAN MIER, J. G. M. (1984). *Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

VAN MIER, J. G. M. (1997). *Fracture processes of concrete: Assessment of material parameters for fracture models*, Boca Raton: CRC Press.

VAN ORNUM, J. L. (1903). "*Fatigue of cement products*." Transactions ASCE 51: 443-451. (zitiert nach MURDOCK, J. W. (1965) und PFANNER, D. (2002))

VAN ORNUM, J. L. (1907). "*Fatigue of concrete*." Transactions ASCE 58: 294-320. (zitiert nach MURDOCK, J. W. (1965) und PFANNER, D. (2002))

VONK, R. A. (1992). *Softening of concrete loaded in compression*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

WANG, Z. M., A. K. H. KWAN, ET AL. (1999). "*Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh*." Computers & Structures 70(5): 533-544.

WEFER, M. (2010). *Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung*. Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, Hannover.

WEIGLER, H. & W. FREITAG (1975). *Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton*. Heft 247. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Verlag von Wilhelm und Sohn, Berlin.

WEIGLER, H. & K.-H. RINGS (1987). *Unbewehrter und bewehrter Beton unter Wechselbeanspruchung*. Heft 383. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Verlag für Architektur und Technische Wissenschaft, Berlin.

WILHELM, T. (2006). *Ein experimentell begründetes mikromechanisches Modell zur Beschreibung von Bruchvorgängen in Beton bei äußerer Krafteinwirkung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

WITTMANN, F. H. (1983). *Fracture mechanics of concrete*. edited by F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

WRIGGERS, P. & S. O. MOFTAH (2006). "*Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour*." Finite Elements in Analysis and Design 42(7): 623-636.

ZANUY, C., P. DE LA FUENTE, ET AL. (2007). "*Effect of fatigue degradation of the compression zone of concrete in reinforced concrete sections*." Engineering Structures 29(11): 2908-2920.

ZHANG, B., D. V. PHILLIPS, ET AL. (1996). "*Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete*." Magazine of Concrete Research 48(177): 361-375.

ZILCH, K. & G. ZEHETMAIER (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*, 2. neu bearb. u. erw. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Tragstruktur der Sherbrooke Fußgängerbrücke in Quebec, Kanada; Schwergewichtsfundament einer Offshore-Windenergieanlage 2

Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der Ermüdungsfestigkeit von Beton sowie Veranschaulichung des dahinter verborgenen und ablaufenden Ermüdungsvorgangs 4

Abbildung 2.1: Bruchfläche eines ermüdungsbedingten Bruches einer Fahrradspeiche 8

Abbildung 2.2: Charakteristische Kenngrößen bei zyklischen Beanspruchungen 9

Abbildung 2.3: Veranschaulichung der Beanspruchungsbereiche mit den zugehörigen Spannungsverhältnissen R für zyklische Belastungen 9

Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer Wöhlerlinie für einstufige Ermüdungsbeanspruchungen mit Bezeichnung der unterschiedlichen Festigkeitsbereiche 10

Abbildung 2.5: Prinzipielle Darstellung der Dauerfestigkeitsschaubilder nach Smith und nach Goodman 11

Abbildung 2.6: Beispielhafter Zeitverlauf einer regellosen variierenden Betriebsbeanspruchung 12

Abbildung 3.1: Spannungs-Verformungs-Verlauf eines zentrischen Zugversuches an Beton mit zugehörigen Verteilungen der Mikrorisse und der Dehnungen 16

Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowie der Spannungs-Volumen-Beziehung unter Druckbeanspruchungen 17

Abbildung 3.3: Spannungs-Dehnungs-Beziehung und Spannungs-Verformungs-Kurven im Nachbruchbereich für unterschiedlich hohe Probekörper unter Druckbeanspruchung 18

Abbildung 3.4: Spannungs-Verformungs-Beziehungen unter Druckbeanspruchung für verschiedene Betondruckfestigkeiten 19

Abbildung 3.5: Komponenten der Langzeitverformung von Beton unter Dauerlast und Kriechverformungen für verschiedene Belastungsniveaus 20

Abbildung 3.6: Versagenslinien von Beton unter statischer zweiaxialer Druckbeanspruchung und Versagensfläche von Beton unter statischer dreiaxialer Druckbeanspruchung 21

Abbildung 3.7: Kenngrößen Belastungen im Rahmen von Ermüdungsuntersuchungen an Beton 24

Abbildung 3.8: Unterteilung der Bereiche der Ermüdungsfestigkeit von Beton 25

Abbildung 3.9: Schematische Veranschaulichung der qualitativen Verläufe der Wöhlerkurven für Druckschwell-, Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen 25

Abbildung 3.10: Qualitativer Verlauf der Schädigungsentwicklung in Form der relativierten Steifigkeit unter hochzyklischen Beanspruchungen bei Stahl und bei Beton 26

Abbildung 3.11: Umhüllende der zyklischen Spannungs-Verformungs-Kurven aus weggeregelten einaxialen Zugversuchen mit verschiedenen Lastspielzahlen 27

Abbildung 3.12: 3-phasige mittlere Rissentwicklungen aus kraftgeregelten einaxialen zyklischen Zugversuchen für verschiedene Belastungsgrade 28

Abbildung 3.13: 3-phasige Dehnungsentwicklung von einaxialen zyklischen kraftgeregelten Zug-Druck-Versuchen 29

Abbildung 3.14: Wöhlerlinien für verschiedene Unterspannungen mit extrapolierten Bereichen und Einzelergebnisse für Ermüdungsfestigkeiten mit Streubereich und Regressionsgerade 30

Abbildung 3.15: Typische Hysteresekurven aus weggeregelten niederzyklischen Druckversuch 31

Abbildung 3.16: 3-phasige Entwicklung der Dehnungen und Reduzierung der Sekantensteifigkeit bei Ermüdungsversuchen im Druckschwellbereich 33

Abbildung 3.17: Fortlaufende Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung infolge von Ermüdungsbeanspruchungen im Druckschwellbereich..... 34

Abbildung 3.18: Entwicklung der statischen Restdruckfestigkeit über die Ermüdungslebensdauer ... 34

Abbildung 3.19: Impulssummenkurven aus der Schallemissionsmessung an hochzyklischen Ermüdungsversuchen mit verschiedenen Beanspruchungsniveaus 35

Abbildung 3.20: Verteilung der Hauptspannungen nach den Modellversuchen von Lusche sowie daraus abgeleiteter Kräfteverlauf im Betongefüge 37

Abbildung 3.21: Modellvorstellung zur ermüdungsbedingten Schädigung im Beton und der daraus resultierenden Krümmungsumkehr der Spannungs-Dehnungs-Beziehung..... 38

Abbildung 3.22: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die resultierende Bruchlastspielzahl 40

Abbildung 3.23: Versagenskurven für zweiaxiale Ermüdungsbeanspruchungen im Druckbereich 41

Abbildung 3.24: Wöhlerlinien für Beton mit unterschiedlich starker Umschnürungsbewehrung und 3-phasige Dehnungsentwicklung in axialer Richtung unter dreiaxialer Ermüdungsbeanspruchung..... 42

Abbildung 3.25: Zusammenstellung von Ergebnissen aus verschiedenen Wöhlerversuchen sowie Ansatz für Wöhlerlinie nach Hsu 44

Abbildung 3.26: Darstellung der Versagensfläche für Ermüdungsbeanspruchungen nach dem Ansatz von Lohaus & Wefer & Oneschkow 45

Abbildung 3.27: Grafische Veranschaulichung der linearen Palmgren-Miner-Regel und experimentell ermittelte Reihenfolgeabhängigkeit bei zweistufigen Lastprozessen..... 46

Abbildung 3.28: Veranschaulichung der nichtlinearen Schädigungsentwicklung und des Reihenfolgeeffektes für zweistufige Lastkollektive nach OH und schematische Darstellung des Ansatzes nach Göhlmann zur Beschreibung mehrstufiger Lastprozesse 46

Abbildung 3.29: Veranschaulichung der beiden Prinzipien das Material als homogenisiertes Kontinuum oder als heterogenes Materialgemisch zu betrachten 47

Abbildung 3.30: Nach dem Ansatz von Papa berechnete Dehnungsentwicklungen und nach dem Ansatz von Alliche errechnete E-Modul-Entwicklung..... 48

Abbildung 3.31: Vergleich von simuliertem und niederzyklischem Verhalten und grafische Veranschaulichung der Energiehypothese von Pfanner 49

Abbildung 3.32: Mesomodell mit Lattice-Elementen, simulierte niederzyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve verschiedener Korngrößen und statische Bruchfigur eines Lattice-Modells 51

Abbildung 4.1: Zielstellungen und Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen und der theoretischen Betrachtungen..... 56

Abbildung 4.2: Veranschaulichung der Konzeption zu den hochzyklischen Ermüdungsversuchen ... 57

Abbildung 4.3: Überblick zu den einzelnen durchgeführten Versuchsreihen..... 58

Abbildung 4.4: Versuchskonzept der einzelnen Versuchsserien der hochzyklischen Ermüdungsversuche der Versuchsreihe 4 mit Schädigungsgraden und Probenzahlen 62

Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der gestörten Randbereiche bei verschiedenen Proben-formen sowie Bild eines Bruchs mit Ausbildung des entsprechenden Bruchkegels. 67

Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der Form und Maße der kleinen Betonzylinder und Bild von kleinen Betonzylindern 68

Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Form und Maße der großen Betonzylinder und Bild mit großem und kleinem Betonzylinder 69

Abbildung 4.8: Zur Betonherstellung verwendeter 250l Mischer und 51 gefüllte Formen einer Mischung direkt nach der Betonierung 69

Abbildung 4.9: Zwei frisch betonierte große Zylinder in ihrer Form und Lagerung mehrerer großer Zylinder nach dem Schleifen auf Europaletten. 70

Abbildung 4.10: 1MN Prüfmaschine zur Prüfung der kleinen Zylinder, 10MN Prüfmaschine für die Prüfung der großen Zylinder und 5MN Prüfmaschine zur Prüfung der Würfel 73

Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Messfläche von ARAMIS an einem kleinen Betonzylinder und Foto der Messanordnung im Versuch 75

Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der Wellenausbreitung im Materialgefüge für ein Rissereignis und davon durch einem Sensor an der Oberfläche gemessener Signalverlauf 76

Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der Ultraschallmessung an einem ungeschädigten Gefüge und einem geschädigtem Gefüge mit gemessenen beispielhaften Signalverläufen 77

Abbildung 4.14: Schematische Veranschaulichung des Versatzes bei einer verspäteten Detektion des Signalersteinsatzes sowie die mögliche Korrektur über eine Rückrechnung 78

Abbildung 4.15: Messanordnung zur Ultraschallmessung mit zwei Sensoren horizontal und mit vier Sensoren horizontal und vertikal 79

Abbildung 4.16: Schematische Darstellung der Schnittanordnung zur Gewinnung der Probenteile für mikroskopische Untersuchungen 80

Abbildung 4.17: Fertig präparierter Längs- und Querschnitt aus einem Betonzylinder und verwendetes Stereomikroskop vom Typ Olympus SZX16 81

Abbildung 4.18: Schematische Darstellung der mit dem Lichtmikroskop untersuchten Teilflächen auf den Probenlängs- und Probenquerschnitten 81

Abbildung 4.19: Schematische Veranschaulichung der Schnittanordnung für die Gewinnung der REM-Proben mit Darstellung der zugehörigen Probengeometrie 82

Abbildung 4.20: Fertig präparierte Probe für das REM und das verwendete Rasterelektronen-mikroskop vom Typ LEO Gemini 1530 VP 83

Abbildung 4.21: Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die Kriechversuche 85

Abbildung 4.22: Schematische Darstellung der Messanordnung am Probekörper für die Kriech-versuche sowie Bild eines Probekörpers in der Prüfmaschine während eines Kriechversuches 86

Abbildung 4.23: Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die statische Nachprüfung der Probekörper im Anschluss an die Kriechversuche 87

Abbildung 4.24: Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich 88

Abbildung 4.25: Schematische Darstellung der Messanordnung an der Probe sowie Foto einer Probe in der Prüfmaschine mit applizierter Messtechnik für die Ermüdungsversuche 89

Abbildung 4.26: Foto einer Probe in der Prüfmaschine vor dem Ermüdungsversuch und nach dem Ermüdungsversagen 90

Abbildung 4.27: Schematische Darstellung der Entnahmezeitpunkte während des Ermüdungsvor-gangs für die drei Versuchsserien der Abbruchversuche 92

Abbildung 4.28: Veranschaulichung der Nichteignung der Zyklenzahlen als Lebensdauerindikator, in den Versuchen erreichte Bruchzyklenzahlen mit Mittelwert sowie in den Abbruchversuchen tatsächlich erreichte Zyklenzahlen bei 90 % der Ermüdungslebensdauer 93

Abbildung 4.29: Schematische Darstellung der Messanordnung für die Ermüdungsversuche an den Großproben sowie Foto einer Großprobe in der Prüfmaschine mit applizierter Messtechnik 95

Abbildung 4.30: Fotos einer Großprobe in der Prüfmaschine nach dem Ermüdungsversagen 96

Abbildung 5.1: Entwicklung der gemittelten Längsdehnungen aus den UHC-Versuchen für drei verschiedene Lastniveaus 98

Abbildung 5.2: Ausschnitt aus Lastprogramm mit den drei E-Modul-Rampen und relative Entwicklung der drei E-Moduli aus den UHC-Versuchen über die relative Lebensdauer 99

Abbildung 5.3: Beispielhafter Verlauf der gemessenen Schallemissionsaktivität über die relative Lebensdauer für einen Versuch der UHC-Versuchsreihe 100

Abbildung 5.4: Relative Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeiten senkrecht und parallel zur Belastungsrichtung, jeweils unter Oberlast S_{max} und Grundlast S_0 102

Abbildung 5.5: Relative Entwicklung der Signalamplituden aus den Ultraschallmessungen senkrecht zur Belastungsrichtung unter Oberlast S_{max} und Grundlast S_0 104

Abbildung 5.6: Ausschnitt aus Lastprogramm mit Rampen für die Hysterese und Entwicklung der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen mit 330.000 Lastzyklen Abstand 106

Abbildung 5.7: Beispielhafte Entwicklung der 1. Ableitung der Belastungskurven aus den Hysteresen während der Lebensdauer, dargestellt über die Spannung und über die Dehnung 107

Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der aus den Hysteresen ermittelten Energieanteile und resultierende Entwicklungen der beiden errechneten Energieanteile über die Lebensdauer 108

Abbildung 5.9: Vollständige Arbeitslinien von unterschiedlich stark zyklisch vorgeschädigten Proben sowie von ungeschädigten Proben 109

Abbildung 5.10: Entwicklung der relativen statischen Bruchfestigkeit infolge einer zyklischen Vorschädigung für verschiedene Lebensdauerzustände 110

Abbildung 5.11: Verteilung der horizontalen Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0, zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 und unter der Oberlast S_{max} 113

Abbildung 5.12: Verteilung der vertikalen Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn unter der Grundlast S_0, zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 und unter der Oberlast S_{max} 113

Abbildung 5.13: Mikroskop-Aufnahme von ungerichteten Mikrorissen mit Rissbreiten in einem Längsschnitt einer mechanisch unbeanspruchten Probe 114

Abbildung 5.14: Mikroskop-Aufnahme von parallel zur Lastrichtung orientierten Mikrorissen mit Rissbreiten in einem Längsschnitt von einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe 115

Abbildung 5.15: Bei der Lichtmikroskopie gemessene maximale und mittlere Rissbreiten sowie je Schnitt ermittelte Gesamtrisslängen und mittleren Risslängen jeweils für unbeanspruchte und bis zu verschiedenen Lebensdauerzuständen zyklisch vorgeschädigte Proben 116

Abbildung 5.16: Darstellung der Verteilungen der relativen Häufigkeit der ermittelten Rissrichtungen in unbeanspruchten Proben im Schnitt quer und parallel zur Belastungsrichtung (rechts) 117

Abbildung 5.17: Darstellung der Verteilungen der relativen Häufigkeit der ermittelten Rissrichtungen in bis 90% der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Proben im Schnitt quer und parallel zur Belastungsrichtung 117

Abbildung 5.18: Darstellung des Probenausschnitts für die REM-Untersuchung aus einer bis 90 % der Lebensdauer vorgeschädigten Probe mit Markierungen für zwei Untersuchungsbereiche 119

Abbildung 5.19: Mit dem REM aufgenommenes Rissbild des Zementsteins einer unbeanspruchten Probe in einem Bereich 1 bei hoher Vergrößerung 120

Abbildung 5.20: REM-Aufnahme des Rissbildes im Zementstein einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe in einem erwarteten Spannungskonzentrationsbereich 120

Abbildung 5.21: REM-Aufnahme des Rissbildes im Zementstein einer bis 90% der Lebensdauer vorgeschädigten Probe in einem Bereich mit erwarteten geringen Spannungen 121

Abbildung 5.22: Vergleich bleibender Kriechdehnung mit den Verformungen aus Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe und relativer Anteil der bleibenden Kriechdehnung..... 124

Abbildung 5.23: Ausschnitt aus dem Lastprogramm mit den beiden Rampen für die E-Modul-Ermittlung und relative Entwicklung der ermittelten E-Moduli über die Dauer der Versuche 125

Abbildung 5.24: Vergleich Reduzierungen von $E_{1/3}$ aus den Kriech- und den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe, mit Differenzbildung zur Bestimmung des reinen Ermüdungsanteils..... 126

Abbildung 5.25: Vergleich der in der Nachprüfung ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Kriechproben mit denen einer ungeschädigten Probe sowie mit einer bis 90 % der Lebensdauer zyklisch vorgeschädigten Probe sowie zugehörige 1. Ableitungen 127

Abbildung 5.26: Vergleich Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen auf jeweils zwei Lastniveaus für Längsdehnungen und für horizontal gemessene Ultraschallgeschwindigkeiten 130

Abbildung 5.27: Vergleich der Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen für die drei E-Moduli und für die auf zwei Lastniveaus gemessenen vertikalen Ultraschallgeschwindigkeiten 130

Abbildung 5.28: Vergleich der Ergebnisse aus LHC und UHC-Versuchen für die Schallemissionsaktivität und für die horizontalen Ultraschallamplituden 130

Abbildung 5.29: Direkter Vergleich von Hysteresekurven aus LHC-Versuch mit Hysteresekurven aus UHC-Versuch im ungeschädigten Zustand und bei 10 %, 50 % und bei 90 % der Lebensdauer..... 133

Abbildung 5.30: Beispielhafte Entwicklung der 1. Ableitung der Belastungskurven aus Hysteresen, über die Spannung, von einem LHC-Versuch im Vergleich mit einem UHC-Versuch 134

Abbildung 5.31: Gegenüberstellung Schallemissionsaktivitäten für einen LHC- und einen UHC-Versuch während der ersten Belastungshysterese und bei 4,5 % Lebensdauer 135

Abbildung 5.32: Vergleich der beiden für die LHC und UHC-Versuche aus den Hysteresen ermittelten Entwicklungen der Energieanteile 137

Abbildung 5.33: Verteilung horizontale Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende unter Grundlast S_0 sowie unter Oberlast S_{max} 139

Abbildung 5.34: Verteilung vertikale Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende unter Grundlast S_0 sowie unter Oberlast S_{max} 139

Abbildung 5.35: Gegenüberstellung der verschiedenen Dehnungsanteile im Moment des Versagens bzw. kurz vor dem Versagen aus den einzelnen Versuchsreihen..... 141

Abbildung 5.36: Vergleich der vollständigen Arbeitslinien unterschiedlich stark zyklisch vorgeschädigter sowie ungeschädigter Proben ohne Dehnungsanteile aus Vorschädigung 142

Abbildung 5.37: Erste und zweite Hysteresekurve aus einer statischen Belastung sowie je eine Hysteresekurve aus einem LHC und einem UHC-Versuch kurz vor dem Ermüdungsversagen 144

Abbildung 5.38: Schematische Darstellung der ermittelten irreversiblen Energieeinträge anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für statischen Fall und für den zyklischen Fall 145

Abbildung 5.39: Gegenüberstellung der aus den statischen und zyklischen Versuchen ermittelten irreversiblen Energieanteile mit Darstellung der Komponente $w_{f,d2}$ für die zyklischen Versuche 146

Abbildung 5.40: Schematische Darstellung der ermittelten Energieeinträge $w_{s,fmax}$ anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den statischen Fall und $w_{f,tot}$ für den zyklischen Fall 146

Abbildung 5.41: Gegenüberstellung der aus den zyklischen Versuchsreihen ermittelten Energieanteile $w_{f,tot}$ mit entsprechenden aus der statischen Arbeitslinie bestimmten Energieanteilen $w_{s,fmax}$ 147

Abbildung 5.42: Schematische Darstellung der ermittelten Bruchenergie anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den statischen Fall und anhand der Hysteresekurven sowie der Spannungs-Dehnungs-Linie aus der Nachprüfung für den zyklischen Fall 147

Abbildung 5.43: Gegenüberstellung der aus zyklisch vorgeschädigten Proben ermittelten Energieanteile der UHC-Versuchsreihe mit der aus den statischen Versuchen bestimmten Bruchenergie 148

Abbildung 5.44: Vergleich Ergebnisse von Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche für Längsdehnungen und Vergleich der Längs- und Querdehnungen der Großproben 151

Abbildung 5.45: Vergleich Ergebnisse von Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche für drei E-Moduli und für die horizontalen Ultraschallgeschwindigkeiten 151

Abbildung 5.46: Vergleich der Ergebnisse von den Großproben mit denen der Kleinproben der LHC-Versuche für die Schallemissionsaktivität 151

Abbildung 5.47: Direkter Vergleich Hysteresekurve Großprobe mit Hysteresekurve Kleinprobe aus LHC-Versuch im ungeschädigten Zustand und bei 10 %, 50 % und 90 % der Lebensdauer 154

Abbildung 5.48: Vergleich der beiden ermittelten Entwicklungen der Energieanteile für die Versuche an den Großroben sowie die LHC und UHC-Versuche an den Kleinproben 154

Abbildung 5.49: Verteilung der horizontalen Dehnungskomponenten in Richtung quer zur Probenlängsachse zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 und unter der Oberlast S_{max} 156

Abbildung 5.50: Verteilung der vertikalen Dehnungskomponenten in Richtung parallel zur Probenlängsachse zu Versuchsende unter der Grundlast S_0 und unter der Oberlast S_{max} 156

Abbildung 6.1: 3-dimensionale Modellierung Zuschlagsanordnung mit 16 mm Größtkorn und 70 % Zuschlagsanteil und 2-dimensionaler Schnitt des Würfels zur Simulation des Lastabtrags 160

Abbildung 6.2: Ergebnisse aus der linear-elastischen Berechnung mit ANSYS für eine vertikale Beanspruchung. Inhomogene Spannungsverteilung in x-Richtung und in y-Richtung. Zugehörige inhomogene Dehnungsverteilung in x-Richtung und in y-Richtung 161

Abbildung 6.3: Grafische Veranschaulichung wesentlicher Korrelationen in den Versuchsergebnissen aus den Ermüdungsversuchen der UHC-Versuchsreihe 163

Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der drei Phasen des Ermüdungsvorgangs sowie der Entnahmezeitpunkte für die Gefügeuntersuchungen 165

Abbildung 6.5: Veranschaulichung des vorhandenen Risszustandes im unbeanspruchten Ausgangszustand des Zementsteins infolge Schwinden und Hydratation, sowie Beispielaufnahmen vom Lichtmikroskop und vom REM 166

Abbildung 6.6: Zusammenstellung der in UHC-Versuchen in Phase I gemessenen Entwicklungen bei Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten und -Amplituden 167

Abbildung 6.7: Schematische Veranschaulichung der unterschiedlichen Schädigungsausbildung im Zementstein bzw. -mörtel infolge von Zug- und infolge von Druckbeanspruchungen 169

Abbildung 6.8: Schematische Veranschaulichung der prinzipiellen Beanspruchungsverteilung im Betongefüge in der Phase I infolge einaxialer Druckschwellbeanspruchungen 169

Abbildung 6.9: Zusammenstellung der in UHC-Versuchen in stabiler Phase II gemessenen Entwicklungen bei Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten, US-Amplituden .. 173

Abbildung 6.10: Schematische Veranschaulichung prinzipielle Beanspruchungsverteilung im Betongefüge in der Phase II infolge einaxialer Druckschwellbeanspruchungen 174

Abbildung 6.11: Zusammenstellung der in UHC-Versuchen in instabiler Phase III gemessenen Entwicklungen bei Dehnungen, Steifigkeiten, Schallemissionen, US-Geschwindigkeiten und US-Amplituden 176

Abbildung 6.12: Graphische Darstellung des in Phase III einsetzenden Wachstums von Mikrorissen im Zementstein und der Kontaktzone mit vorrangiger Orientierung parallel zur Lastrichtung 178

Abbildung 6.13: Graphische Darstellung der vor dem Ermüdungsversagen stattfindenden starken Lokalisation der Mikrorissbildung, mit Ausbildung von Makrorissen und Bruchflächen als Folge .. 179

Abbildung 6.14: Unterschiedliche Auswirkungen der Schädigung auf die Entwicklung der Druckfestigkeit sowie auf die Entwicklung der horizontalen Ultraschallgeschwindigkeit 182

Abbildung 6.15: Abbildung der Schädigung in der Kontinuumsschädigungsmechanik über eine skalare E-Modul-Reduzierung und in Ermüdungsversuchen tatsächlich im Beton festgestellte ungleichmäßige Veränderung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung 183

Abbildung 6.16: Ungleichmäßig ausgeprägte Veränderungen in den Ableitungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen während der Lebensdauer mit fortlaufender und am stärksten ausgeprägter Veränderung im unteren Spannungsbereich 184

Abbildung 6.17: Beispielhafte Kurvenscharen aus UHC-Versuchen für die Entwicklung des E-Moduls und die Zyklenzahlen bezogen auf die Lebensdauer 187

Abbildung 6.18: Schematische Veranschaulichung der einzelnen Größen zur Bestimmung des bezogenen Variationskoeffizienten bez. v_{var} anhand einer gemittelten Messkurve 187

Abbildung 6.19: Vergleich der Entwicklungen der bez. Variationskoeffizienten über die Lebensdauer für die verschiedenen Messgrößen aus den LHC-Versuchen 189

Abbildung 6.20: Vergleich der Entwicklungen der bez. Variationskoeffizienten über die Lebensdauer für die verschiedenen Messgrößen aus den UHC-Versuchen 189

Abbildung 6.21: Schematische Veranschaulichung der wesentlichen Größen, die die ermüdungsbedingte Veränderung des Materialverhaltens charakterisieren 195

Abbildung 6.22: Allgemeine Darstellung des verwendeten gebrochen rationalen Funktionsansatzes zur Abbildung s-förmiger Evolutionskurven 196

Abbildung 6.23: Darstellung der abgeleiteten Funktionsgleichungen zusammen mit zugehörigen Messkurven der UHC-Versuche für die Entwicklung des E-Moduls im unteren Beanspruchungsbereich sowie für die Entwicklung der horizontalen US-Geschwindigkeit unter Grundlast S_0 198

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Übersicht über die wesentlichen Einflussparameter auf das Ermüdungsverhalten 39
Tabelle 4.1: Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der statischen Versuchsreihe..... 59
Tabelle 4.2: Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der Kriechversuche 60
Tabelle 4.3: Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der LHC Versuchsreihe 3 61
Tabelle 4.4: Übersicht zu den einzelnen Versuchsserien der UHC Versuchsreihe 4 62
Tabelle 4.5: Übersicht zu Versuchsserien der Nachprüfungen zuvor zyklisch geprüfter Proben 63
Tabelle 4.6: Übersicht zu den statischen Versuchen GSV an Großprobekörpern..... 64
Tabelle 4.7: Übersicht zu den statischen Versuchen an zugehörigen kleinen Probekörpern 64
Tabelle 4.8: Übersicht zu den zyklischen Versuchen an den Großprobekörpern..... 65
Tabelle 4.9: Mischungszusammensetzung des verwendeten Betons 66
Tabelle 4.10: Mittlere Frischbetonkennwerte aller verwendeten Betonmischungen 71
Tabelle 4.11: Mittlere Festbetonkennwerte aller verwendetet Betonmischungen..... 72
Tabelle 4.12: Verwendete Belastungsniveaus für die Kriechversuche 85
Tabelle 4.13: Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC) Belastungsniveaus.... 88
Tabelle 4.14: Übersicht Ermüdungsversuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC)..... 89
Tabelle 4.15: Belastungsniveaus Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC) 91
Tabelle 4.16: Übersicht Ermüdungsversuche (UHC) mit den Abbruchversuchen..... 92
Tabelle 4.17: Belastungen für die Ermüdungsversuche an den Großproben 94
Tabelle 4.18: Übersicht Ermüdungsversuche an den Großproben 95
Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Bruchenergien für verschiedene Schädigungsgrade 110
Tabelle 5.2: Stichprobenartig ermittelte Rissbreiten in den REM-Aufnahmen 122
Tabelle 5.3: Vergleich Restbruchfestigkeiten Kriechproben mit unbeanspruchten und mit zyklisch vorgeschädigten Proben 127
Tabelle 5.4: Vergleich der gemittelten Dehnungsanteile aus den einzelnen Versuchsreihen 142
Tabelle 5.5: Vergleich gemittelter Dehnungsanteile aus verschiedenen Vorschädigungsgraden 143
Tabelle 5.6: Vergleich der Steifigkeitsreduzierungen bei statischer sowie zyklischer Belastung 144
Tabelle 6.1: Aus Literatur abgeleitete Materialeigenschaften für Zuschläge und Zementmörtel 160
Tabelle 6.2: Einige durch die Materialschädigung beeinflusste Materialeigenschaften 182
Tabelle 6.3: Vergleich und Bewertung der verschiedenen Messgrößen 193
Tabelle 6.4: Parameter für Evolutionsgleichungen relevanter Größen zur Beschreibung des Materialverhaltens..... 197
Tabelle 6.5: Parameter für Evolutionsgleichungen relevanter Größen für Zustandsbestimmung anhand von Ultraschallmessungen..... 197

Anhang A – Experimentelle Untersuchungen

A1 – Ausgangsstoffe

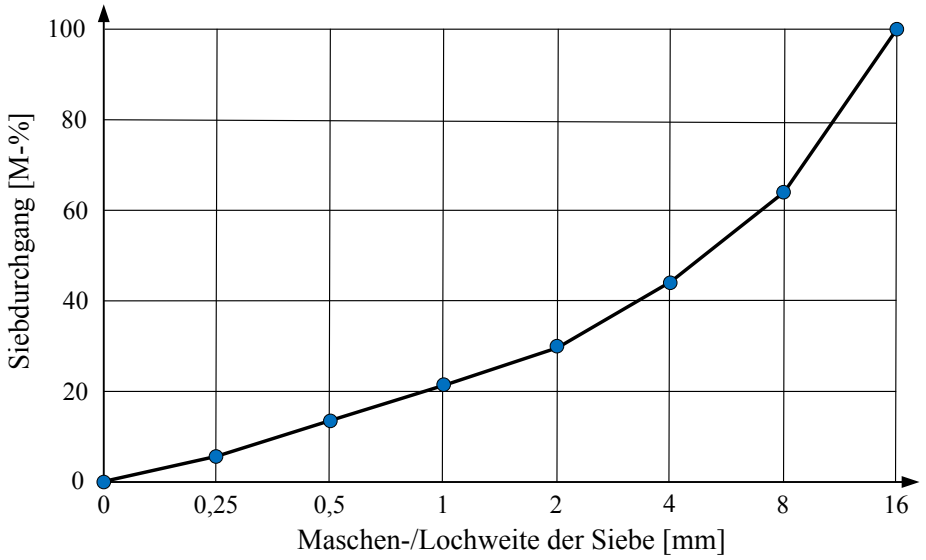

Abbildung A1 1: *Sieblinie A/B16 des verwendeten Zuschlags für den untersuchten Normalbeton*

A2 – Versuchs- und Messtechnik

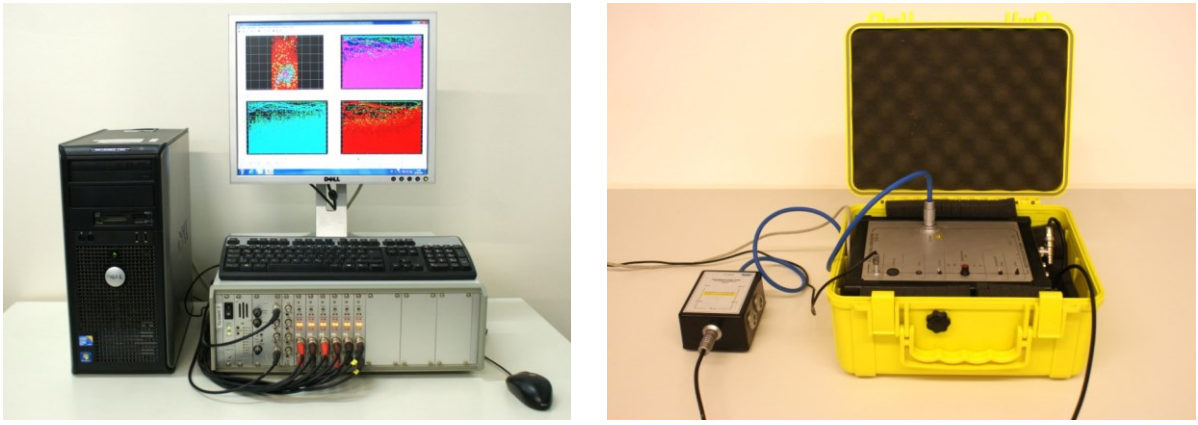

Abbildung A2 1: *Verwendetes Schallemissions-Messsystem der Firma Vallen vom Typ AMSY-5 (links) sowie das eingesetzte Ultraschall Messsystem UKS-D der Firma Geotron-Elektronik (rechts)*

Abbildung A2 2: *Optisches Messsystem ARAMIS der Firma GOM zur 3D-Verfromungsanalyse, eingesetzt zur Ermittlung der Oberflächenverformungen der Probekörper (© GOM mbH)*

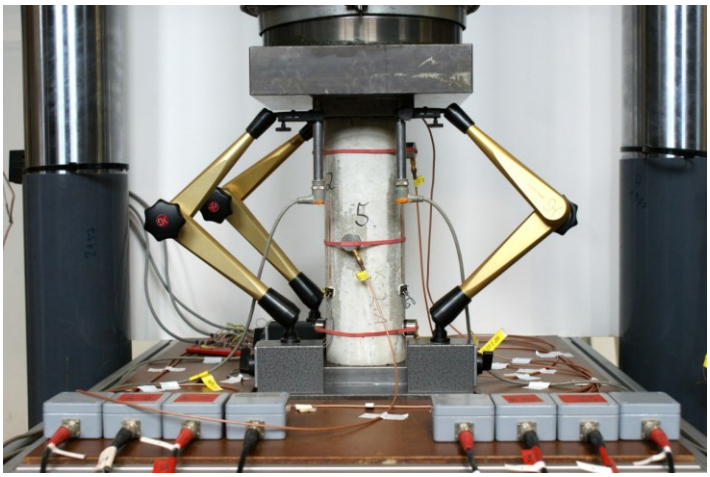

Abbildung A2 3: *Beispiel einer bestückten Probe in der Prüfmaschine mit Messungen der Dehnungen, der Ultraschallsignale, der Schallemissionen und des Druckplatenabstandes*

A3 – Versuchsdurchführung

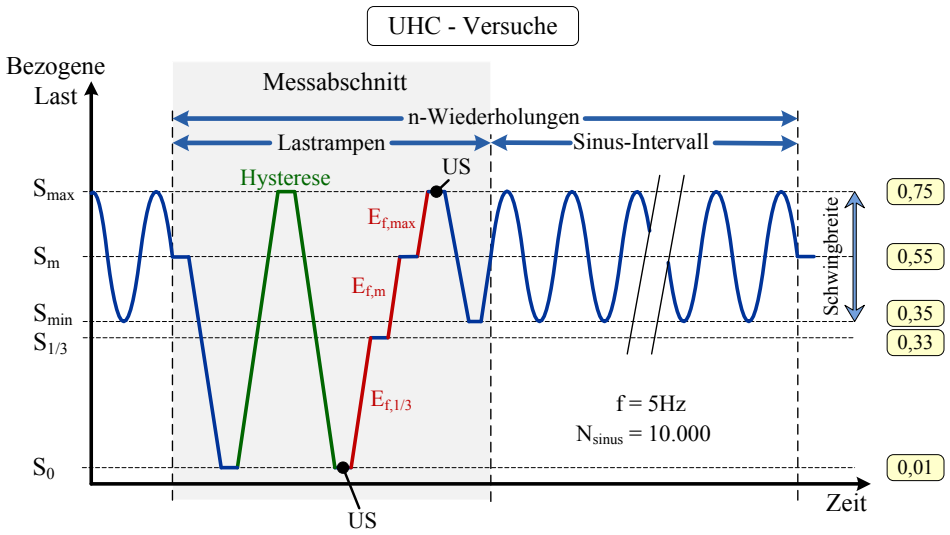

Abbildung A3 1: *Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die UHC-Ermüdungsversuche im oberen hochzyklischen Bereich mit dem für Messzwecke integrierten Abschnitt aus Lastrampen*

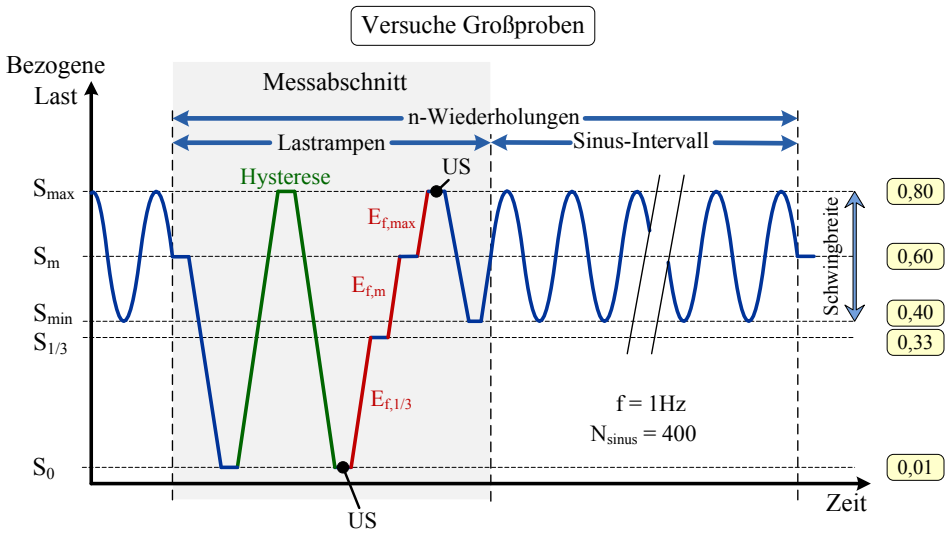

Abbildung A3 2: *Schematische Darstellung des Belastungsprogramms für die Ermüdungsversuche an den Großproben mit dem für Messzwecke integrierten Abschnitt aus Lastrampen*

Anhang B – Versuchsergebnisse

B1 – Versuche im oberen hochzyklischen Bereich (UHC)

Tabelle B1 1: *Übersicht zu den einzelnen Versuchen der Serie S1 aus der UHC-Versuchsreihe*

Probe	***Lastzyklen N_f[-]***	***Versuchs-dauer [h]***	***Messungen***
Serie UHC-S1: Durchgängig bis 100% N_f			
P1	1.734.130	101:14	ε, E, US hor.
P2	4.126.267	250:45	ε, E, US hor.
P3	3.241.280	210:05	ε, E, US hor.
P4	3.982.834	225:46	ε, E, US hor., Aramis
P5	3.181.253	187:06	ε, E, US hor.+vert., SEA
P6	8.402.485	488:31	ε, E, SEA
P7	4.844.080	281:40	ε, E, SEA
P8	3.503.328	204:24	ε, E, US hor., SEA
P9	2.467.906	144:00	ε, E, US hor., SEA
P10	6.136.633	365:58	ε, E, US hor., SEA
P11	3.244.461	190:30	ε, E, SEA
P12	6.076.295	356:10	ε, E, US hor.+vert., SEA
P13	5.297.408	310:31	ε, E, US hor.+vert., SEA
P14	*4.639.438	279:17	ε, E, US hor.+vert., SEA

*Probleme während des Versuches, daher nicht in die Auswertung einbezogen.

Tabelle B1 2: *Übersicht zu den einzelnen Versuchen der Serien S2 bis S3 aus der UHC-Versuchsreihe*

Probe	***Lastzyklen N_i [-]***	***Versuchs-dauer [h]***	***Messungen zykl. Teil***	***Nachprüfungen***
Serie UHC-S2: Teilschädigung bis 90% Lebensdauer				
P1	8.898.455	521:33	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q, REM L
P2	5.855.579	356:16	ε, E, US hor.+vert., SEA	-
P3	*1.220.077	71:33	ε, E, US hor.+vert., SEA	-
P4	2.152.049	126:11	ε, E, US hor.+vert., SEA	-
P5	11.971.372	701:39	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q
P6	1.401.342	82:22	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
P7	1.341.283	78:50	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
Serie UHC-S3: Teilschädigung bis 50% Lebensdauer				
P1	3.593.418	210:40	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L
P2	6.566.242	384:57	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q
P3	14.603.871	857:11	ε, E, US hor.+vert., SEA	-
P4	1.461.397	85:54	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
P5	1.861.777	109:27	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q
P6	1.291.233	75:53	ε, E, US hor.+vert., SEA	*Arbeitslinie
P7	1.461.397	85:54	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
Serie UHC-S4: Teilschädigung bis 10% Lebensdauer				
P1	740.711	43:28	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
P2	340.331	20:01	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q
P3	460.445	27:03	ε, E, US hor.+vert., SEA	Mikro. L+Q, REM L
P4	210.207	12:23	ε, E, US hor.+vert., SEA	*Arbeitslinie
P5	600.578	35:15	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie
P6	570.548	33:30	ε, E, US hor.+vert., SEA	Arbeitslinie

*Probleme während des Versuches, daher nicht in die Auswertung einbezogen.

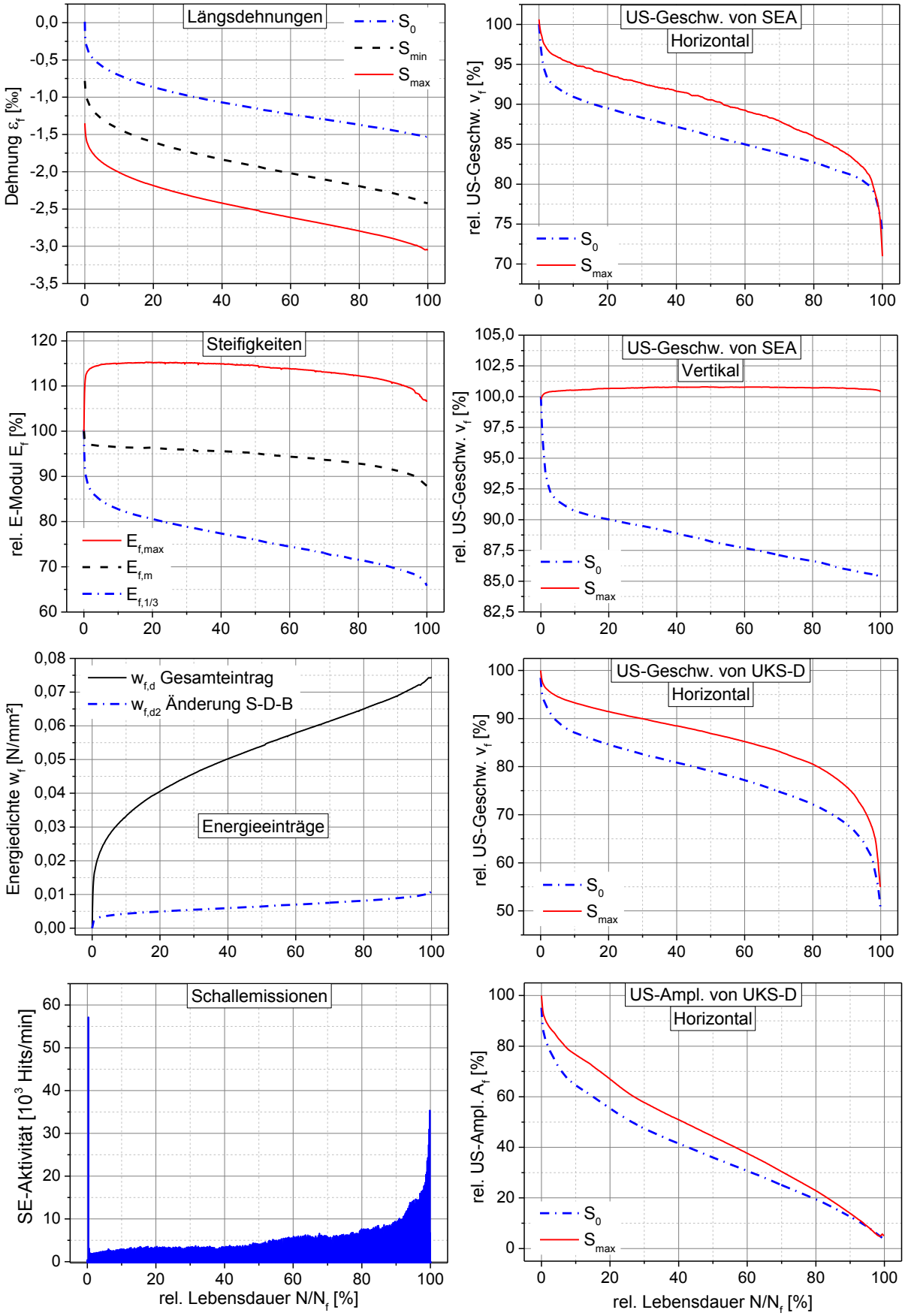

Abbildung B1 1: *Zusammenstellung der makroskopischen Messergebnisse der UHC-Versuchsreihe*

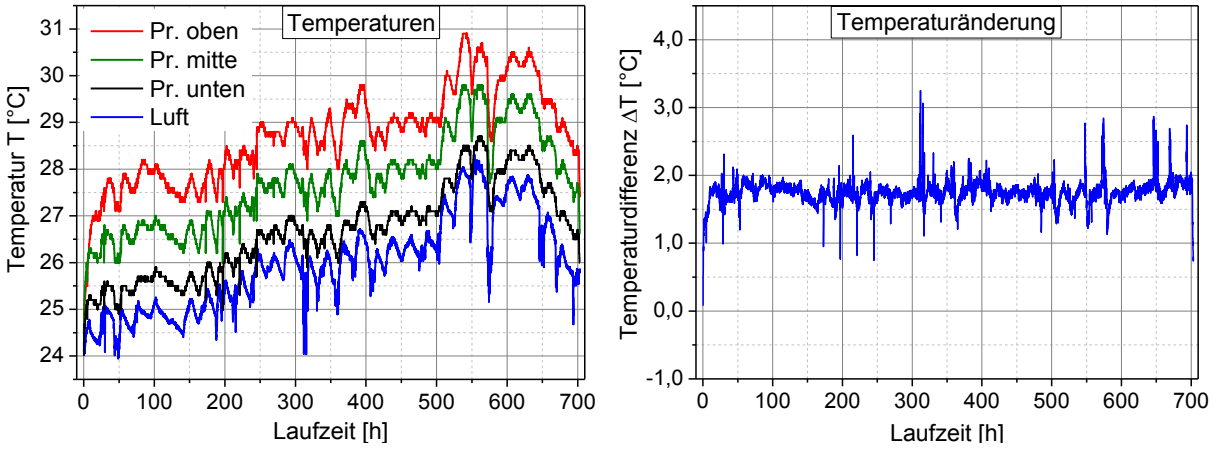

Abbildung B1 2: *Temperaturentwicklung im Ermüdungsversuch an verschiedenen Stellen der Probe sowie der Umgebung (links) und resultierende relative Temperaturänderung der Probe (rechts)*

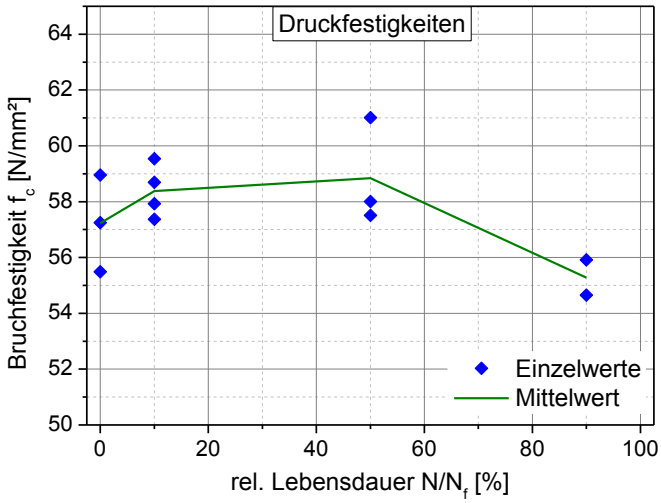

Abbildung B1 3: *Bruchfestigkeiten und Restbruchfestigkeiten der einzelnen ungeschädigten und verschieden zyklisch vorgeschädigten Proben aus der UHC-Versuchsreihe*

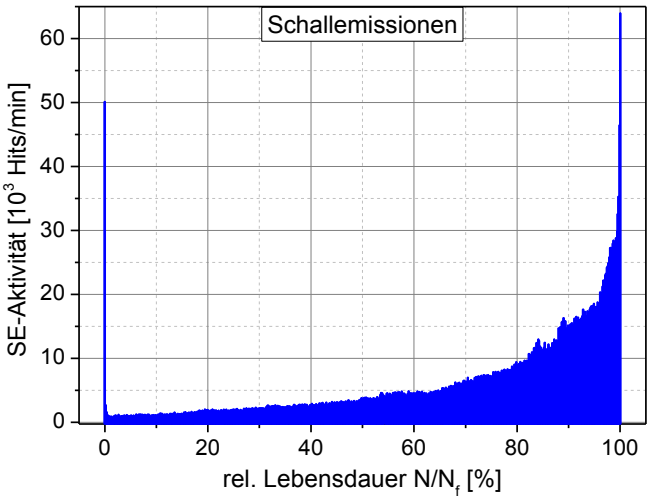

Abbildung B1 4: *Weitere beispielhafte Entwicklung der Schallemissionsaktivität von einem Ermüdungsversuch der Serie UHC-S1 mit N_f = 5.297.408 Zyklen*

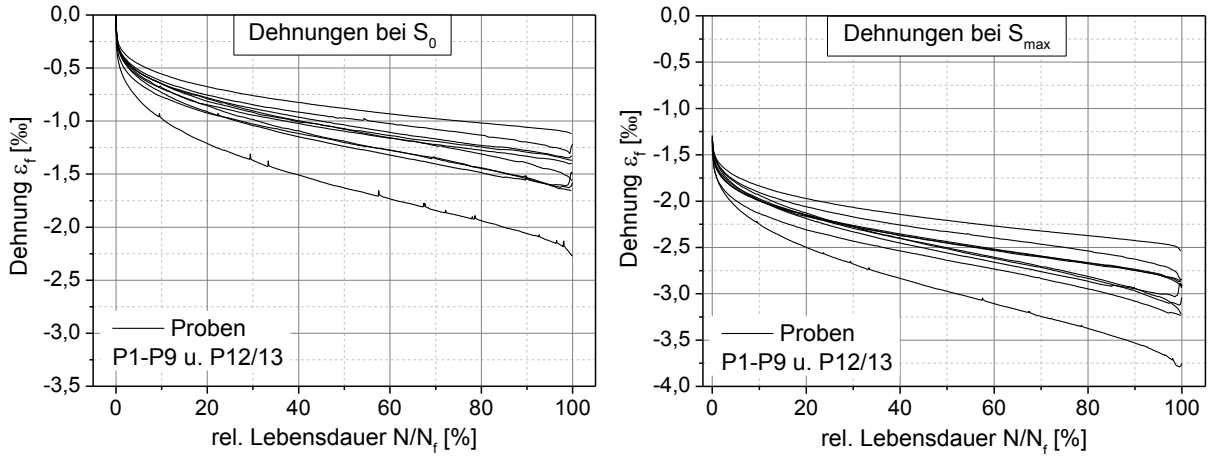

Abbildung B1 5: *Dehnungsverläufe der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

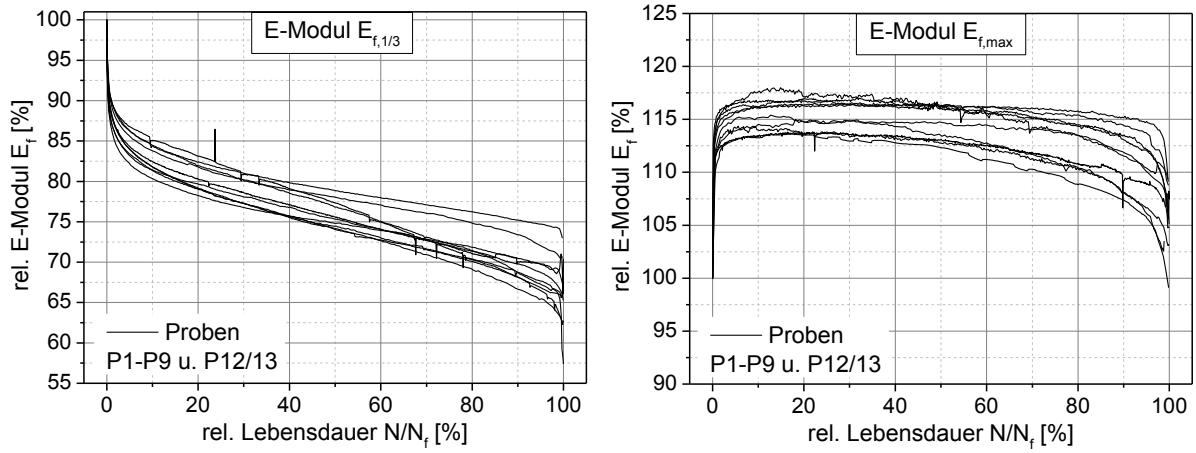

Abbildung B1 6: *E-Modul-Verläufe der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 im untersten Beanspruchungsbereich (links) und im obersten Beanspruchungsbereich (rechts)*

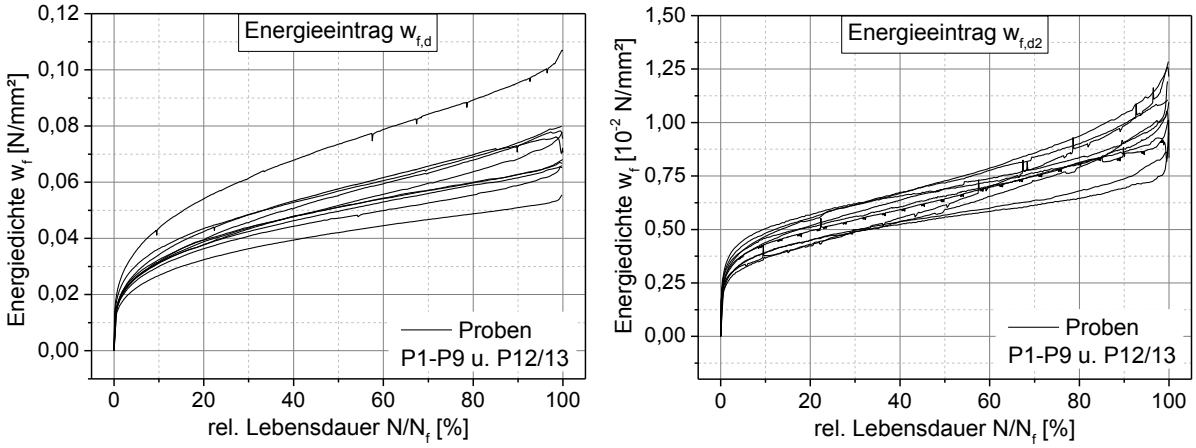

Abbildung B1 7: *Entwicklungen der Energieeinträge der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 für den Gesamteintrag $w_{f,d}$ (links) und für die Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Beziehung $w_{f,d2}$ (rechts)*

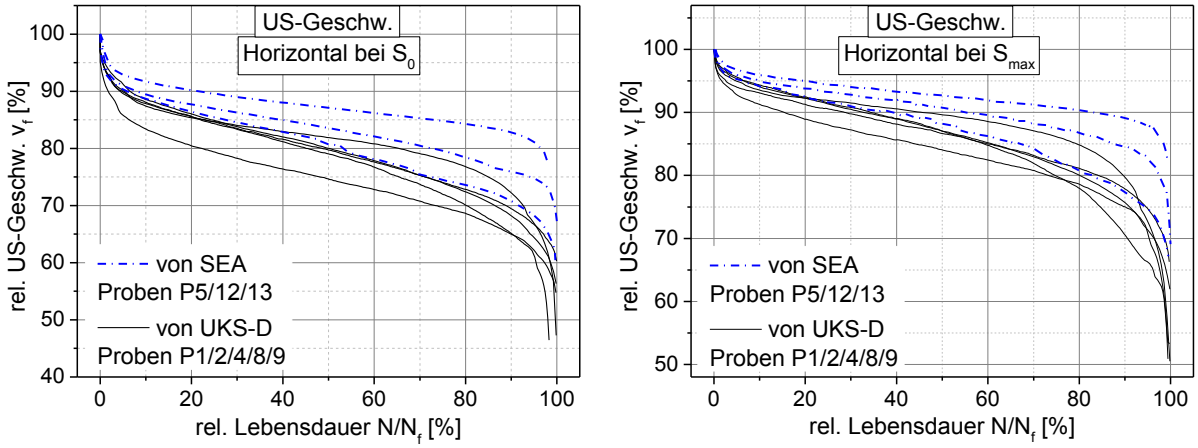

Abbildung B1 8: *Verläufe der horizontal gemessenen US-Geschwindigkeiten der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

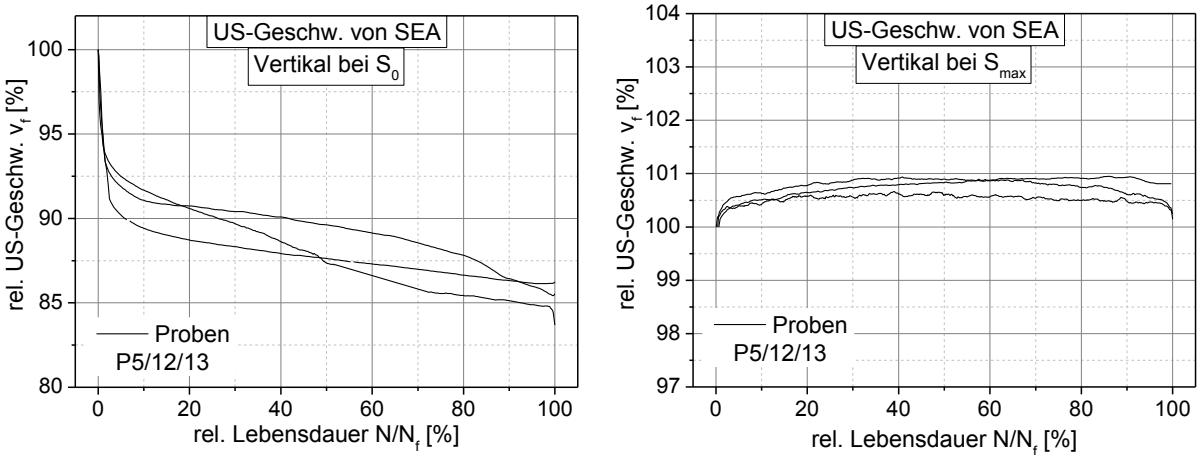

Abbildung B1 9: *Verläufe der vertikal gemessenen US-Geschwindigkeiten der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

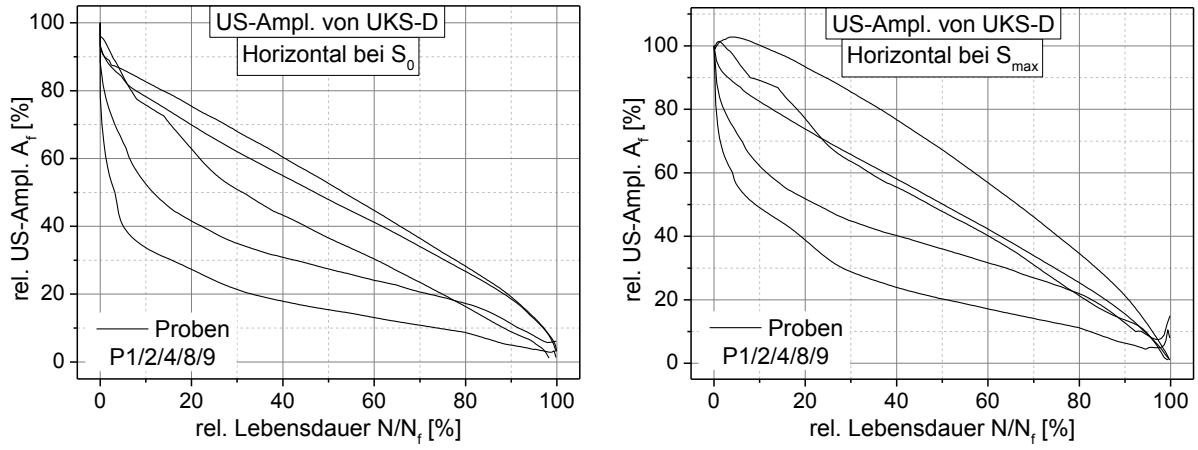

Abbildung B1 10: *Verläufe der horizontal gemessenen US-Amplituden der einzelnen Proben der Versuchsserie UHC-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

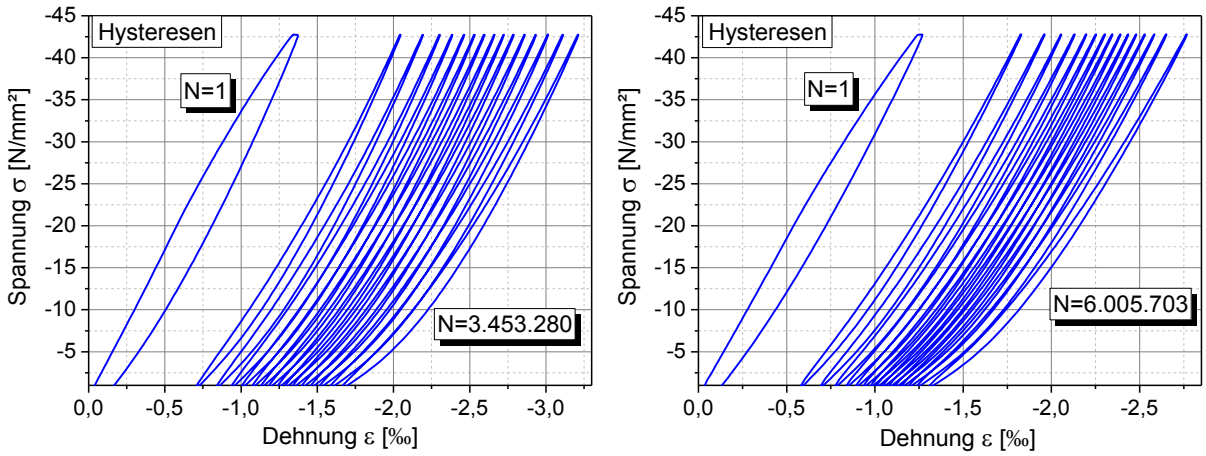

Abbildung B1 11: *Zwei zusätzliche beispielhafte Entwicklungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den Hysteresen von zwei Ermüdungsversuchen der Serie UHC-S1*

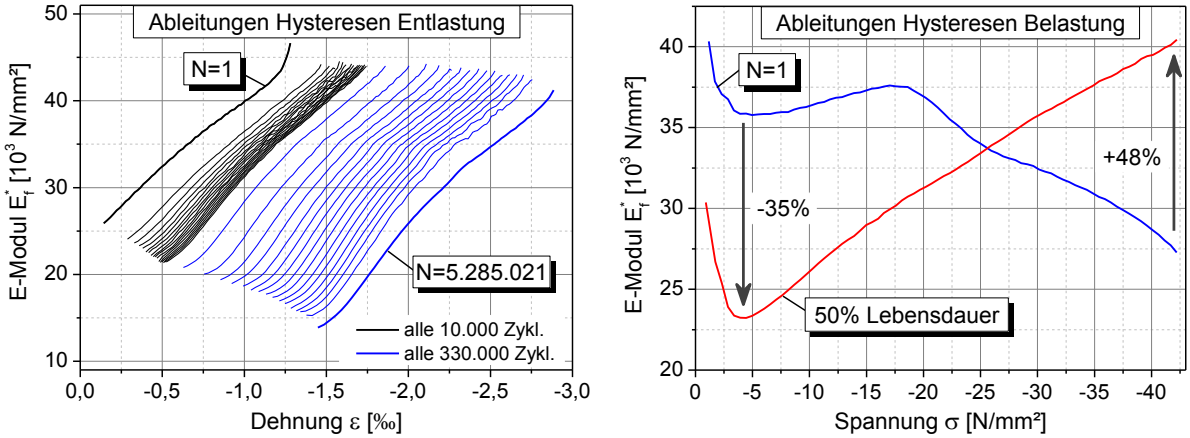

Abbildung B1 12: *1. Ableitung der Entlastungskurven aus den Hysteresen während der Lebensdauer (links), sehr unterschiedliche Steifigkeitsveränderungen durch den Ermüdungsvorgang in den Belastungskurven (rechts) von einem UHC-Versuch*

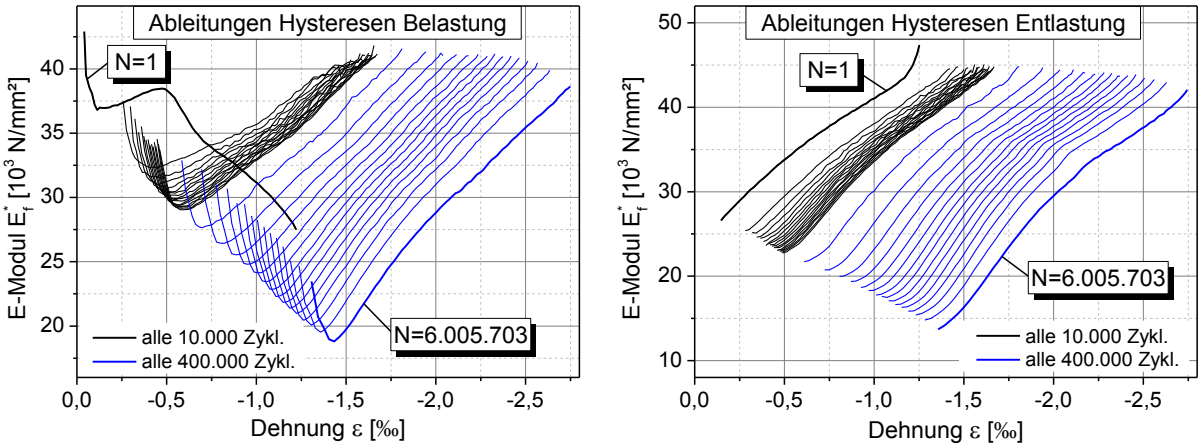

Abbildung B1 13: *Weitere beispielhafte Ableitungen von Belastungskurven (links) und von Entlastungskurven (rechts) aus den Hysteresen, dargestellt über die Dehnung, von einem UHC-Versuch*

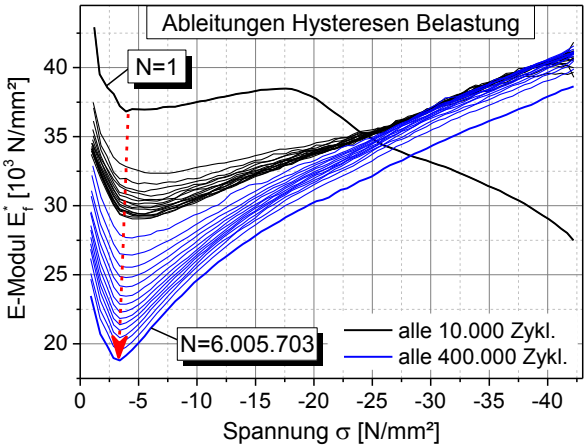

Abbildung B1 14: *Weitere beispielhafte Ableitungen von Belastungskurven aus den Hysteresen, dargestellt über die Spannung, von einem UHC-Versuch*

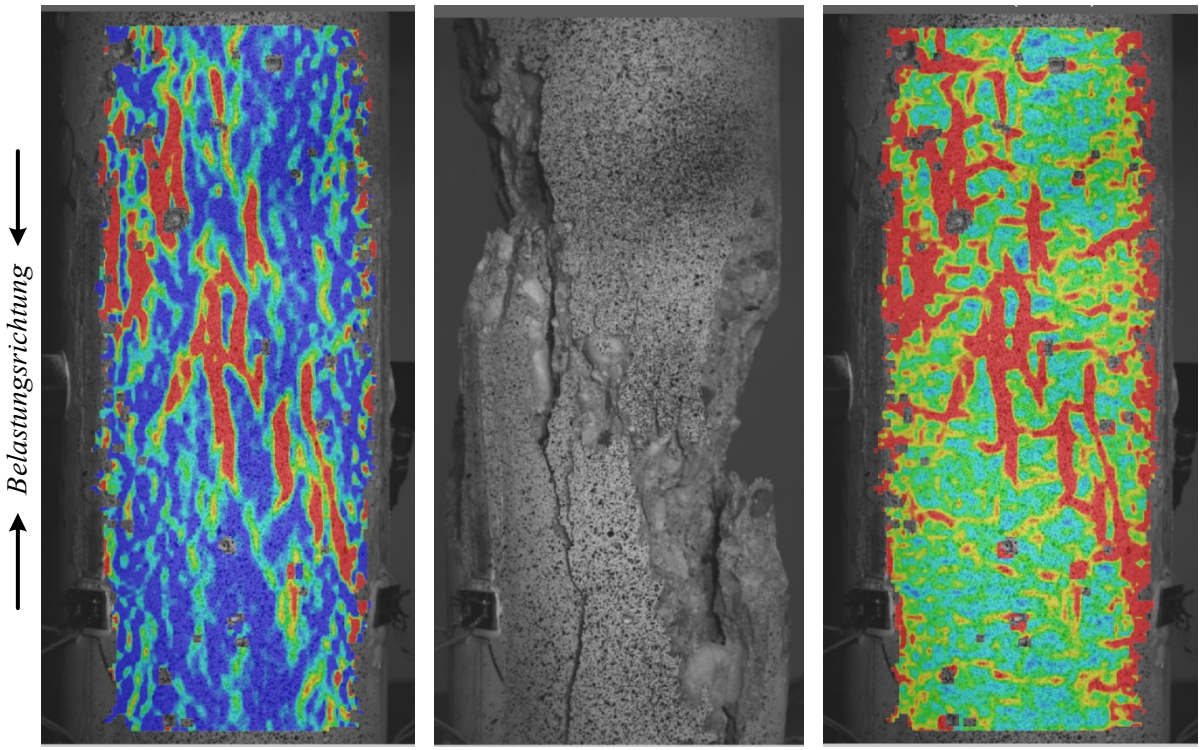

Abbildung B1 15: *Vergleich des Bruchbildes nach dem Ermüdungsversagen (Mitte) mit den kurz zuvor gemessenen Oberflächenverformungen in Form der Querdehnungen (links) und der resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises (rechts)*

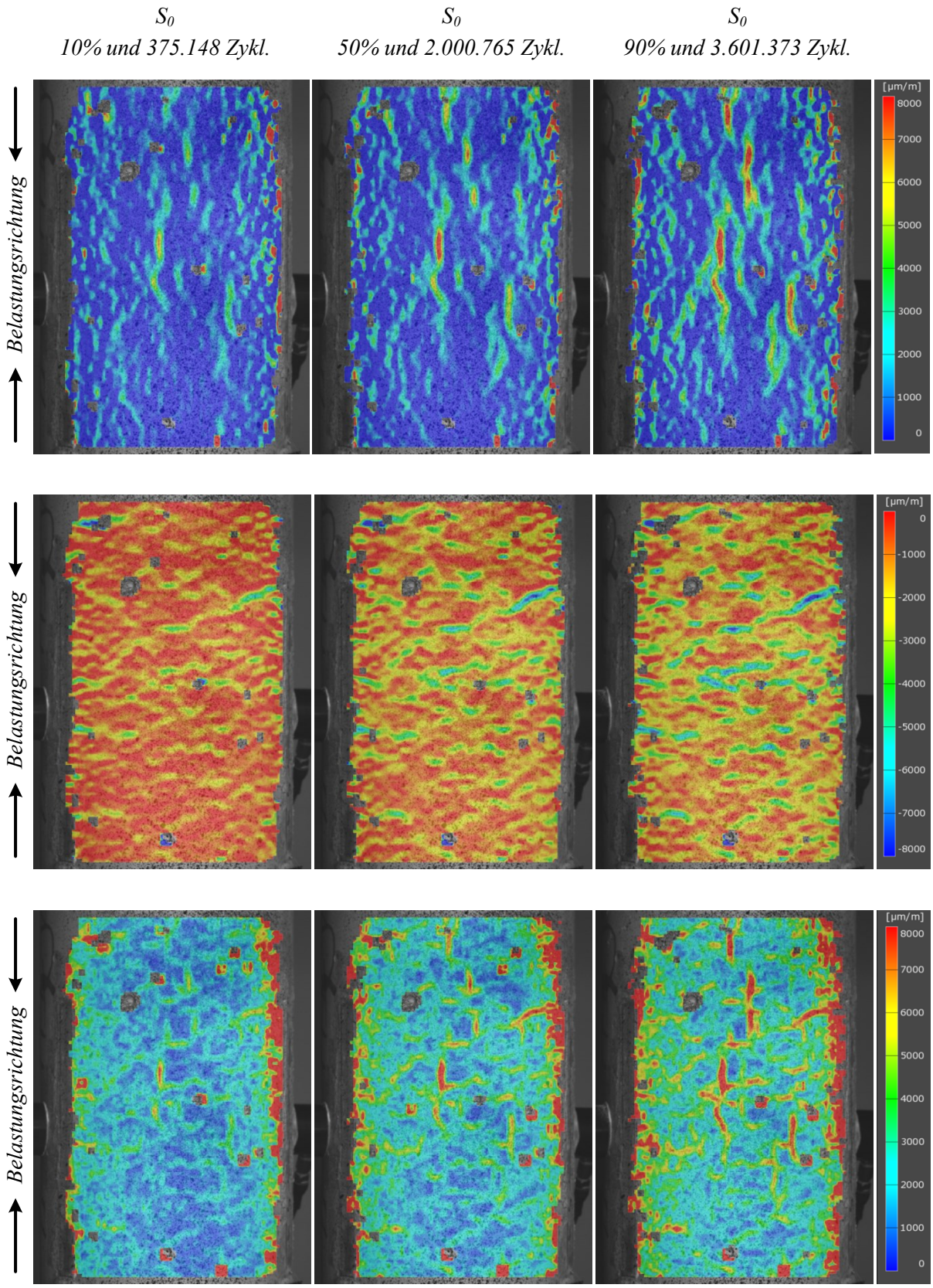

Abbildung B1 16: *Verteilung der Oberflächenverformungen für einen UHC-Versuch unter der Grundlast S_0 zu drei verschiedenen Lebensdauerzeitpunkten, für die Horizontaldehnungen (oben), für die Vertikaldehnungen (Mitte) und für die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises (unten). Die Ermüdungslastspielzahl betrug 3.982.834 Zyklen.*

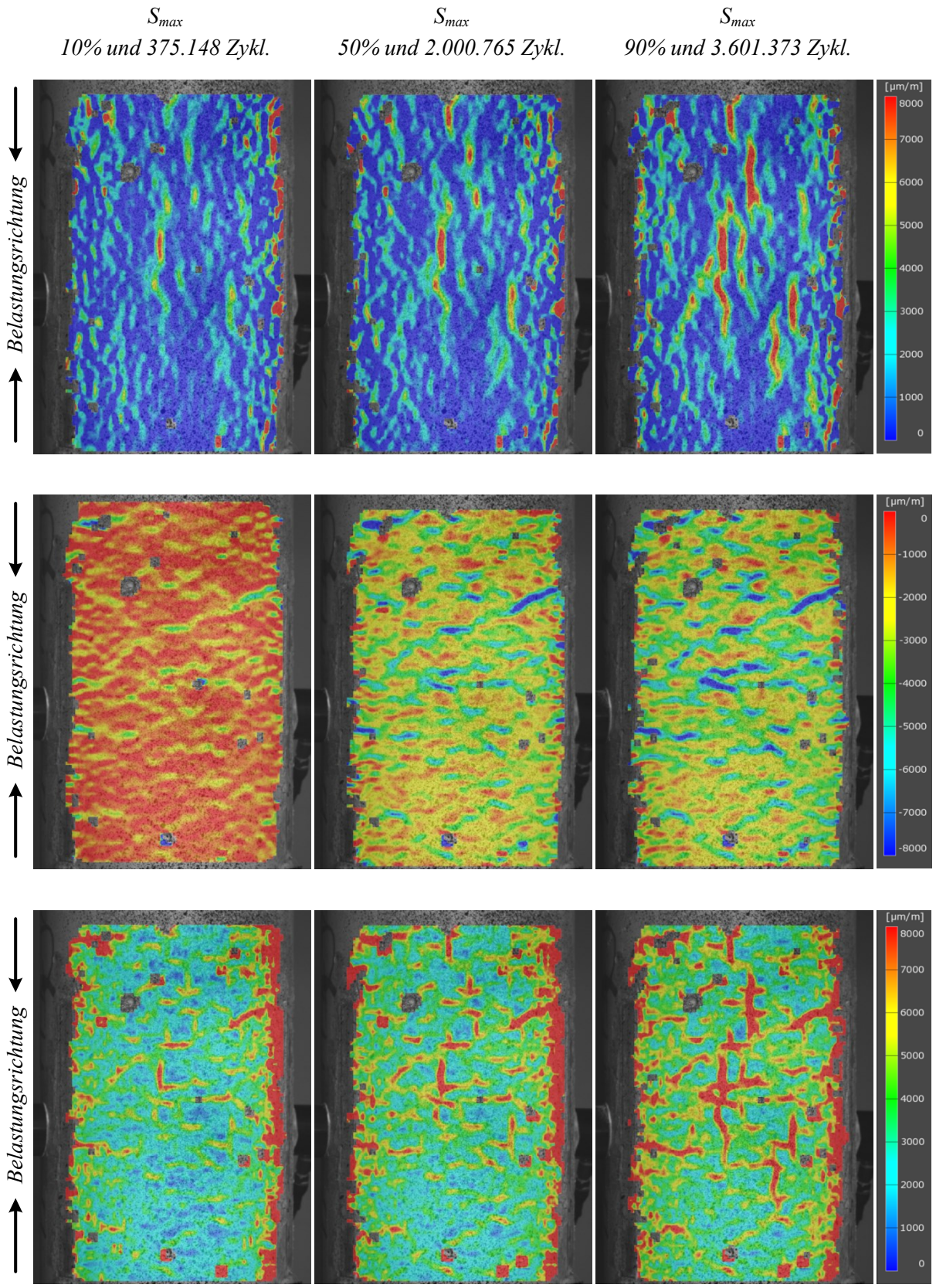

Abbildung B1 17: *Verteilung der Oberflächenverformungen für einen UHC-Versuch unter der Oberlast S_{max} zu drei verschiedenen Lebensdauerzeitpunkten, für die Horizontaldehnungen (oben), für die Vertikaldehnungen (Mitte) und für die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises (unten). Die Ermüdungslastspielzahl betrug 3.982.834 Zyklen.*

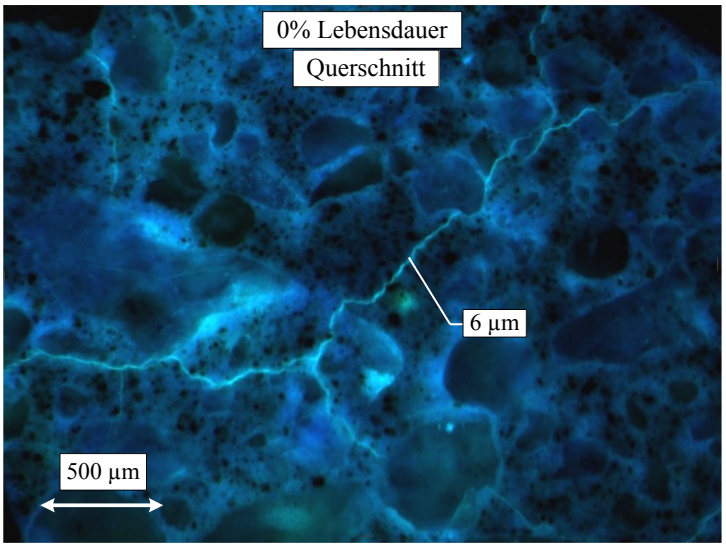

Abbildung B1 18: *Diffuse und ungerichtete Rissstruktur einer unbeanspruchten Probe*

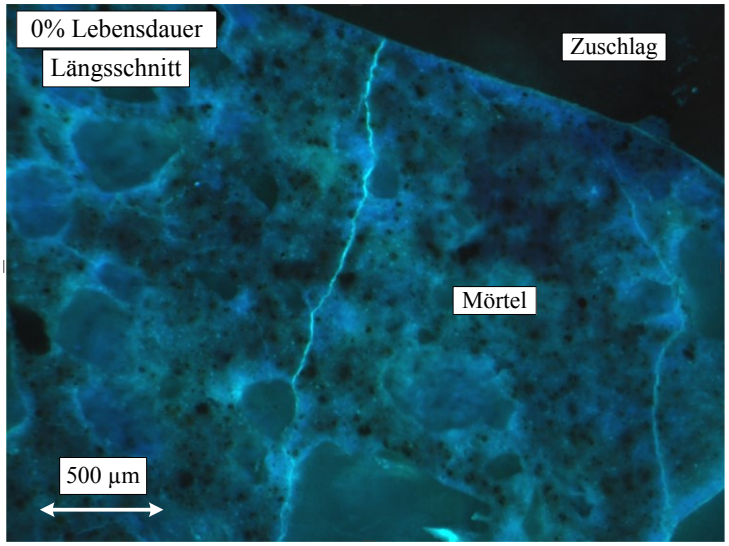

Abbildung B1 19: *Typischer Mikroriss von Korn in den Zementmörtel und zum Korn, unbeanspruchte Probe*

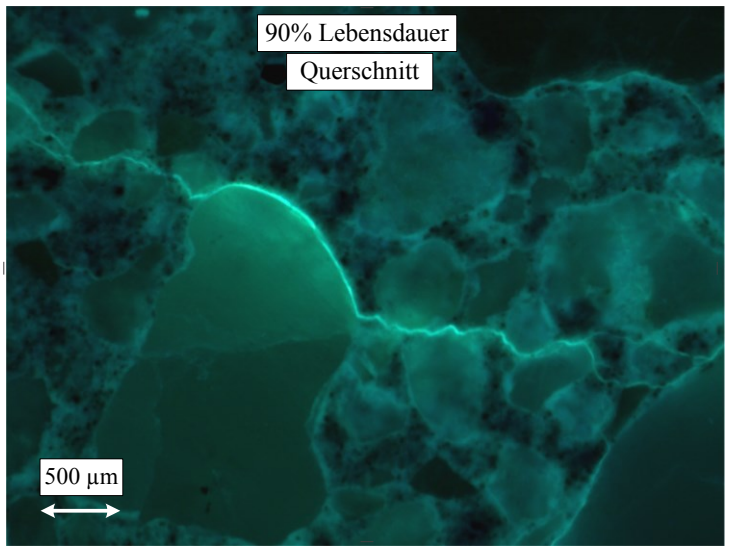

Abbildung B1 20: *Typischer Rissverlauf durch Zementmörtel, in der ITZ um das Korn und weiter im Mörtel*

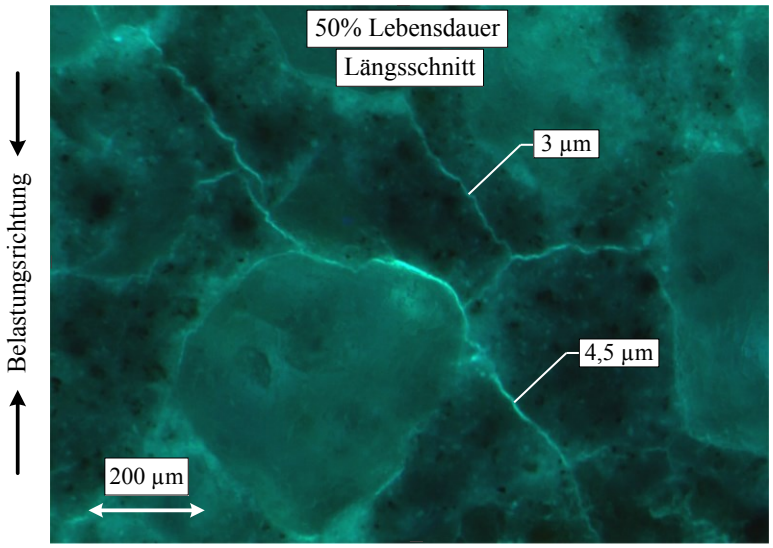

Abbildung B1 21: *Typischer Riss durch Zementmörtel, der ein Korn durch die ITZ umläuft*

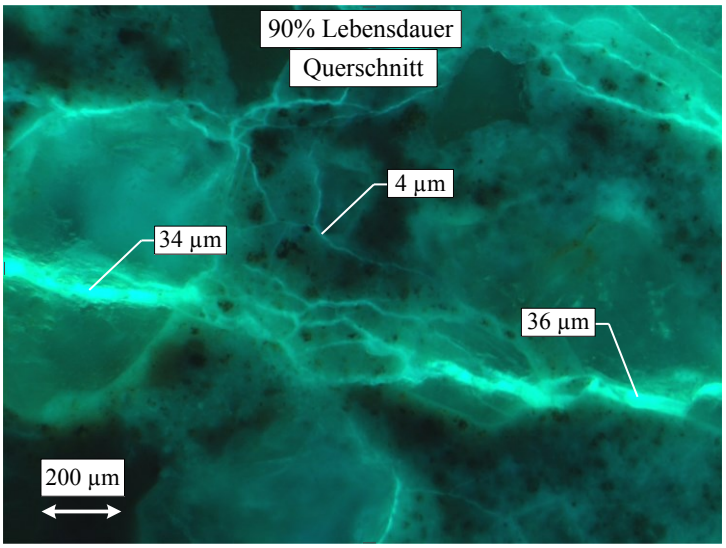

Abbildung B1 22: *Großer Riss aufgefächert in mehrere kleine Risse der durch Zementmörtel und den Zuschlag verläuft*

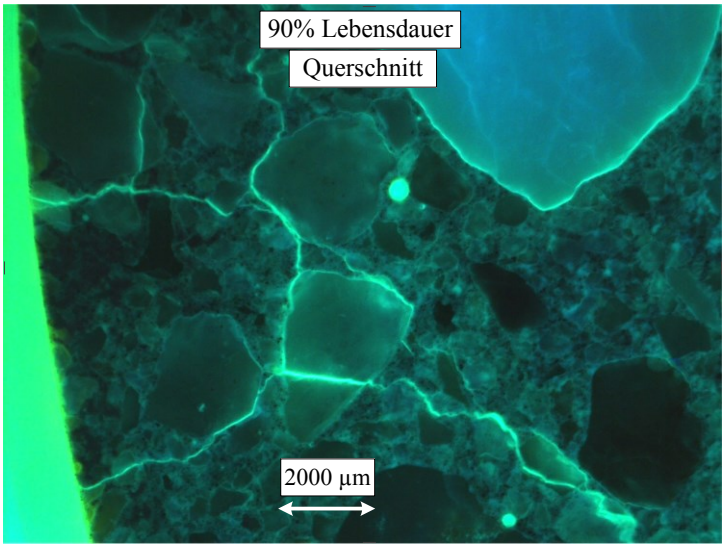

Abbildung B1 23: *Große Rissstruktur durch Zementmörtel und Zuschlag bis zur Probenoberfläche*

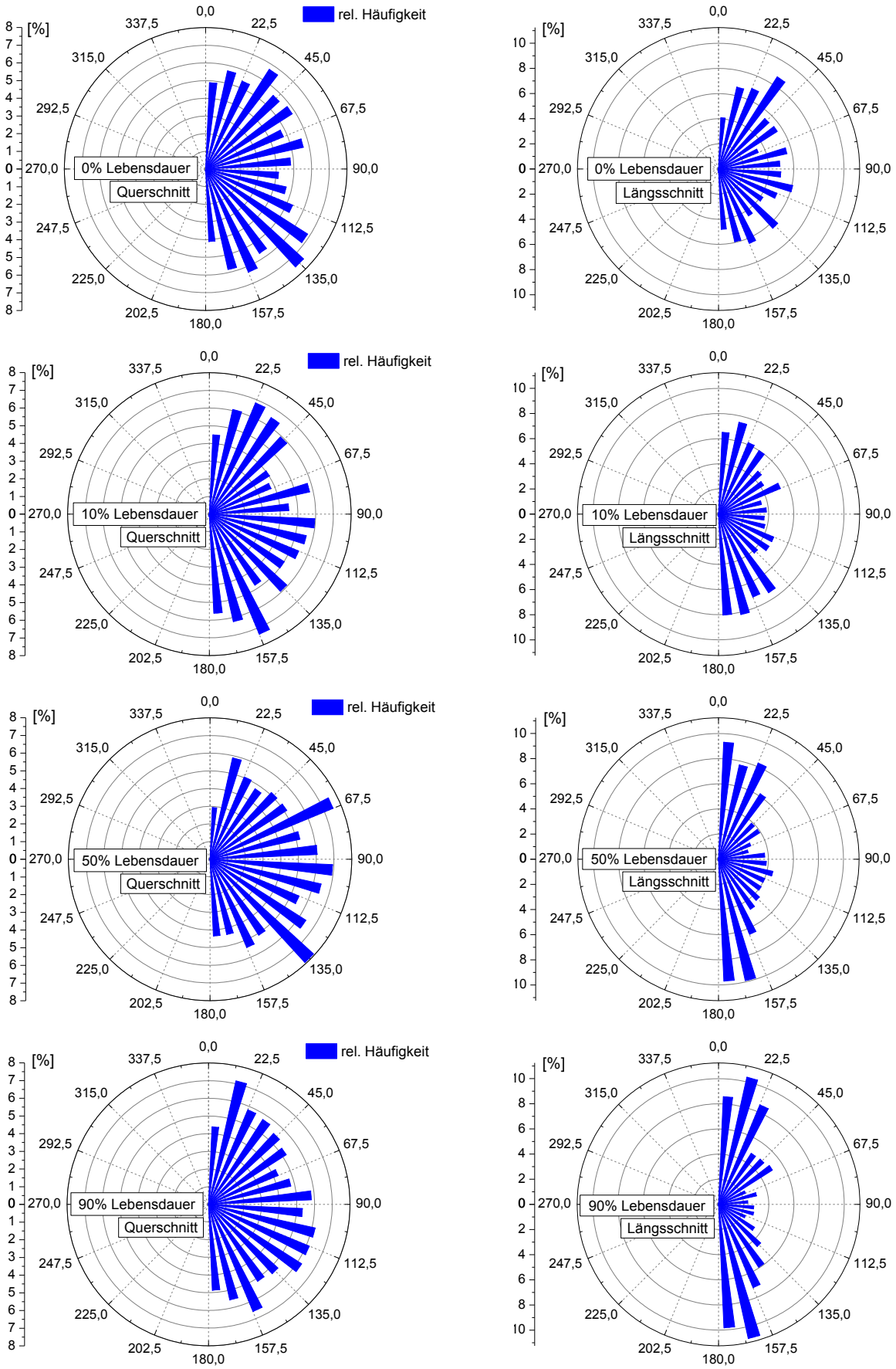

Abbildung B1 24: *Zusammenstellung der Häufigkeitsverteilungen der Rissrichtungen für verschiedene Lebensdauerzustände*

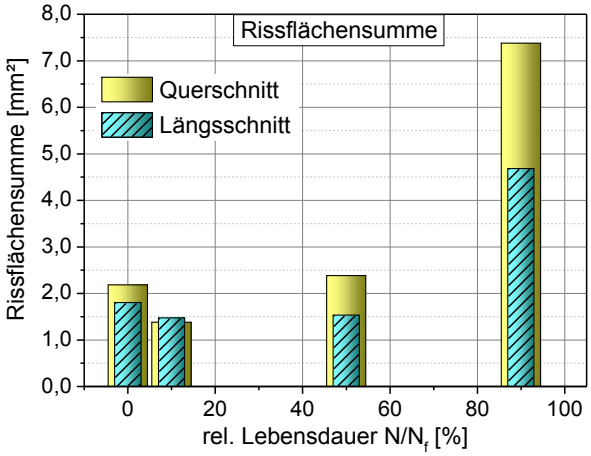

Abbildung B1 25: *Aus den gemessenen Mikrorissen ermittelte mittlere Rissflächensumme für Quer- und Längsschnitte zu verschiedenen Lebensdauerzeitpunkten*

Tabelle B1 3: *Aus den Mikroskopie-Bildern ermittelte Werte für die Rissbreiten im Quer- und Längsschnitt für die verschiedenen Lebensdauerzeitpunkte*

Lebens-	***Rissbreiten Querschnitt***			***Rissbreiten Längsschnitt***		
dauer	***Min.***	***Max.***	***Mittel***	***Min.***	***Max.***	***Mittel***
[%]	***[µm]***	***[µm]***	***[µm]***	***[µm]***	***[µm]***	***[µm]***
0	2,5	8,3	5,4	2,6	8,8	5,6
10	3,0	9,6	5,8	3,1	6,6	5,0
50	3,1	9,5	6,2	3,0	9,1	5,8
90	3,2	23,4	10,8	3,6	32,9	14,1

Tabelle B1 4: *Aus den Mikroskopie-Bildern ermittelte Werte für die Risse im Quer- und Längsschnitt für die verschiedenen Lebensdauerzeitpunkte*

Gemessene	***Lebensdauerzustand***			
Größe	***0%***	***10%***	***50%***	***90%***
Querschnitt der Probe				
Rissanzahl	325	252	302	328
Gesamtlänge [mm]	398	256	396	592
Mittlere Länge [mm]	1,2	1,0	1,3	2,0
Rissfläche [mm²]	2,2	1,4	2,4	7,4
Längsschnitt der Probe				
Rissanzahl	263	213	318	237
Gesamtlänge [mm]	328	273	255	378
Mittlere Länge [mm]	1,3	1,1	0,8	1,6
Rissfläche [mm²]	1,8	1,5	1,5	4,7

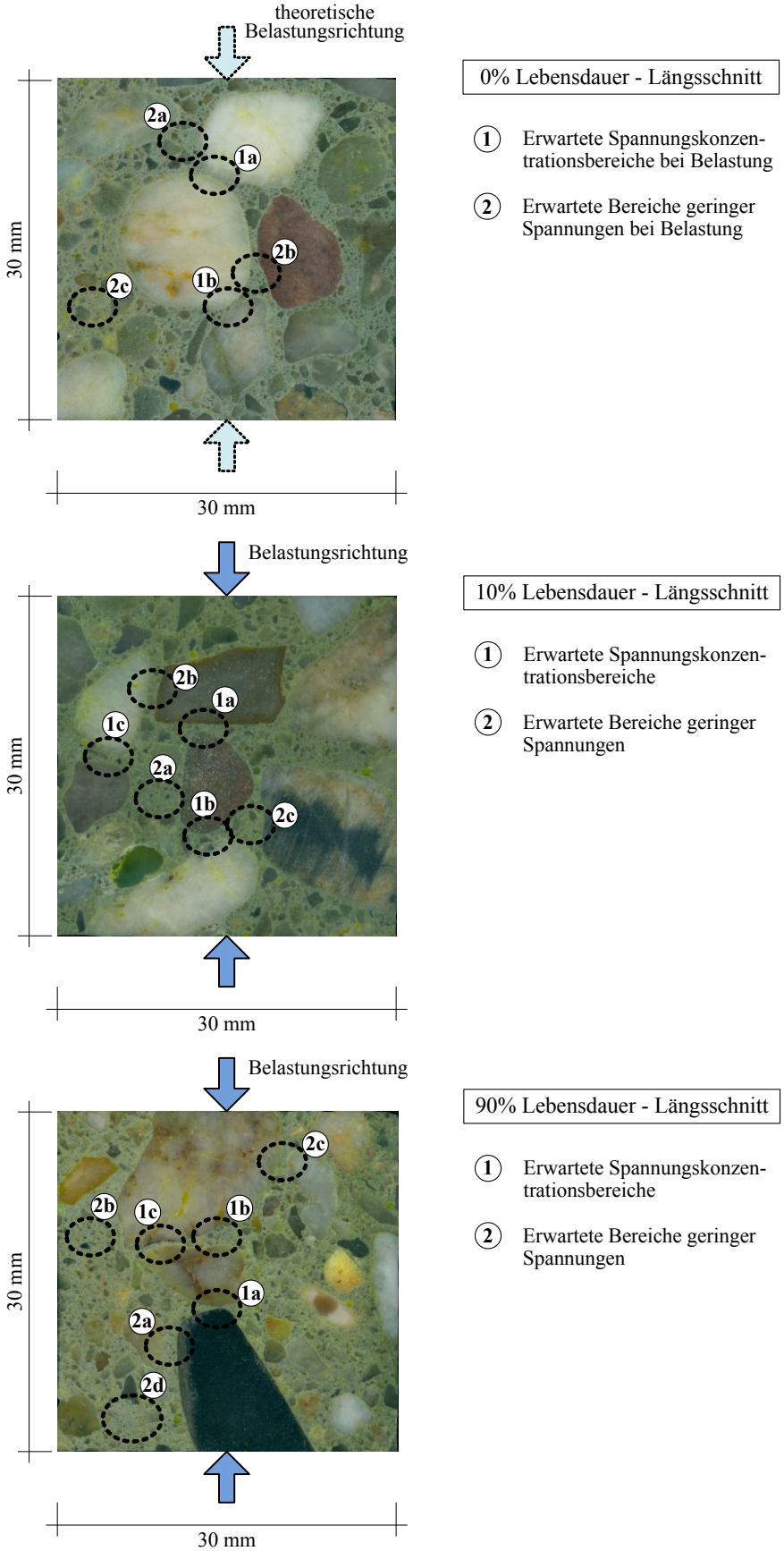

Abbildung B1 26: *Darstellung der drei mit dem REM untersuchten Probenausschnitte mit den entsprechenden Markierungen der jeweiligen Untersuchungsbereiche*

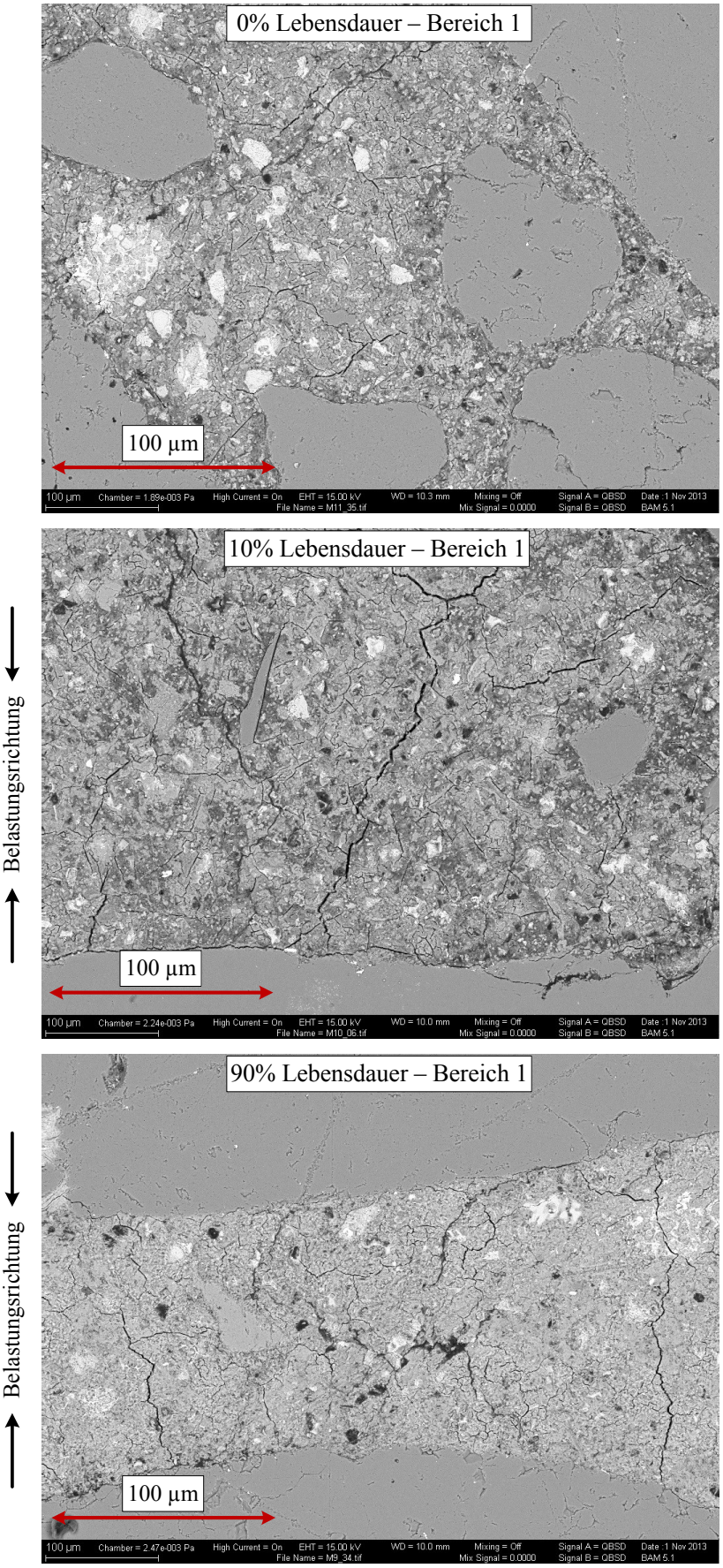

Abbildung B1 27: *REM-Aufnahmen aus einem erwarteten Spannungskonzentrationsbereich aus den drei untersuchten Lebensdauerzuständen bei mittlerer Vergrößerung*

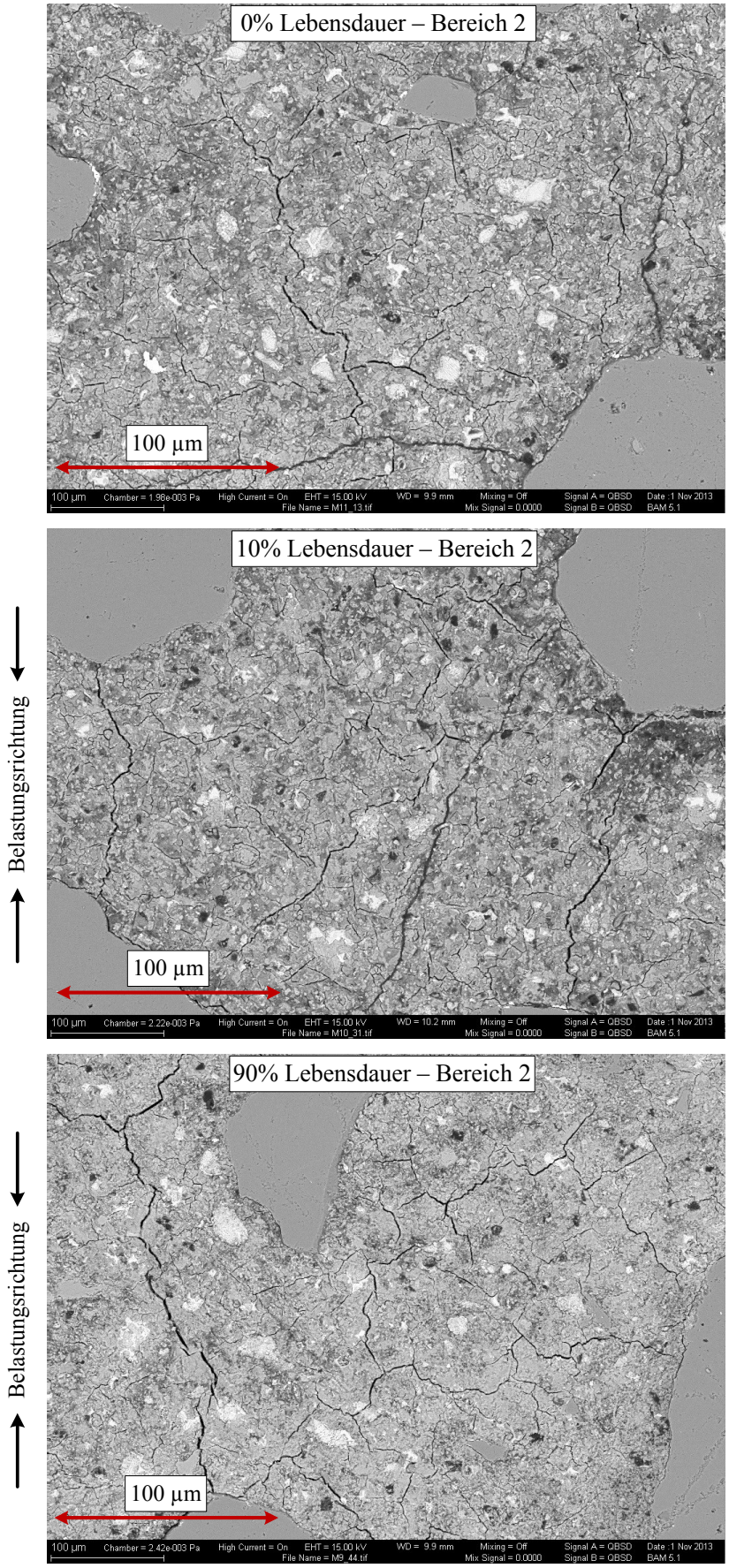

Abbildung B1 28: *REM-Aufnahmen aus einem erwarteten Bereich mit geringen Spannungen aus den drei untersuchten Lebensdauerzuständen bei mittlerer Vergrößerung*

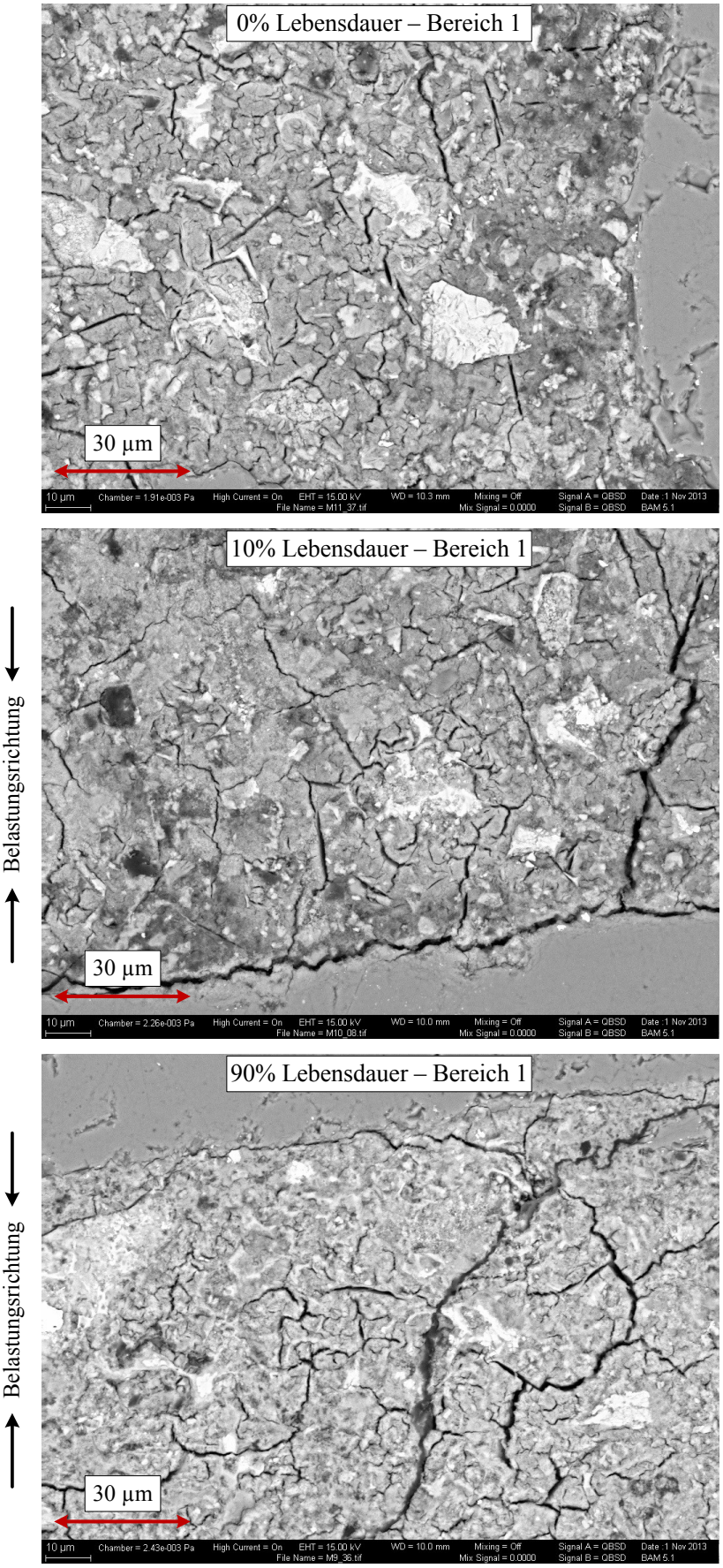

Abbildung B1 29: *REM-Aufnahmen aus einem erwarteten Spannungskonzentrationsbereich aus den drei untersuchten Lebensdauerzuständen bei hoher Vergrößerung*

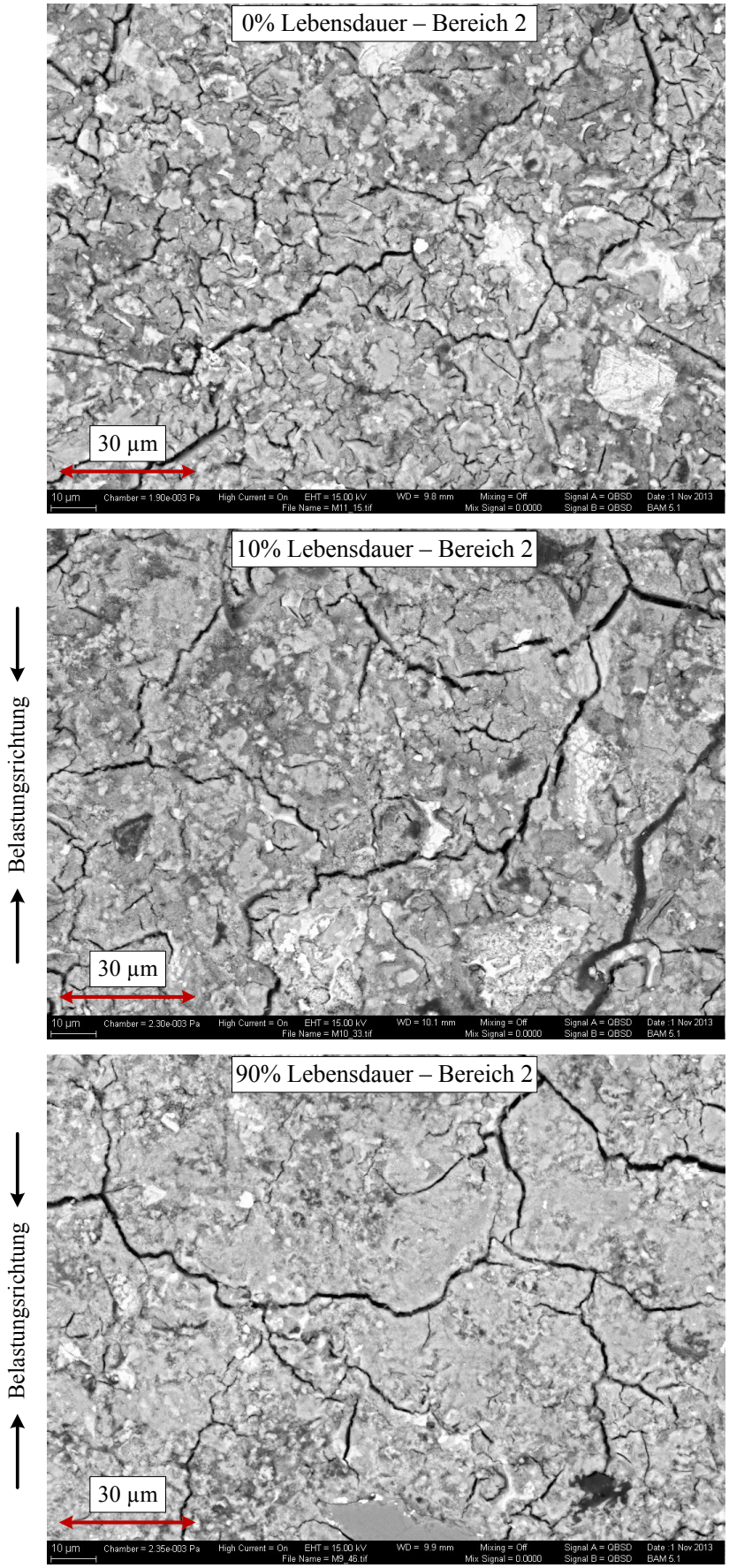

Abbildung B1 30: *REM-Aufnahmen aus einem erwarteten Bereich mit geringen Spannungen aus den drei untersuchten Lebensdauerzuständen bei hoher Vergrößerung*

B2 – Kriechversuche

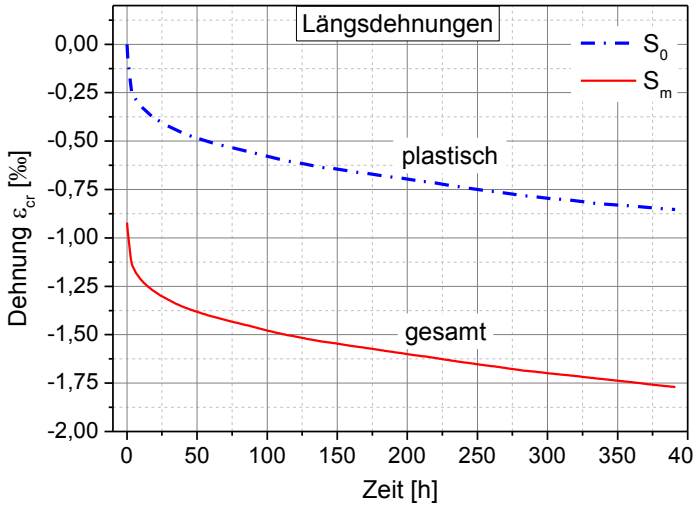

Abbildung B2 1: *Gemittelte Verläufe der bleibenden Dehnungen im entlasteten Zustand unter S_0 und der Gesamtdehnung unter der Kriechlast S_m*

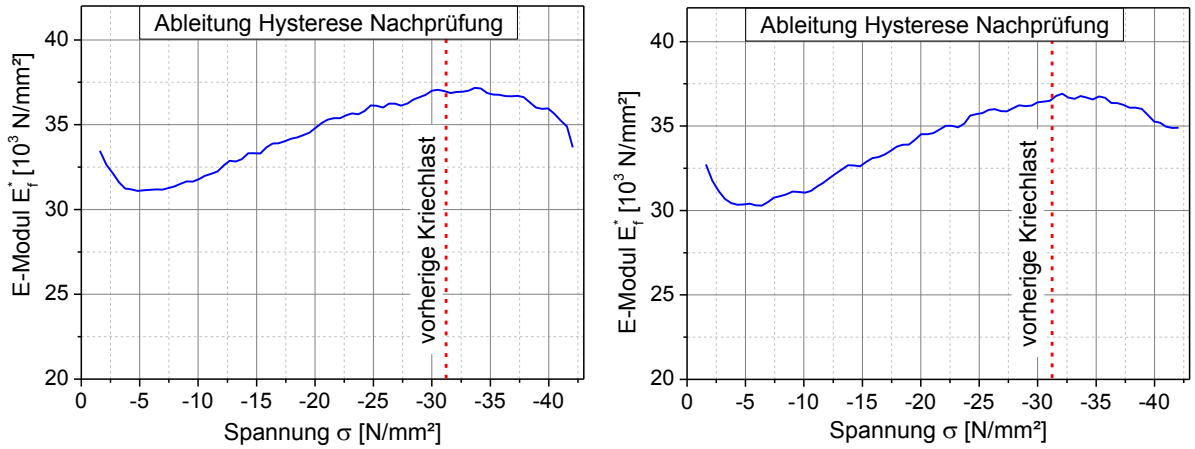

Abbildung B2 2: *1. Ableitung der Belastungskurven von den in der Nachprüfung ermittelten Hysteresen der Kriechproben für die Probe KV-S2-P1 (links) und Probe KV-S2-P2 (rechts)*

B3 – Versuche im unteren hochzyklischen Bereich (LHC)

Tabelle B3 1: *Übersicht zu den einzelnen Versuchen der Serie S1A aus der LHC-Versuchsreihe*

Probe	***Lastzyklen N_f[-]***	***Versuchs-dauer [Min.]***	***Messungen***
Serie LHC-S1A: Durchgängig bis 100% N_f			
P1	6.152	48	ε, E, US horiz.
P2	2.180	19	ε, E, US horiz.
P3	21.622	152	ε, E, US horiz., Aramis
P4	3.854	30	ε, E, US horiz., Aramis
P5	3.731	33	ε, E, US horiz.
P6	6.974	73	ε, E, SEA
P7	17.901	180	ε, E, SEA
P8	4.390	47	ε, E, SEA
P9	11.641	119	ε, E, SEA
P10	15.828	159	ε, E, SEA
P11	37.418	372	ε, E, SEA
P12	6.896	71	ε, E, SEA
P13	14.856	150	ε, E, SEA
P14	22.401	229	ε, E, SEA
P15	22.268	227	ε, E, SEA
P16	3.572	37	ε, E, SEA
P17	12.445	128	ε, E

Tabelle B3 2: *Übersicht zu den einzelnen Versuchen der Serien S1B bis S2 aus der LHC-Versuchsreihe*

Probe	***Lastzyklen N_f[-]***	***Versuchs-dauer [Min.]***	***Messungen***
Serie LHC-S1B: Bis 100% N_f mit kurzer Pause			
P1	37.737	383	ε, E
P2	5.313	62	ε, E, SEA.
P3	1.564	20	ε, E, SEA
P4	20.926	218	ε, E, SEA
P5	25.548	262	ε, E, SEA
P6	10.245	107	ε, E, SEA
P7	34.051	348	ε, E, SEA
P8	72.476	735	ε, E, US hor., SEA
P9	19.248	202	ε, E, US hor., SEA
P10	23.136	237	ε, E, US hor., SEA
P11	31.145	317	ε, E, US hor., SEA
Serie LHC-S2: Teilschädigung bis N_i ohne Versagen			
P1	6.454	69	ε, E, SEA
P2	5.165	57	ε, E, SEA
P3	1.459	15	ε, E
P4	2.842	32	ε, E

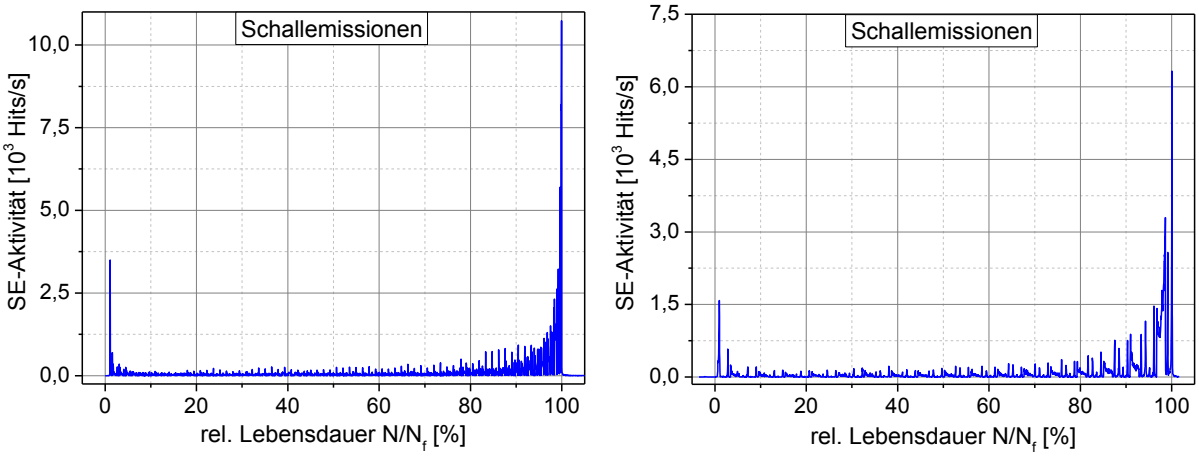

Abbildung B3 1: *Zwei weitere beispielhafte Entwicklungen der Schallemissionsaktivität von zwei Ermüdungsversuchen der Serie LHC-S1A mit N_f = 6.974 bzw. 11.641 Zyklen*

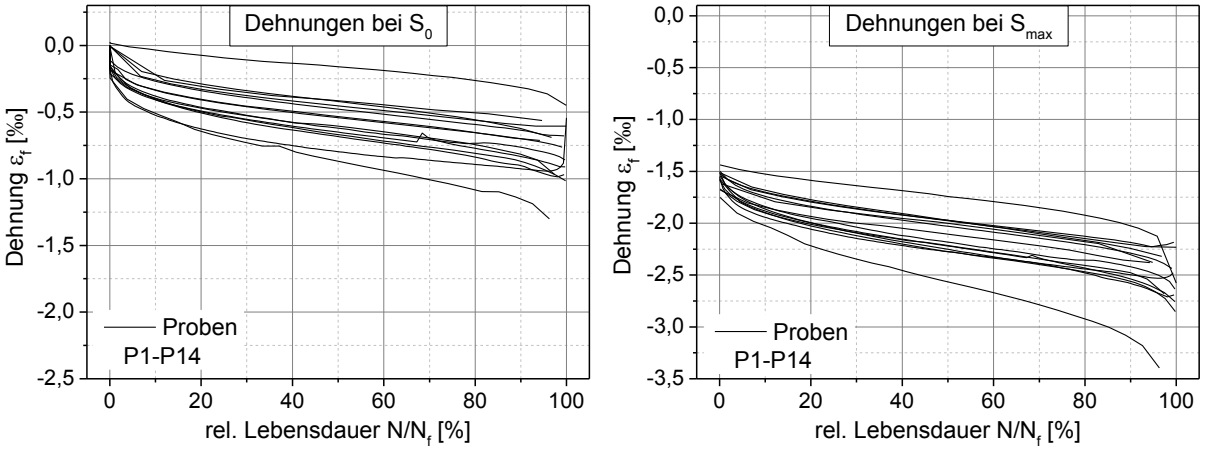

Abbildung B3 2: *Dehnungsverläufe der einzelnen Proben der Versuchsserie LHC-S1A bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

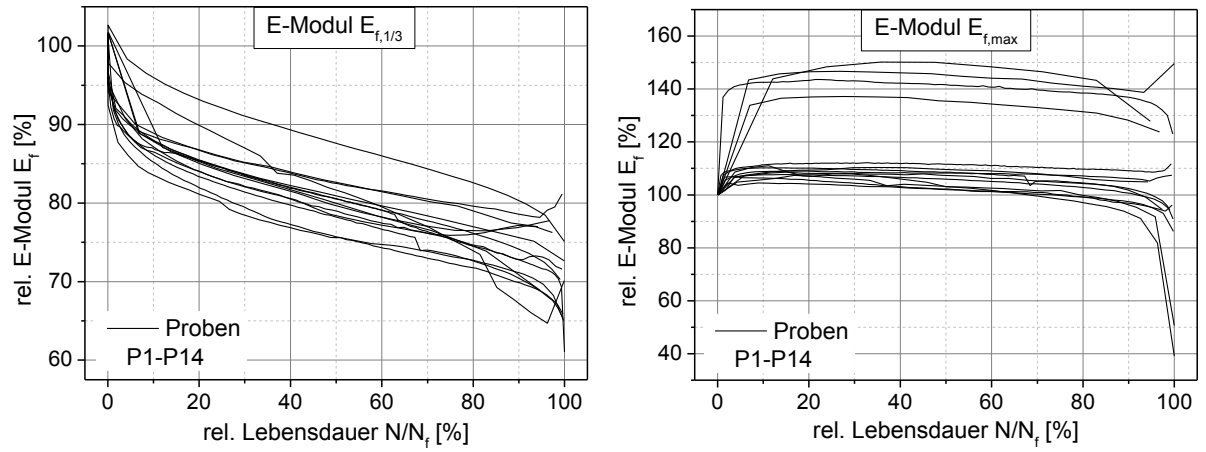

Abbildung B3 3: *E-Modul-Verläufe der einzelnen Proben der Versuchsserie LHC-S1A im untersten Beanspruchungsbereich (links) und im obersten Beanspruchungsbereich (rechts)*

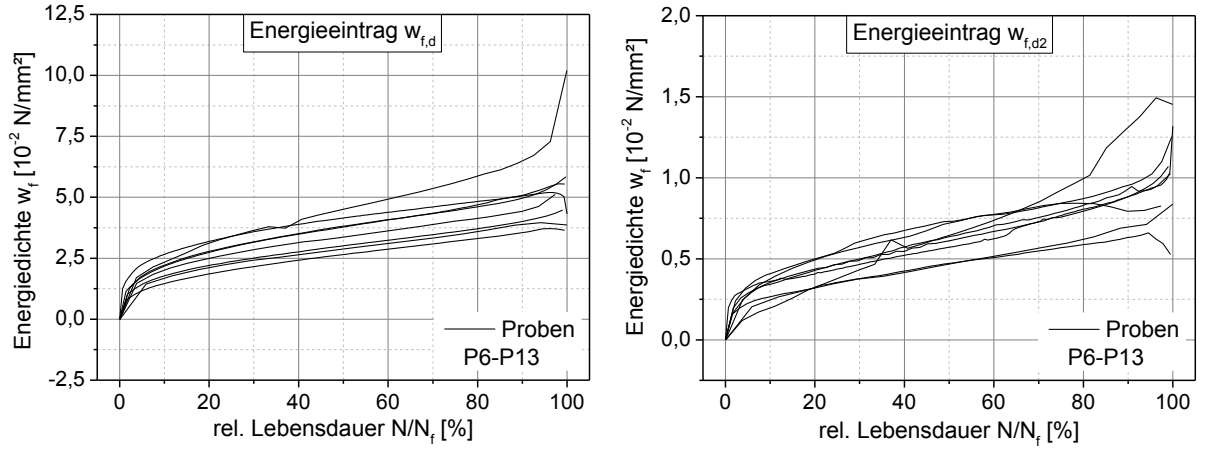

Abbildung B3 4: *Entwicklungen der Energieeinträge der einzelnen Proben der Versuchsserie LHC-S1A für den Gesamteintrag $w_{f,d}$ (links) und für die Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Beziehung $w_{f,d2}$ (rechts)*

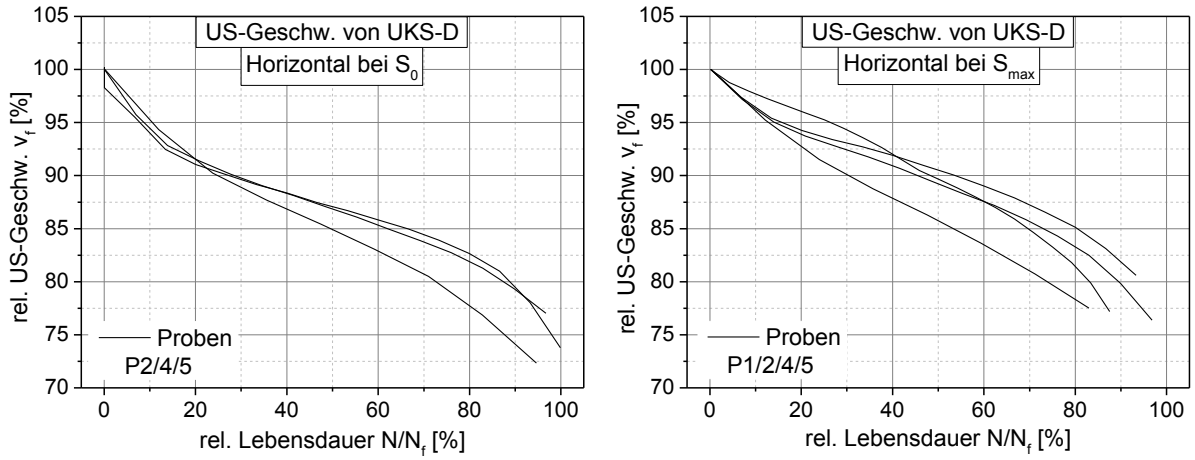

Abbildung B3 5: *Verläufe der horizontal gemessenen US-Geschwindigkeiten der einzelnen Proben der Versuchsserie LHC-S1A bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

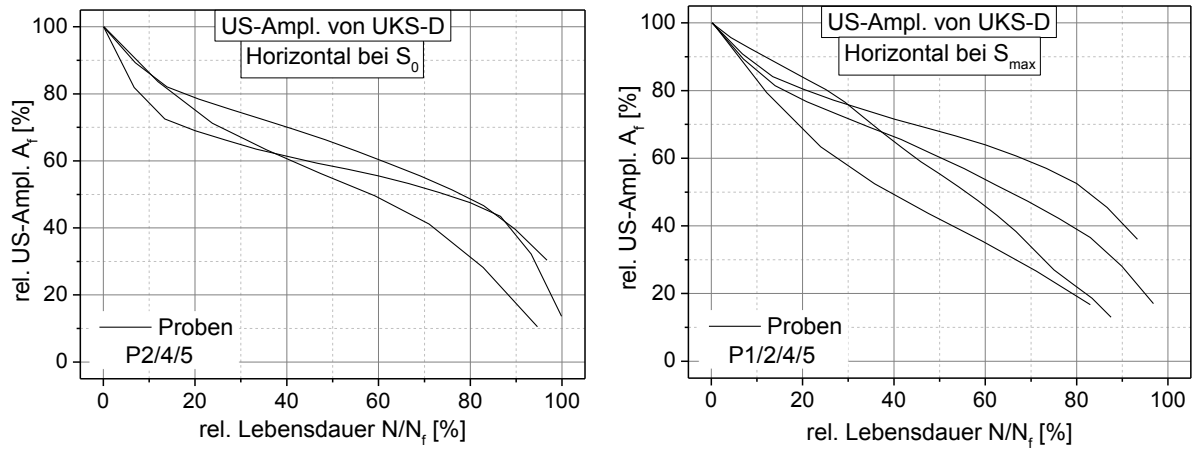

Abbildung B3 6: *Verläufe der horizontal gemessenen US-Amplituden der einzelnen Proben der Versuchsserie LHC-S1A bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

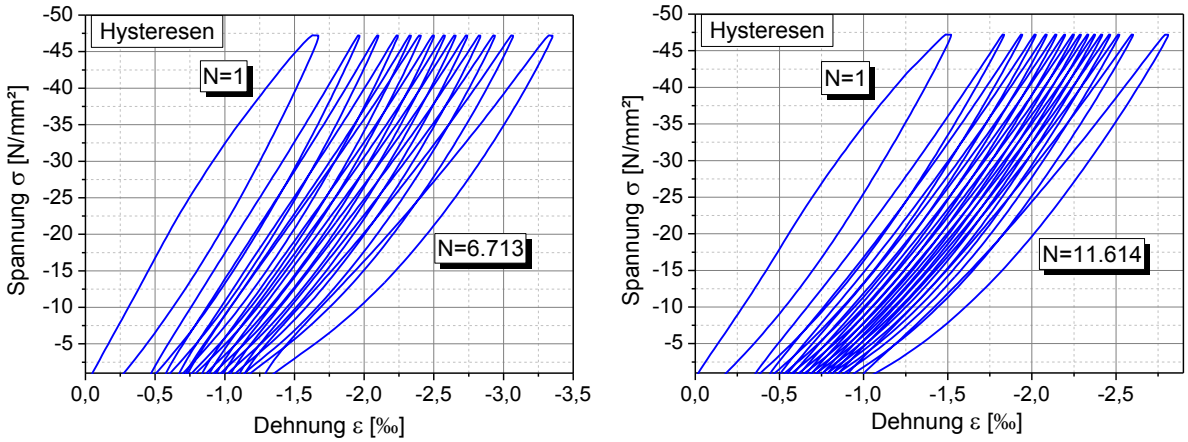

Abbildung B3 7: *Zwei zusätzliche beispielhafte Entwicklungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den Hysteresen von zwei Ermüdungsversuchen der Serie LHC-S1A*

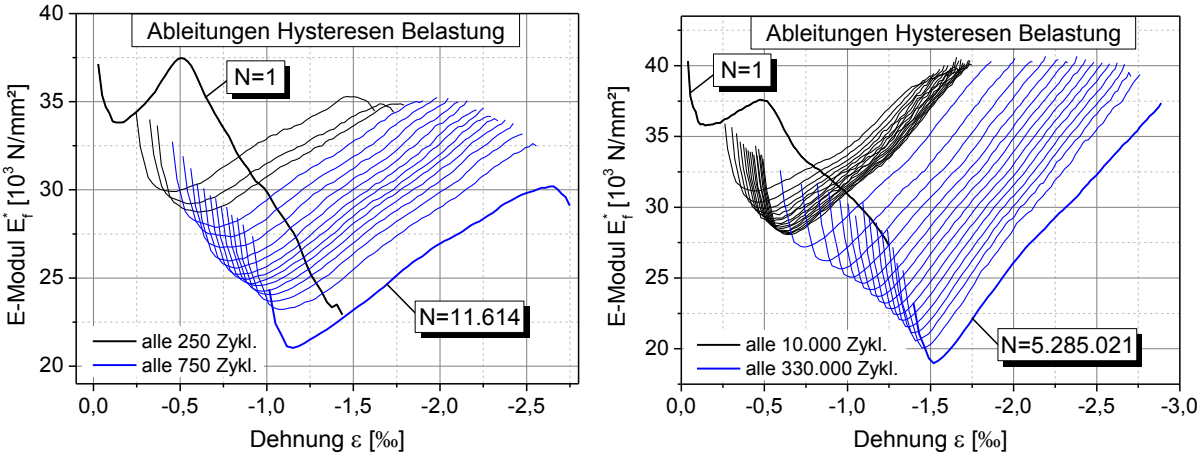

Abbildung B3 8: *Vergleich der 1. Ableitung der Belastungskurven aus den Hysteresen von einem LHC-Versuch (links) mit einem UHC-Versuch (rechts)*

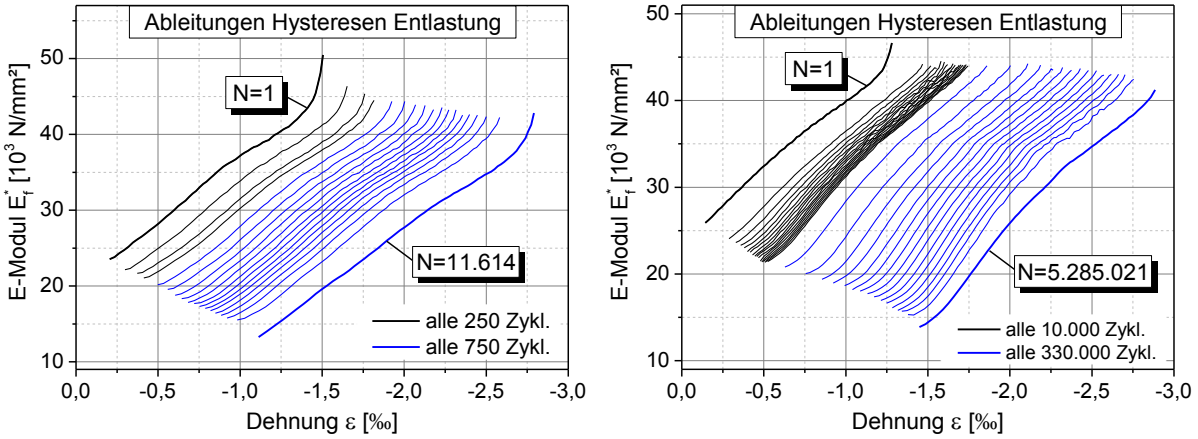

Abbildung B3 9: *Vergleich der 1. Ableitung der Entlastungskurven aus den Hysteresen von einem LHC-Versuch (links) mit einem UHC-Versuch (rechts)*

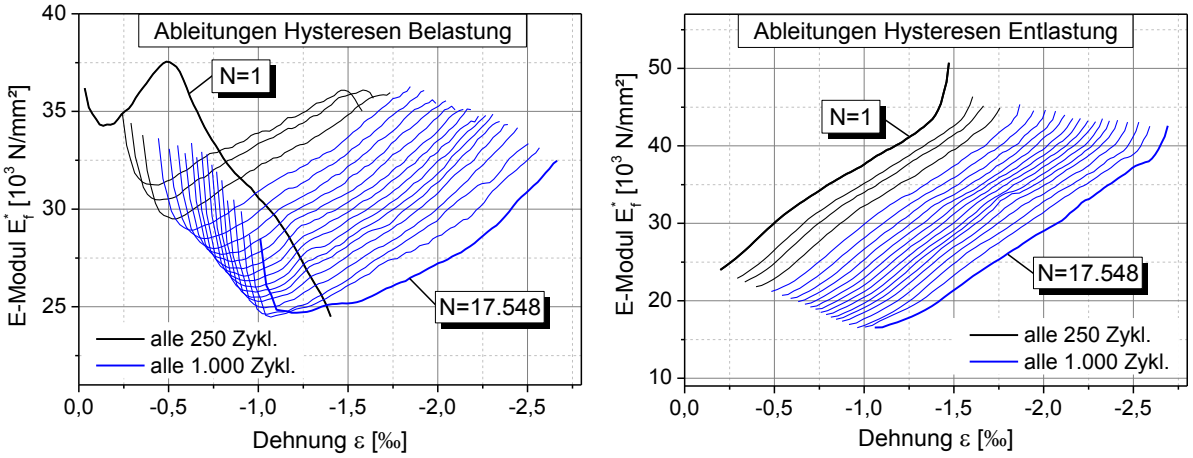

Abbildung B3 10: *Weitere beispielhafte Ableitungen aus den Hysteresen von Belastungskurven (links) und von Entlastungskurven (rechts), von einem LHC-Versuch, dargestellt über die Dehnung*

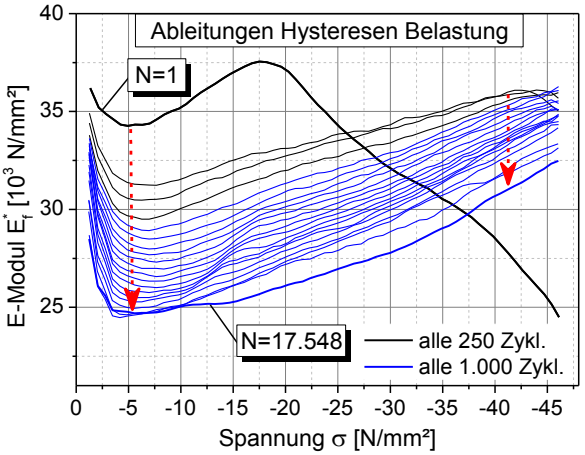

Abbildung B3 11: *Weitere beispielhafte Ableitungen von Belastungskurven aus den Hysteresen von einem LHC-Versuch, dargestellt über die Spannung*

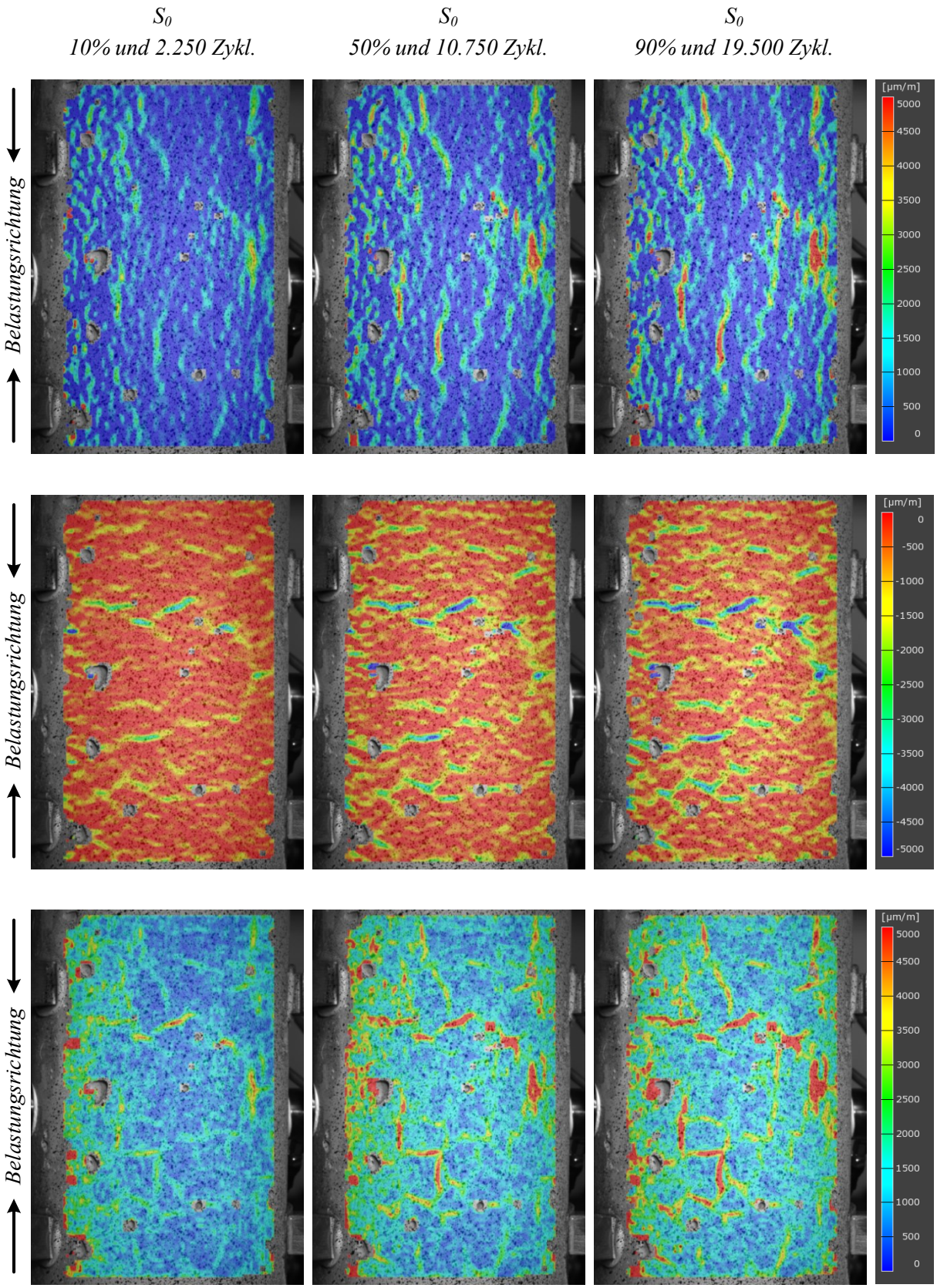

Abbildung B3 12: *Verteilung der Oberflächenverformungen für einen LHC-Versuch unter der Grundlast S_0 zu drei verschiedenen Lebensdauerzeitpunkten, für die Horizontaldehnungen (oben), für die Vertikaldehnungen (Mitte) und für die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises (unten). Die Ermüdungslastspielzahl betrug 21.622 Zyklen.*

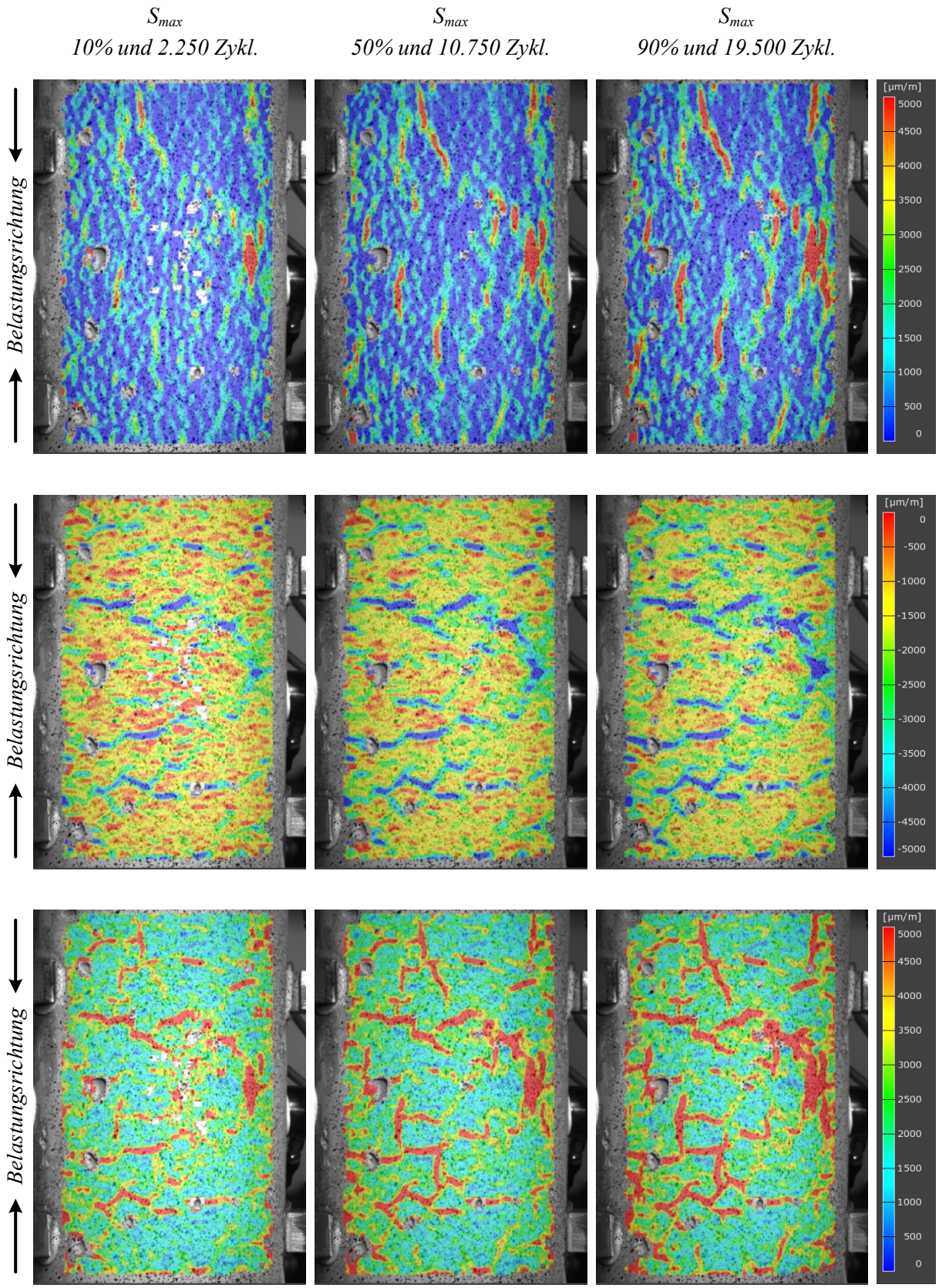

Abbildung B3 13: *Verteilung der Oberflächenverformungen für einen LHC-Versuch unter der Oberlast S_{max} zu drei verschiedenen Lebensdauerzeitpunkten, für die Horizontaldehnungen (oben), für die Vertikaldehnungen (Mitte) und für die resultierenden Vergleichsdehnungen nach von Mises (unten). Die Ermüdungslastspielzahl betrug 21.622 Zyklen.*

B4 – Statische Versuche

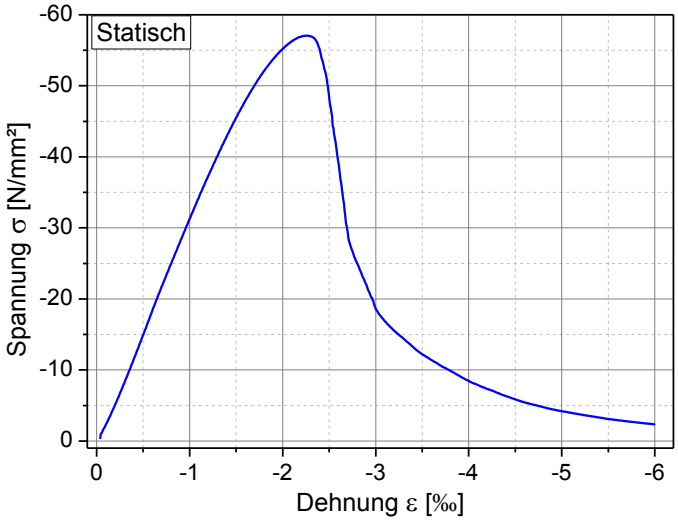

Abbildung B4 1: *Gemittelte vollständige Arbeitslinie aus der statischen Versuchsreihe von weggeregelten Bruchversuchen*

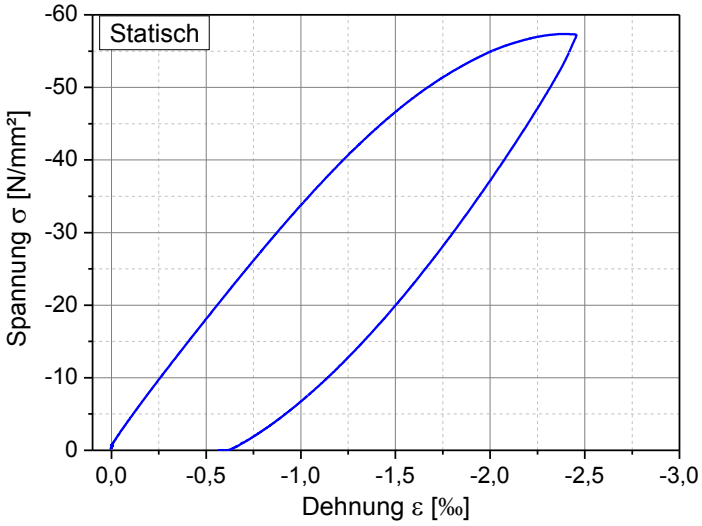

Abbildung B4 2: *Gemessene Spannungs-Dehnungs-Beziehung für eine weggeregelt bis zur Bruchlast gefahrene und direkt wieder entlastete Probe zur Bestimmung reversibler und irreversibler Anteile*

Tabelle B4 1: *Werte für die verschiedenen aus den statischen Versuchen ermittelten Energieeinträge*

Energie-größe	$w_{s,tot}$	$w_{s,1.0}$ ***(bei*** $\sigma_{s,max}$***)***	$w_{s,0.825}$ ***(für LHC)***	$w_{s,0.75}$ ***(für UHC)***	$w_{s,d}$ ***(bei*** $\sigma_{s,max}$***)***
Energiedichte [N/mm²]	0,1243	0,0744	0,0883	0,0905	0,045

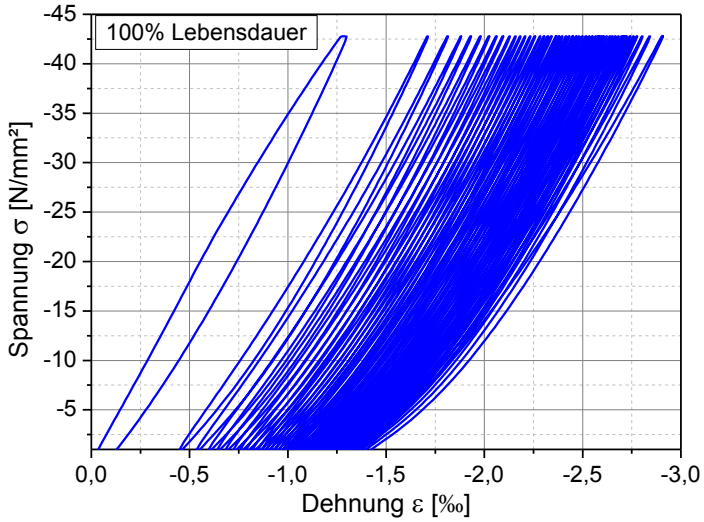

Abbildung B4 3: *Hysteresekurven für eine zyklisch bis zum Versagen gefahrene Probe der UHC-Versuchsreihe, aus denen die eingetragenen Energieanteile bestimmt werden (N_f = 5.297.408)*

Tabelle B4 2: *Werte für die verschiedenen Energieeinträge aus den zyklisch bis zum Versagen gefahrenen Versuchen der LHC und UHC-Versuchsreihe*

Versuchs-reihe	***$w_{f,d2}$ [N/mm²]***	***$w_{f,d}$ [N/mm²]***	***$w_{f,tot}$ [N/mm²]***
Lower HC (für 100% N_f)	0,0105	0,0544	0,0934
Upper HC (für 100% N_f)	0,0107	0,0743	0,103

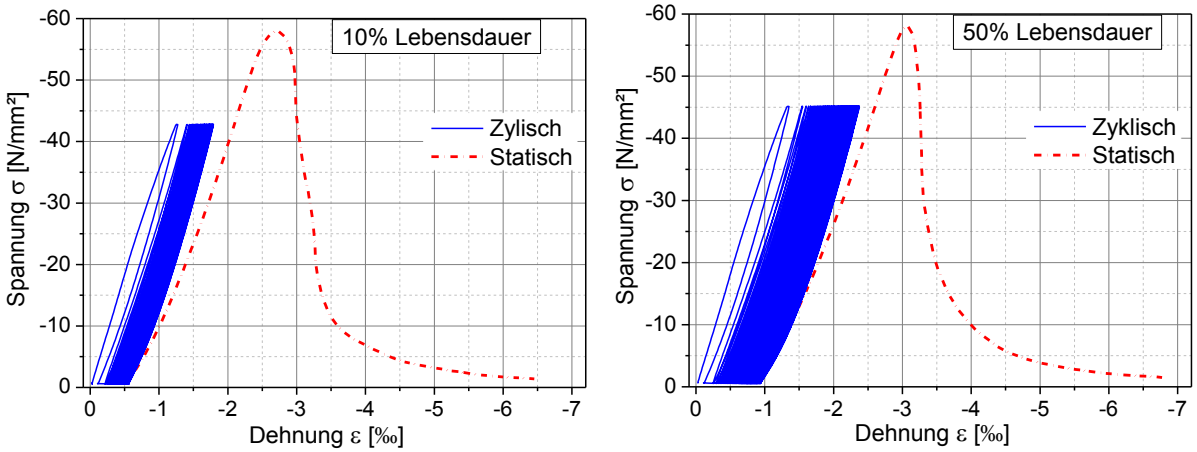

Abbildung B4 4: *Hysteresekurven und statische Bruchkurven für zyklisch vorgeschädigte Proben der UHC-Versuchsreihe mit anschließender weggeregelter statischer Nachprüfung, mit zyklischer Vorschädigung bis 10 % der Lebensdauer (links) und mit zyklischer Vorschädigung bis 50 % der Lebensdauer (rechts)*

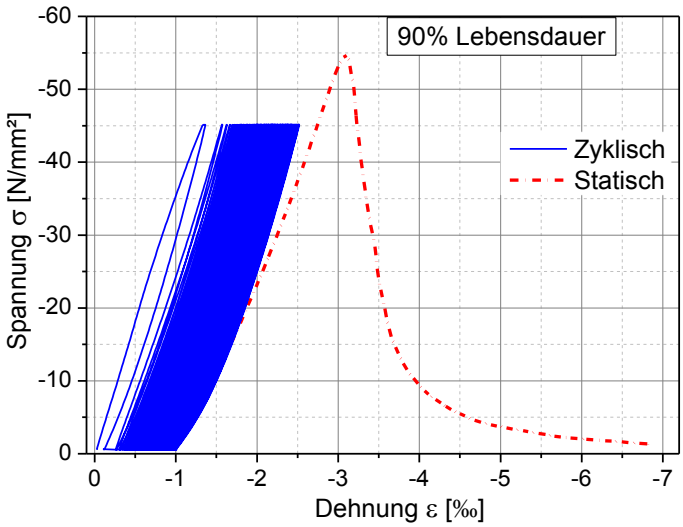

Abbildung B4 5: *Hysteresekurve und statische Bruchkurve für eine zyklisch vorgeschädigte Probe der UHC-Versuchsreihe mit anschließender weggeregelter statischer Nachprüfung, mit einer zyklischen Vorschädigung bis 90 % der Lebensdauer*

Tabelle B4 3: *Werte für die verschiedenen Energieeinträge aus den zyklisch vorgeschädigten und statisch nachgeprüften Proben der UHC-Versuchsreihe*

Versuchs-reihe	***zykl. $w_{f,d}$ [N/mm²]***	***stat. $w_{s,tot}$ [N/mm²]***	***ges. $w_{fs,tot}$ [N/mm²]***
10%	0,024	0,1061	0,1301
50%	0,0479	0,089	0,1368
90%	0,0505	0,0909	0,1414

B5 – Versuche an Großproben

Tabelle B5 1: *Vergleich der einzelnen erreichten Druckfestigkeiten von den Großproben mit den Werten der zugehörigen Kleinproben aus den statischen Druckversuchen*

Probe	***Kraft [kN]***	***Spannung [N/mm²]***	***Proben***	***Kraft [kN]***	***Spannung [N/mm²]***
Ø 400 mm			Ø 100 mm		
P1	7.094	56,5	P1 – P3	454,6	59,6
P2	6.356	50,6	P4 – P6	452,6	59,3
P3	7.437	59,2	P7 – P9	467,8	61,3
Mittelwert	6.962	55,4	Mittelwert	458,4	60,1

Tabelle B5 2: *Übersicht zu den beiden zyklischen Versuchen der Serie GZV-S1 mit den Großproben*

Probe	***Lastzyklen N_f [-]***	***Versuchs-dauer [h]***	***Messungen***
Serie GZV-S1: Durchgängig bis 100% N_f			
P1	5.455	1:58	ε, E, US hor., SEA
P2	39.670	13:50	ε, E, US hor., SEA, Aramis

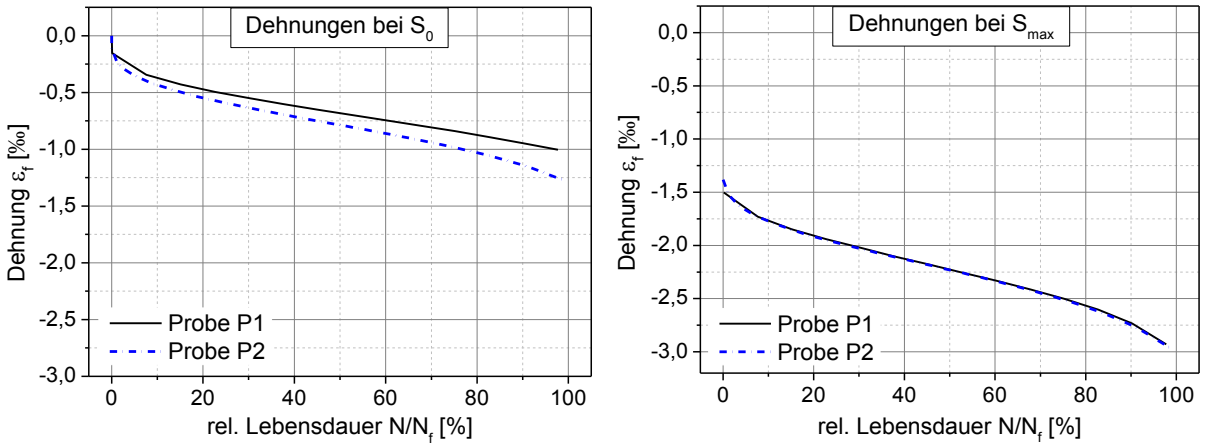

Abbildung B5 1: *Dehnungsverläufe der beiden Großproben der Versuchsserie GZV-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

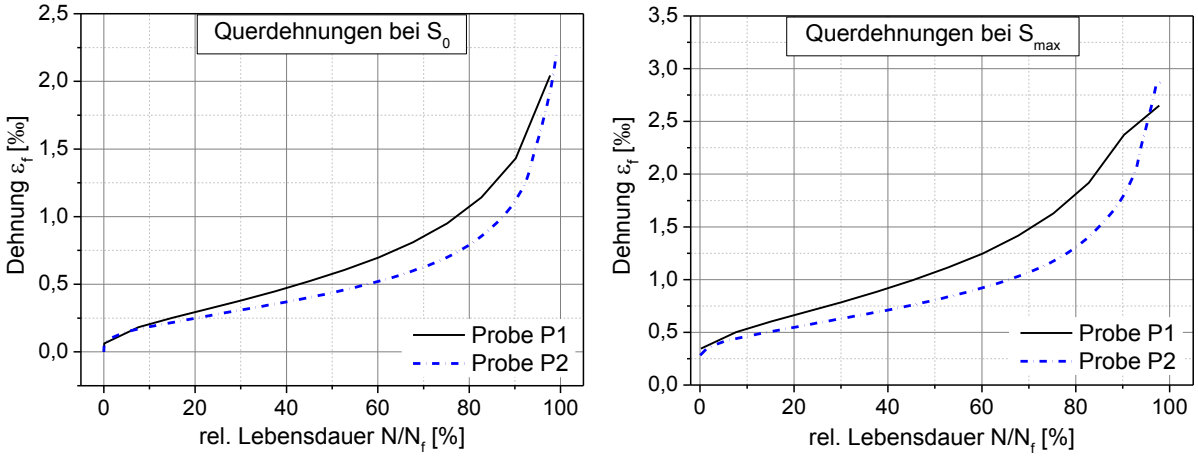

Abbildung B5 2: *Querdehnungsverläufe der beiden Großproben der Versuchsserie GZV-S1 bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

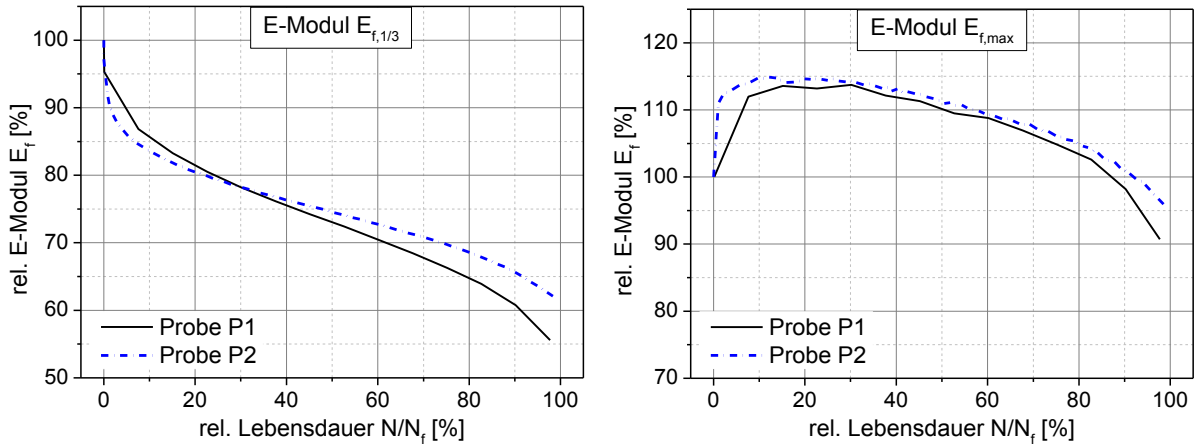

Abbildung B5 3: *E-Modul-Verläufe der beiden Großproben der Versuchsserie GZV-S1 im untersten Beanspruchungsbereich (links) und im obersten Beanspruchungsbereich (rechts)*

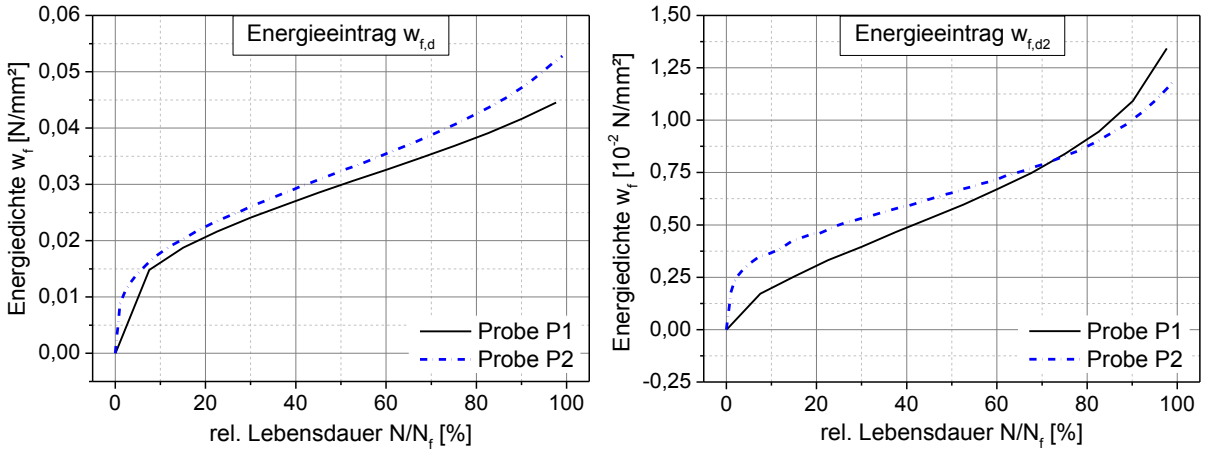

Abbildung B5 4: *Entwicklungen der Energieeinträge bei den beiden Großproben der Versuchsserie GZV-S1 für den Gesamteintrag $w_{f,d}$ (links) und für die Änderung der Form der Spannungs-Dehnungs-Beziehung $w_{f,d2}$ (rechts)*

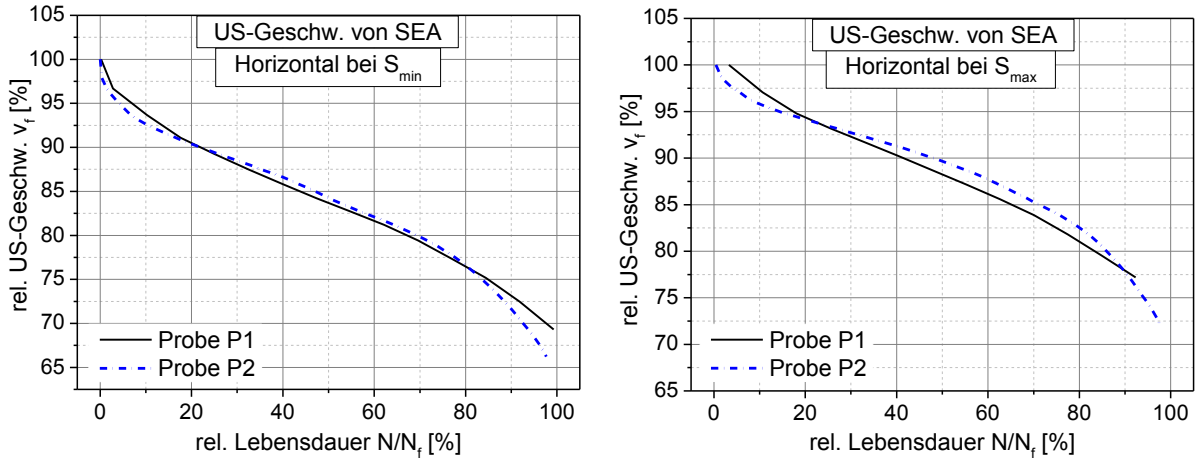

Abbildung B5 5: *Verläufe der horizontal gemessenen US-Geschwindigkeiten bei den beiden Großproben der Versuchsserie GZV-S1, bei der Grundlast S_0 (links) und bei der Oberlast S_{max} (rechts)*

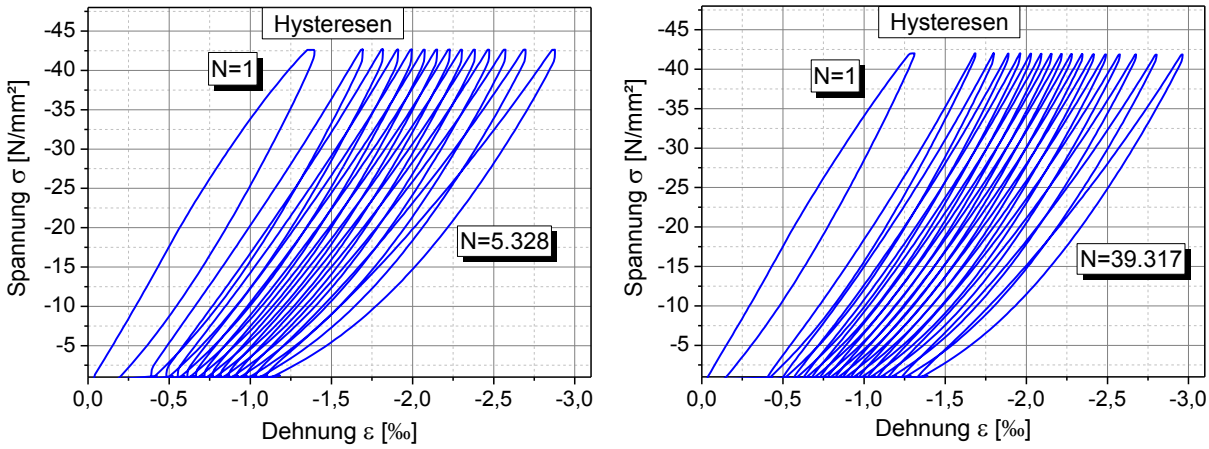

Abbildung B5 6: *Entwicklungen der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den Hysteresen der beiden Großproben der Serie GZV-S1, für die Probe P1 (links) und für die Probe P2 (rechts)*

Anhang C – Empirische Ansätze

C1 – Evolutionskurven für den oberen hochzyklischen Bereich (UHC)

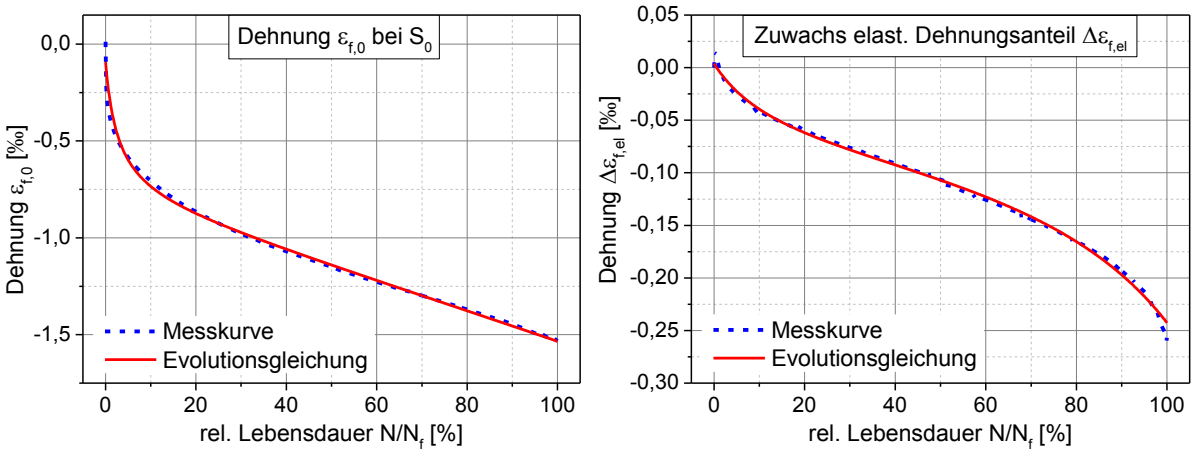

Abbildung C1 1: *Darstellung der abgeleiteten Funktionsgleichungen im Vergleich mit den jeweiligen Messkurven aus den UHC-Versuchen, für die bleibende Längsdehnung (links) sowie für den Zuwachs des elastischen Dehnungsanteils (rechts)*

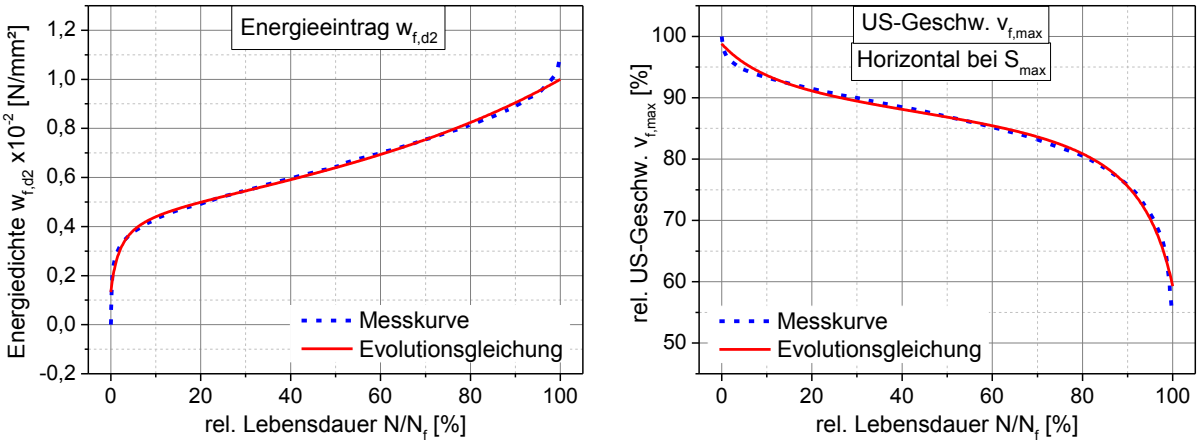

Abbildung C1 2: *Darstellung der abgeleiteten Funktionsgleichungen im Vergleich mit den jeweiligen Messkurven aus den UHC-Versuchen, für den Energieeintrag $w_{f,d2}$ (links) sowie für die Entwicklung der horizontalen US-Geschwindigkeit unter Oberlast S_{max} (rechts)*

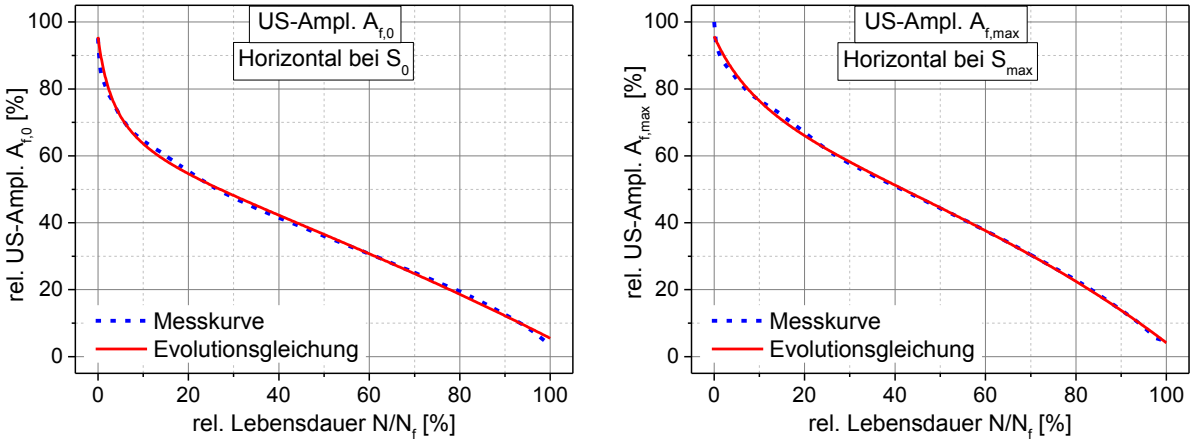

Abbildung C1 3: *Darstellung der abgeleiteten Funktionsgleichungen im Vergleich mit den jeweiligen Messkurven aus den UHC-Versuchen, für die Entwicklungen der US-Amplituden unter der Grundlast S_0 (links) sowie unter der Oberlast S_{max} (rechts)*