

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Bauingenieurwesen

**Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von
Asphaltgemischen unter Verwendung von ein- und
mehraxialen Zugschwellversuchen**

Characterization of the fatigue behaviour of asphalt mixes using
uni- and multiaxial tension tests

Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Christiane Weise

geb. am 21. September 1979 in Radebeul

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab

Univ. Prof. a.D. Dr.-Ing. Rolf Leutner

Tag der Verteidigung: 14. November 2008

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einführung	3
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
1.2 Vorgehensweise	4
2 Ermüdungsverhalten von Asphalt	5
2.1 Grundlagen	5
2.1.1 Stoffeigenschaften von Asphalt	5
2.1.2 Ermüdung von Asphalt	8
2.2 Verhalten einer Asphaltbefestigung	11
2.2.1 Beanspruchungszustand in einer Asphaltbefestigung	11
2.2.2 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Beanspruchungs- zuständen einer Straßenbefestigung	16
2.2.3 Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten	17
2.3 Nachbildung des Verhaltens im Labor	18
2.4 Einfluss der Ermüdung auf die rechnerische Dimensionierung	19
2.4.1 Einleitung	19
2.4.2 Ermüdungsfunktionen	19
2.4.3 Hypothese von Miner	21
3 Laborprüfverfahren	23
3.1 Übersicht	23
3.2 Einaxialer Zugschwellversuch	24
3.2.1 Einleitung	24
3.2.2 Beanspruchungszustand im Probekörper	24
3.2.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter	25
3.2.4 Probekörperabmessungen	26
3.2.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung	26
3.2.6 Versuchsdurchführung	27
3.3 Spaltzugschwellversuch	28
3.3.1 Einleitung	28
3.3.2 Beanspruchungszustand im Probekörper	28
3.3.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter	31

3.3.4	Probekörperabmessungen	34
3.3.5	Probekörperherstellung und -vorbereitung	34
3.3.6	Versuchsdurchführung	35
3.4	Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung	36
3.4.1	Einleitung	36
3.4.2	Beanspruchungszustand im Probekörper	36
3.4.3	Versuchseinrichtung und Prüfparameter	37
3.4.4	Probekörperabmessungen	39
3.4.5	Probekörperherstellung und -vorbereitung	39
3.4.6	Versuchsdurchführung	40
3.5	2-Punkt-Biegeversuch	41
3.5.1	Einleitung	41
3.5.2	Beanspruchungszustand im Probekörper	41
3.5.3	Versuchseinrichtung und Prüfparameter	42
3.5.4	Probekörperabmessungen	42
3.5.5	Probekörperherstellung und -vorbereitung	43
3.5.6	Versuchsdurchführung	43
3.6	4-Punkt-Biegeversuch	44
3.6.1	Einleitung	44
3.6.2	Beanspruchungszustand im Probekörper	44
3.6.3	Versuchseinrichtung und Prüfparameter	45
3.6.4	Probekörperabmessungen	45
3.6.5	Probekörperherstellung und -vorbereitung	46
3.6.6	Versuchsdurchführung	46
3.7	Diskussion der Prüfverfahren	47
4	Analyse der Ermüdung im Laborversuch	49
4.1	Kriterien zur Durchführung von Ermüdungsversuchen	49
4.2	Auswertung	51
4.2.1	Einleitung	51
4.2.2	Bruch des Probekörpers	52
4.2.3	Abfall der Steifigkeit auf 50% des Anfangswertes	53
4.2.4	Wendepunkt der plastischen Verformungskurve	54
4.2.5	Lastwechselzahl bis zum Mikro- bzw. Makroriss basierend auf dem Konzept der dissipierten Energie	55
4.2.6	Diskussion und Auswahl des Verfahrens	57
4.3	Darstellung der Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen	58
4.3.1	Einleitung	58
4.3.2	Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen	60
4.3.3	Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen	60
4.3.4	Diskussion und Auswahl des Ermüdungsfunktionstyps	62
4.4	Ermittlung der elastischen Verformungen	64
4.4.1	Einleitung	64

4.4.2	Parameterermittlung anhand der Minima und Maxima	64
4.4.3	Parameterermittlung mit Hilfe einer Sinusregression	64
4.4.4	Diskussion der Verfahren	65
5	Laborversuche	69
5.1	Untersuchte Asphaltgemische	69
5.2	Übersicht über die ausgeführten Versuche	71
6	Spaltzugschwellversuche	73
6.1	Probekörperherstellung und -vorbereitung	73
6.2	Ergebnisse der Versuche	74
6.2.1	E-Modul	74
6.2.2	Einflussfaktoren auf die Parameter der Ermüdungsfunktion	78
7	Triaxialversuche	87
7.1	Voruntersuchungen zur Probekörperherstellung	87
7.2	Probekörperherstellung	90
7.3	Ergebnisse der Triaxialversuche	92
7.3.1	Wiederholbarkeit der Triaxialversuche	92
7.3.2	E-Modul	93
7.3.3	Einflussfaktoren auf die Parameter der Ermüdungsfunktion	96
7.3.4	Zusätzliche Anmerkungen zum Ermüdungskriterium Makroriss	98
8	Beschreibung des Zusammenhanges	103
8.1	Vergleich der E-Moduln	103
8.2	Vergleich der Ermüdungsfunktionen	105
8.3	Aufstellung dreidimensionaler Ermüdungsflächenfunktionen	109
8.3.1	Aufspaltung der gemessenen Dehnung	109
8.3.2	Dehnungsabhängige Ermüdungsflächenfunktionen	111
8.3.3	Überlegungen zur Verbesserung des gewählten Ansatzes	115
8.4	Spannungsabhängige Ermüdungsflächenfunktionen	117
8.5	Auswirkungen auf die Dimensionierung	121
9	Ausblick	127
10	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	131
	Abbildungsverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	141

A Asphaltuntersuchungen	143
A.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro	144
A.2 SMA 0/11S PmB 45A Moräne	145
A.3 AB 0/11S 50/70 Moräne	146
A.4 OPA 0/8 PmB 45H Moräne	147
A.5 ABi 0/16S PmB 45A Moräne	148
A.6 ATS 0/32CS 50/70 Muschelkalk	149
B Versuchsergebnisse	151
B.1 Ergebnisse der Triaxialversuche	152
B.1.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro	152
B.1.2 SMA 0/11S PmB 45A Moräne	153
B.1.3 ABi 0/16S PmB 45A	154
B.1.4 ATS 0/32CS 50/70	155
B.2 Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche	156
B.2.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 10 Hz	156
B.2.2 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 5 Hz	157
B.2.3 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 3 Hz	158
B.2.4 SMA 0/11S PmB 45A Moräne	159
B.2.5 AB 0/11S 50/70, 10 Hz	160
B.2.6 AB 0/11S 50/70, 5 Hz	161
B.2.7 OPA 0/8 PmB 45H	162
B.2.8 ABi 0/16S PmB 45A, 10 Hz	163
B.2.9 ABi 0/16S PmB 45A, 5 Hz	164
B.2.10 ATS 0/32CS 50/70, 10 Hz	165
B.2.11 ATS 0/32CS 50/70 Zusatzversuche, 10 Hz	166
B.2.12 ATS 0/32CS 50/70, 5 Hz	167
C Vergleich der Ermüdungsfunktionen	169
C.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro - 10 Hz	170
C.2 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro - 5 Hz	171
C.3 SMA 0/11S PmB 45A Moräne - 10 Hz	172
C.4 ABi 0/16S PmB 45A - 10 Hz	173
C.5 ATS 0/32CS 50/70 - 10 Hz	174
C.6 AB 0/11S 50/70 - 10 Hz	175
C.7 AB 0/11S 50/70 - 5 Hz	176
C.8 OPA 0/8 PmbH 45A - 10 Hz	177

Abkürzungsverzeichnis

A, \bar{A}		Materialparameter einer Ermüdungsfunktion
α	[°]	Winkel
α_T	[-]	Verschiebungsfaktor
AB		Asphaltbeton
ABi		Asphaltbinderschicht
ADS		Asphaltdeckschicht
ATS		Asphalttragschicht
B, \bar{B}		Materialparameter einer Ermüdungsfunktion
b	[mm]	Probekörperabmessung (Kantenlänge)
D	[mm]	Probekörperabmessung (Durchmesser)
D_{GK}	[mm]	Größtkordurchmesser des Asphaltgemisches
E^*	[N/mm ²]	Komplexer E-Modul
$ E $	[N/mm ²]	Absoluter E-Modul
$\varepsilon_{x,y,z}$	[‰]	Dehnung in Richtung der Hauptspannungen
f	[Hz]	Belastungsfrequenz
F	[kN]	Kraft
h	[mm]	Probekörperabmessung (Höhe)
H_{bit}	[Vol. - %]	Hohlraumgehalt
J, K		Materialparameter einer Ermüdungsflächenfunktion
l	[mm]	Probekörperabmessung (Länge)
MPK		Marshall-Probekörper
μ	[-]	Querdehnzahl
N	[-]	Lastwechselzahl
p	[N/mm ²]	Flächenlast
φ	[°]	Phasenwinkel
r	[mm]	Probekörperabmessung (Radius)
ρ_A	[g/cm ³]	Raumdicke
SMA		Splittmastixasphalt
$\sigma_{x,y,z}$	[N/mm ²]	Hauptspannungen
T	[°C]	Temperatur
u	[mm]	Verformung

Vorwort

Seit Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur für Straßenbau der Technischen Universität Dresden im August 2004 beschäftigt mich das Thema „Ermüdungsverhalten von Asphaltgemischen“.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens *Nachhaltiger Straßenbau - Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen* war es mir möglich, die vorliegende Arbeit anzufertigen. Mein erster Dank richtet sich daher an das BMBF für die Förderung des Forschungsvorhabens.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner danke ich für die Möglichkeit das Forschungsvorhaben mitzubearbeiten und für seine Unterstützung bei der Anfertigung dieser Promotionsschrift. Sein fachlicher Rat und die zahlreichen Diskussionen haben mir bei der Erstellung der Arbeit sehr geholfen.

Auch meinen Gutachtern Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab (Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien) und Herrn Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Rolf Leutner (Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig) gebührt mein herzlichster Dank.

Ein ganz besonderer Dank richtet sich an Herrn Konrad Mollenhauer und die Kolleginnen und Kollegen am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig, die als Forschungsnehmer ebenso am Verbundprojekt *Nachhaltiger Straßenbau* beteiligt waren. Durch die sehr enge Zusammenarbeit konnte ich die Ergebnisse der in Braunschweig durchgeführten Einaxialen Zug-schwellversuche für meine Untersuchungen verwenden.

Meinen Kolleginnen und Kollegen an der Professur für Straßenbau und im Straßenbaulabor der Technischen Universität Dresden möchte ich für die Unterstützung während der gesamten Projektlaufzeit und die intensiven Diskussionen danken, die mich stets voran gebracht haben.

Abschließend möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die mich während der gesamten Bearbeitungszeit in jeder Hinsicht unterstützt und mich in Zeiten mangelnder Motivation angetrieben haben - meiner gesamten Familie, allen voran meinen Eltern und ganz besonders meinem Lebensgefährten Henrik Schulz.

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung

In Europa sind ca. 80% der Straßenbefestigungen in Asphaltbauweise ausgeführt. Dieser Bauweise sollte somit hinsichtlich der Erhaltung und des Neubaus besondere Beachtung zuteil werden, da sich durch den optimalen Einsatz des Baustoffes Asphalt ein großes wirtschaftliches Potential ergibt.

Aufgrund des eingesetzten Bindemittels sind das Verhalten und die Materialeigenschaften von Asphalt sehr komplex. Zusätzlich sind Asphaltbefestigungen verschiedensten Beanspruchungen infolge Verkehrsbelastung und Temperatur ausgesetzt, die über die gesamte Lebensdauer berücksichtigt werden müssen. Substanz- und Gebrauchswert einer Asphaltbefestigung werden durch Risse und Spurrinnen gemindert. Preisintensive Baumaßnahmen zur Sanierung solcher Strecken können minimiert werden, wenn das Ermüdungsverhalten des Asphaltes in ausreichendem Maße bekannt ist und in individuelle Dimensionierungsrechnungen einfließen kann. Im Rahmen einer rechnerischen Dimensionierung können Risse, die auf mangelnder Berücksichtigung der Materialeigenschaften der Asphaltgemische basieren, verhindert werden. Weiterhin können neuartige Asphalte mit verbesserten Eigenschaften in geringerer Dicke oder preiswerte Materialien mit schlechteren Materialeigenschaften in größeren Schichtdicken eingebaut werden, was in beiden Fällen zu einer wirtschaftlichen Bauweise und einer Ressourcenschonung führt.

Für die Ermittlung der Ermüdungsfunktionen sind in der europäischen Normung verschiedene Versuchstypen vorgesehen. In Deutschland haben sich bisher der Einaxiale Zugschwellversuch und der Spaltzugschwellversuch etabliert. Diese vergleichsweise einfachen Versuche können das Verhalten *in situ* nur mit Einschränkungen wiedergeben. Der Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung kann zur realitätsnahen Untersuchung des Ermüdungsverhaltens (Ermüdungsfunktion in Verbindung mit der E-Modul-Funktion) angewandt werden, da neben der frei wählbaren Zugbeanspruchung zusätzlich beliebige Druckbeanspruchungen auf den Probekörper aufgegeben werden können. Aufgrund der aufwändigen Versuchsdurchführung findet der Versuch bisher nur in der Forschung Anwendung.

Die Beschreibung der Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten eines Asphaltes ist ein Ziel der Arbeit. Das Hauptziel der Arbeit ist der Vergleich der Ergebnisse verschiedener Ermüdungsversuche,

die Darstellung der Zusammenhänge und die Ermittlung der Auswirkungen auf die rechnerische Dimensionierung.

1.2 Vorgehensweise

Die Arbeit gliedert sich in drei Hauptteile. Nach einer theoretischen Einführung zum Ermüdungsverhalten von Asphalt folgt die ausführliche Darstellung der in Europa angewandten Ermüdungsversuche. Der Komplex wird durch die Ausführungen zur Auswertung von Ermüdungsversuchen abgeschlossen.

Daran anschließend werden die Ergebnisse der durchgeführten Spaltzugschwellversuche und der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung beschrieben. Dabei wird sowohl auf die Einflussgrößen des E-Moduls als auch auf die der Ermüdungsfunktionen eingegangen.

Die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Einaxialen Zugschwellversuchen, Spaltzugschwellversuchen und Triaxialversuchen mit Zug-/Druckschwellbelastung und die Darstellung der Auswirkungen auf die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen schließen die Arbeit ab.

Kapitel 2

Ermüdungsverhalten von Asphalt

2.1 Grundlagen

2.1.1 Stoffeigenschaften von Asphalt

Einleitung

Asphalt ist aufgrund seiner Zusammensetzung ein Mehrphasengemisch, wobei drei Phasen unterschieden werden - Luft, Bindemittel und Gestein. Die Phasen reagieren unter Beanspruchung sehr unterschiedlich. Infolge Belastung verhält sich ein Einzelkorn im Gegensatz zum Haufwerk vieler Körner verschieden. Das Einzelkorn reagiert elastisch, im Haufwerk können zusätzlich plastische Verformungen beobachtet werden. Bitumen hingegen reagiert temperaturabhängig viskos. Eine dauerhaft einwirkende Beanspruchung verursacht eine zeitabhängige Fließverformung. Werden diese einzelnen Eigenschaften zusammengefasst, kann das Verhalten von Asphalt abgeleitet und beschrieben werden.

Die Reaktionen von Asphalt unter Einwirkung einer Belastung ist maßgeblich von der Temperatur abhängig, was auf die Viskosität des Bitumens zurückzuführen ist. Innerhalb des Gebrauchstemperaturbereiches (-20 bis $+50^\circ C$) einer Straßenbefestigung variiert die Viskosität von Bitumen stark. Bei tiefen Temperaturen treten hauptsächlich elastische Verformungen auf. Mit steigender Temperatur treten zunehmend irreversible, also plastische Verformungen ein.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen nur die Stoffeigenschaften näher betrachtet werden, die für das Ermüdungsverhalten von Asphalt relevant sind. Dies ist insbesondere der E-Modul und die Querdehnzahl.

Steifigkeit

Wirkt auf einen Körper eine Kraft F ein, so reagiert dieser mit einer bestimmten Dehnung ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \tag{2.1}$$

Die Steifigkeit eines Körpers beschreibt den Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft und resultierender elastischer Verformung unter Berücksichtigung der Geometrie. Für Stoffe, die rein

elastisch reagieren (z.B. eine Feder) entspricht die Steifigkeit dem Elastizitätsmodul (E-Modul). Zur Beschreibung der Materialeigenschaften von Asphalt reicht der Begriff Steifigkeit nicht aus, da Asphalt zum Einen elastische und zum Anderen viskose und plastische Verformungseigenschaften besitzt. Die elastischen und viskoelastischen Eigenschaften von Asphalt können im Allgemeinen anhand des komplexen E-Moduls E^* beschrieben werden. Der komplexe E-Modul ist in die Komponenten absoluter E-Modul $|E|$ und Phasenwinkel φ aufspaltbar. Die Viskosität λ eignet sich zur Beschreibung von viskosen Verformungen.

Absoluter E-Modul

Neben den temperaturabhängigen Eigenschaften von Asphalt ergibt sich infolge der viskosen und viskoelastischen Eigenschaften eine deutliche Abhängigkeit der Dehnungsreaktionen von der Belastungszeit. Bei einer sinusförmigen Beanspruchung sind die Asphalteeigenschaften somit von der Belastungsfrequenz f abhängig.

Für den absoluten E-Modul $|E|$ besteht zusätzlich eine Temperatur-Frequenz-Äquivalenz. Ein bestimmter E-Modul-Wert gleicher Größe kann bei einem Versuch mit wiederholter Belastung z.B. bei einer Temperatur T_1 und der Frequenz f_1 oder auch bei einer Temperatur T_2 und der Belastungsfrequenz f_2 ermittelt werden. Die Temperatur-Frequenz-Äquivalenz besagt, dass die E-Modul-Werte eines Asphaltgemisches, bestimmt unter verschiedenen Prüfbedingungen (Temperatur und Frequenz) auf eine Referenztemperatur T_R bezogen werden können, wenn gleichzeitig die Belastungsfrequenz entsprechend angepasst wird. Mit Hilfe des Verschiebungsfaktors α_T wird die neue Belastungsfrequenz f_{korrr} bestimmt. Hürtgen [21] beschreibt, dass sich für die Ermittlung des temperaturabhängigen Verschiebungsfaktors die physikalisch begründete Arrhenius-Funktion besonders gut eignet. Der Term $(T_R + 273)$ bzw. $(T + 273)$ spiegelt dabei die absolute Temperatur wider.

$$f_{korrr} = f \cdot \alpha_T \quad (2.2)$$

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \cdot \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{T_R + 273} \right)}} \quad (2.3)$$

mit:

- T tatsächliche Prüftemperatur
- T_R Bezugstemperatur (meist $20^\circ C$)
- m Faktor ($m \approx 25.000$ nach [21])

Abbildung 2.1 verdeutlicht das Prinzip der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz. Die Masterkurve für einen Asphalt (rechtes Teilbild) wird durch die horizontale Verschiebung der, bei verschiedenen Temperaturen und/oder Frequenzen, ermittelten E-Moduln um den temperaturabhängigen Faktor α_T erzeugt.

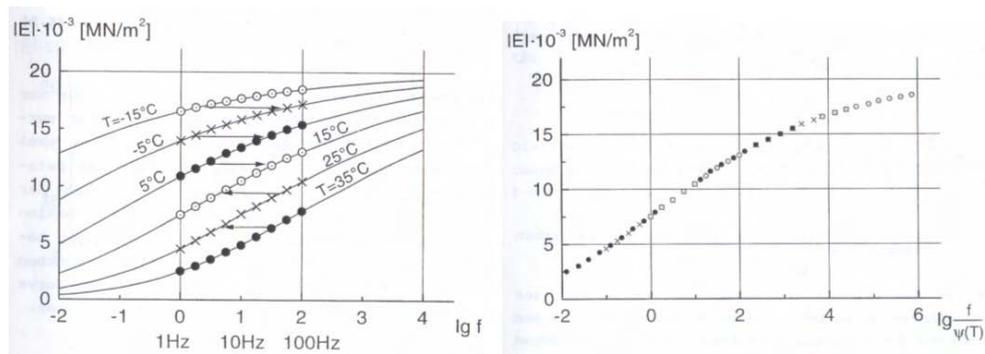


Abbildung 2.1: Anwendung der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz nach Hürtgen [21]

Zur rechnerischen Modellierung des absoluten E-Moduls von Asphaltgemischen kann zunächst auf das Verfahren von Francken/Verstraeten zurückgegriffen werden [16] um den absoluten E-Modul festzulegen. Mit diesem Verfahren ist die Berücksichtigung der Mischgutzusammensetzung möglich. Der absolute E-Modul lässt sich nach Gleichung 2.4 temperatur- und frequenzabhängig berechnen.

$$|E| = R \cdot E_{\infty} \quad (2.4)$$

mit:

$|E|$ absoluter E-Modul des Asphalttes

R $0 < R \leq 1$ Reduktionsfaktor

(Funktion der Nadelpenetration, des Erweichungspunktes
Ring und Kugel, der Temperatur und der Belastungsfrequenz)

E_{∞} Glasmodul

$$E_{\infty} = 1,436 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{V_g}{V_b}\right)^{0,56} \cdot e^{-0,0584 \cdot V_a} \quad (2.5)$$

mit:

V_a Hohlraumvolumen im Asphaltmischgut

V_b Bindemittelvolumen im Asphaltmischgut

V_g Volumen der Gesteinskörnung im Asphaltmischgut

Der Reduktionsfaktor R ist gemäß Hürtgen [20] eine Funktion R , die von der Nadelpenetration bei 25°C , der Temperatur des Erweichungspunktes Ring und Kugel, der Temperatur und der Belastungsfrequenz beim Versuch mit wiederholter Belastung abhängig ist. In [20] sind Nomogramme zur Ermittlung des Reduktionsfaktors R in Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz (5, 10, 20 Hz) und der Nadelpenetration (20 – 200 1/10 mm) angegeben. Als Nebenbedingung gilt für diese Nomogramme ein Penetrationsindex von P.I.=0.

Die dem Verfahren nach Francken/Verstraeten zu Grunde liegenden Untersuchungen wurden an mit Straßenbaubitumen (Normalbitumen) zusammengesetzten Asphaltten durchgeführt. Allgemein werden die Fehler bei der Berechnung des E-Moduls aus den Mischgut- und Bindemitteldaten aufgrund der Ungenauigkeiten bei der Bestimmung dieser Daten mit $\pm 20\%$ angegeben. Die Ermittlung der E-Moduln nach dem vorgestellten Verfahren für Asphaltte mit modifiziertem Bitumen ist mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet und kann daher nicht zur Anwendung empfohlen werden.

Querdehnzahl

Für die Ermittlung des E-Moduls bei mehraxialen Spannungszuständen als auch für Dimensionierungsrechnungen ist die Querdehnzahl μ notwendig. Bei der Annahme elastischen Materialverhaltens ist die Querdehnzahl μ als der negative Quotient zwischen Quer- und Längsdehnung definiert.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_Q}{\varepsilon_L} \quad (2.6)$$

In Abhängigkeit von der Temperatur und der Asphaltart liegt die Querdehnzahl zwischen 0,15 und 0,45. Bisher wurde üblicherweise eine konstante (temperaturunabhängige) Querdehnzahl von $\mu = 0,35$ angenommen. Für die Berechnungen dieser Arbeit wurde die temperaturabhängige Funktion der Querdehnzahl nach Witczak [42] ausgewählt und angewandt.

$$\mu(T) = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{3,1849 - 0,04233 \cdot (\frac{9}{5} \cdot T + 32)}} \quad (2.7)$$

Die Querdehnzahlen für die in dieser Arbeit benutzten Temperaturen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Temperatur $T [^{\circ}C]$	Querdehnzahl $\mu [-]$
20	0,298
5	0,217
-5	0,185
-10	0,174

Tabelle 2.1: Querdehnzahlen nach Gleichung 2.7 für übliche Prüftemperaturen

2.1.2 Ermüdung von Asphalt

Einführung

Gemäß Radaj [32] wird Ermüdung folgendermaßen beschrieben:

Unter Materialermüdung wird die Schädigung oder das Versagen von Werkstoff und Bauteil unter zeitlich veränderlicher, häufig wiederholter Beanspruchung verstanden. Es bilden sich bevorzugt an Fehlstellen, Kerben und Querschnittsübergängen nach kleinerer oder größerer Schwingspiellanzahl Anrisse. Die Risse vergrößern sich mit den weiteren Schwingspielen, schließlich tritt der Restbruch ein. Dies geschieht bei einer Beanspruchungshöhe, die weit unterhalb der statischen Festigkeit liegen kann. Je höher die Beanspruchung, desto kürzer die Lebensdauer.

Der Bereich der Zeitfestigkeit wird durch die statische Festigkeit und die Dauerfestigkeit begrenzt. Der Bereich der Dauerfestigkeit konnte für Asphalte bisher noch nicht nachgewiesen werden. Der Bereich der Zeitfestigkeit wird durch Ermüdungsfunktionen beschrieben.

Zeitfestigkeit

Die Werkstoffmechanik definiert Ermüdung als eine werkstoffschädigende Folgeerscheinung, die bei zyklischen Belastungen in Form von Rissbildung und Risswachstum auftritt.

Übertragen auf Asphalt bedeutet Ermüdung, dass die Asphaltbefestigung bei jeder kurzen Beanspruchung während der Überrollung durch einen Reifen minimal geschädigt wird, was zu einem Steifigkeitsverlust infolge Mikrorissbildung und bei wiederholter Belastung zum Ausfall der Asphaltbefestigung durch Rissbildung und Ausbreitung dieser führt. Tatsächlich können die einzelnen Phasen der Ermüdung in einer Straßenbefestigung nicht nachgewiesen werden, da u. a. Alterung und Heilung entgegen der Ermüdung wirken.

Die Ermüdung einer Asphaltbefestigung bzw. eines Asphaltprobekörpers im Laborversuch lässt sich nach Di Benedetto [13] in zwei Phasen unterteilen.

- *Initiierungsphase (Initiation mode)* - In dieser Phase bilden sich erste Mikrorisse und vereinigen sich zu einem ungeordneten Mikroriss-Netz. Daraus resultiert ein Abfall der Steifigkeit.
- *Ausbreitungsphase (Propagation mode)* - In dieser Phase tritt, infolge einer Vereinigung der Mikrorisse, ein Makroriss auf, der sich im Material ausbreitet. Die Vereinigung der Mikrorisse erfolgt in einem bestimmten Stadium der Mikrorissbildung bzw. Ermüdung. Mit Beginn dieser Phase fällt die Steifigkeit stärker ab.

Der Steifigkeitsverlauf während eines Ermüdungsversuches wird gemäß Di Benedetto [13] jedoch in drei Phasen untergliedert.

- *Anpassungsphase (Phase I)* - Diese erste Phase ist durch einen raschen Steifigkeitsabfall charakterisiert, der durch Ermüdung, Erwärmung und lokale Erscheinungen (z.B. Anpassung zwischen Probekörper und Lasteinleitungsvorrichtung) verursacht wird.
- *Quasistationäre Phase (Phase II)* - Während dieser zweiten Phase ist der Einfluss der Ermüdung auf den Steifigkeitsabfall dominant. Die Steifigkeit nimmt linear ab.
- *Versagensphase (Phase III)* - In der letzten Phase nimmt die Steifigkeit wiederum rasch ab, was durch die Ausbreitung der Makrorisse erklärt werden kann. Am Ende der Phase versagt der Probekörper vollständig.

Die Phasen I und II des Steifigkeitsverlaufes laufen zeitgleich mit der Initiierungsphase des Ermüdungsverlaufes ab. Die Phase III und die Ausbreitungsphase sind identisch. In Abbildung 2.2 sind die Phasen der Ermüdung und des Steifigkeitsverlaufes dargestellt.

Die Ermüdung von Asphalt ist als Abfall der Steifigkeit infolge wiederholter Belastung definiert und darf nicht mit einer bleibenden Verformung verwechselt bzw. überlagert werden (siehe Abbildung 2.3). Wird z.B. wiederholt eine Zugbelastung auf einen Probekörper aufgebracht, so können die akkumulierten bleibenden Dehnungen sehr groß werden und die Auswirkungen der Ermüdung überdecken. Gleichzeitig führen starke plastische Verformungen bei Ermüdungsfortschritt zu einem progressiven Anstieg der elastischen Dehnungen.

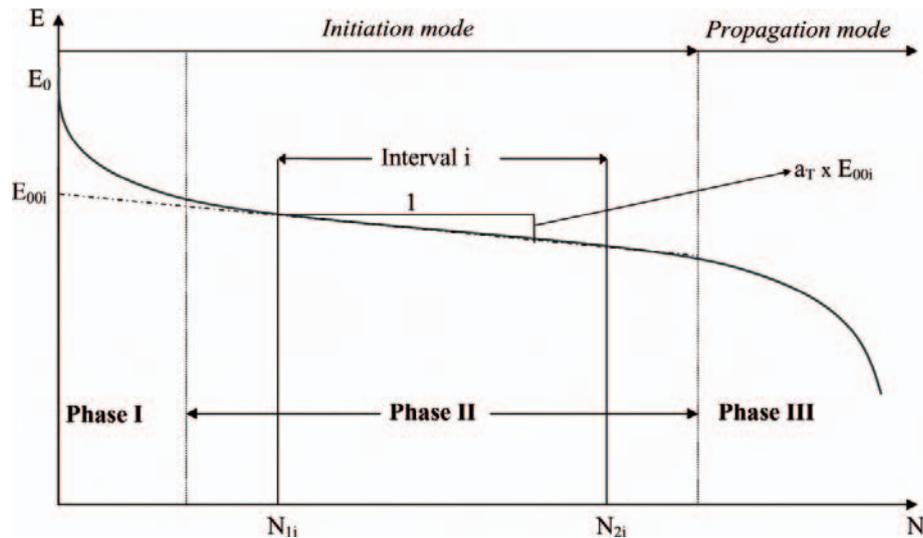


Abbildung 2.2: Verlauf der Steifigkeit während eines Ermüdungsversuches, Di Benedetto [13]

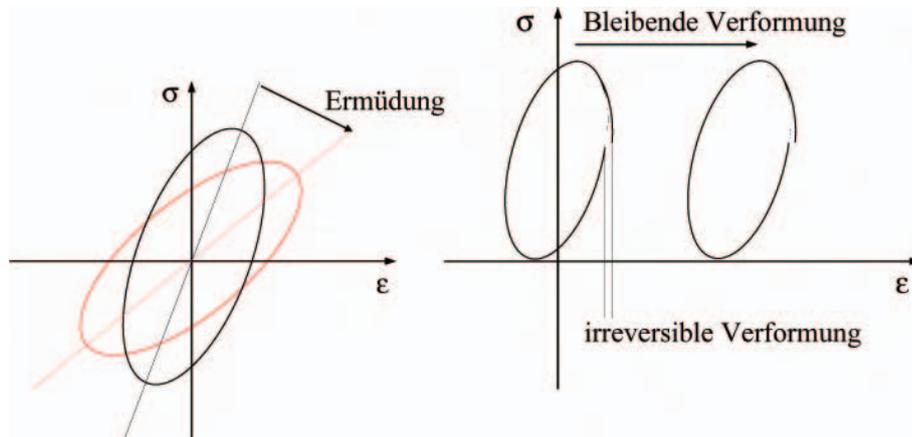


Abbildung 2.3: Unterschied zwischen Ermüdung und bleibender Verformung, Di Benedetto [13]

Dauerfestigkeit

Es wird angenommen, dass ein Probekörper oder eine Asphaltbefestigung im Bereich der Dauerfestigkeit aufgrund der geringen Beanspruchung keine Ermüdung erfährt. Es könnten theoretisch unendlich viele Einzelbelastungen aufgebracht werden, ohne dass ein Versagen oder eine Minderung des Substanzwertes eintritt. Entsprechend der Wöhlerfunktion (siehe Abbildung 4.9) ist der Bereich der Dauerfestigkeit durch eine maximale Dehnung gekennzeichnet. Ayers [10] gibt für Asphaltbetone eine Dauerfestigkeitsgrenze von $0,07\text{‰}$ an. Untersuchungen an einer Versuchstrecke der TU Delft (siehe [29]) ergaben jedoch, dass Asphaltbetone auch bei Dehnungen $\leq 0,07\text{‰}$ versagten. Die Versuche wurden bei 20°C und 0°C durchgeführt. Auch bei eigenen Ermüdungsversuchen im Labor konnten bei diesen Dehnungen Risse bzw. der Probekörperbruch beobachtet werden (siehe Kapitel 6 und 7).

2.2 Verhalten einer Asphaltbefestigung

2.2.1 Beanspruchungszustand in einer Asphaltbefestigung

Einleitung

Untersuchungen an verschiedenen Modell- und Versuchsstraßen im In- und Ausland ergaben einen deutlichen Unterschied zwischen berechneten und gemessenen Spannungen und Dehnungen innerhalb einer Asphaltbefestigung. Die Berechnungen erfolgten hierbei auf Grundlage linear elastischen Materialverhaltens und der Mehrschichtentheorie. In der Arbeit von Loulizi [26] wird eine deutliche Abhängigkeit der gemessenen horizontalen Querdehnung von der Überfahrgeschwindigkeit dargestellt. Mit zunehmender Überfahrgeschwindigkeit nehmen die gemessenen Dehnungen ab. Die Differenz zwischen den gemessenen Dehnungen bei 8 bzw. 72 km/h Überfahrgeschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur progressiv zu. Software auf der Grundlage der linear elastischen Mehrschichtentheorie kann den Geschwindigkeitseinfluss nur begrenzt wiedergeben, da die Belastung i. d. R. als statisch angenommen wird. Daher ergeben sich große Unterschiede zwischen den gemessenen (siehe Loulizi [26]) und berechneten Dehnungen.

Weiterhin ist bei Loulizi [26] beschrieben, dass die maximale vertikale Druckspannung an der Oberfläche der Asphaltbefestigung infolge einer definierten Radlast nicht von der Überfahrgeschwindigkeit abhängig ist. Vielmehr wird die Größe der vertikalen Druckspannung von der Temperatur bestimmt. Auch diesen Einfluss können Programme auf der Basis der linear elastischen Mehrschichtentheorie nur ungenügend darstellen.

Auf den Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Beanspruchungszuständen wird in Abschnitt 2.2.2 näher eingegangen.

Berechnungsgrundlagen

Um die genaue Geometrie einer Asphaltbefestigung zu berücksichtigen, sind Programme auf Basis der Mehrschichtentheorie ungeeignet, da sie mit der Annahme unendlich ausgedehnter Schichten arbeiten. Um die Geometrie der Straßenbefestigungen detailliert berücksichtigen zu können, wurden die Berechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (z.B. Software *REFEM 3D*) durchgeführt, so dass der Spannungs- und Dehnungszustand unter Annahme linear elastischen Materialverhaltens berechnet werden konnten. Die Berechnungen wurden an dem in Abbildung 2.4 dargestellten Ausschnitt durchgeführt. Die Anordnung der einzelnen Befestigungsschichten und die Lage der Lasteintragung durch zwei Räder einer Achse können der Abbildung 2.4 entnommen werden. In Abbildung 2.5 sind die Abmessungen des tatsächlich für die *REFEM*-Berechnungen angenommenen Systems gegeben. Es wurde nur die dargestellte Hälfte des Gesamtsystems berechnet, da die Symmetrie ausgenutzt werden konnte. Für die Berechnungen wurde eine Belastung von $1,0 \text{ N/mm}^2 \cong 8,5 \text{ t}$ Achslast gewählt. Durch die Verwendung dieser Einheitslast und des Ansatzes des linear elastischen Materialverhaltens können alle Spannungen und Dehnungen infolge anderer Achslasten durch Multiplikation ermittelt werden, ohne zusätzliche FE-Rechnungen durchführen zu müssen. Die durch den Reifen gebildete Lasteinleitungsfläche wurde gemäß Eisenmann [15] und Gohl [17] als Rechteckfläche angenommen. Untersuchungen an der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ergaben,

das die Aufstandsfläche die Abmessungen $160 \times 240 \text{ mm}$ besitzt. Für die FE-Rechnungen wird mit der Annahme der gleichmäßigen Lasteinleitung über diese Fläche gearbeitet, obwohl dies nicht der Wirklichkeit entspricht. Das FE-Netz wurde im Lasteinleitungsbereich enger vernetzt.

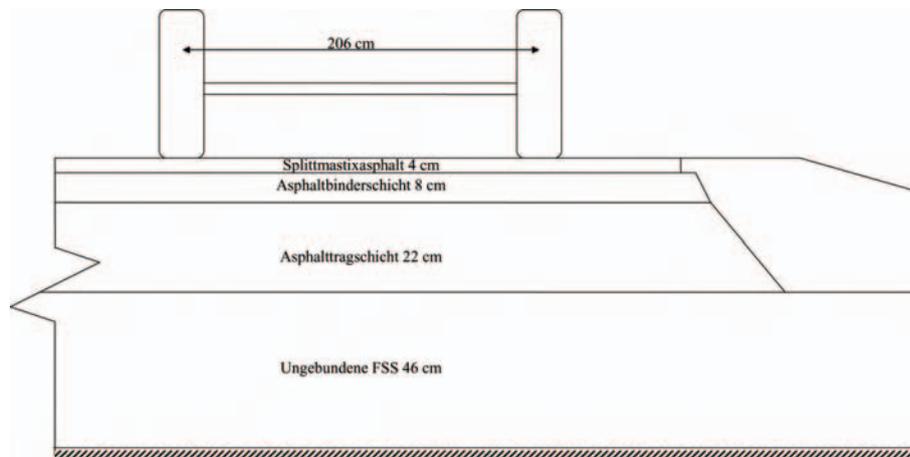


Abbildung 2.4: Ausschnitt einer Straßenbefestigung für die *REFEM*-Berechnungen

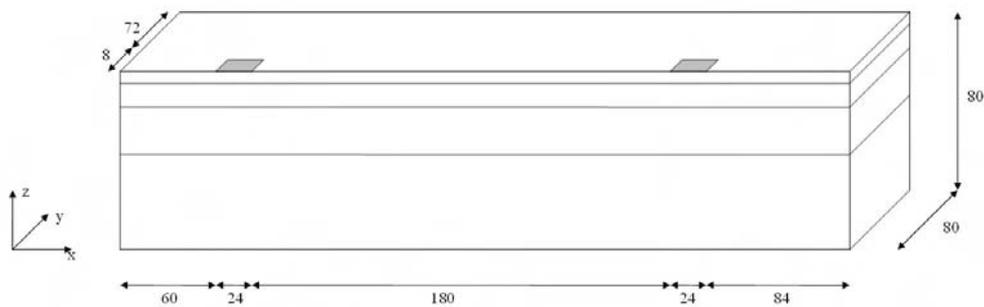


Abbildung 2.5: System für die *REFEM*-Berechnungen

Spannungszustand

Als Ergebnis der FE-Berechnungen können u. a. Spannungsverläufe ermittelt werden. In Abbildung 2.7 ist der Horizontalspannungszustand im beschriebenen System bei sommerlichen und winterlichen Temperaturen dargestellt. Die zugrunde liegenden Materialparameter für eine Belastungsfrequenz von 10 Hz sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Die angenommenen Fahrbahnoberflächentemperaturen betragen $-2,5^\circ\text{C}$ für den winterlichen und $+32,5^\circ\text{C}$ für den sommerlichen Temperaturfall. Die Temperaturverläufe in der Asphaltbefestigung wurden im Rahmen einer Dissertation erarbeitet (siehe Kayser [24]). Der sommerliche Temperaturfall entspricht dem Verlauf ncT5 und der winterliche dem Verlauf ncT2. Die Temperaturverläufe sind unter Berücksichtigung der gewählten Oberflächentemperatur in Abbildung 2.6 dargestellt.

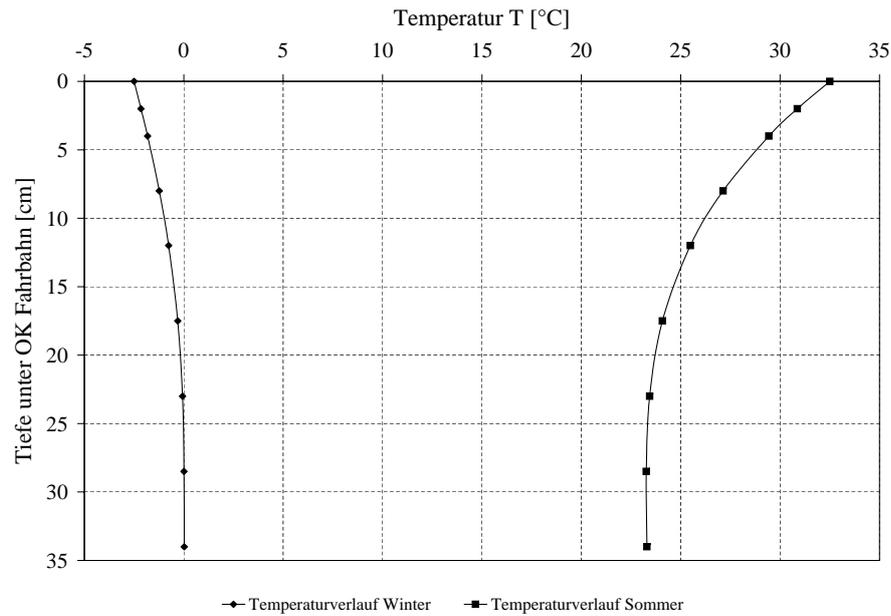


Abbildung 2.6: Sommerlicher und winterlicher Temperaturverlauf gemäß Kayser [24]

Tiefe unter OK Fahrbahn [cm]	Material	Winterlicher Temperaturfall			Sommerlicher Temperaturfall		
		T [°C]	E [N/mm ²]	μ [-]	T [°C]	E [N/mm ²]	μ [-]
0 - 4	ADS	-2	16.250	0,192	31	3.600	0,37
4 - 12	ABi	-1	16.300	0,195	27	4.000	0,345
12 - 34	ATS	0	18.000	0,198	23,9	6.250	0,325

Tabelle 2.2: Für die Berechnungen verwendete Materialparameter und Temperaturen in den einzelnen Asphaltsschichten bei $f = 10 \text{ Hz}$

Die Abbildung 2.7 verdeutlicht, dass die auftretenden Spannungen für den winterlichen Temperaturfall größer sind. Gleichzeitig steigt der E-Modul der für die Berechnungen angesetzten Asphalte bei tiefen Temperaturen nichtlinear an. Da der Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung/Dehnung nicht linear ist, müssen für die Betrachtungen auch die auftretenden Dehnungen berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 2.2.1).

Der in der Asphaltbefestigung entstehende mehrachsige Spannungszustand ist in Abbildung 2.8 für die zwei genannten Temperaturfälle in der Rollspur an der Unterseite der Asphalttragschicht und zwischen den Rollspuren an der Oberseite der Asphaltdeckschicht dargestellt. Die an Volumenelementen gezeigten Hauptspannungen verdeutlichen die Unterschiede zwischen den Temperaturfällen. An der Unterseite der Asphalttragschicht verringern sich die Spannungen infolge des höheren E-Moduls bei niedrigen Temperaturen geringfügig. An der Oberseite der Asphaltdeckschicht (zwischen den Rollspuren) werden bei tiefen Temperaturen infolge der steifen Unterlage gegenüber dem sommerlichen Temperaturfall entscheidend größere Spannungen induziert.

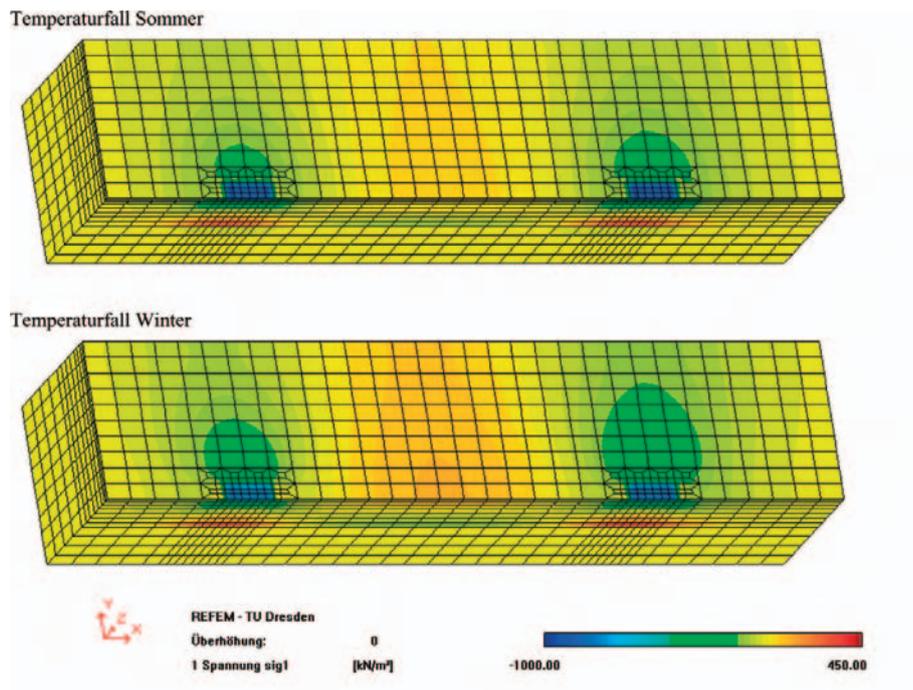


Abbildung 2.7: Horizontalspannungszustand σ_x in einer Straßenbefestigung bei sommerlichen und winterlichen Temperaturen

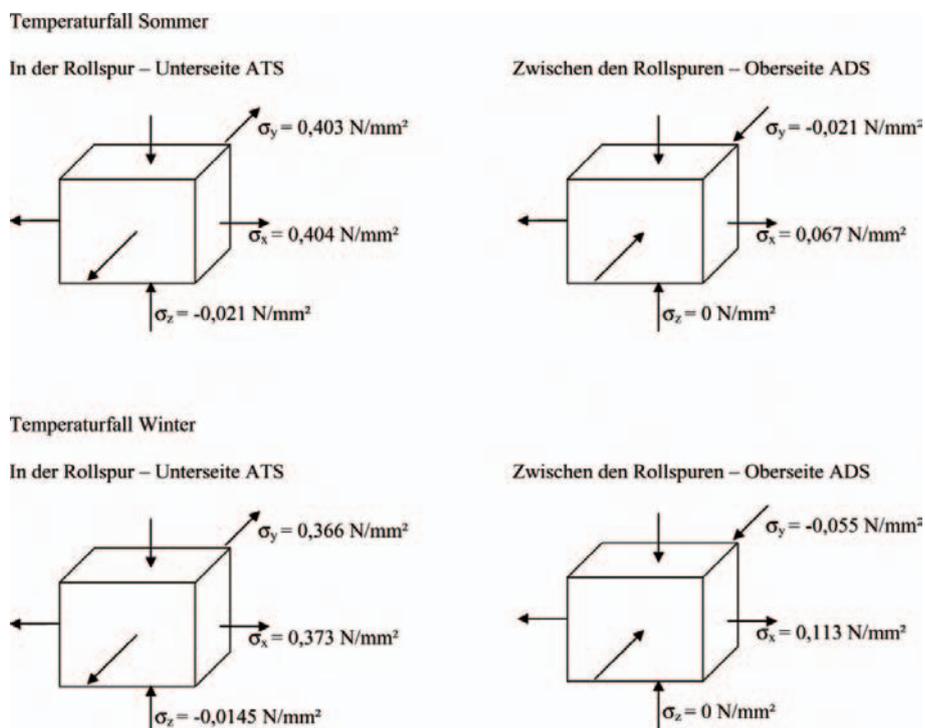


Abbildung 2.8: Mehraxialer Spannungszustand in bzw. zwischen den Rollspuren bei sommerlichen und winterlichen Temperaturen

Dehnungszustand

Zur Beurteilung der verschiedenen Beanspruchungszustände ist auch der resultierende Dehnungszustand zu betrachten, da dieser das Resultat des vorherrschenden mehrachsigen Spannungszustandes ist. Der aus dem Spannungszustand und den Materialeigenschaften (insbesondere der Querdehnzahl) ableitbare Dehnungszustand ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Dehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht und an der Oberseite der Asphaltdeckschicht bei sommerlichen Temperaturen signifikant größer sind, obwohl die Spannungen denen des winterlichen Temperaturfall entsprechen bzw. kleiner sind. Es zeigt sich, dass die Dehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht größer sind, als an der Oberseite der Asphaltdeckschicht. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Asphaltbefestigung insbesondere im Sommer an der Unterseite der Asphalttragschicht große Dehnungen ertragen muss. Demgegenüber können Heilungseffekte (z.B. Wiederverklebung von Mikrorissen) nur bedingt auftreten, da die Temperaturen gegenüber der Oberseite der Befestigung geringer sind und die entgegengerichteten Spannungen klein ausfallen.

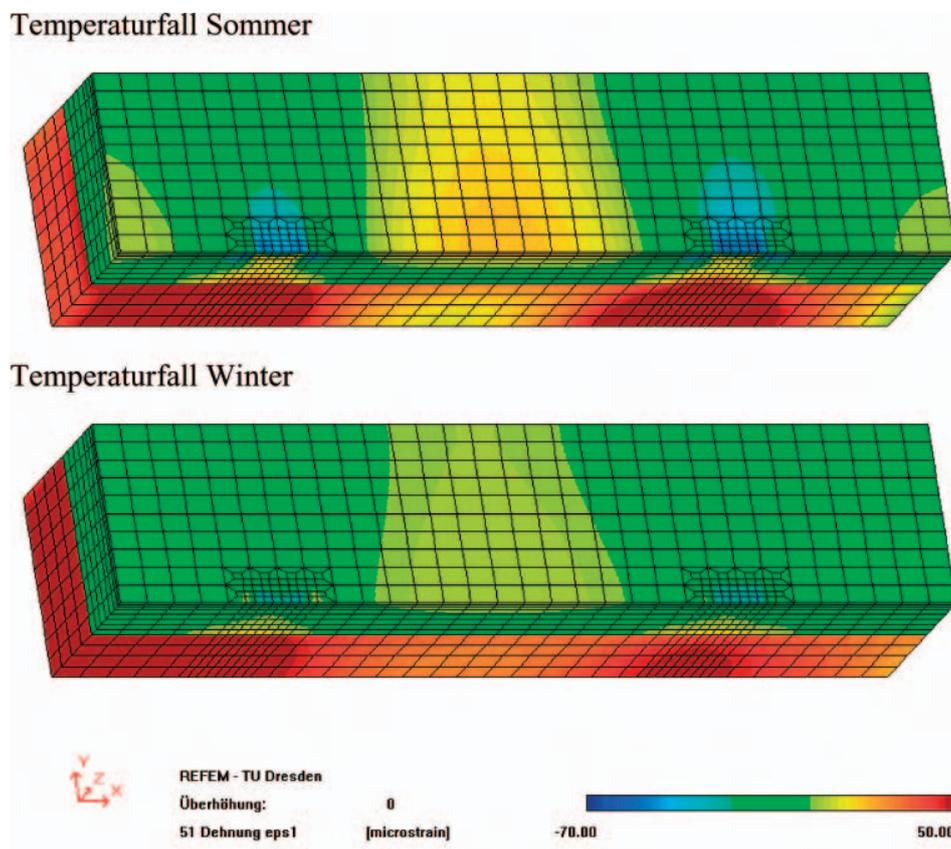


Abbildung 2.9: Dehnungszustand ε_x in einer Straßenbefestigung bei sommerlichen bzw. winterlichen Temperaturen

Anhand von Abbildung 2.10 soll der Dehnungszustand an der Unterseite der Asphalttragschicht bei verschiedenen Temperaturen noch einmal verdeutlicht werden. Es sind die Dehnungen ε_y in Fahrtrichtung an der Unterseite der Asphalttragschicht direkt unter dem Lasteinleitungsbereich für verschiedene über die gesamte Asphaltpaketdicke vereinfachend als konstant angenommene

Temperaturen im Bereich von -10°C bis $+30^{\circ}\text{C}$ zusammengestellt. Es ist erkennbar, dass die Dehnungen in der Rollspur zwischen Dehnung und Stauchung wechseln. Die Dehnungen direkt unter der Belastung sind dabei wesentlich größer als die Stauchungen die sich vor bzw. nach dem Lasteinleitungsbereich ausbilden. In Abhängigkeit von der Temperatur liegt die Größenordnung für den Faktor zwischen Dehnung und Stauchung unter Berücksichtigung der angenommenen Materialparameter zwischen 12 ($+30^{\circ}\text{C}$) und 22 (-10°C), was ein Verkleben von Rissen nur bei hohen Temperaturen als möglich erscheinen lässt.

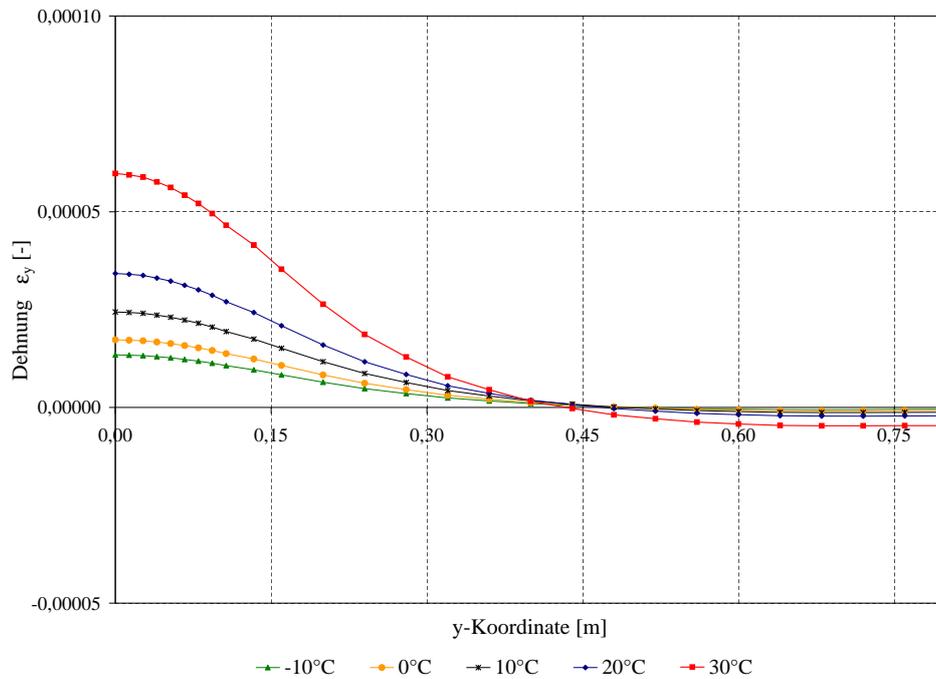


Abbildung 2.10: Dehnungen ε_y an der Unterseite der Asphalttragschicht für verschiedene Temperaturen

2.2.2 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Beanspruchungszuständen einer Straßenbefestigung

In der Diplomarbeit von Gohl [17] wird ein detaillierter Vergleich zwischen den an der Modellstraße der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gemessenen und berechneten mechanischen Beanspruchungen vorgenommen. Die Berechnungen erfolgten mit *BISAR* (Mehrschichtentheorie), *FENLAP* (Anwendung der Finite Elemente Methode für rotationssymmetrische Systeme) und *REFEM 3D* (Anwendung der Finite Elemente Methode für dreidimensionale Systeme). Der Vergleich der gemessenen mit den berechneten Längs- und Querdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht ergibt für die betrachteten Versuchsfelder der Modellstraße unterschiedliche Tendenzen. Es ist jedoch festzustellen, dass sich die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Dehnungen unter Berücksichtigung der Überfahrgeschwindigkeit deutlich reduzierten. Die Größe der auftretenden Dehnungen werden dann von allen drei Berechnungsprogrammen befriedigend wiedergegeben. Mit dem Programm *REFEM* konnte jedoch die beste Übereinstimmung ermittelt werden.

Im Gegensatz dazu liegen die Berechnungsergebnisse für die vertikalen Druckspannungen an der Unterseite der Asphalttragschicht sehr weit unter den gemessenen Spannungen. Diese Unterschiede können auf die verwendete Messtechnik (Druckmessdosen) zurückgeführt werden, da diese eine Spannungskonzentration hervorrufen können.

Weitergehende Untersuchung z.B. der anderen Spannungsanteile konnte nicht erfolgen, da keine weitere Messtechnik installiert wurde.

2.2.3 Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten

Die Temperatur und die Belastungsgeschwindigkeit beeinflussen gleichermaßen die Ermüdungsfunktion und den E-Modul von Asphalt. Einen sehr großen, im Labor nur ungenügend erfassbaren Einfluss auf die Ermüdungsfunktion einer Straßenbefestigung haben u.a. folgende Faktoren:

- Lastpausen,
- Materialalterung,
- Pendelbewegung der Fahrzeuge,
- Heilungsprozesse bei hohe Temperaturen und / oder entgegengerichteten Beanspruchungen,
- Rissausbreitung usw.

Diese Einflussfaktoren sind jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Den Einfluss der Lastpause und der damit verbundenen Heilung hat u. a. Castro [12] dargestellt.

2.3 Nachbildung des Verhaltens einer Asphaltbefestigung *in situ* im Labor

Das Ermüdungsverhalten von Asphalten kann im Labor nur unter vereinfachten Bedingungen ermittelt werden. Z.B. sind die Belastungsfunktion und der Temperaturzustand während des Laborversuches vereinfachend konstant zu halten. Im Allgemeinen werden Asphaltproben bei Ermüdungsuntersuchungen mit einer harmonischen Sinusfunktion ohne Lastpausen beansprucht. Die Beanspruchungsamplitude (Kraft oder Weg) ist dabei konstant. In Deutschland werden Ermüdungsfunktionen derzeit ausschließlich mit schwellender Beanspruchung ermittelt. Die in der Straßenbefestigung auftretende mehrachsiale Beanspruchung kann im Laborversuch nur schwierig erzeugt werden. Eine Ausnahme bildet hierbei der Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung, mit dem gezielt mehrachsiale Beanspruchungszustände in einem Probekörper erzeugt werden können.

Die Vereinfachungen bei den Laborversuchen und die Einflussfaktoren, die nicht berücksichtigt werden können, führen zu einer Diskrepanz zwischen den ermittelten Ermüdungszeitpunkten im Labor und *in situ*. Zum Ausgleich dieser Unterschiede wird ein sogenannter Shift-Faktor eingeführt. Castro [12] führt für Werte zwischen 10 und 100 an. Werkmeister [40] hingegen listet Teil-Shift-Faktoren gemäß den Einflussfaktoren getrennt auf:

- Spurgenauigkeit: 1,1
- Lastpausen zwischen den Belastungen: 20
- Rissausbreitung bis zum Erreichen kritischer Bedingungen: 3,5
- Rissausbreitung bis zum Bruch: 20.

In der Multiplikation ergibt sich somit 1540, der Wert, der auch in den RDO [6] für Ermüdungsfunktionen, ermittelt mit dem Spaltzugschwellversuch, angesetzt wird. Um die unterschiedlichen Spannungszustände in den Probekörpern verschiedener Ermüdungsversuche berücksichtigen zu können, müssen die Shift-Faktoren für jeden Versuchstyp individuell bestimmt werden. Bisher wurden die Shift-Faktoren durch Kalibrierung an den auf Erfahrung beruhenden Schichtdicken der RStO [7] ermittelt und den Berechnungen nach den RDO zu Grunde gelegt. Weitere Verbesserungen für die Annahme der Shift-Faktoren sind durch Beobachtungsstrecken zu erwarten. Hierzu könnte z.B. die im Rahmen des BMBF geförderten Projektes *Nachhaltiger Straßenbau* [38] angelegte Beobachtungsstrecke neue Erkenntnisse hervorbringen.

2.4 Einfluss der Ermüdung auf die rechnerische Dimensionierung

2.4.1 Einleitung

Die Dimensionierung von Straßenbefestigungen erfolgt in Deutschland bisher auf der Grundlage der RStO, d.h. der Standardisierung von Befestigungen für vorgegebene Verkehrsbelastungen (Bauklassen) sowie eine grobe Kategorisierung örtlicher Gegebenheiten und klimatischer Bedingungen. Anhand der rechnerischen Dimensionierung können Materialeigenschaften, die Verkehrsbelastung und die klimatischen Gegebenheiten detailliert berücksichtigt werden. Somit ist es möglich, Straßenbefestigungen auch unter Verwendung neuartiger Materialien mit herkömmlichen Bauweisen zu dimensionieren. Es können wirtschaftliche und ressourcenschonende Straßenbefestigungen gebaut werden. Durch die Minderung der Schichtdicken aufgrund der eingesetzten Materialien, können Ressourcen eingespart werden. Andererseits sind dicke, aber preisgünstige Asphaltsschichten mit schlechteren Materialeigenschaften ebenso wirtschaftlich. Es müssen beide Aspekte Berücksichtigung finden.

2.4.2 Ermüdungsfunktionen

Für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen kann bei unbekanntem Materialparametern auf die Ermüdungsfunktion nach Heukelom und Klomp [19] zurückgegriffen werden. Diese stellt den Zusammenhang zwischen N_{zul} und der Spannung sowie dem E-Modul her. Da der E-Modul sowohl von der Temperatur als auch von der Belastungsfrequenz abhängig ist, werden auch diese beiden Einflüsse berücksichtigt. Es ist jedoch zu beachten, dass bei den Versuchen, die die Grundlage für diese allgemeine Ermüdungsfunktion bildeten, nicht ein Risskriterium, sondern der Abfall des E-Moduls auf 50% des Anfangswertes als Ermüdungskriterium angesehen wurde (siehe auch Abschnitt 4.2).

$$N = 0,004295 \cdot \frac{E^{2,633}}{\sigma^5} \quad (2.8)$$

mit:

- N Lastwechselzahl bis zum Versagen
- E absoluter E-Modul bei der entsprechenden Temperatur
- σ wiederholt induzierte Zugspannung

Die Ermüdungsfunktion berücksichtigt die individuellen Materialeigenschaften ausschließlich über den E-Modul, der entweder in Laborversuchen ermittelt oder nach Francken / Verstraeten anhand der Mischgut- und Bindemittelleigenschaften bestimmt werden kann.

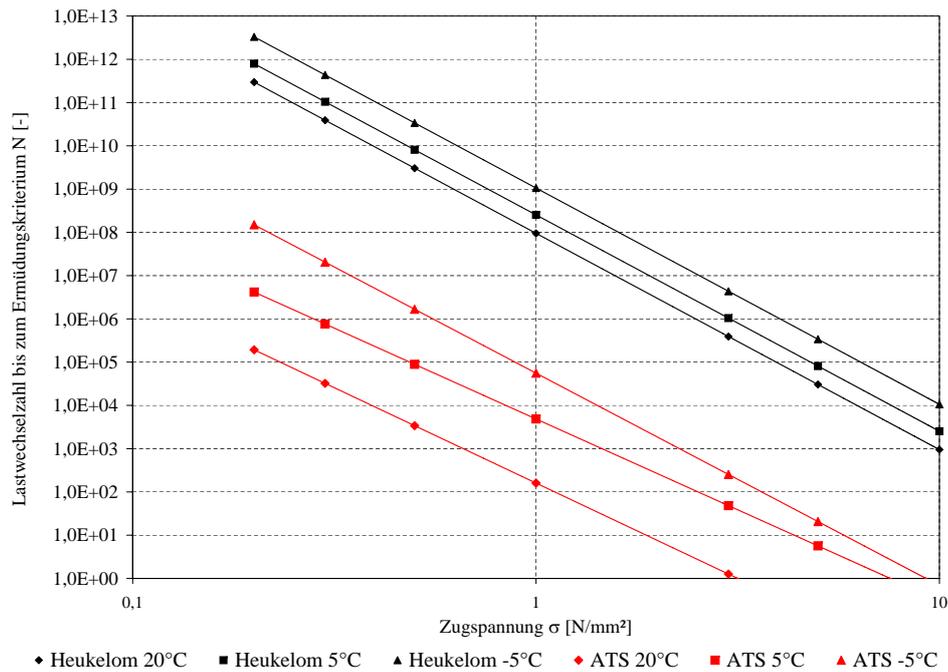


Abbildung 2.11: Ermüdungsfunktionen einer ATS bis zum Versagen nach Heukelom/Klomp und mit Hilfe von Spaltzugschwellversuchen ermittelt

Abbildung 2.11 verdeutlicht die großen Unterschiede zwischen Ermüdungsfunktionen, die nach Heukelom und Klomp für verschiedene Temperaturen bestimmt wurden und Funktionen, die auf Spaltzugschwellversuchen basieren. Für die Auswertung der Spaltzugschwellversuche wurde abweichend von den Versuchen nach Heukelom und Klomp die Lastwechselzahl bis zum Makroriss als Ermüdungszeitpunkt angesetzt. Für die Funktionen nach Heukelom und Klomp wurden die in den Spaltzugschwellversuchen ermittelten E-Moduln verwendet. Es wird deutlich, dass die mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten Ermüdungsfunktionen für den Asphalt wesentlich geringere Lastwechselzahlen bis zum Versagen angeben, obwohl die Lastwechselzahl bis zum Makroriss genutzt wurde. Die Faktoren zwischen den spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen, ermittelt mit dem Spaltzugschwellversuch bzw. der Ermüdungsfunktionen nach Heukelom und Klomp, sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Die Faktoren nehmen mit steigender Zugspannung ab. Der Unterschied zwischen den beiden Ermüdungsfunktionen ist insbesondere bei 20°C sehr groß. Die Unterschiede zeigen, dass die Ermüdungsfunktionen nach Heukelom und Klomp unrealistisch hohe Lastwechselzahlen bis zum Ermüdungskriterium ausgeben. Für die rechnerische Dimensionierung sollte die Aufstellung von Ermüdungsfunktionen auf der Basis von im Labor durchgeführten Ermüdungsversuchen erfolgen. Die Durchführung verschiedener Ermüdungsversuche ist in Kapitel 3 und die Auswertung sowie die Aufstellung von Ermüdungsfunktionen in Kapitel 4 beschrieben.

Temperatur	Faktor		
20°C	1.500.000	-	310.000
5°C	190.000	-	22.000
-5°C	22.000	-	16.000

Tabelle 2.3: Unterschiede zwischen den Ermüdungsfunktionen nach Heukelom/Klomp und denen aus Spaltzugschwellversuchen

2.4.3 Hypothese von Miner

Die Hypothese von Miner [28] ermöglicht rechnerisch die Akkumulation verschiedener Schädigungsanteile. Basierend auf Einaxialen Zugschwell- und Zugwechselfersuchen an Aluminiumproben stellte Miner folgende Hypothese auf:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.9)$$

mit:

- n_i ertragene Lastwechselanzahl bei einer bestimmten Beanspruchung i
- N_i maximal ertragbare Lastwechselanzahl bei einer bestimmten Beanspruchung i

Jeder Lastwechsel verbraucht einen kleinen Anteil der Lebensdauer. Entsprechend der Hypothese von Miner ist die Größe des Verbrauches unabhängig von der zeitlichen Reihenfolge des Auftretens der Schädigung. Der Dauerfestigkeitsbereich konnte für Asphalte bisher noch nicht nachgewiesen werden, so dass zunächst davon ausgegangen werden muss, dass er nicht existiert.

Für andere Baustoffe (insbesondere Stahl) stellte Radaj [32] fest, dass die Unabhängigkeit der zeitlichen Reihenfolge nicht gegeben ist, denn dies würde bedeuten, dass Lastwechsel mit Dehnungen unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze auch in Verbindung mit Lastwechseln hoher Dehnungen keine Schädigung hervorrufen. In Wirklichkeit vermindert sich die Dauerfestigkeitsgrenze eines Materials infolge einer Vorschädigung. Dies bedeutet, dass die Dauerfestigkeitsgrenze nicht unabhängig von der Belastungskonfiguration existiert.

Bereits die von Miner durchgeführten Versuche an Aluminium zeigten große Streuungen bei der Aufsummierung der einzelnen Schadensanteile. Für die veröffentlichten Versuche streuten die Summen zwischen 0,60 und 1,49. Radaj [32] schlägt daher vor, die Hypothese von Miner anzupassen und die Schadenssumme auf $\neq 1$ zu setzen, was mit einer Änderung des Shift-Faktors gleich zu setzen wäre.

Unabhängig davon wird die Hypothese von Miner derzeit im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung für Asphalte angewandt. Die Richtigkeit der Vorgehensweise ist jedoch anzuzweifeln. In einem aktuellen durch die DFG geförderten Forschungsvorhaben [39] an der Professur für Straßenbau der TU Dresden wird daher u. a. die Gültigkeit der Hypothese von Miner für Asphalte überprüft.

Kapitel 3

Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion von Asphaltgemischen

3.1 Übersicht

Ermüdungserscheinungen an Asphalt können an verschiedenen Stellen innerhalb einer Straßenbefestigung auftreten. Hierbei sind Schädigungen in und neben der Lastachse zu unterscheiden. Unter der Voraussetzung eines wirksamen Schichtenverbundes tritt die größte Zugspannungskomponente in der Lastachse an der Unterseite der Asphalttragschicht auf. Außerhalb der Lastachse sind die Zugspannungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht am größten. Die Lage des Spannungsmaximums an der Oberseite (Abstand von der Lastachse) hängt vom Schichtenverbund und der Temperatur des Asphaltpaketes ab. In Abbildung 3.1 sind die beiden Spannungsverläufe qualitativ dargestellt. Im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung wird die Ermüdung an der Unterseite des Asphaltpaketes als maßgebend angesehen, da der Riss von unten wirtschaftlich ungünstiger als der Riss von oben ist. Weiterhin sind die infolge der Verkehrsbelastung auftretenden Zugspannungen an der Oberseite der Asphaltbefestigung wesentlich kleiner als die Zugspannungen an der Unterseite der Asphalttragschicht. Nach den bisherigen Überlegungen sind die mechanogenen Zugspannungen an der Oberseite noch mit den maßgebenden kryogenen Zugspannungen zu überlagern, die jedoch unabhängig von den Schichtdicken der Asphaltbefestigung sind und somit nicht dimensionierungsrelevant sind.

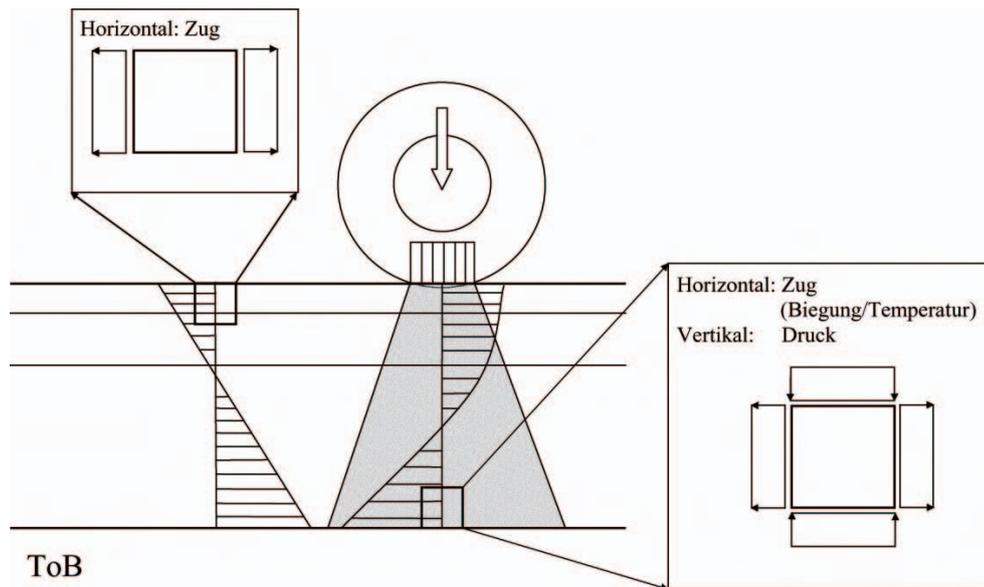


Abbildung 3.1: Verlauf der horizontalen Spannungen in und neben der Lastachse

3.2 Einaxialer Zugschwellversuch

3.2.1 Einleitung

Beim Einaxialen Zugschwellversuch wird ein prismatischer Probekörper bei tiefen Temperaturen (-15°C bis 5°C) mit einer sinusförmigen Zugschwellspannung belastet. Die Lastübertragung erfolgt über angeklebte Adapter. Die Prüffrequenz, die Temperatur und die aufgetragenen Spannungen können variiert werden. Als Unterspannung im Versuch wird die kryogene Zugspannung der entsprechenden Temperatur angesetzt. Die kryogenen Zugspannungen werden entsprechend der geltenden Technischen Prüfvorschrift [8] bestimmt. In Abbildung 3.2 ist das Prinzip des Einaxialen Zugschwellversuches dargestellt. Der Versuch kann sowohl in Weg- als auch in Kraftregelung durchgeführt werden.

3.2.2 Beanspruchungszustand im Probekörper

Merkmale des Einaxialen Zugschwellversuchs sind ein weitgehend homogener einaxialer Spannungszustand im mittleren Bereich des Probekörpers. Aufgrund der angeklebten Adapter, die zur Belastung des Probekörpers erforderlich sind, ist ein einaxialer Spannungszustand in den Probekörperendbereichen nicht gewährleistet. In Abbildung 3.3 ist der Verlauf der Vertikalspannung über einen halben Probekörper dargestellt. Wegen der Klebung an den Probekörperendflächen tritt eine Querdehnungsbehinderung auf, wodurch die Längsverformung des Probekörpers beeinflusst wird. FEM-Berechnungen ergaben eine Differenz der Längsverformungen von etwa 3,5% bei einer Temperatur von 20°C (siehe Oeser [30]).

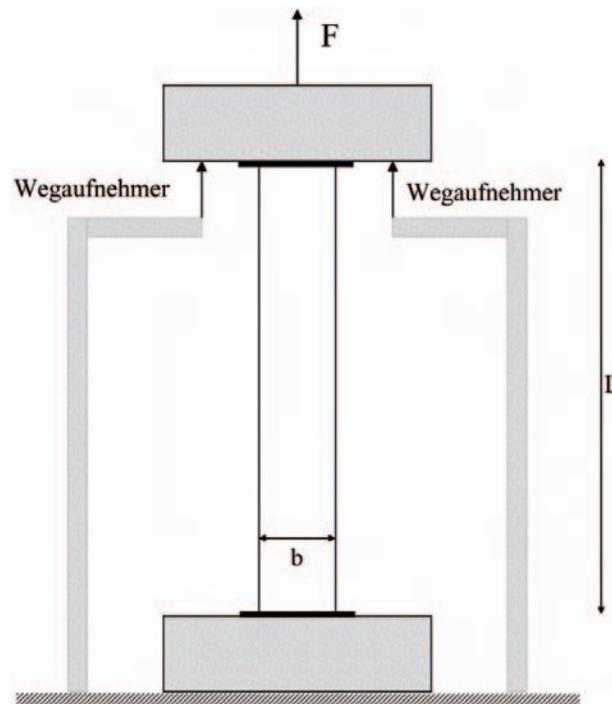


Abbildung 3.2: Prinzip des Einaxialen Zugschwellversuches

Die vertikale Spannung σ_x , die Dehnung ε_x in vertikaler Richtung sowie der absolute E-Modul $|E|$ können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_x = \frac{F}{b^2} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{L} \quad (3.2)$$

$$|E| = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (3.3)$$

3.2.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter

Einaxiale Zugschwellversuche werden in einem servohydraulischen Prüfstand durchgeführt, der Zugkräfte aufbringen kann und der über eine Temperaturkammer verfügen muss. Diese muss den Temperaturbereich von $-15^\circ C$ bis $20^\circ C$ zuverlässig abdecken. Üblicherweise werden Einaxiale Zugschwellversuche bei -15 , -10 , -5 , 0 und $5^\circ C$ durchgeführt. Um Ermüdungsversuche an verschiedenen Materialien und bei unterschiedlichen Temperaturen ausführen zu können, muss der Prüfstand schwellende Zugkräfte bis ca. 20 kN bei Belastungsfrequenzen bis mindestens 10 Hz aufbringen können.

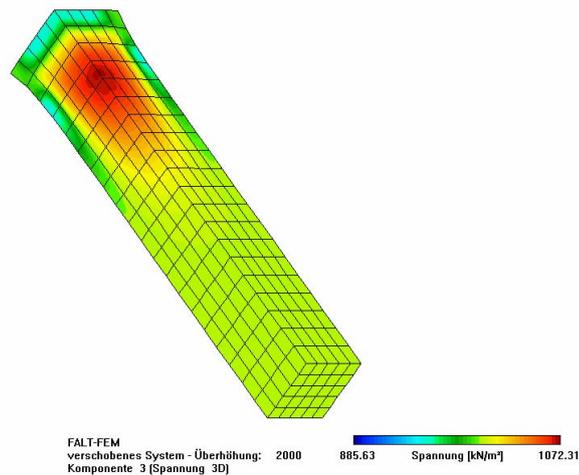


Abbildung 3.3: Verlauf der vertikalen Spannungskomponente im Einaxialen Zugschwellversuch

3.2.4 Probekörperabmessungen

Die Probekörperabmessungen im Einaxialen Zugschwellversuch ergeben sich in erster Linie aus dem Größtkorndurchmesser D_{GK} des zu untersuchenden Asphaltgemisches. Zusätzlich müssen versuchstechnische Grenzwerte eingehalten werden. Die empfohlenen Probekörperabmessungen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Größtkorndurchmesser D_{GK} [mm]	Probekörper-	
	Kantenlänge b [mm]	Länge L [mm]
≤ 11	40	160
$11 < D_{GK} \leq 16$	40	160
$16 < D_{GK} \leq 22$	55	160
≥ 32	80	160

Tabelle 3.1: Probekörperabmessungen im Einaxialen Zugschwellversuch

Die Verwendung zylindrischer Probekörper, die aus im Labor hergestellten Platten herausgebohrt werden, ist für den Einaxialen Zugschwellversuch denkbar. Bisher liegen jedoch nur geringe Erfahrungen mit diesem Probekörpertyp vor.

3.2.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die für den Einaxialen Zugschwellversuch notwendigen prismatischen Probekörper können entweder aus bestehenden Straßenbefestigungen entnommen werden oder im Labor hergestellt werden. Bei der Entnahme aus bestehenden Strecken ist aufgrund der notwendigen Probekörperabmessungen mit einem erhöhten Aufwand zu rechnen. Es müssen Bohrkern mit einem Durchmesser von 300 mm entnommen werden, aus denen anschließend in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser D_{GK} maximal 8 Probekörper gewonnen werden können. Bei der Herstellung der Probekörper im La-

bor muss eine praxisadäquate Verdichtung gewährleistet werden. Bewährt hat sich die Herstellung von Probepplatten mit dem Walzsektorverdichter, bei dem unterschiedliche Verdichtungsarten (wegeregelt, krafteregelt oder eine Kombination aus diesen beiden) ausgewählt werden können. Die Probekörper werden dann aus den so hergestellten Platten herausgesägt. Die unmittelbaren Randbereiche der im Walzsektorverdichter hergestellten Platten weisen im Allgemeinen eine schlechte Verdichtung auf und dürfen somit nicht in den Probekörpern enthalten sein.

Für jeden Probekörper müssen die genauen Abmessungen sowie die Raumdichte und damit der Hohlraumgehalt ermittelt werden. Die Bestimmung der Raumdichte erfolgt nach DIN EN 12697-6 [3].

Vor dem Versuch müssen die Adapter zur Lastübertragung mittels Epoxidharzkleber an die Proben angeklebt werden. Der Kleber muss mindestens 24 Stunden aushärten, um eine Verbindung zu gewährleisten, die verformungsbeständig ist, da sonst die Verformungen der Klebefuge zu den Probekörperverformungen addiert werden.

3.2.6 Versuchsdurchführung

Bevor der Versuch gestartet werden kann, muss der Probekörper in der Temperaturkammer der Prüfmaschine auf die vorgesehene Temperatur abgekühlt werden. Dazu wird er in die Prüfapparatur eingebaut und dann spannungsfrei auf die Prüftemperatur gebracht. Entsprechend der Prüftemperatur nimmt die Vortemperierung unterschiedliche Zeiten in Anspruch, da ein homogener Temperaturzustand im Probekörper sicher gestellt werden muss.

Anschließend wird die sinusförmige Belastung solange auf den Probekörper aufgebracht, bis dieser in zwei Teile zerbricht ($F = 0$). Die sinusförmige Belastung kann durch Unter- und Oberspannung charakterisiert werden. Die Unterspannung entspricht der kryogenen Zugspannung der jeweiligen Prüftemperatur. Bei Prüftemperaturen zwischen 0 und 5°C ist die Unterspannung somit sehr gering, aber niemals 0. Zur Aufstellung von Ermüdungsfunktionen muss die Oberspannung mindestens 3-fach variiert werden. Weiterhin sind mindestens drei Einzelversuche je Oberspannung erforderlich.

Während des Versuches erfolgt die Aufzeichnung von Kraft- und Wegsignalen entsprechend der voraussichtlichen Versuchsdauer permanent bzw. in Intervallen.

Weitergehende Ausführungen zum Einaxialen Zugschwellversuch können u. a. dem Bericht zum Forschungsprojekt *Nachhaltiger Straßenbau* [38] entnommen werden.

3.3 Spaltzugschwellversuch

3.3.1 Einleitung

Der Spaltzugschwellversuch wird an zylindrischen Probekörperscheiben durchgeführt, die zwischen zwei Lasteintragungsschienen über die Mantelfläche mit einer wiederholten sinusförmigen Druckkraft belastet werden. Der Spaltzugschwellversuch wird bei tiefen bis mittleren Temperaturen (-10°C bis 20°C) durchgeführt. Die Prüffrequenz, die Temperatur und die aufgebrachten Spannungen können variiert werden. In Abbildung 3.4 ist das Prinzip des Spaltzugschwellversuches dargestellt. Der Versuch wird üblicherweise in Kraftregelung durchgeführt. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Prüftechnik wird der Versuch zukünftig auch in Wegregelung durchführbar sein.

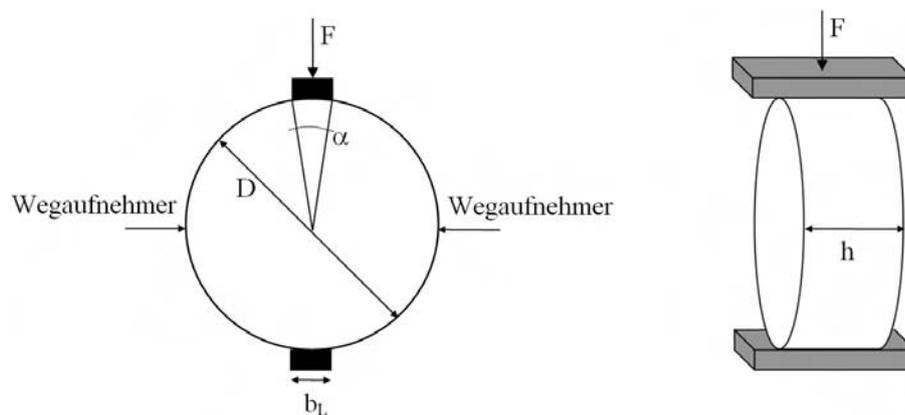


Abbildung 3.4: Prinzip des Spaltzugschwellversuches

3.3.2 Beanspruchungszustand im Probekörper

Der Spaltzugschwellversuch ist durch einen mehrachsialen Spannungszustand gekennzeichnet, der zudem nicht homogen ist. Im Probekörpermittelpunkt beträgt das Spannungsverhältnis $\sigma_x/\sigma_y = 1/3$. Im Folgenden soll der Spannungszustand näher betrachtet werden. Das für die Betrachtungen zugrundeliegende Koordinatensystem hat seinen Ursprung im Probekörpermittelpunkt (siehe Abbildung 3.5).

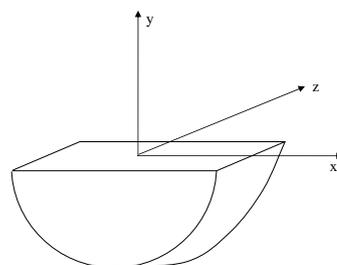


Abbildung 3.5: Koordinatensystem für die Spannungsberechnungen im Spaltzugschwellversuch

Die Gleichung für den Spannungsverlauf $\sigma_x(x = 0; y; z)$ wurde von Wijk [41] publiziert. Damit kann der Spannungsverlauf σ_x in der Lastachse für alle Wertepaare der Koordinaten y und z bestimmt werden.

$$\sigma_x(x = 0; y; z) = -\frac{2p}{\pi}(U - V + W \cdot X) \quad (3.4)$$

$$U = \frac{\left(1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right) \sin 2\alpha}{1 - 2\left(\frac{y}{r}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{y}{r}\right)^4}$$

$$V = \arctan \left(\frac{1 + \left(\frac{y}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2 \tan \alpha} \right)$$

$$W = \frac{4z^2 \tan \alpha}{\left(\frac{1}{\mu} + 1\right) r^2}$$

$$X = \frac{\left(1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right) \left(1 + 3\left(\frac{y}{r}\right)^2\right) + \left(1 + \left(\frac{y}{r}\right)^2\right) \tan^2 \alpha \left(1 - 3\left(\frac{y}{r}\right)^2\right)}{\left(\left(1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right)^2 + \left(1 + \left(\frac{y}{r}\right)^2\right)^2 \tan^2 \alpha\right)^2}$$

mit:

p	[N/mm ²]	über die Lasteintragungsschienen aufgebrachte Flächenlast
α	[°]	Winkel, der die Lasteintragungsschienen in Bezug auf den Probekörpermittelpunkt einschließt
y, z	[-]	Koordinaten entsprechend Abbildung 3.5

Eine über die Lasteintragungsschienen in den Probekörper eingetragene Druckkraft F kann mit Gleichung 3.5 in die Flächenlast p aus Gleichung 3.4 umgerechnet werden.

$$p = \frac{F}{2 \cdot h \cdot r \cdot \sin \alpha} \quad (3.5)$$

Für den Spaltzugschwellversuch wird vereinfachend der ebene Spannungszustand für den gesamten Probekörper angesetzt, d.h. dass die Höhe h des Probekörpers gegen Null geht. Mit dieser Annahme vereinfacht sich Gleichung 3.4 zu:

$$\sigma_x(x = 0; y; z = 0) = -\frac{2p}{\pi}(U - V) \quad (3.6)$$

Für die vertikale Spannung σ_y in der Lastachse gilt bei Annahme einer linienförmigen Belastung Gleichung 3.7.

$$\sigma_y(x = 0; y; z = 0) = -\frac{2F}{\pi h} \left(\frac{2}{D - 2y} + \frac{2}{D + 2y} + \frac{1}{D} \right) \quad (3.7)$$

In Abbildung 3.6 sind die Spannungsverläufe σ_x und σ_y entlang der y -Achse für $z = 0$ dargestellt. Die Spannung σ_x erreicht das absolute Maximum, also die größten Zugspannungen im Probekörpermittelpunkt. Gleichzeitig weist die Spannung σ_y im Probekörpermittelpunkt das Minimum, also die geringste Druckspannung auf.

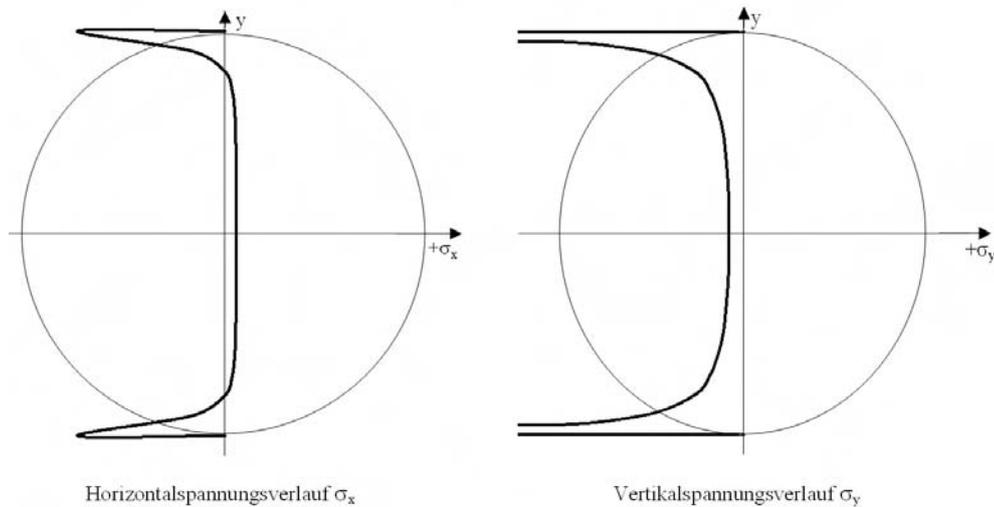


Abbildung 3.6: Spannungsverlauf σ_x und σ_y bei ($z = 0$)

Anhand von Berechnungen mit der FE-Methode konnte durch Oeser [31] gezeigt werden, dass in der Mitte des Probekörpers über einen Bereich von $\approx 0,7 D$ die horizontale Zugspannung σ_x nahezu konstant ist. Im Bereich der Lasteinleitungsstellen treten in horizontaler Richtung große Druckspannungen auf.

Unter Annahme eines ebenen und zweiachsigen Spannungszustandes im Probekörper (Zylinderscheibe) müsste das Verhältnis zwischen Probekörperhöhe und -durchmesser h/D auf maximal 0,2 begrenzt werden. Für dieses Verhältnis ist die Annahme einer nahezu gleichmäßig verteilten Horizontalspannung σ_x im Kernbereich des Probekörpers noch zutreffend. Für andere Verhältnisse h/D hingegen ändert sich die Horizontalspannung σ_x über die Probekörperhöhe. In Abbildung 3.7 ist die gemäß Gleichung 3.4 berechnete Horizontalspannung in den Außenflächen von Probekörpern mit verschiedenen Höhen ($h = 0, 20, 40 \text{ mm}$) dargestellt. Die angegebene Koordinate z entspricht dabei der halben Probekörperhöhe. Der dargestellte Spannungsverlauf kann auch für einen Probekörper mit den Abmessungen $D = 100 \text{ mm}$ und $h = 40 \text{ mm}$ angenommen werden. Hierbei sind die abgebildeten Spannungen entsprechend der Koordinatendefinition nach Abbildung 3.5 für die unterschiedlichen Ebenen (parallel zu den Außenflächen) gültig.

Die Ergebnisse praktischer Untersuchungen durch Borek [11] haben gezeigt, dass der Anstieg der Probekörperhöhe direkten Einfluss auf die Werte der ermittelten statischen Spaltzugfestigkeit (Zunahme) und die zugehörigen Streuungen (Abnahme) der Prüfergebnisse hat. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Optimum für die Probekörperabmessungen bei

$$h/D = 0,4 \tag{3.8}$$

liegt.

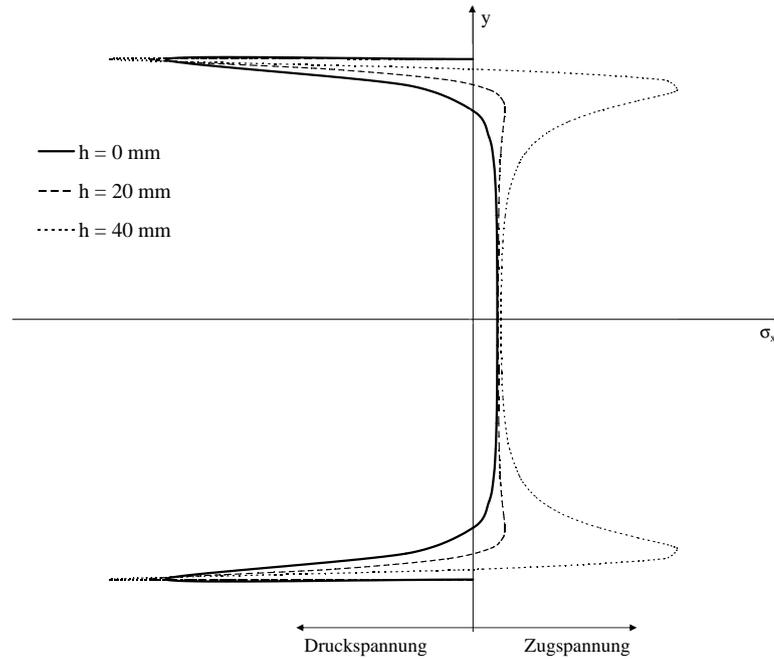


Abbildung 3.7: Verlauf der berechneten Horizontalspannung σ_x in der Außenfläche des Probekörpers für unterschiedliche Probekörperhöhen

Der Einfluss des Einzelkorns muss durch die Einhaltung von Probekörpermindestabmessungen so gering wie möglich gehalten werden. Die Vorgabe von $h \approx 3 \cdot D_{GK}$ hat sich bis zu einem Größtkorndurchmesser von $D_{GK} = 22 \text{ mm}$ bewährt. Bei Asphalten mit einem Größtkorn von 32 mm werden mit dieser Forderung Probekörper mit einer Höhe von 90 mm erforderlich (siehe AL Sp-Asphalt [2]).

Die Horizontalspannung σ_x , die zugehörige Dehnung ε_x sowie der absolute E-Modul können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma(1 + 3\mu)}{|E|} = \frac{2u(1 + 3\mu)}{\pi \cdot D(0,274 + \mu)} \quad (3.10)$$

$$|E| = \frac{\Delta F(0,274 + \mu)}{\pi \cdot D} \quad (3.11)$$

3.3.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter

Spaltzugschwellversuche werden in einem servohydraulischen Prüfstand durchgeführt, der ausschließlich Druckkräfte aufbringen können muss. Die Temperaturkammer muss den Temperaturbereich von -15°C bis 20°C zuverlässig abdecken. Üblicherweise werden Spaltzugschwellversuche bei -5 , 5 und 20°C durchgeführt. Um Ermüdungsversuche an verschiedenen Materialien und bei unterschiedlichen Temperaturen ausführen zu können, muss der Prüfstand schwellende Druckkräfte bis 50 kN bei Belastungsfrequenzen bis mindestens 10 Hz aufbringen können.

Breite der Lasteinleitungstreifen und Brucharten

In Abhängigkeit von der Breite der Lasteintragungsschienen können sich im Spaltzugschwellversuch verschiedene Brucharten ausbilden. Mitchell [14] beschreibt, dass eine linienförmige Lasteintragung theoretisch unendlich große Druckbeanspruchungen an der Lasteintragungsstelle zur Folge hätte, die zu einem Druckbruch führen würden. Zur Verminderung dieser hohen Druckbeanspruchung wird die Belastung über zwei Lasteintragungsschienen in den Probekörper übertragen. Die Breite der Lasteintragungsschienen b_L ist entsprechend der folgenden Kriterien zu wählen. Einerseits müssen die Schubspannungen im Lasteintragungsbereich möglichst klein sein, was durch eine Begrenzung der Lasteintragungsschienenbreite erreicht werden kann. Dadurch wird verhindert, dass sich primär Schubbrüche ausbilden, die zum Versagen des Probekörpers führen. Andererseits müssen die horizontalen Zugspannungen im Probekörper ausreichend groß sein, so dass ein Überschreiten der Zugfestigkeit bzw. Ermüdungsfestigkeit zum Bruch führt, was durch sehr geringe Breiten der Lasteintragungsschienen erreicht werden kann. Die Ausführungen von Borek [11] zeigen, dass sich Lasteintragungsschienen mit einer Breite von $12,7\text{ mm}$ für Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm bzw. $19,1\text{ mm}$ für Probekörper mit 150 mm Durchmesser sehr gut bewährt haben.

Die Abmessungen der Lasteintragungsschienen entsprechend DIN EN 12697-26 [5] sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

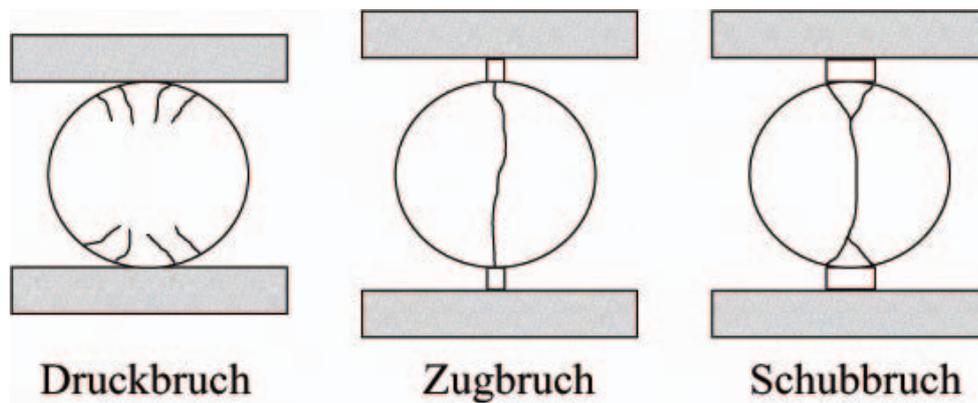


Abbildung 3.8: Brucharten beim Spaltzugversuch an Beton nach Mitchell [14]

Probekörperdurchmesser D	$[mm]$	100 ± 3	150 ± 3
Breite der Lasteinleitungstreifen b	$[mm]$	$12,7 \pm 0,2$	$19,1 \pm 0,2$
Biegeradius r	$[mm]$	50 ± 1	75 ± 1

Tabelle 3.2: Breite der Lasteintragungsschienen im Spaltzugversuch

Aufgrund der thermoviskosen Eigenschaften von Asphalt kann bei der Anwendung des Spaltzugschwellversuchs bei höheren Temperaturen ($T > 20^\circ C$) zusätzlich die Versagensart Fließen auftreten, wobei sich die beschriebenen Brucharten überlagern. Da bei Ermüdungsuntersuchungen die Probekörper nicht bis zur Festigkeitsgrenze bei einmaliger Belastung beansprucht werden und die

Prüf­temperatur auf $T = 20^{\circ}\text{C}$ be­grenzt wird, kann das Ver­sa­gen durch Flie­ßen bzw. einen reinen Schub­bruch ver­mie­den wer­den.

Eigene Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera haben gezeigt, dass der Bruch sowohl bei statischen weggeregelten Spaltzugversuchen als auch bei kraftgeregelten Spaltzugschwellversuchen in der Probekörpermitte initiiert wird und sich dann nach außen hin fortsetzt (siehe Abbildung 3.9). Insofern kann davon ausgegangen werden, dass die Zugbeanspruchung in der Mitte des Probekörpers das Versagenskriterium beim Spaltzugschwellversuch ist. Von dem nach Versuchsende vorliegenden Bruchbild kann nicht auf das Versagenskriterium geschlossen werden. Im dargestellten Beispiel versagt der Probekörper durch Überschreiten der Zugfestigkeit des Asphaltes in der Probekörpermitte. Dies ist in Teilbild 1 deutlich zu erkennen. In Teilbild 2 hat sich der Riss bis in den unteren Lasteintragungsbereich vergrößert. Zu diesem Zeitpunkt ist der Probekörper nicht mehr in der Lage Zugspannungen aufzunehmen. Aufgrund der weiterhin einwirkenden sinusförmigen Druckkraft und der Lage einzelner Gesteinskörner im unteren Lasteintragungsbereich bildet sich ein Keil aus, der jedoch nicht auf ein Versagen infolge eines Schubbruches hinweist, da er erst nach dem Versagen des Probekörpers entstanden ist (siehe Teilbilder 3 und 4).

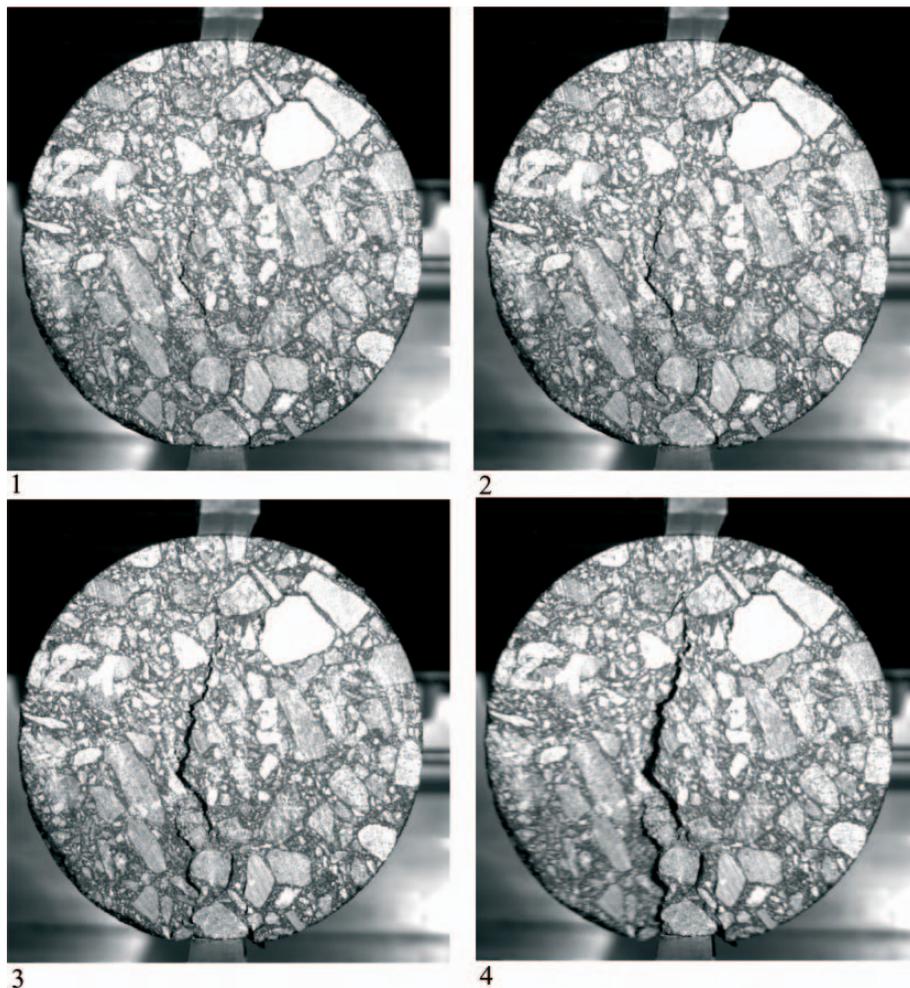


Abbildung 3.9: Rissentstehung im Spaltzugschwellversuch bei 20°C

3.3.4 Probekörperabmessungen

Die Probekörperabmessungen für den Spaltzugversuch ergeben sich einerseits aus dem Ansatz eines zweiachsigen Spannungszustandes und den daraus resultierenden geometrischen Anforderungen und andererseits aus versuchstechnischen und gemischspezifischen Kennwerten. In Tabelle 3.3 sind die gemäß AL Sp-Asphalt [2] empfohlenen Probekörperabmessungen zusammengefasst.

Größtkorndurchmesser D_{GK} [mm]	Probekörper-		Verhältnis h/D [-]
	Durchmesser D [mm]	Höhe h [mm]	
≤ 11	100	40	0,4
$11 \leq D_{GK} \leq 16$	100	40	0,4
$16 \leq D_{GK} \leq 22$	150	60	0,4
≥ 32	150	90	0,6

Tabelle 3.3: Probekörperabmessungen im Spaltzugversuch

3.3.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die zylindrischen Probekörper können entweder aus bestehenden Straßenbefestigungen entnommen oder im Labor hergestellt werden. Bei der Herstellung der Probekörper im Labor muss eine praxisadäquate Verdichtung gewährleistet werden. Marshall-Probekörper, die einer schlagenden Verdichtung unterzogen werden, sind somit nicht geeignet.

Bewährt hat sich hingegen die Herstellung von Probeplatten mit dem Walzsektorverdichter, bei dem unterschiedliche Verdichtungsarten (weggeregelt, kraftgeregelt oder eine Kombination aus diesen beiden) ausgewählt werden können. Die Probekörper werden dann mit dem Kernbohrgerät aus den Platten herausgebohrt.

Für jeden Probekörper müssen die genauen Abmessungen sowie die Raumdichte und somit der Hohlraumgehalt ermittelt werden. Die Bestimmung der Raumdichte erfolgt nach DIN EN 12697-6 [3].

Vor der Versuchsdurchführung müssen die Probekörper bis zur Massekonstanz getrocknet werden. Für jeden Probekörper ist die mittlere Höhe und der mittlere Durchmesser zu bestimmen. Die Messung der Höhe des Probekörpers erfolgt im Allgemeinen mit Hilfe eines Messschiebers an vier Mantellinien des Probekörpers, die im Abstand von $1/4$ des Mantelumfanges parallel zur Probekörperachse angeordnet sind. Der Durchmesser des Probekörpers wird durch zwei Einzelmessungen auf der Mantelfläche des Zylinders ermittelt. Die Messungen erfolgen dabei um 90° versetzt zueinander.

Zusätzlich muss geprüft werden, ob die Probekörper zueinander planparallele Stirnflächen besitzen, die im rechten Winkel zur Mantelfläche liegen. Da für Asphaltprobekörper hierzu noch keine Anforderungen existieren, können die Anforderungen aus der AL Sp-Beton [1] übernommen wer-

den. Demnach ist eine Abweichung von maximal 3° zum rechten Winkel zwischen Stirnfläche und Mantelfläche ($\alpha = 90^\circ \pm 3^\circ$) zulässig.

Die Lagerung der Probekörper muss bei Umgebungstemperatur ($T < 20^\circ C$) und vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt in einem abgedunkelten Raum erfolgen. Die Probekörper müssen auf der Zylindergrundfläche bis zum Versuch gelagert werden.

3.3.6 Versuchsdurchführung

Die trockenen Probekörper müssen vor dem Versuchsbeginn mindestens 4 Stunden bei der gewählten Prüftemperatur ($T \leq 20^\circ C$) gelagert werden, um eine gleichmäßige Temperatur im Probekörper zu sichern. Im nächsten Schritt wird der Halterahmen (siehe Abbildung 3.10) zur Positionierung der Wegaufnehmer am Probekörper befestigt und die Wegaufnehmer mit einem definierten Weg von $120 - 160 \mu m$ an den Probekörper angelegt. Die Wegaufnehmer werden zu Versuchsbeginn auf Null gesetzt.

Der Probekörper wird so zwischen den Lasteintragungsschienen positioniert, dass sich die Mitte des Probekörpers direkt unter der Lastachse der Prüfmaschine befindet. Im nächsten Schritt wird der Probekörper mit der jeweiligen Unterspannung eingespannt. Bei tiefen Temperaturen ($T \leq 10^\circ C$) ist dies die kryogene Zugspannung der jeweiligen Temperatur, die mit Hilfe des Abkühlversuches ermittelt wird. Bei mittleren Temperaturen ($10 < T \leq 20^\circ C$) treten keine kryogenen Zugspannungen auf, so dass eine Haltespannung von $0,035 N/mm^2$ zur Lagesicherung des Probekörpers notwendig ist.

Anschließend wird der Probekörper mit einer sinusförmigen Druckschwellkraft belastet bis die Abbruchkriterien (Makroriss, Bruch des Probekörpers, Schutz der Wegaufnehmer) erreicht sind.

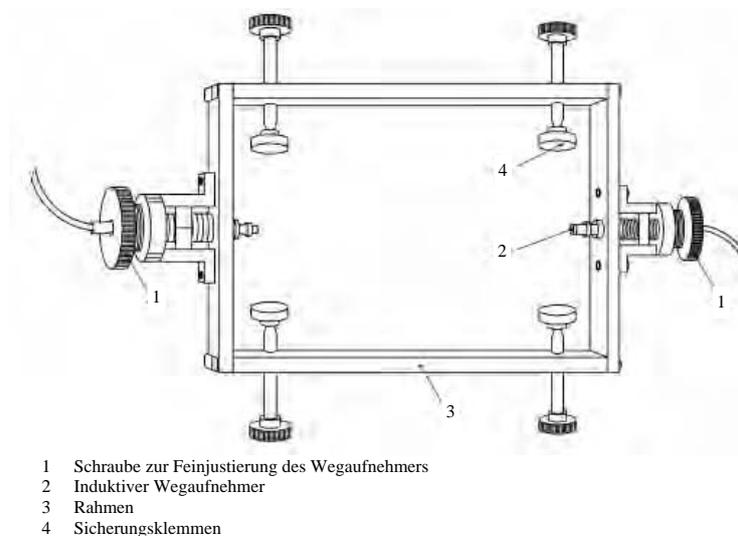


Abbildung 3.10: Halterahmen zur Positionierung der Wegaufnehmer im Spaltzugschwellversuch

3.4 Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung

3.4.1 Einleitung

Der Beanspruchungszustand eines Probekörpers im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung entspricht weitgehend dem an der Unterseite der Asphaltbefestigung vorliegenden tatsächlichen Zustand (siehe Abbildung 3.1). Bei diesem Versuch wird auf einen zylindrischen Probekörper über die an den Stirnflächen angeklebten Adapter vertikal eine Zugschwellbelastung und zusätzlich über die Mantelfläche horizontal eine Druckschwellbelastung aufgebracht. Vertikal kann auch eine Zug-Druck-Wechselbelastung auf den Probekörper aufgebracht werden, was der tatsächlichen Belastungssituation noch besser entsprechen würde. In der vorliegenden Arbeit wurden vertikal nur Zugschwellbelastungen aufgebracht. Die Prüffrequenz, die Temperatur und die aufgebrachten Spannungen können variiert werden. In Abbildung 3.11 ist das Prinzip des Triaxialversuches mit Zug-/Druckschwellbelastung dargestellt. Der Versuch kann sowohl in Weg- als auch in Kraftregelung durchgeführt werden.

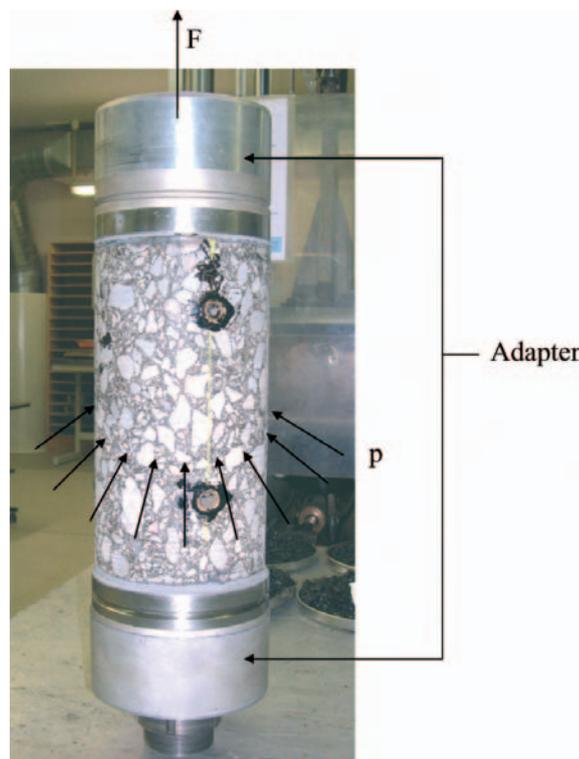


Abbildung 3.11: Prinzip des Triaxialversuches mit Zug-/Druckschwellbelastung

3.4.2 Beanspruchungszustand im Probekörper

Aufgrund des rotationssymmetrischen Probekörpers sind die zweite und dritte Spannungskomponente (σ_y und σ_z) des dreiaxialen Spannungszustandes gleich groß.

Abgesehen von den Bereichen in unmittelbarer Nähe der Stirnflächen (angeklebte Adapter), in denen sich wegen der Querdehnungsbehinderung ein undefinierter mehraxialer und inhomogener Be-

anspruchungszustand einstellt, kann im mittleren Bereich des Probekörpers von einem homogenen mehraxialen Spannungszustand ausgegangen werden. In Abbildung 3.12 ist der Verlauf der vertikalen Spannung σ_x als Ergebnis einer Finite-Elemente-Rechnung für ein Achtel eines Probekörpers dargestellt. Im Inneren des gesamten Probekörpers sind die auftretenden Zugspannungen homogen. Aufgrund der Verklebung der Stirnflächen mit den Adaptern treten Querdehnungsbehinderungen auf, die zu geringeren Zugspannungen auf der Mantelfläche als in der Mitte des Probekörpers führen. Wie Abbildung 3.12 zeigt, ist dieser inhomogene Bereich kleiner als $1/8$ der Probekörperhöhe.

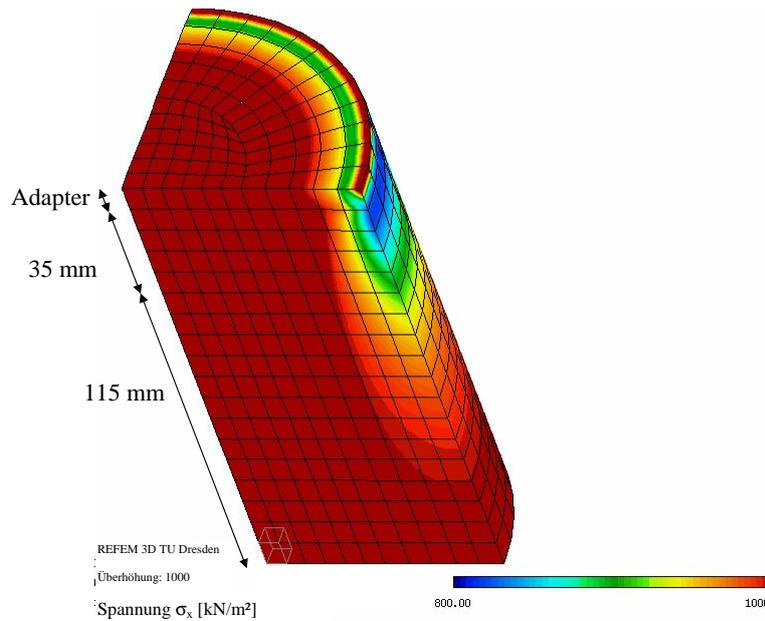


Abbildung 3.12: Verlauf der vertikalen Spannungen σ_x im Triaxialversuch

Die Magnete des Systems zur Messung der Vertikalverformungen sind in den Viertelspunkten der Höhe des Probekörpers eingesetzt. Die Messung der Verformung des Probekörpers in Längsrichtung erfolgt zwischen den beiden Magnetebenen. In diesem Bereich ist nachweislich ein homogener definierbarer Spannungszustand vorhanden. Die gemessenen Verformungen bzw. Dehnungen können so eindeutig der Spannung in vertikaler Richtung zugeordnet werden.

3.4.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter

Es existieren verschiedene Bauformen von Triaxialprüfanlagen. Im folgenden soll die Dresdner Triaxialprüfanlage genauer beschrieben werden, die für Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm konzipiert ist (siehe Abbildung 3.13). Mit der Prüfanlage können vertikal dynamische Kräfte bis $-70/+50 \text{ kN}$ bei einer maximalen Belastungsfrequenz von 10 Hz auf einen Probekörper aufgebracht werden. Zusätzlich können in horizontaler Richtung Belastungen in Form eines Stützdrukkes bis $1,0 \text{ N/mm}^2$ realisiert werden, wobei als Medium Hydrauliköl verwendet wird. Der Probekörper wird durch eine in die Triaxialzelle eingebaute Gummi-Membran vor diesem Öl geschützt. Die Mantelfläche der Probekörper wird mit einer dünnen Latexhülle versehen, um einerseits die Gummi-Membran zu schützen und um andererseits die Bewegung zwischen Gummi-Membran und Probekörper unter Verwendung von Glycerin als Gleitmittel zu gewährleis-

ten. Das Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Belastung kann innerhalb der Betriebsparameter frei gewählt werden. Die Festlegung des Phasenwinkels zwischen Vertikaler und horizontaler Belastung kann ebenso frei gewählt werden. Unter Berücksichtigung der Untersuchungen von Renken [34] wurde der Phasenwinkel mit $\phi = 10\text{ ms}$ festgelegt. Die Temperaturkammer arbeitet in einem Bereich von -10 bis 50°C .

Während der Ermüdungsversuche werden die elastischen und plastischen Verformungen der Probekörper mit verschiedenen Systemen gemessen und aufgezeichnet. Das externe induktive Wegmesssystem misst die vertikalen plastischen Verformungen über die gesamte Probekörperhöhe und die angeklebten Adapter und wird zur Kontrolle der Versuchsabbruchkriterien (Erreichen der maximal möglichen vertikalen Verformung) genutzt. Das interne berührungslose Messsystem basiert auf sechs Magneten, die mit Bitumen in den Probekörper eingeklebt werden und sechs Spulen, die sich in der Wand der Triaxialzelle befinden. Mit diesem System können die vertikalen Verformungen - elastisch und plastisch - in der Probekörpermitte gemessen werden. Der vertikale Abstand zwischen den Magneten beträgt 150 mm. In diesem Bereich ist die Spannungsverteilung nicht durch die angeklebten Adapter beeinflusst und es liegt ein homogener Spannungszustand vor. Das horizontale Messsystem besteht aus neun induktiven Wegaufnehmern, die in drei Ebenen (75, 150 und 225 mm über der Grundplatte) radial in die Triaxialzelle integriert sind. In Abbildung 3.11 ist ein für den Versuch vorbereiteter Probekörper abgebildet. Zwei der sechs Magnete sowie die obere und untere Adapterplatte sind zu sehen.



Abbildung 3.13: Dresdner Triaxialprüfanlage

3.4.4 Probekörperabmessungen

Bedingt durch die Abmessungen der Triaxialzelle konnten nur zylindrische Probekörper mit festen Abmessungen, unabhängig vom Größtkorndurchmesser des Asphaltgemisches untersucht werden. Der Durchmesser der Probekörper betrug $D = 150\text{ mm}$ und die Höhe $H = 290\text{ mm}$. Die Probekörperhöhe wurde gegenüber dem Standard um 10 mm vermindert, um eine maximale vertikale Verformung während des Versuches zu ermöglichen. So konnte sichergestellt werden, dass die Probekörper am Versuchsende gerissen waren.

3.4.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die Probekörper für die Triaxialversuche wurden aus im Labor hergestellten Asphaltplatten herausgebohrt. Die Asphaltplatten für die nachfolgend beschriebenen Versuche mit den Abmessungen $40 \times 50 \times 17\text{ cm}$ wurden im Walzsektorverdichter der FMPA der BTU Cottbus hergestellt. Die Herstellung von Probekörpern mit Hilfe des Gyrators oder durch schlagende Verdichtung mit einem geeigneten Hilfsmittel haben sich nicht bewährt (siehe Abschnitt 7.1).

Aus jeder Platte wurden senkrecht zur Verdichtungsrichtung zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen. Wie in Abbildung 3.14 zu erkennen ist, ist die Übertragbarkeit von Belastungs- und Verdichtungsrichtung von der Straßenbefestigung auf den Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung sehr gut.

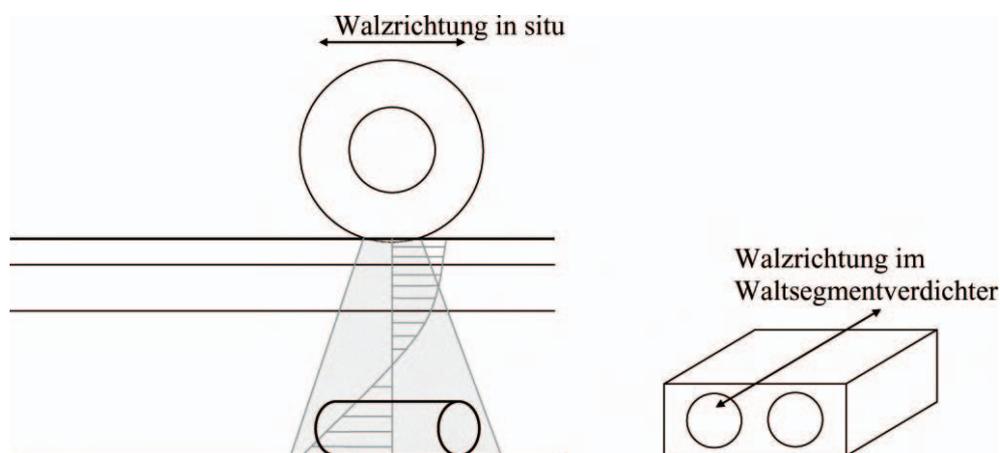


Abbildung 3.14: Belastungs- und Verdichtungsrichtung bei der Probekörperherstellung für den Triaxialversuch und in der Straßenbefestigung

Die Bohrkerne wurden im Vorfeld der Versuche auf die entsprechende Länge gekürzt und planparallel geschliffen. Anschließend wurden die Probekörper gründlich gereinigt, bevor die Raumdichte mit dem Verfahren B entsprechend DIN EN 12697-6 [3] bestimmt werden konnte.

Die Messung der Höhe des Probekörpers erfolgt mit Hilfe eines Messschiebers an vier Mantellinien des Probekörpers, die im Abstand von $1/4$ des Mantelumfanges parallel zur Probekörperachse angeordnet sind. Der Durchmesser des Probekörpers wird in fünf Höhenebenen (0 mm , 75 mm , 150 mm ,

225 mm und 290 mm) in jeweils zwei Einzelmessungen auf der Mantelfläche des Zylinders bestimmt, die rechtwinklig zueinander liegen. Anschließend wurden für Durchmesser und Höhe die Mittelwerte aus den Einzelmessungen gebildet.

Weiterhin müssen die sechs Löcher für die Magnete des Vertikalmesssystems in den Probekörper gebohrt werden. Anschließend müssen die sechs Magnete mit Hilfe des entsprechenden Bitumens in die Löcher eingeklebt werden.

Damit die Zugbelastung auf den Probekörper übertragen werden kann, müssen die Adapter mit Hilfe von 2-Komponenten-Epoxidharz angeklebt werden. Dabei musste auf eine exakte Ausführung der Klebung geachtet werden. Die Mindestaushärtungszeit des Klebers beträgt 24 Stunden.

3.4.6 Versuchsdurchführung

Der vorbereitete Probekörper wird in die Triaxialprüfmaschine eingebaut und anschließend mindestens sechs Stunden bei der gewählten Prüftemperatur temperiert. Durch diese lange Temperierzeit kann eine gleichmäßige Temperatur im Probekörper gewährleistet werden. Versuche im Rahmen der Diplomarbeit von Grohs [18] haben gezeigt, dass die Temperierung des Probekörpers mit angelegter Gummi-Membran erfolgen muss, da andernfalls die erforderliche Zeitspanne vergrößert werden muss.

Anschließend wird der Probekörper solange der sinusförmigen Belastung (vertikale Zugbelastung und horizontale Druckbelastung) ausgesetzt, bis der Probekörper reißt oder die Abbruchkriterien zum Schutz der Prüfeinrichtung erreicht sind.

3.5 2-Punkt-Biegeversuch

3.5.1 Einleitung

Der 2-Punkt-Biegeversuch kann an prismatischen oder trapezförmigen Probekörpern durchgeführt werden. Der auf eine Grundplatte geklebte Probekörper wird am Kopfende durch eine Wechselbelastung mit einer konstanten Amplitude ausgelenkt. Die Prüffrequenz, die Temperatur und die aufbrachten Spannungen können variiert werden. Der Versuch kann kraft- und weggeregelt ausgeführt werden. In Abbildung 3.15 ist das Prinzip des 2-Punkt-Biegeversuches gezeigt.



Abbildung 3.15: Darstellung einer möglichen Prüfeinrichtung für den 2-Punkt-Biegeversuch

3.5.2 Beanspruchungszustand im Probekörper

Der Spannungszustand im 2-Punkt-Biegeversuch ist sowohl in den prismatischen als auch in trapezförmigen Probekörpern inhomogen. In prismatischen Probekörpern ist der Spannungszustand über die Höhe und die Länge inhomogen, beim trapezförmigen Probekörper nur über die Höhe. Durch die Klebung am Fuß der Probekörper treten zusätzliche Störeinflüsse auf. In Abbildung 3.16 ist der vertikale Spannungszustand σ_x in einem trapezförmigen Probekörper bei Auslenkung nach links dargestellt. An der linken Flanke des Probekörpers treten dabei die größten Druckspannungen auf. Der Spannungsverlauf an der rechten Flanke des Probekörpers zeigt die höchste Zugspannung, die während des Auslenkungsvorganges auftreten kann. Die maximalen Zug- bzw. Druckspannungen breiten sich insgesamt über einem Bereich von $\approx 0,7 \cdot h$ in der Randfaser des trapezförmigen Probekörpers aus. FEM-Simulationen haben gezeigt, dass die größten Schädigungen und somit die Risse in etwa bei $0,45 \cdot h$ über der Grundplatte zu beobachten sein müssten (siehe Huurman [23]).

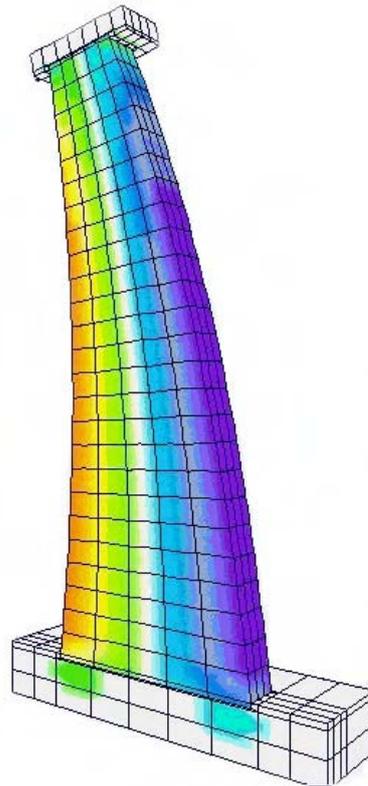


Abbildung 3.16: Vertikaler Spannungszustand σ_x im 2-Punkt-Biegeversuch bei maximaler Auslenkung, Huurman [23]

3.5.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter

Die Prüfmaschine zur Durchführung von 2-Punkt-Biegeversuchen muss ein System sein, das es ermöglicht, den Kopf des Probekörpers einer sinusförmigen Verschiebung mit festgelegter Frequenz zu unterziehen. Die Prüfeinrichtung muss in einer Temperaturkammer platziert werden, um während des Versuches gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten.

Um Ermüdungsversuche an verschiedenen Materialien und bei unterschiedlichen Temperaturen ausführen zu können, muss der Prüfstand Kräfte bis ca. 50 N bei einer standardmäßigen Belastungsfrequenz von 25 Hz aufbringen können. Bei weggeregelter Steuerung beträgt die maximale Verformung ca. $\pm 5\mu\text{m}$.

3.5.4 Probekörperabmessungen

Die Abmessungen für die prismatischen und die trapezförmigen Probekörper sind in Abhängigkeit vom Größtkorn des Asphaltgemisches in DIN EN 12697-24 [4] festgelegt. In den Tabellen 3.5 und 3.4 sind die Abmessungen zusammengefasst.

Größtkorndurchmesser D_{GK} [mm]	Probekörperabmessungen	
	Kantenlänge b [mm]	Höhe h [mm]
≤ 22	40 ± 1	160 ± 1
≥ 22	80 ± 1	320 ± 1

Tabelle 3.4: Abmessungen der prismatischen Probekörper für den 2-Punkt-Biegeversuch

Größtkorn- durchmesser D_{GK} [mm]	Probekörperabmessungen			
	Breite (Fuß) b_F [mm]	Breite (Kopf) b_K [mm]	Tiefe e [mm]	Höhe h [mm]
	≤ 14	56 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
$14 \leq D_{GK} \leq 20$	70 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	250 ± 1
$20 \leq D_{GK} \leq 40$	70 ± 1	25 ± 1	50 ± 1	250 ± 1

Tabelle 3.5: Abmessungen der trapezförmigen Probekörper für den 2-Punkt-Biegeversuch

3.5.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die erforderlichen Probekörper in Form eines gleichschenkligen Trapezes bzw. eines Prismas können aus im Labor hergestellten Platten herausgesägt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Probekörper durch Aussägen aus Bohrkernen zu gewinnen. Die Abmaße der Probekörper sind zu überprüfen und die Raumdichte ist festzustellen.

Vor dem Einbau in die Prüfmaschine muss jeder Probekörper mit seiner Grundfläche auf eine mindestens 20 mm dicke Grundplatte geklebt werden. Über die am Kopf des Probekörpers angeklebte Abdeckung wird die Verschiebung aufgebracht. Der korrekte Sitz der Abdeckung und des Probekörpers auf der Grundplatte muss überprüft werden.

3.5.6 Versuchsdurchführung

Die Temperaturkammer der Prüfeinrichtung und der Probekörper müssen auf die gewählte Prüftemperatur gebracht werden. Für den Probekörper ist eine Temperierzeit von mindestens zwei Stunden einzuplanen.

Anschließend wird der Probekörper bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums (50% der Anfangssteifigkeit bzw. -kraft) einer sinusförmigen Wechselbeanspruchung ausgesetzt. Der Versuch wird wegeregelt durchgeführt. Die aufgebrachten Kräfte müssen gemäß DIN EN 12697-24 [4] lediglich zwischen dem 100. und 500. Lastwechsel aufgezeichnet werden. Die Verschiebung v und die Lastwechselzahl N müssen kontinuierlich aufgezeichnet werden.

3.6 4-Punkt-Biegeversuch

3.6.1 Einleitung

Beim 4-Punkt-Biegeversuch wird ein schlanker prismatischer Probekörper (Balken) einer wiederholten sinusförmigen Beanspruchung durch Biegung unterzogen. Die Lasteinleitung bzw. die Auflagerung des Probekörpers wird über vier Klemmen realisiert. Die Prüffrequenz, die Temperatur und die aufgebrachtten Spannungen können variiert werden. Die äußeren und inneren Klemmen müssen derart konstruiert sein, dass der damit eingespannte Probekörper frei verbiegen und sich horizontal bewegen kann. Die Belastung kann sowohl dehnungs- als auch kraftkonstant erfolgen. Abbildung 3.17 zeigt den erforderlichen Prüfeinsatz des 4-Punkt-Biegeversuchs inklusive Probekörper.



Abbildung 3.17: Darstellung einer möglichen Prüfeinrichtung für den 4-Punkt-Biegeversuch

3.6.2 Beanspruchungszustand im Probekörper

Der Spannungszustand im 4-Punkt-Biegeversuch ist unter Berücksichtigung der Auflager- und Belastungsbedingungen inhomogen und aufgrund der üblicherweise vorliegenden Wechselbeanspruchung wechseln sich Druck- und Zugspannungen in ein und der selben Randfaser ab. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass bereits bei 20°C ein signifikanter Unterschied zwischen den E-Moduln bei Druck- bzw. Zugbelastung besteht. Durch einen solchen Unterschied der E-Moduln würde die Spannungsnulllinie nicht in der Mitte der Probekörperhöhe liegen und sich daher bei jeder Wechselbeanspruchung nach oben bzw. unten verschieben. Beobachtungen an der TU Delft haben gezeigt, dass die Probekörper aufgrund der außergewöhnlichen Beanspruchungen in den Bereichen der inneren Klemmen im Allgemeinen an diesen Stellen brechen. Abbildung 3.18 zeigt den sich im Probekörper ausbildenden Spannungszustand infolge einer vorgegebenen vertikalen Verschiebung der inneren Klemmen.

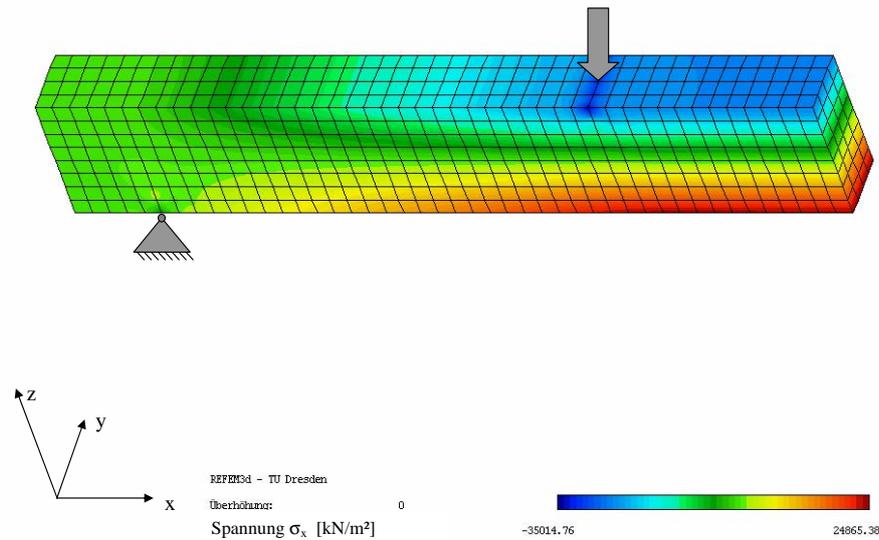


Abbildung 3.18: Horizontalspannungszustand σ_x im 4-Punkt-Biegeversuch infolge einer Druckbelastung

3.6.3 Versuchseinrichtung und Prüfparameter

Die Prüfeinrichtung muss mit Hilfe eines geeigneten Mechanismus über zwei am Probekörper befestigte innere Klemmen in der Lage sein, eine sinusförmige Belastung auf den Probekörper aufzubringen. Die in die Prüfeinrichtung integrierte Kraftmessdose muss einen Messbereich von mindestens $\pm 2000\text{ N}$ haben. Die Verschiebung des Probekörpers infolge der Belastung muss an der Oberseite oder an der Unterseite des Probekörpers an einer der beiden inneren Klemmen oder zwischen ihnen gemessen werden. Die Prüfeinrichtung muss sich während des Versuches in einer Temperaturkammer befinden. Die Versuche werden üblicherweise bei 0 oder 20°C durchgeführt. Die Belastungsfrequenzen für den 4-Punkt-Biegeversuch liegen zwischen $0, 1$ und 60 Hz .

3.6.4 Probekörperabmessungen

Die Probekörper müssen die Form eines prismatischen Balkens aufweisen und entsprechend des Größtkorndurchmessers des zu prüfenden Asphaltgemisches spezifische Abmessungen besitzen. Abbildung 3.19 und Tabelle 3.6 beinhalten die Grenzwerte für Probekörperabmessungen. Die Anordnung der Klemmen muss in Probekörperlängsrichtung symmetrisch erfolgen.

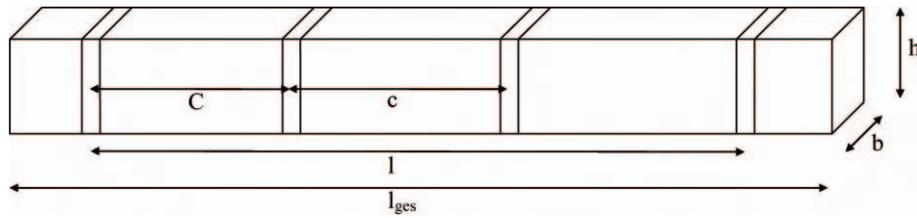


Abbildung 3.19: Probekörpergeometrie im 4-Punkt-Biegeversuch

Probekörperabmessung	Grenzwert
effektive Länge l	$\geq 6 \cdot h$ bzw. b
Breite b	$\geq 3 \cdot D_{GK}$
Höhe h	$\geq 3 \cdot D_{GK}$
Gesamtlänge l_{ges}	$\leq 1,1 \cdot l$
Abstand C	$\approx l/3$

Tabelle 3.6: Grenzwerte für die Abmessungen der prismatischen Probekörper für den 4-Punkt-Biegeversuch

3.6.5 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die Probekörper müssen durch Aussägen aus Platten hergestellt werden, die im Labor hergestellt oder aus Straßenbefestigungen entnommen wurden. Werden Platten im Labor hergestellt, so müssen diese mindestens 20 mm dicker sein als die angestrebte Höhe H des Probekörpers. Weiterhin muss ein Mindestabstand zum Plattenrand von 20 mm eingehalten werden. Diese Grenzwerte gelten grundsätzlich auch für Probekörper, die aus Straßenbefestigungen entnommen werden sollen.

Für alle Probekörper sind der Hohlraumgehalt sowie die tatsächlichen Abmessungen zu dokumentieren. Nach dem Trocknen sind die Probekörper vollflächig aufliegend bei max. 20°C zu lagern. Abschließend müssen die Klemmen mit einem geeigneten Kleber am Probekörper befestigt werden. Dies kann z.B. mit Hilfe von Bitumen oder Epoxydharzkleber erfolgen.

3.6.6 Versuchsdurchführung

Der Probekörper sowie die Prüfeinrichtung müssen innerhalb einer Zeitspanne von 2-6 Stunden auf die Prüftemperatur gebracht werden. Anschließend wird der Probekörper mit den beiden äußeren Klemmen in den Belastungsrahmen eingebaut. Die erforderliche Kraft zur Initiierung der gewünschten Zugspannung wird über die beiden inneren Klemmen aufgebracht. Die DIN EN 12697-24 [4] fordert pro Belastungsstufe (dehnungs- oder kraftkonstante Regelung) mindestens sechs Wiederholungen. Die Belastung wird mindestens bis zum Abfall des komplexen Steifigkeitsmoduls auf die Hälfte des Ausgangswertes für die dehnungskonstante Regelung bzw. bis zur Verdopplung der anfänglichen Verschiebung (bzw. Dehnung) bei kraftkonstanten Versuchen aufgebracht. Die Belastungsstufen müssen so gewählt werden, dass die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen dieser Kriterien in einem Bereich von 10.000 bis 2.000.000 liegen.

3.7 Diskussion der Prüfverfahren

Die beschriebenen Ermüdungsversuche weisen jeweils Vor- und Nachteile auf, die zu einer Bewertung der einzelnen Versuche herangezogen werden sollen.

In der Lastachse treten die größten Zugspannungen in horizontaler Richtung an der Unterseite der Asphalttragschicht auf. An dieser Stelle wirkt infolge der Verkehrsbelastung vertikal zusätzlich eine Druckbeanspruchung auf den Asphalt. Dieser Beanspruchungszustand wird im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung am Besten abgebildet. Die über die gesamte Mantelfläche des Probekörpers wirkende rotationssymmetrische Druckbeanspruchung ist im Vergleich zur wirklichen Beanspruchung (ebener Druckspannungszustand) eine vertretbare Vereinfachung. Die Nachteile des Triaxialversuches mit Zug-/Druckschwellbelastung liegen in der Durchführung der Versuche. Die Probekörperherstellung und -vorbereitung ist sehr aufwändig. Eine Beurteilung von bestehenden Straßenbefestigungen wäre ausschließlich für Tragschichten entsprechender Dicke möglich.

Die anderen beschriebenen Ermüdungsversuche können den tatsächlichen Beanspruchungszustand an der Unterseite der Asphalttragschicht in der Lasteinleitungssachse nur mit Einschränkungen wiedergeben. Im Spaltzugschwellversuch ist das Verhältnis zwischen Zug- und Druckspannungskomponente im Probekörpermittelpunkt konstant bei $1/3$. In der Realität liegt das Verhältnis zwischen Zug- und Druckspannungskomponente in etwa bei $20/1$. Ein großer Vorteil dieses Versuches ist die einfache Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung. Die Probekörper müssen nur aus im Labor hergestellten Platten oder aus bestehenden Straßenbefestigungen ausgebohrt werden und zur Versuchsdurchführung genügt eine temperierbare dynamische Druckprüfeinrichtung.

Im Einaxialen Zugschwellversuch wird ausschließlich eine Zugspannung in den Probekörper induziert, wobei an den Stirnflächen des Probekörpers infolge der Klebung Störungen auftreten. Die Störstellen an den geklebten Stirnflächen führen zu zusätzlichen Streuungen der Prüfergebnisse. Der Beanspruchungszustand an der Unterseite der Asphalttragschicht kann mit dem Versuch nicht nachgebildet werden. Der Versuch ist jedoch für die Beurteilung der Ermüdungseigenschaften von Deckschichten bedingt geeignet. Außerhalb der Lastachse treten die größten Zugspannungen an der Oberseite der Asphaltdeckschicht auf. Dort treten sowohl radiale als auch tangentielle Beanspruchungskomponenten auf. Weiterhin muss außerhalb der Lastachse infolge der Verkehrsbelastung von einem Wechsel zwischen Zug- und Druckbeanspruchung ausgegangen werden. Ein einaxialer Wechselfersuch würde die Realität daher besser wiedergeben. Für den Einaxialen Zugschwellversuch können Probekörper aus bestehenden Straßenbefestigungen oder im Labor hergestellte verwendet werden. Die Probekörpervorbereitung muss hinsichtlich der Befestigung der Adapter sehr sorgfältig erfolgen, um eine mittige Belastung des Probekörpers zu gewährleisten. Das Probekörpervorbereitung (Ankleben der Adapter) ist aufwändiger als beim Spaltzugschwellversuch.

Der 2-Punkt-Biegeversuch bildet die tatsächliche Beanspruchung der Asphaltdeckschicht in der Rollspur gut nach. Durch die wechselnde Beanspruchung können Heilungseffekte infolge der Druckbeanspruchung untersucht werden. Der Beanspruchungszustand an der Unterseite des Asphaltpaketes in der Lastachse kann aufgrund der fehlenden zusätzlichen Druckspannungskomponente normal

zur Zugspannung nicht nachgebildet werden. Weiterhin ist festzustellen, dass die Druck- bzw. Zugbeanspruchung während des Versuches gleich groß sein müssen, damit sich der Probekörper nicht plastisch verformt. Für eine plastische Verformung während des Versuches ist die Prüfeinrichtung nicht ausgelegt. In der Realität treten Druck- und Zugbeanspruchung jedoch in unterschiedlicher Größe auf. Der Versuch weist somit auch Abweichungen von der Realität auf. Die Probeprobereitung ist insbesondere bei der Verwendung von trapezförmigen Probekörpern schwierig und durch das notwendige Ankleben zeitaufwändig.

Der 4-Punkt-Biegeversuch bildet keinen in einer Straßenbefestigung auftretenden Spannungszustand nach. Der Momentenverlauf ist zwischen den beiden inneren Klemmen konstant, damit in diesem Bereich das Material das Versagen auslöst und nicht ein etwaiges Maximum im Spannungs- bzw. Momentenverlauf. Der Probekörperherstellung ist auf Grund der erforderlichen Abmessung nicht einfach. Die Versuchsvorbereitung ist durch den notwendigen Prüfeinsatz, die Lagerungs- und Belastungsbedingungen sowie durch die Befestigung der Klemmen sehr schwierig.

Es wird deutlich, dass keiner der beschriebenen Versuche wirklich realitätskonform ist. Die geringsten Unterschiede zur Realität liegen beim Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung vor. Danach folgen der Einaxialen Zugschwellversuch, der Spaltzugschwellversuch und der 2-Punkt-Biegeversuch. Zwischen Realität und 4-Punkt-Biegeversuch liegen keine Gemeinsamkeiten vor. Der größte Aufwand bei der Versuchsvorbereitung und -durchführung ist beim Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung erforderlich. Trotz der einfachen Probekörperherstellung ist der Einaxiale Zugschwellversuch auf Grund der erforderlichen Klebung aufwändig. Danach folgen der 2-Punkt- und der 4-Punkt-Biegeversuch. Der geringste Aufwand bei der Versuchsvorbereitung ist für Spaltzugschwellversuche erforderlich.

Prinzipiell müssen mit den verschiedenen Versuchen Materialeigenschaften bzw. -parameter eines Asphaltgemisches ermittelt werden, die für die rechnerische Dimensionierung benötigt werden. Das Verfahren zur rechnerischen Dimensionierung ist so weit entwickelt, dass eine entsprechende Unterscheidung z.B. durch verschiedene Shift-Faktoren erfolgen kann.

Die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von Einaxialen Zugschwellversuchen, Spaltzugschwellversuchen und Triaxialversuchen mit Zug-/Druckschwellbelastung in Kapitel 8 soll helfen die Ermüdungsfunktionen von Asphalten detaillierter in die rechnerische Dimensionierung einfließen zu lassen.

Kapitel 4

Analyse der Ermüdung von Asphalten im Laborversuch

4.1 Kriterien zur Durchführung von Ermüdungsversuchen

Berechnungen mit BISAR im Rahmen des Forschungsvorhabens *Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und des Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen* [25] haben ergeben, dass sich an der Unterseite der Asphalttragschicht in Abhängigkeit von der Dicke der Befestigung und der Temperatur Dehnungen in einem Bereich von etwa 0,05‰ bis 0,3‰ einstellen. Diese Dehnungen basieren ausschließlich auf der mechanogenen (Verkehrs-) Belastung und konnten durch FEM-Berechnungen bestätigt werden. In Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Um realitätsnahe Ermüdungsversuche durchzuführen, sollten der genannte Dehnungsbereich auch in den Laborversuchen angestrebt werden. Durch einen Vorversuch müssen die Belastungsstufen, die zur Einhaltung des angestrebten Dehnungsbereiches erforderlich sind bestimmt werden, wenn der Ermüdungsversuch spannungskonstant ausgeführt werden soll.

Ein weiteres Kriterium bei der Aufstellung von Ermüdungsfunktionen sind Mindestlastwechselzahlen, die im Laborversuch erreicht werden sollten. Die maximalen Lastwechselzahlen ergeben sich einerseits aus den geringsten Dehnungen (unter Berücksichtigung der Genauigkeit des verwendeten Wegmesssystems) und andererseits aus der Versuchsdauer, die durch die Belastungsfrequenz beeinflusst wird. Die DIN EN 12697-24 [4] schreibt für die verschiedenen Ermüdungsversuche folgende Lastwechselzahlen vor:

- 2-Punkt-Biegeversuch - 10^4 bis 10^7 Lastwechsel
- 4-Punkt-Biegeversuch - 10^4 bis $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel
- Spaltzugschwellversuch - 10^3 bis 10^6 Lastwechsel

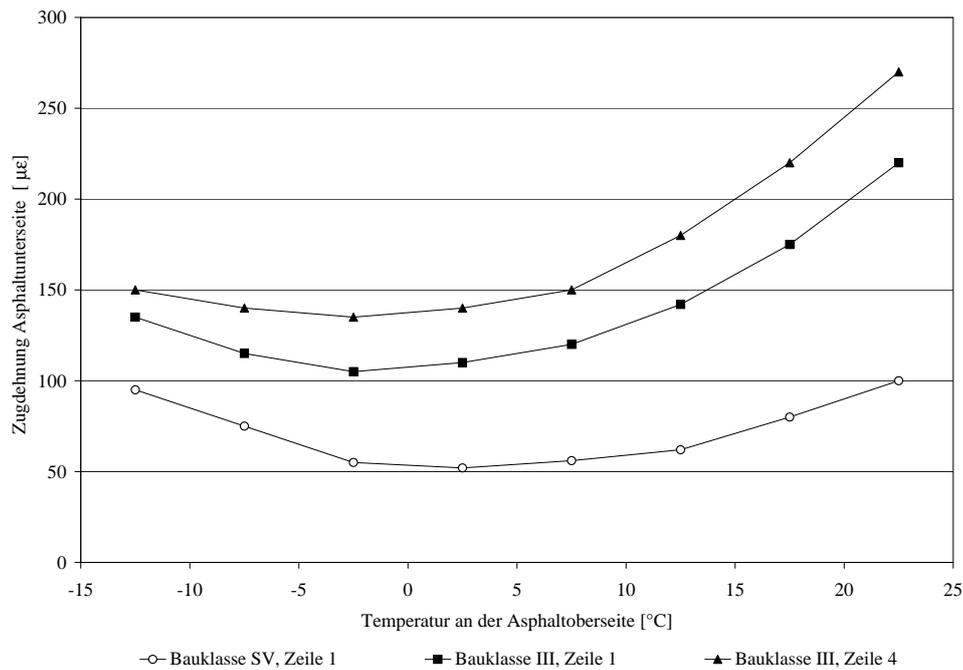


Abbildung 4.1: Zugdehnungen infolge der mechanogenen Belastung an der Unterseite des Asphalttoberbaus [25]

Die beiden Kriterien des angestrebten Dehnungsbereiches und der Mindestlastwechselzahl führen nicht in jedem Fall zu übereinstimmenden Anforderungen. Bei großen Dehnungen ($\geq 0,2\%$) werden häufig Lastwechselzahlen von ≤ 1000 erreicht. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens *Nachhaltiger Straßenbau* [38] haben jedoch gezeigt, dass die Verwendung von Einzelergebnissen mit sehr geringen Lastwechselzahlen und großen Dehnungen außerhalb der vorgegebenen Grenzen nicht zu einer Verfälschung der Ermüdungsfunktionen führen. Abbildung 4.2 zeigt die Ergebnisse von Spaltzugschwellversuchen an einem Splittmastixasphalt (SMA Gabbro), die bei verschiedenen Prüftemperaturen ermittelt wurden. Die Versuche mit den großen elastischen Anfangsdehnungen wurden bei 20°C durchgeführt. Es wird deutlich, dass Ermüdungsfunktionen auch unter Verwendung dieser Ergebnisse aufgestellt werden können. Die Lage der Funktion und auch das Bestimmtheitsmaß verschlechtern sich dadurch nicht. Letzendlich kann daraus geschlossen werden, dass eine Extrapolation mit Hilfe der aufgestellten Ermüdungsfunktionen in Bereiche mit sehr großen Dehnungen möglich ist.

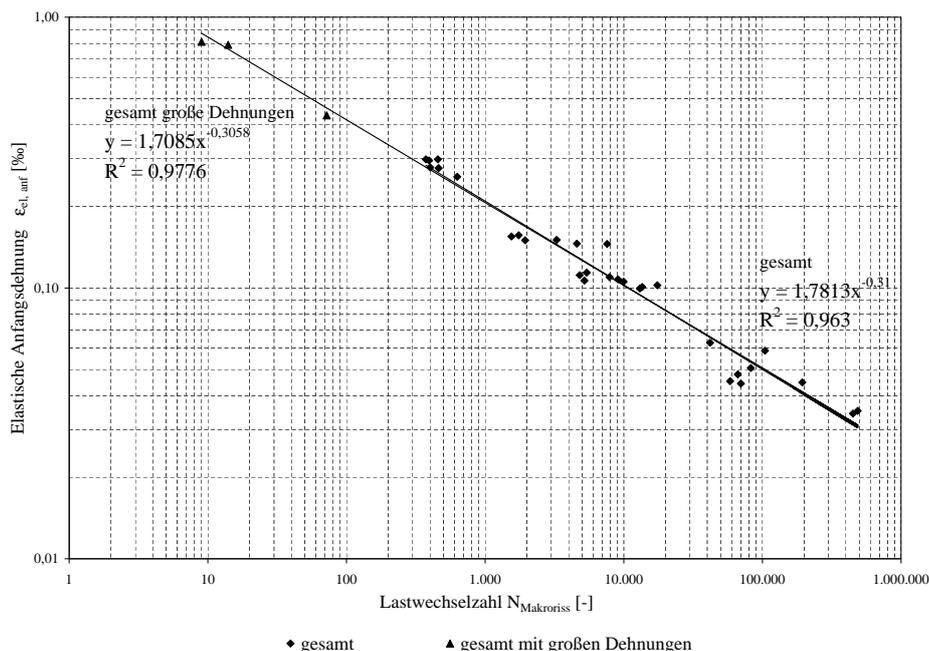


Abbildung 4.2: Einfluss von Versuchsergebnissen mit sehr großen Dehnungen auf die Ermüdungsfunktion eines Apathales [38]

4.2 Methoden zur Auswertung von Ermüdungsversuchen

4.2.1 Einleitung

Die Auswertung von Ermüdungsversuchen kann unter Berücksichtigung verschiedener Ermüdungskriterien, die sich aus der Versuchsdurchführung ergeben (spannungs- oder dehnungskonstant), erfolgen. Weiterhin wird der Ermüdungszeitpunkt unterschiedlich definiert.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Definition der Ermüdung (siehe Kapitel 2). Der in Abbildung 4.3 dargestellte Steifigkeitsverlauf eines Probekörpers im Spaltzugschwellversuch lässt sich in die drei maßgebenden Phasen nach Abbildung 2.2 unterteilen.

Die Phasen der Rissentstehung und des Risswachstums lassen sich in die Aufgliederung des E-Modul-Verlaufs über die Versuchsdauer einarbeiten (siehe Kapitel 2). Die in Kapitel 3 beschriebenen Versuche sind alle durch eine Überlagerung von Ermüdung und plastischer Verformung gekennzeichnet. Nur in weggeregelten Wechselversuchen können keine plastischen Verformungen beobachtet werden.

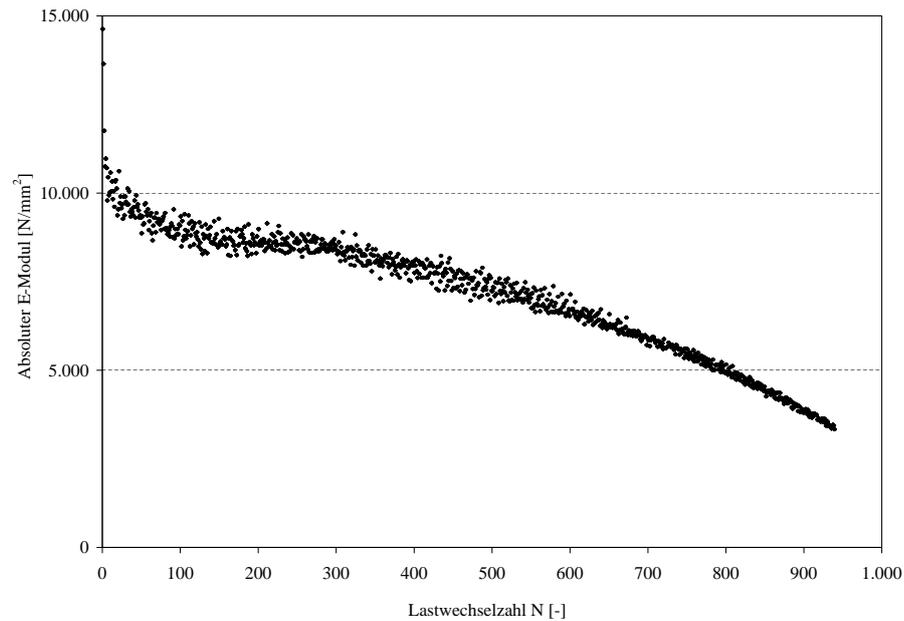


Abbildung 4.3: Verlauf des E-Moduls während eines Spaltzugschwellversuches

4.2.2 Bruch des Probekörpers

Die bis zum Bruch ertragene Lastwechselzahl N_{Br} ist der am einfachsten zu bestimmende Ermüdungszeitpunkt. Der Probekörper zerbricht in zwei Teile ($F = 0$) und der Versuch ist beendet. Es ist keine zusätzliche Auswertung erforderlich. Für den Spaltzugschwellversuch ist diese Auswertungsmethode aufgrund der Versuchsanordnung nicht anwendbar. Durch den Halterahmen der Wegaufnehmer wird ein Auseinanderbrechen des Probekörpers verhindert, so dass $F = 0$ nicht eintritt. Weiterhin tritt der Bruch im Spaltzugschwellversuch erst bei sehr großen horizontalen Verformungen ein, was zum Schutz der Wegaufnehmer durch die Maschinensteuerung verhindert werden muss. Abbildung 4.4 zeigt zwei Probekörper eines Asphalttragschichtmaterials nach dem Versuchsende im Spaltzugschwellversuch. Bild a zeigt einen deutlichen gerissenen und damit ermüdeten Probekörper, der nicht in zwei Teile zerbrochen ist. Der Probekörper wurde bei einer Prüftemperatur von 20°C geprüft. Bild b hingegen zeigt einen in zwei Teile zerbrochenen Probekörper, der bei 5°C geprüft wurde.

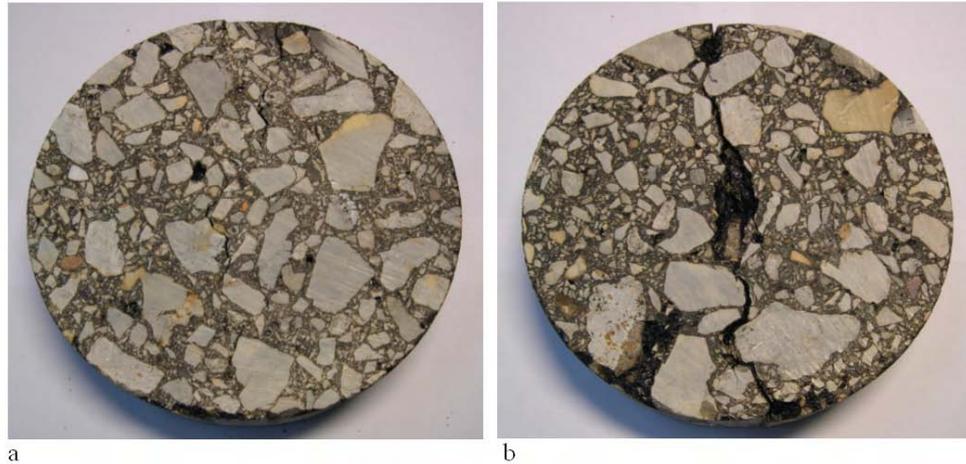


Abbildung 4.4: Probekörper nach dem Spaltzugversuch: a - gerissener Probekörper b - zerbrochener Probekörper

4.2.3 Abfall der Steifigkeit auf 50% des Anfangswertes

In verschiedenen Veröffentlichungen (z.B. bei Schrickel [36]) wird darauf hingewiesen, dass bei Asphalt insbesondere bei höheren Temperaturen (meist $\geq 20^\circ C$) ein Riss als Kennzeichen der eingetretenen Ermüdung nicht mehr beobachtet werden kann. Deshalb wird behelfsmäßig per Definition der Abfall des E-Moduls auf 50% des Anfangswertes als Kriterium für den Ermüdungsschaden angesetzt. In Abbildung 4.5 ist der Verlauf des E-Moduls während eines Spaltzugversuches bei $20^\circ C$ dargestellt. Es wird deutlich, dass der Versuch aufgrund der Abbruchkriterien zum Schutz der Prüfeinrichtung beendet wurde, bevor der E-Modul auf 50% des Anfangswertes abgefallen war. Der Abfall des E-Moduls auf 50% des Anfangswertes ist jedoch kein verlässliches Ermüdungskriterium. Ein derartiger Abfall kann nicht immer und vor allem nicht wiederholbar mit dem gleichen Ergebnis beobachtet werden. In Spaltzugversuchen, insbesondere bei mittleren Temperaturen ($\approx 20^\circ C$) und geringen Lasten ($\approx 0,3 N/mm^2$) treten andere Abbruchkriterien für den Versuch (z.B. Überschreiten der Maximalverformung) bereits vorher ein. Weiterhin konnte in Versuchen beobachtet werden, dass der E-Modul nach einem schnellen anfänglichen Abfall auf unter 50% des Anfangswertes konstant blieb bis dann nach längerer Zeit wiederholter Belastung der tatsächliche Bruch eintrat. Solche Materialien würden bei Anwendung des Kriteriums Abfall des E-Moduls auf 50% falsch bewertet werden.

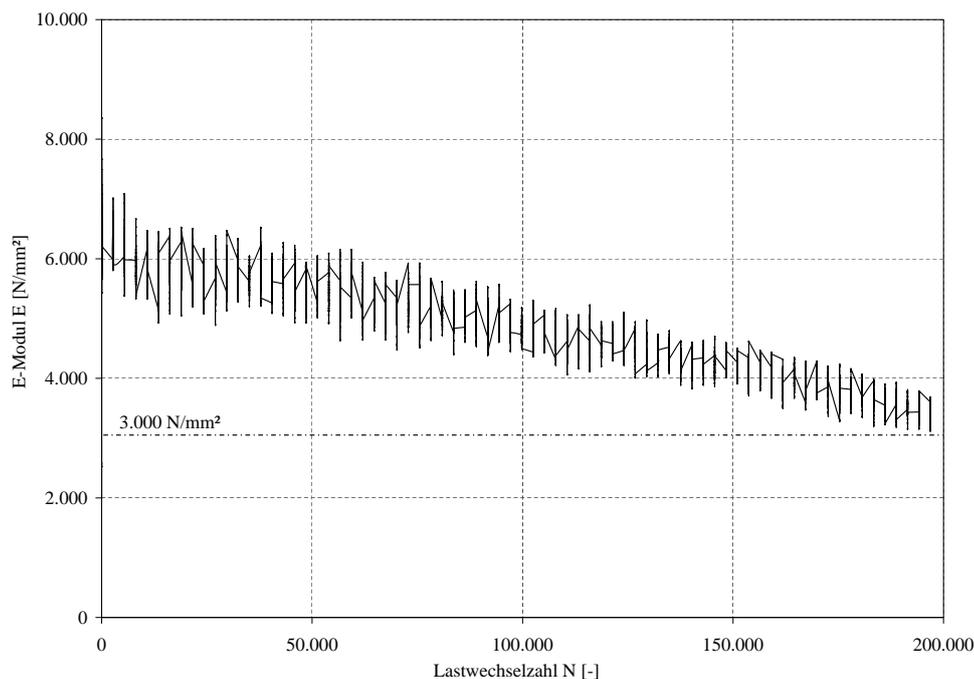


Abbildung 4.5: Verlauf des E-Moduls

4.2.4 Wendepunkt der plastischen Verformungskurve

Die Festlegung des Wendepunktes oder anderer charakteristischer Punkte der plastischen Verformungskurve (Kriechkurve) als Ermüdungskriterium ist eine weitere in der Literatur zu findende Methode zur Versuchsauswertung. Gemäß Di Benedetto [13] muss jedoch deutlich zwischen Ermüdung (Änderung des E-Moduls) und plastischer Verformung unterschieden werden. Somit kann von der plastischen Verformung nicht auf den Ermüdungszeitpunkt bzw. -fortschritt geschlossen werden. Der Wendepunkt der Kriechkurve steht weiterhin in keiner beschreibbaren Beziehung zu den anderen Ermüdungskriterien (z.B. Steifigkeitsverlauf des Probekörpers oder Lastwechselzahl bis zum Makroriss). Abbildung 4.6 verdeutlicht die drei Phasen einer Kriechkurve:

- Phase I - gekennzeichnet durch eine starke (Anfangs-) Verformung, die Verformungsgeschwindigkeit nimmt progressiv ab
- Phase II - linearer Anstieg der Verformung, konstante Verformungsgeschwindigkeit
- Phase III - progressive Zunahme der Verformung und Verformungsgeschwindigkeit bis zum Versagen des Probekörpers

Die Auswertung der Versuchsergebnisse der Spaltzugschwellversuche und der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung des Forschungsprojektes *Nachhaltiger Straßenbau* [38] haben gezeigt, dass sowohl der Wendepunkt der Verformungskurve als auch der Beginn der tertiären Schädigungsphase (Zeitpunkt ab dem die Kriechkurve nicht mehr linear ansteigt) in keinem Zusammenhang mit der Lastwechselzahl bis zum Makroriss steht. Weiterhin sind die plastischen Verformungen für Asphalttragschichtgemische vor dem Eintreten des Ermüdungskriteriums nur sehr schwach ausgeprägt. Die Auswertung von Ermüdungsversuchen basierend auf der Kriechkurve ist daher in Frage

zu stellen. Das Ermüdungsverhalten und das plastische Verformungsverhalten sollte getrennt voneinander betrachtet werden.

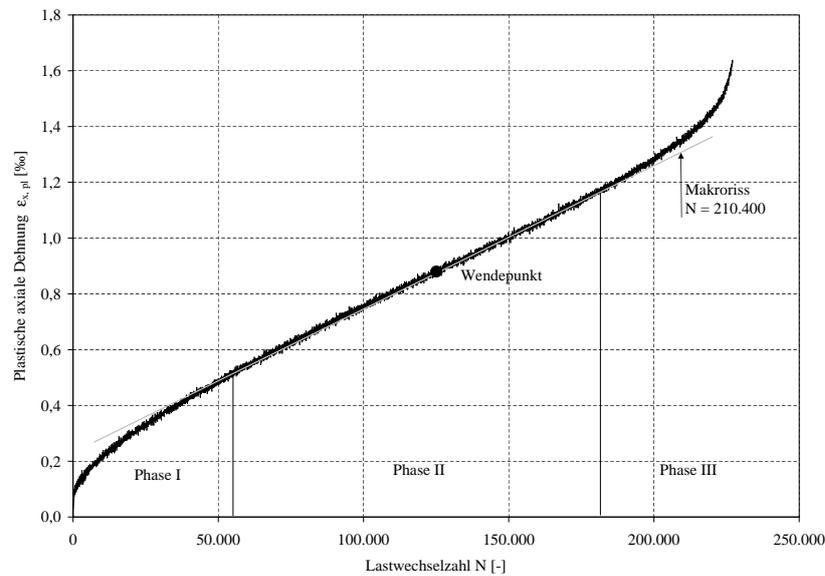


Abbildung 4.6: Plastische Vertikalverformung eines Probekörpers während eines Triaxialversuches

4.2.5 Lastwechselzahl bis zum Mikro- bzw. Makroriss basierend auf dem Konzept der dissipierten Energie

Von Rowe [35] wurde, basierend auf dem Konzept der dissipierten Energie nach Van Dijk und Visser [37], eine Methode zur Bestimmung der Lastwechselzahl bis zur Rissentstehung entwickelt. Abbildung 4.7 zeigt das Prinzip der vorgeschlagenen Methode an einem Beispiel.

Die Energy Ratio ER beschreibt das Verhältnis der am Versuchsanfang je Lastwechsel dissipierten Energie W_0 zur dissipierten Energie eines beliebigen Lastwechsels n (Gleichung 4.1). Durch die Annahme einer während des Versuchs konstanten Phasenverschiebung zwischen dem Spannungs- und Dehnungssignal vereinfacht sich die ER zum Produkt aus der Lastwechselzahl n und dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden absoluten Elastizitätsmodul $|E|_n$ (Gleichung 4.2).

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} = \frac{n \cdot \varphi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \varphi_0}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \sin \varphi_n} \quad (4.1)$$

$$ER(n) = n \cdot |E|_n \quad (4.2)$$

mit:

W_0	geleistete Arbeit beim 0. Lastwechsel
W_n	geleistete Arbeit beim n. Lastwechsel
φ [°]	Phasenwinkel
σ_0 [N/mm ²]	induzierte Spannung beim 0. Lastwechsel
σ_n [N/mm ²]	induzierte Spannung beim n. Lastwechsel

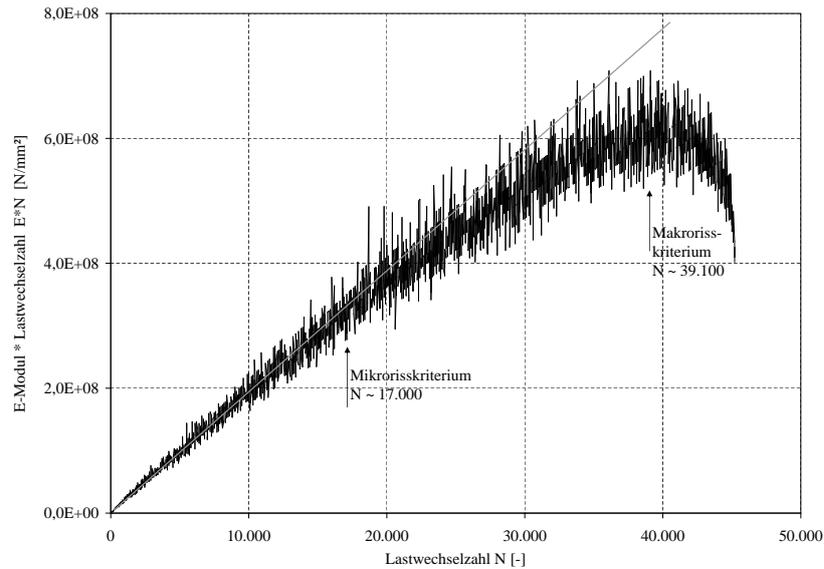


Abbildung 4.7: Bestimmung der Lastwechselzahl bis zum Mikro- und Makroriss gemäß Rowe [35]

In Abbildung 4.8 ist sowohl der Phasenwinkel φ als auch die Energie Ratio ER während eines Spaltzugshwellversuches dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass sich der Phasenwinkel bis zum Eintreten des Makrorisses nur unwesentlich verändert, so dass die vereinfachte Form der Energy Ratio ER angewendet werden kann.

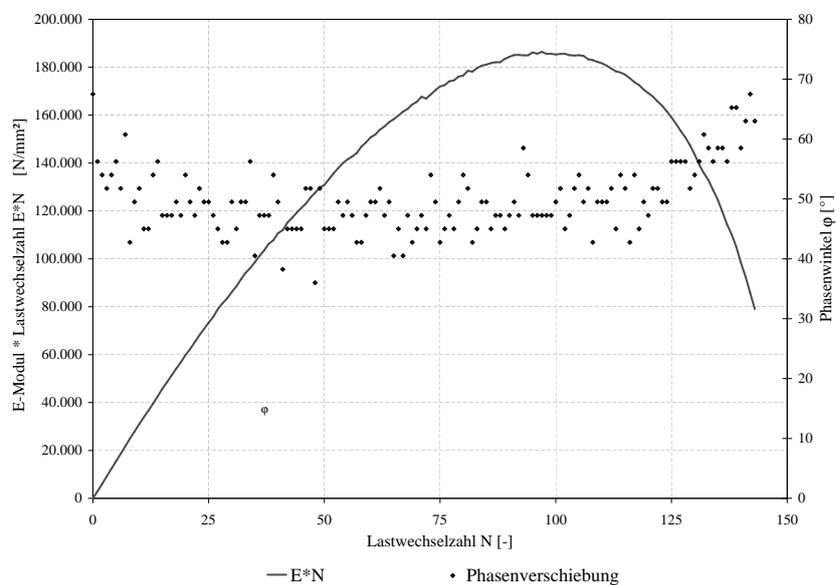


Abbildung 4.8: Verlauf der Phasenverschiebung während eines Spaltzugshwellversuches

Wird das Produkt aus Lastwechselzahl und E-Modul (entspricht dem Verhältnis von gespeicherter und dissipierter Energie) in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl aufgetragen, so kann eine Veränderung des Produktes über die Lastwechselzahl beobachtet und der Zeitpunkt der Mikro- und

Makrorissentstehung in Bezug zur Lastwechselzahl ermittelt werden. Das Produkt aus bleibender Verformung und eingetragener Last stellt die dissipierte Energie und das Produkt aus elastischer Verformung und eingetragener Last die gespeicherte Energie dar. Das elastische Potenzial spiegelt das Rückstellvermögen des Körpers und das plastische Potenzial das plastische Verformungsvermögen wider. Grundgedanke dieser Methode ist, dass das elastische Potenzial des Probekörpers bis zum Zeitpunkt der Mikrorissentstehung relativ konstant bleibt, was sich in einer nur geringen Abnahme des E-Moduls widerspiegelt. Hierbei ist auch der Zuwachs an dissipierter Energie konstant. In Abbildung 4.7 verlassen die Messpunkte bei einer Lastwechselzahl von ≈ 17.000 den linearen Bereich der Kurve. Ab dem Zeitpunkt der Mikrorissentstehung wächst das plastische Potenzial, wobei ein progressiver Zuwachs der dissipierten Energie zu verzeichnen ist. Das elastische Potenzial des Probekörpers und somit auch der E-Modul nehmen signifikant ab. Sobald der Makroriss entstanden ist, führt bereits eine relativ niedrige zusätzliche Lastwechselzahl zum vollständigen Versagen des Probekörpers, da kein elastisches Potenzial mehr vorhanden ist. Der Extremwert der Kurve ($N = 39.100$) wird als Zeitpunkt der Entstehung eines Makrorisses interpretiert. Dabei ändert sich plötzlich das Verhältnis von gespeicherter zu dissipierter Energie. Wird der Verlauf der Energy Ratio mit einem Polynom 4. Grades abgebildet bzw. approximiert, so kann der Zeitpunkt der Entstehung eines Makrorisses bestimmt werden.

4.2.6 Diskussion und Auswahl des Verfahrens

Die beschriebenen Verfahren sind mit Ausnahme des Wendepunktes der Kriechkurve grundsätzlich zur Feststellung der Ermüdungslastwechselzahl geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit musste ein Verfahren zur Versuchsauswertung zur Anwendung kommen, dass für die drei verschiedenen Ermüdungsversuche (Einaxialer Zugschwellversuch, Spaltzugschwellversuch und Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung) gleichermaßen anwendbar ist.

Das Festlegen der Ermüdungslastwechselzahl anhand des Probekörperbruches ist für den Spaltzugschwellversuch nicht anwendbar. Daher wurde diese Methode nicht angewandt. Für jeden durchgeführten Versuch wurde jedoch die Lastwechselzahl bei Versuchsende aufgezeichnet. Für den Spaltzugschwellversuch ist diese Lastwechselzahl mit dem Erreichen der Abbruchkriterien verbunden. Im Allgemeinen ist bei Versuchsende ein deutlicher Riss sichtbar, der Probekörper ist aber noch nicht in zwei Teile zerbrochen. Dies ist nur bei tiefen Temperaturen und sehr großen Beanspruchungszuständen der Fall.

Die Festlegung der Ermüdungslastwechselzahl anhand des Steifigkeitsabfalls auf 50% des anfänglichen Wertes ist aufgrund der beschriebenen Unzulänglichkeiten kein geeignetes Verfahren. Prinzipiell wäre die Methode für alle drei durchgeführten Ermüdungsversuche anwendbar.

Die Festlegung des Ermüdungszeitpunktes wurde für die durchgeführten Ermüdungsversuche anhand der Lastwechselzahl bis zum Makroriss realisiert. Aufgrund der Vereinfachungen basiert das Verfahren auf dem Verlauf der Steifigkeit während des Versuches. Hierbei wird der plötzlich eintretende stärkere Abfall der ER unabhängig vom tatsächlichen Wert der Steifigkeit als Schädigungsmerkmal angesehen.

4.3 Darstellung der Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen

4.3.1 Einleitung

Die Europäische Norm sieht zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens eines Asphaltgemisches lediglich die Dehnung ε_{el} bei 1 Mio. Lastwechsel bis zum Eintreten des Ermüdungskriteriums vor. Damit ist es jedoch nicht möglich, das Ermüdungsverhalten tatsächlich zu bewerten. Die Einzelergebnisse der Versuche müssen zu einer Ermüdungsfunktion zusammengefasst werden, die in Verbindung mit der E-Modul-Funktion das Ermüdungsverhalten des Asphaltes unter Berücksichtigung der Qualität der Ermüdungsfunktion beschreibt.

Ermüdungsfunktionen können spannungs- oder dehnungsabhängig aufgestellt werden. Gemäß DIN EN 12697-24 [4] haben Ermüdungsfunktionen die folgende Form:

$$\ln(N) = A_0 + A_1 \cdot \ln(\sigma \text{ bzw. } \varepsilon_{el}) \quad (4.3)$$

mit:

σ	$[N/mm^2]$	induzierte Spannung
ε_{el}	$[\%]$	elastische Anfangsdehnung
N	$[-]$	Ermüdungslastwechselzahl
A_0, A_1	$[-]$	Materialparameter

Die Umformung ergibt:

$$N = A \cdot (\sigma_A \text{ bzw. } \varepsilon_{el})^B \quad (4.4)$$

Die Ermüdungsfunktionen von Asphaltgemischen können auch als Wöhler-Linie dargestellt werden. Diese gibt die Spannungsamplitude σ_A bzw. die elastische Anfangsdehnung ε_{el} in Abhängigkeit von der maßgebenden Lastwechselzahl N an.

$$\sigma_A \text{ bzw. } \varepsilon_{el} = \bar{A} \cdot N^{\bar{B}} \quad (4.5)$$

mit:

σ_A	$[N/mm^2]$	induzierte Spannungsamplitude
ε_{el}	$[\%]$	elastische Anfangsdehnung
N	$[-]$	Ermüdungslastwechselzahl
A, B, \bar{A}, \bar{B}	$[-]$	Materialparameter

Die Materialparameter A und \bar{A} sowie B und \bar{B} können dabei folgendermaßen ineinander umgerechnet werden.

$$\bar{A} = A^{-\frac{1}{B}} \quad \bar{B} = \frac{1}{B} \quad (4.6)$$

Es ist jedoch zu beachten, dass bei Ermittlung der jeweiligen Ermüdungsfunktion $N(\varepsilon_{el})$ bzw. $\varepsilon_{el}(N)$ mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme gegenüber der Umrechnung abweichende Werte bestimmt werden, da die Optimierung jeweils über die unabhängige Variable erfolgt.

Abbildung 4.9 zeigt eine schematische Darstellung der gesamten Wöhler-Kurve. Auf der Abszisse sind die Lastwechselzahlen bis zum Eintreten des Ermüdungskriteriums abgetragen. Auf der Ordinate werden die zugehörigen Spannungen aufgetragen. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert bzw. die Zahlenwerte logarithmiert. Aus der Darstellung der Wöhler-Kurve für Stahl sind drei verschiedene Bereiche ersichtlich, die für Asphalt angepasst werden müssen.

- *Kurzzeitfestigkeitsbereich* - Der Bereich der Kurzzeitfestigkeit kann für Asphalte offensichtlich auch durch die Wöhler-Linie wiedergegeben werden. Siehe hierzu auch Abschnitt 4.1.
- *Zeitfestigkeitsbereich* - Dieser Bereich kann in der logarithmischen Darstellung durch die Wöhler-Linie beschrieben werden.
- *Dauerfestigkeitsbereich* - Der Bereich der Dauerfestigkeit konnte für Asphalt versuchstechnisch noch nicht nachgewiesen werden.

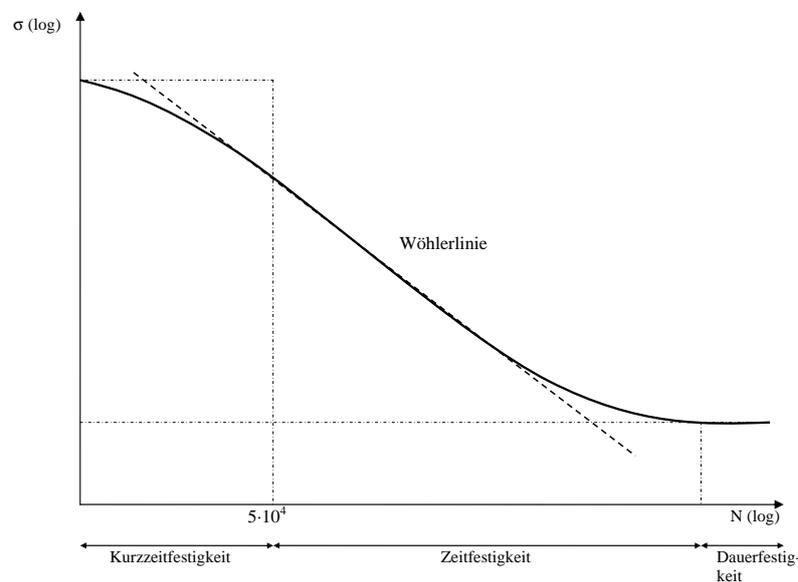


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung der Wöhlerkurve für Stahl

Die Ermittlung der Materialparameter erfolgt dann mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Grundsätzlich sind bei der Aufstellung von Ermüdungsfunktionen folgende Parameter konstant zu halten, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben (siehe Abschnitt 2.3).

- Art der Beanspruchung (spannungs- bzw. dehnungskonstant)
- Form der Belastungsfunktion (z.B. Anordnung von Lastpausen)
- Belastungsfrequenz
- (Prüftemperatur)

Nachfolgend werden die Grundlagen zur Aufstellung von Ermüdungsfunktionen diskutiert.

4.3.2 Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen

Die Ergebnisse von kraftgeregelten Ermüdungsversuchen, also die Ermüdungslastwechselzahlen können in Abhängigkeit von der aufgebracht bzw. induzierten Zugspannung dargestellt werden. Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen sind dann neben den bereits genannten Kriterien insbesondere von der Prüftemperatur abhängig. Für die Dimensionierung einer Straßenbefestigung müssen daher Ermüdungsfunktionen bei mehreren Temperaturen ermittelt werden, um zwischen den Funktionen der einzelnen Temperaturen interpolieren zu können. Diese Vorgehensweise ist zu aufwändig, weshalb sie vorläufig nicht angewandt wird.

In Abbildung 4.10 sind die spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen für einen Splittmastixasphalt gezeigt, die mit Hilfe von Spaltzugschwellversuchen ermittelt wurden. Die Ermüdungsversuche wurden bei drei Temperaturen (-5°C , 5°C und 20°C) durchgeführt. Die aufgetragenen Spannungsamplituden wurden entsprechend der Prüftemperatur ausgewählt, so dass der angestrebte Dehnungsbereich bei jeder der drei Prüftemperaturen gut abgedeckt werden konnte. Für die Versuche bei -5°C und 5°C wurden die kryogenen Spannungen als Unterspannung berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die Ermüdungsfunktion für 20°C die geringsten Lastwechselzahlen bis zum Versagen bei gleicher Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ prognostiziert, da der untersuchte Asphalt bei 20°C den geringsten E-Modul besitzt.

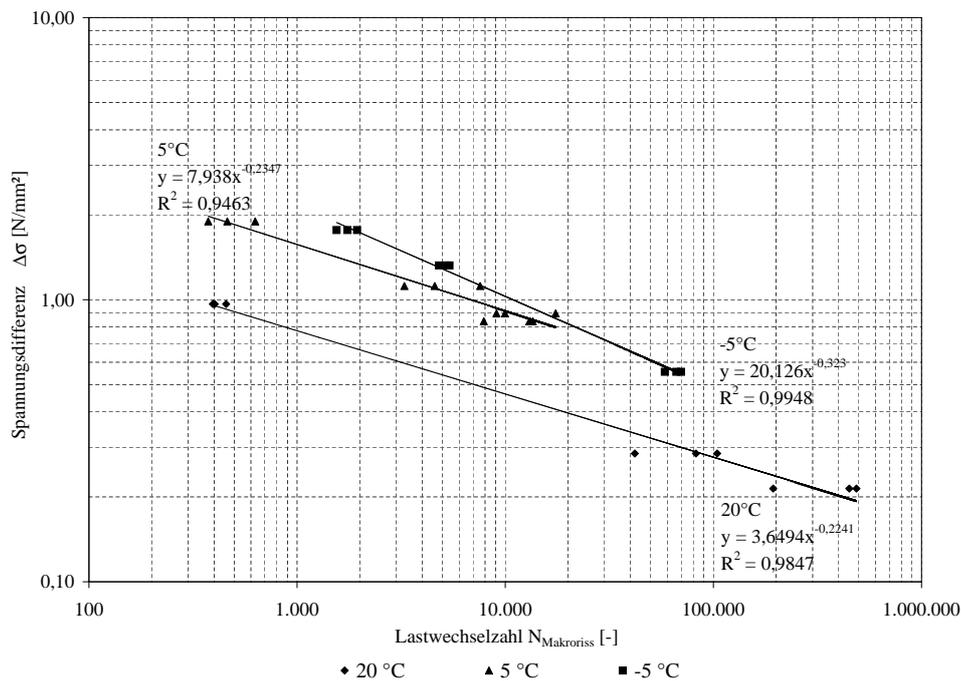


Abbildung 4.10: Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen eines SMA für drei Prüftemperaturen

4.3.3 Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen

Die Aufstellung von dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen weist einen entscheidenden Vorteil gegenüber der spannungsabhängigen Darstellung auf. Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen

sind nur noch in einem geringen Maße von der Prüftemperatur abhängig. In der Dissertation von Read [33] wurden die Ergebnisse von Spaltzugschwellversuchen und von 2-Punkt-Biegeversuchen mit trapezförmigen Probekörpern bei verschiedenen (mittleren) Prüftemperaturen ausgewertet. Die Ergebnisse wurden einerseits in Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannung und andererseits in Abhängigkeit von der elastischen Anfangsdehnung aufgetragen. Der Vergleich zeigte, dass eine Ermüdungsfunktion über die Ergebnisse der Versuche bei verschiedenen Temperaturen aufgestellt werden. Read führte die Versuche nur bei mittleren Temperaturen (10 bis 30°C) durch. Eine Erweiterung seiner Erkenntnisse auf tiefe Temperaturen erscheint nur mit Einschränkung hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes möglich. Abbildung 4.11 soll verdeutlichen, dass die Aufstellung dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen für bindemittelreiche Asphaltarten auch unter Einbeziehung von Versuchsergebnissen bei tiefen Temperaturen ohne größere Streuungen möglich ist. Grundlage für diese Abbildung sind die gleichen Versuchsergebnisse wie in Abbildung 4.10. Anhand der Abbildung soll verdeutlicht werden, dass es bei dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen unerheblich ist, wie die jeweilige Dehnung erzeugt wurde, die einer bestimmten Ermüdungslastwechselzahl zugeordnet wird. Die Dehnung kann also bei 20°C mit einer relativ niedrigen Belastung oder bei z.B. -5°C bei einer sehr viel höheren Belastung erzeugt werden.

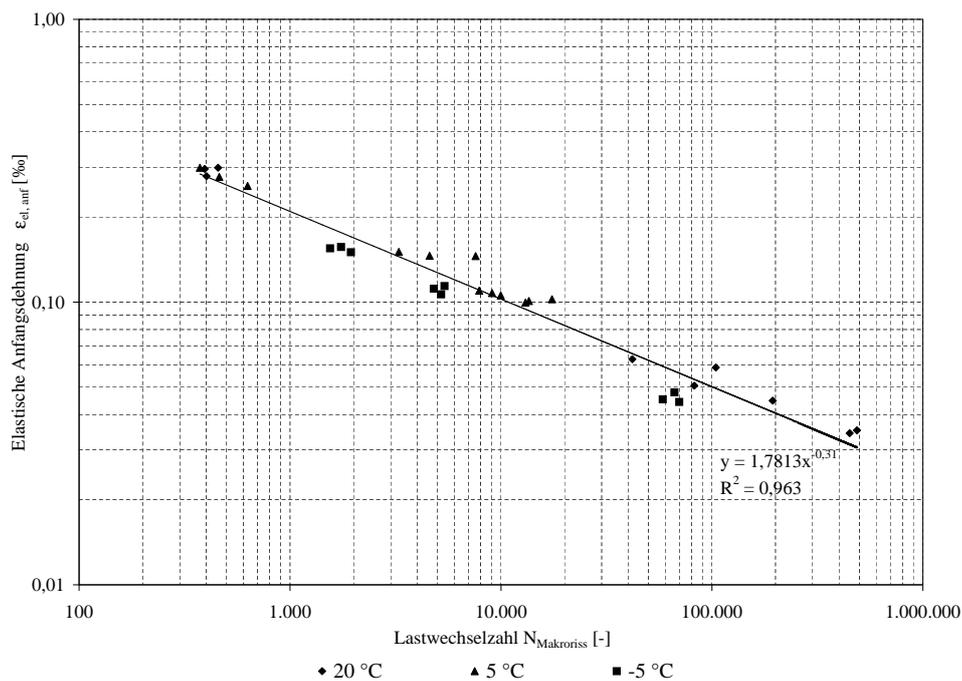


Abbildung 4.11: Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion eines SMA

Die Aufstellung der dehnungsabhängigen und damit temperaturunabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einem guten bis sehr gutem Bestimmtheitsmaß R^2 konnte für Spaltzugschwellversuche und Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung bestätigt werden (siehe [38]). Dieser Vorteil kann unter anderem auf die Messung der Verformungen direkt am Probekörper zurückgeführt werden. Für den Einaxialen Zugschwellversuch konnte das bisher noch nicht bestätigt werden (siehe [38]). Hier ist noch zu überprüfen, ob die Unterschiede zwischen den verschiedenen Prüftemperaturen

und somit die Abweichungen von der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktion durch eine Verformungsmessung direkt am Probekörper verringert werden können.

Weiterhin ist anzuführen, dass die Laborversuche zur Aufstellung der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen unter Berücksichtigung der kryogenen Zugspannungen als Unterspannung erfolgen müssen. Abbildung 4.12 zeigt Ermüdungsfunktionen bestimmt bei Spaltzugschwellversuchen mit drei verschiedenen Temperaturen, die mit einer gleichbleibenden Unterspannung von $0,035\text{ N/mm}^2$ durchgeführt wurden und die Ermüdungsfunktionen ermittelt bei 5 und -5°C mit der jeweiligen kryogenen Spannung von $0,106$ bzw. $0,445\text{ N/mm}^2$ als Unterspannung. Kaum ein Einfluss zeigt sich für die Ermüdungsfunktionen ermittelt bei 5°C . Die Ermüdungsfunktionen für -5°C weisen hingegen deutliche Differenzen auf. Die Funktionen für 20 und 5°C weichen aufgrund der niedrigen kryogenen Zugspannung von $0,106\text{ N/mm}^2$ bei 5°C nur geringfügig voneinander ab. Es wird deutlich, dass eine Vereinigung der Ergebnisse von Versuchen bei verschiedenen Temperaturen zu einer Ermüdungsfunktion nur unter Berücksichtigung der kryogenen Spannungen als Unterspannung durchführbar ist.

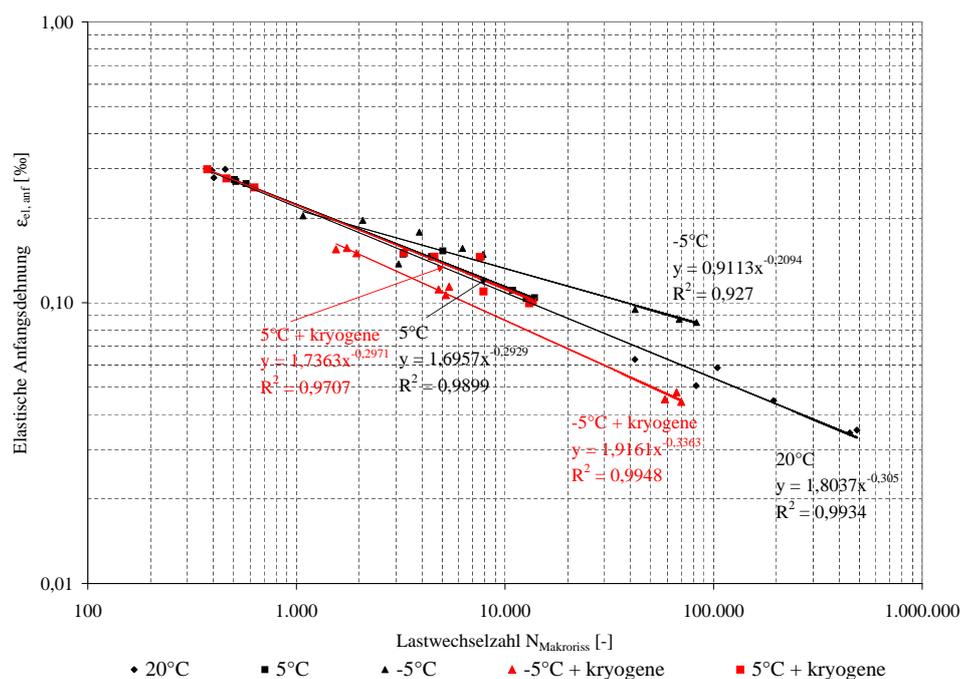


Abbildung 4.12: Ermüdungsfunktionen eines SMA für drei Temperaturen bei gleichbleibender Unterspannung

4.3.4 Diskussion und Auswahl des Ermüdungsfunktionstyps

Die Anwendung von spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung ist nur dann möglich, wenn die Materialparameter der Ermüdungsfunktion und die E-Modul-Funktion für das gesamte Temperaturspektrum vorliegen bzw. prognostiziert werden

können. Es hat sich jedoch gezeigt (siehe Abschnitt 8.4), dass die Ergebnisse von Versuchen bei drei Prüftemperaturen nicht ausreichen, um eine realistische Prognose durchzuführen.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Lastwechselzahlen bis zum Makroriss bei spannungsabhängigen Ermüdungskurven nur der Zugspannung gegenübergestellt werden. Alle anderen Spannungsanteile können nicht berücksichtigt werden. Da sich die beschriebenen Prüfverfahren durch jeweils individuelle Spannungszustände auszeichnen, ist ein Vergleich der Ermüdungsfunktionen bezogen auf die Zugspannungskomponente fehlerbehaftet.

Die während der Ermüdungsversuche in Richtung der Zugspannung auftretenden elastischen Verformungen bzw. Dehnungen sind ein Resultat des mehraxialen Spannungszustandes innerhalb des Probekörpers. Es zeigt sich offenbar, dass die Dehnung das maßgebliche Kriterium im Hinblick auf die Ermüdungsfunktion eines Asphaltgemisches ist. Daher werden in der Arbeit hauptsächlich dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen aufgestellt und angewandt.

Die Unterschiede zwischen spannungs- und dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen werden in Abschnitt 8.4 noch einmal aufgegriffen.

4.4 Ermittlung der elastischen Verformungen

4.4.1 Einleitung

Zur Aufstellung dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen muss die elastische Anfangsdehnung infolge der (sinusförmigen) Belastung bestimmt werden. Zusätzlich ist zur Ermittlung des Ermüdungszeitpunktes (Makroriss) mit Hilfe der Energy Ratio ER der Verlauf des E-Moduls über die gesamte Versuchsdauer notwendig.

Für die Ermittlung der elastischen Verformungen können zwei Verfahren angewandt werden. Einerseits eine Minimum-Maximum-Absuche der Messwerte der Verformungen eines Lastwechsels und andererseits die Anwendung einer Sinusregression zur Nachbildung der aufgezeichneten Messwerte über mehrere Lastwechsel.

4.4.2 Parameterermittlung anhand der Minima und Maxima

Die Überprüfung der Messwerte der Verformungen nach Extremwerten innerhalb eines Lastwechsels kann für beliebige Belastungsfunktionen angewandt werden. Die aufgezeichneten Daten werden dafür innerhalb des festgelegten Intervalls nach dem Minimum bzw. Maximum abgesucht. Das Intervall muss aufgrund der möglichen Phasenverschiebung zwischen Regelgröße und Probekörperreaktion entsprechend über den eigentlichen Zeitbereich des Lastwechsels erweitert werden. Unter Berücksichtigung der möglichen Phasenverschiebung ist es z.B. bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und 10 Aufzeichnungspunkten pro Lastwechsel ausreichend, das Intervall um vier Aufzeichnungspunkte, also $0,04\text{ s}$ zu vergrößern. Die maximale Anzahl der Aufzeichnungspunkte eines Lastwechsels ist entsprechend der Regelung der benutzten Prüfmaschine und der verfügbaren Speicherkapazität begrenzt.

Die elastische Verformung je Lastwechsel wird dann angenommen als die Differenz aus Maximum und Minimum der gemessenen Werte je Lastwechsel. Um die Auswirkungen aus der Messungenauigkeit etc. auf die Versuchsergebnisse zu verringern, werden die Differenzen aus Maximum und Minimum über mindestens fünf aufeinanderfolgende Lastwechsel gemittelt.

4.4.3 Parameterermittlung mit Hilfe einer Sinusregression

Die Ermittlung der elastischen Verformung mit Hilfe der Sinusregression kann nur für eine Belastungsfunktion in Form einer reinen Sinusschwingung ohne Lastpausen eingesetzt werden. Für die Regression wird der allgemeine Ansatz einer ungedämpften Schwingung angewandt.

$$y(t) = a + b \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + c) \quad (4.7)$$

mit:

- a Absolutglied der Schwingung
- b Amplitude der Schwingung
- c Phasenverschiebung der Sinusfunktion
- f Frequenz der Schwingung
- t Zeit

Die dargestellten Parameter der Sinusschwingung können z.B. mit Hilfe der Solver-Funktion in *Microsoft Excel* iterativ über eine beliebige Anzahl von Lastwechseln bestimmt werden. Hierbei sind jedoch die plastischen Verformungsanteile und deren Auswirkungen auf die Bestimmung der Parameter über die gesamte Versuchsdauer zu berücksichtigen.

4.4.4 Diskussion der Verfahren

Die Anwendung der beiden Verfahren, sowie die Vor- und Nachteile sollen an den Messwerten zweier Spaltzugschwellversuche beispielhaft gezeigt werden.

Beispiel 1

Der Ermüdungsversuch an einem OPA 0/8 wurde bei -5°C durchgeführt. Aufgrund der erwarteten Versuchsdauer und der beschränkten Möglichkeit der Erfassung der Daten konnte keine permanente Datenerfassung erfolgen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte zyklisch im Abstand von 200 Lastwechseln. Dabei wurden jeweils 40 Lastwechsel je Messperiode registriert. Abbildung 4.13 zeigt die aufgezeichneten und anschließend aufsummierten Messwerte der beiden induktiven Wegaufnehmer zwischen dem 260. und 270. Lastwechsel und die Werte, die unter Zuhilfenahme der Parameter der Sinusregression berechnet werden können. Folgende elastische Verformungen konnten ermittelt werden:

- Differenz aus Maximum und Minimum $u = 8,46 \mu\text{m}$
- Sinusregression $u = 8,762 \mu\text{m}$

Die ermittelten elastischen Verformungen unterscheiden sich nur geringfügig. In diesem Beispiel können beide Verfahren zur Bestimmung der elastischen Anfangsdehnung benutzt werden.

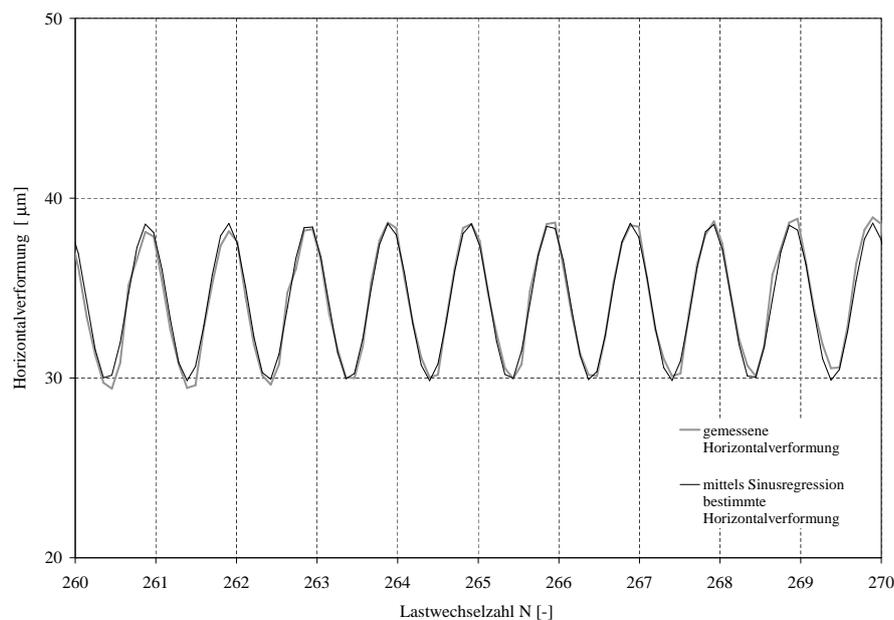


Abbildung 4.13: Sehr gute Anpassung der Sinusregression an die Messwerte -Beispiel 1

Beispiel 2

Der Ermüdungsversuch an einer ATS 0/32 CS wurde bei 20°C durchgeführt. Auch in diesem Beispiel musste eine zyklische Aufzeichnung der Messwerte im Abstand von 150 Lastwechseln erfolgen. Es wurden ebenso jeweils 40 Lastwechsel je Meßperiode registriert. Abbildung 4.14 zeigt die aufgezeichneten und anschließend aufsummierten Messwerte der beiden induktiven Wegaufnehmer zwischen dem 500. und 510. Lastwechsel und die Werte, die unter Zuhilfenahme der Parameter der Sinusregression berechnet werden können. Aufgrund der ausgeprägten Anpassungsphase wurden erst der 500. bis 510. Lastwechsel zur Ermittlung der elastischen Anfangsverformung herangezogen. Folgende elastische Verformungen konnten ermittelt werden:

- Differenz aus Maximum und Minimum $u = 5,574 \mu\text{m}$
- Sinusregression $u = 5,396 \mu\text{m}$

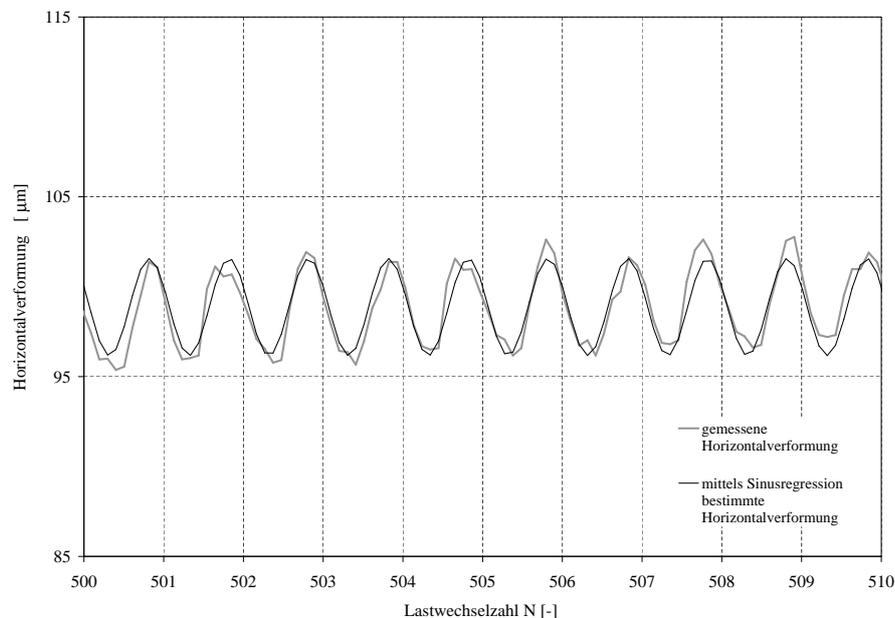


Abbildung 4.14: Ungünstige Anpassung der Sinusregression an die Messwerte - Beispiel 2

Die elastischen Verformungen, ermittelt mit den beiden Verfahren sind zwar nahezu gleich, dennoch wird deutlich, dass die plastischen Verformungen für eine gute Sinusregression über 10 Lastwechsel zu groß sind. Der Graph der berechneten Werte zeigt zu Beginn und am Ende des gewählten Intervalls Abweichungen. Die Sinusregression wurde daher noch einmal mit nur 5 Lastwechsel als Grundlage wiederholt. Abbildung 4.15 zeigt die Unterschiede, die auf die Länge der betrachteten Intervalle zurückzuführen sind. Die ermittelte elastische Horizontalverformung beträgt nun $u = 5,514 \mu\text{m}$. Gleichzeitig hat sich das Bestimmtheitsmaß der Sinusregression verbessert und auch visuell ist die bessere Anpassung erkennbar. Abschließend ist festzuhalten, dass die elastischen Verformungen bei der Anwendung der Sinusregression gegenüber den tatsächlichen Werten häufig abgemindert werden.

Wertung der Ergebnisse

Die Minimum-Maximum-Absuche ist für jegliche Belastungsfunktion (also auch mit Lastpausen) geeignet. Dies ist ein entscheidender Vorteil des Verfahrens. Für eine kontinuierliche Auswertung der Messdaten im Hinblick auf die Ermittlung des E-Moduls und somit zur Bestimmung der Lastwechselzahl bis zum Makroriss ist der Algorithmus ausgesprochen praktikabel.

Der in Gleichung 4.7 beschriebene Ansatz der Sinusregression kann in Abhängigkeit von der eingebrachten Belastung maximal für 10 Lastwechsel angewandt werden, da andernfalls aufgrund des in der Gleichung 4.7 konstanten Absolutglieds a fehlerhafte Parameter ermittelt werden. Das Absolutglied entspricht den plastischen Verformungen im Versuch. Für Ermüdungsversuche mit hohen Beanspruchungen nimmt die plastische Verformung durch jede Belastung signifikant zu. Die Anzahl der Lastwechsel zur Bestimmung der Parameter muss dementsprechend verringert werden, was wegen des geringeren Datenvolumens ebenso zu Abweichungen führen kann.

In der vorliegenden Arbeit wurden die elastischen Verformungen der Spaltzugschwellversuche und der Triaxialversuche grundsätzlich mit der Minimum-Maximum-Absuche ermittelt. Durch eine zusätzliche visuelle Kontrolle der Messdaten konnten unregelmäßige Daten (z.B. durch Messfehler) von der Mittelwertbildung ausgeschlossen werden.

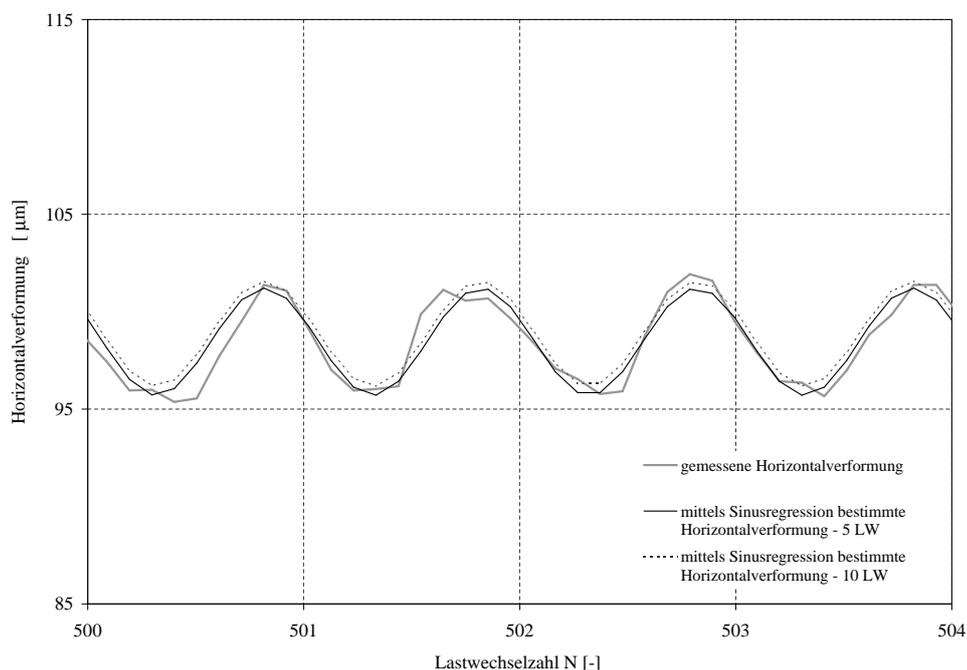


Abbildung 4.15: Vergleich der Ergebnisse der Sinusregression für 5 bzw. 10 Lastwechsel als Grundlage - Beispiel 2

Kapitel 5

Laborversuche zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens

5.1 Untersuchte Asphaltgemische

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basieren auf den Versuchen an den Asphalten des Forschungsvorhabens *Nachhaltiger Straßenbau* [38]. Die Einaxialen Zugschwellversuche wurden am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig durchgeführt sowie ausgewertet und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Es wurden insgesamt vier Deckschichtmaterialien sowie je ein Asphaltbinder- und ein Asphalttragschichtmaterial untersucht. Die wichtigsten Daten der Asphalte sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die genauen Gemischzusammensetzungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten Kontrolluntersuchungen sind in Anhang A aufgeführt. Die Kontrolluntersuchungen ergaben keine Auffälligkeiten.

Die Herstellung der Probekörper erfolgte im Labor. Die Probekörper der Einaxialen Zugschwellversuche wurden aus Asphaltplatten herausgesägt, die im Walzsektorverdichter hergestellt wurden. Die Vorgehensweise der Probekörperherstellung für die Spaltzugschwellversuche und die Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung ist in Kapitel 6 und Kapitel 7 näher erläutert. Für alle Probekörper wurde ein Verdichtungsgrad von 98 – 101% angestrebt. Für die Einaxialen Zugschwellversuche und die Spaltzugschwellversuche wurden ausschließlich Probekörper innerhalb eines Raumdichtebereichs von $\Delta\rho_A = 0,03 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Die Grenzen der Raumdichte sowie des Hohlraumgehaltes sind in Tabelle 5.1 eingearbeitet. Für die Probekörper der Triaxialversuche musste ein größerer Raumdichtebereich zugelassen werden (siehe Abschnitt 7.2).

	AB 0/11 S	SMA 0/11 S	SMA 0/11 S
Gestein	Moräne	Gabbro	Moräne
Steinbruch	Wullenstetten	Bad Harzburg	Wullenstetten
Bitumen	50/70	PmB 45A	PmB 45A
Hersteller	A	B	C
Mischwerk	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG	ISV Ilseder Mischwerke GmbH & Co. KG	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG
Ort	Stuttgart Weilimdorf	Osloss	Stuttgart Weilimdorf
ρ_A [g/cm ³]	2,361 - 2,391	2,503 - 2,533	2,332 - 2,362
H_{bit} [Vol. - %]	4,24 - 3,06	3,86 - 2,67	4,11 - 2,88
	OPA 0/8	ABi 0/16 S	ATS 0/32 CS
Gestein	Kiessplitt	Moräne	Muschelkalk
Steinbruch		Wullenstetten	Mönsheim
Bitumen	PmBH 40-100/65H	PmB 45A	50/70
Hersteller	C	C	A
Mischwerk	Hohenloher Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG	Asphaltmischwerke Donau-Iller GmbH & Co. KG	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG
Ort	Heilbronn	Ehingen	Mönsheim
ρ_A [g/cm ³]	1,811 - 1,841	2,337 - 2,367	2,368 - 2,398
H_{bit} [Vol. - %]	24,70 - 23,50	7,04 - 5,85	6,88 - 5,78

Tabelle 5.1: Kenngrößen und Herkunft der untersuchten Asphalte, siehe [38]

5.2 Übersicht über die ausgeführten Versuche

Um das Ermüdungsverhalten der Asphalte beschreiben zu können, wurden an der Professur für Straßenbau der TU Dresden Spaltzugschwellversuche und die Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung durchgeführt. Zusätzlich stellte das Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig die Ergebnisse der zugeordneten Einaxialen Zugschwellversuche zur Verfügung. In Tabelle 5.2 und 5.3 sind die Versuchsarten und die jeweiligen Parameter zusammengefasst.

Asphalt	Einaxiale Zugschwellversuche		Spaltzugschwellversuche		Triaxialversuche	
	T [$^{\circ}C$]	f [Hz]	T [$^{\circ}C$]	f [Hz]	T [$^{\circ}C$]	f [Hz]
AB 0/11 S	-15, -10, -5, 5	10, 5, 3	-5, 5, 20	10, 5	-	-
SMA 0/11 S Gabbro	-15, -5, 0, 5	10, 5, 3	-5, 5, 20	10, 5, 3 ¹	-10, 20	10, 5, 1
SMA 0/11 S Moräne	-15, -10-5, 0, 5 ²	10	20	10, 5, 3, 0,5	-10, 20	10, 5, 1
OPA 0/8	-15, -10, -5, 0, 5 ³	10, 3 ⁴	-5	10, 5	-	-
ABi 0/16 S	-15, -10, -5, 0, 5	10, 3	-5, 5, 20	10, 5	-10, 20	10, 5, 1
ATS 0/32 CS	-15, -10, -5, 0, 5	10	-5, 5, 20	10, 5	-10, 20	10, 5, 1

Tabelle 5.2: Übersicht der ausgeführten Versuche

Asphalt	Prüftemperatur T [$^{\circ}C$]					
	-15	-10	-5	0	5	20
AB 0/11 S	2,250	1,180	0,515	0,200	0,056	0,035
SMA 0/11 S Gabbro	1,500	0,850	0,445	0,220	0,106	0,035
SMA 0/11 S Moräne	1,900	1,150	0,640	0,290	0,105	0,035
OPA 0/8	0,31	0,170	0,094	0,050	0,030	-
ABi 0/16 S	1,500	0,840	0,424	0,200	0,090	0,035
ATS 0/32 CS	1,140	0,570	0,222	0,100	0,025	0,025

Tabelle 5.3: Übersicht der jeweils angesetzten Unterspannung

Um Ausreißer oder Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung erkennen zu können wurde jeder Belastungs-/Beanspruchungszustand des Einaxialen Zugschwellversuches und des Spaltzugschwellversuches 3-fach belegt ausgeführt. Aufgrund der aufwändigen Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung musste für die Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung auf eine mehrfache Belegung verzichtet werden. Versuche haben jedoch gezeigt, dass die Wiederholbarkeit der Triaxialversuche sehr gut ist (siehe Abschnitt 7.3.1).

¹Die Versuche mit einer Belastungsfrequenz von 3 Hz wurden nur bei $-5^{\circ}C$ und $20^{\circ}C$ durchgeführt.

²Es wurden nur bei $-5^{\circ}C$ und $5^{\circ}C$ Versuche mit drei verschiedenen Belastungsstufen durchgeführt.

³Es wurden nur bei $-10^{\circ}C$, $0^{\circ}C$ und $5^{\circ}C$ Versuche mit drei verschiedenen Belastungsstufen durchgeführt.

⁴Die Versuche mit einer Belastungsfrequenz von 3 Hz wurden nur bei $-10^{\circ}C$ und $-5^{\circ}C$ durchgeführt.

Kapitel 6

Ergänzende Betrachtungen und Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche

6.1 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Die Probekörper für die Spaltzugschwellversuche wurden gemäß Abschnitt 3.3 hergestellt. Die Platten wurden im Walzsektorverdichter einer weggeregelten Verdichtung mit $0,3 \text{ mm/Walzübergang}$ unterzogen. Die Bestimmung der Raumdichte erfolgt für die Deck-, Binder- und Tragschichtasphalte nach DIN EN 12697-6 Verfahren B [3]. Die Bestimmung der Raumdichte des offenporigen Asphaltes erfolgte gemäß Verfahren D durch Ausmessen.

Für den OPA 0/8 musste die vorgesehene Probekörperhöhe von 40 mm nach einigen Vorversuchen geändert werden. Aufgrund des großen Hohlraumgehaltes traten nach dem Herausbohren der Probekörper aus den Platten an den Probekörperrändern große Abbrüche auf. Abbildung 6.1 zeigt einen solchen Probekörper. Eine gleichmäßige Lasteinleitung während der Versuche in den Probekörper wäre unter diesen Gegebenheiten nicht gewährleistet. Daher wurden Probekörper mit einer Höhe von 6 cm hergestellt. Die Auswirkungen der Abbrüche an den Kanten war so deutlich geringer. Die Probekörper wurden derart zwischen den Lasteinleitungsschienen platziert, dass im Bereich der Lasteinleitung keine Kantenabbrüche vorlagen.

Weiterhin wurden die Probekörper des OPA 0/8 an den späteren Abtaststellen der Wegaufnehmer ausgegipst und anschließend mit Sandpapier glatt geschliffen. Durch diese spezielle Vorbereitung wird eine störungsfreie Aufzeichnung der Horizontalverformung gewährleistet. In Abbildung 6.2 ist ein 6 cm hoher Probekörper mit den ausgegipsten Abtaststellen der Wegaufnehmer zu sehen.

Um den Einfluss des Hohlraumgehaltes in den festgelegten Grenzen berücksichtigen zu können, wurde für jeden Beanspruchungszustand je ein Probekörper mit einem niedrigen, mittleren und hohen Hohlraumgehalt ausgewählt und getestet.



Abbildung 6.1: Probekörper des OPA 0/8 mit einer Höhe von 4 cm und deutlichen Kantenabbrüchen

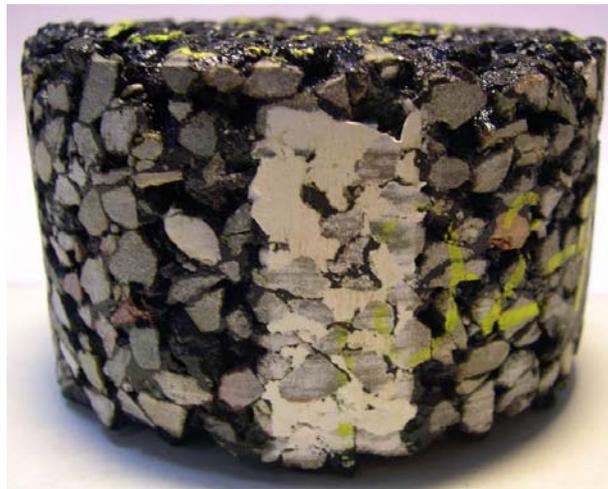


Abbildung 6.2: Probekörper des OPA 0/8 mit einer Höhe von 6 cm und Ausgipsung der Abtaststellen der Wegaufnehmer

6.2 Ergebnisse der Versuche

6.2.1 E-Modul

Wie in Abschnitt 4.2.1 bereits näher beschrieben, ist der E-Modul des untersuchten Materials bzw. die Steifigkeit des Asphaltprobekörpers während eines Ermüdungsversuches veränderlich.

Ausgewertet und für weitere Betrachtungen berücksichtigt wird daher ausschließlich der sich aus der elastischen Anfangsdehnung ergebende E-Modul des untersuchten Materials. Der E-Modul wird nach ca. 100 Lastwechseln bestimmt, wenn die Anpassung zwischen Probekörper und Lasteinleitungsschienen im Allgemeinen abgeschlossen ist. Bei Versuchen mit einer sehr hohen erwarteten Lastwechselzahl werden die Messdaten zur Verringerung des Datenvolumens nicht kontinuierlich sondern mit Unterbrechungen in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet. Da es mit der vorhandenen Prüfsoftware in diesen Fällen nicht möglich war, die ersten 110 Lastwechsel kontinuierlich aufzuzeichnen, wurde die elastische Anfangsdehnung bzw. der E-Modul zum Zeitpunkt der ersten Messwertaufzeichnung bestimmt.

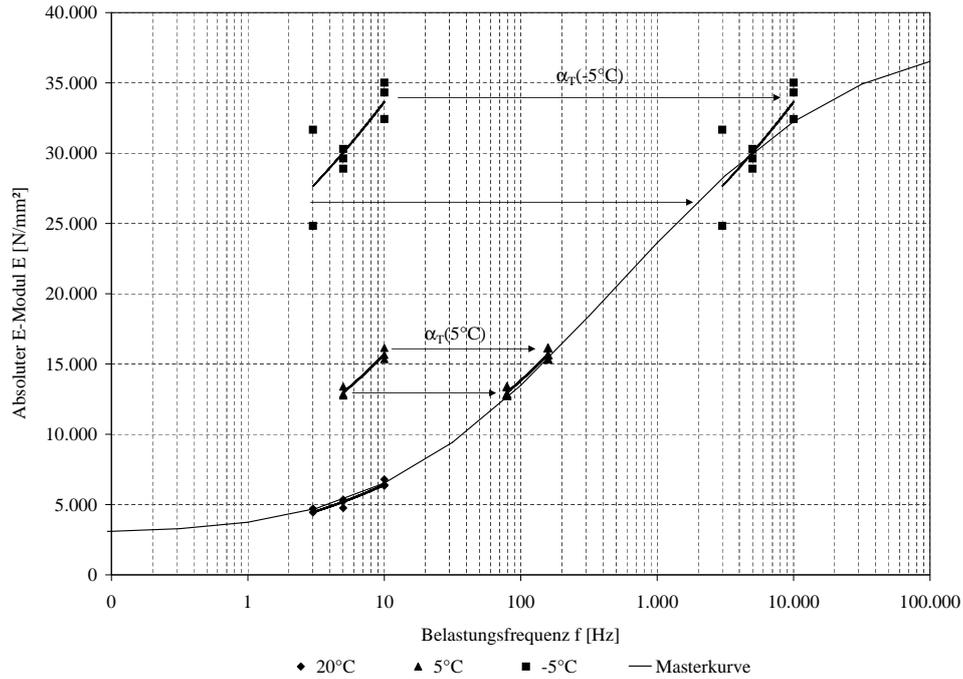


Abbildung 6.3: Masterkurve des absoluten E-Moduls - SMA 0/11 S Gabbro

Die ermittelten E-Moduln bestätigen die bekannten Einflussgrößen. Der in den Spaltzugschwellversuchen ermittelte E-Modul, infolge des mehrachsialen Beanspruchungszustandes, ist temperatur- und frequenzabhängig. Mit Hilfe der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz nach Hürtgen [21] kann die Masterkurve für das Material aufgestellt werden (siehe Abschnitt 2.1.1). In Abbildung 6.3 ist die Masterkurve für den SMA 0/11 S Gabbro dargestellt. Die Kurve basiert auf Versuchen bei drei verschiedenen Temperaturen (-5 , $+5$ und 20°C) und jeweils mindestens zwei Frequenzen (5 und 10 Hz). Als Referenztemperatur T_R wurden 20°C ausgewählt. Die ermittelten E-Moduln bei -5 und $+5^\circ\text{C}$ werden mit dem Verschiebungsfaktor $\alpha_T(T)$ auf die Masterkurve verschoben. Dadurch ändern sich die den E-Moduln zugeordneten Belastungsfrequenzen.

Einfluss des Hohlraumgehaltes

Ein signifikanter Einfluss der Oberspannung bei konstanter Spannungsdifferenz auf den E-Modul konnte nicht nachgewiesen werden. Vielmehr ist der E-Modul eines Asphaltgemisches stark vom Hohlraumgehalt abhängig.

Abbildung 6.4 zeigt, dass der E-Modul mit steigendem Hohlraumgehalt abnimmt. Die Werte wurden bei einer Prüftemperatur von 20°C und einer Belastungsfrequenz von 10 Hz am SMA 0/11 S Gabbro ermittelt. Der geringere E-Modul bei geringerer Raumdichte lässt sich durch die verminderte Anzahl an Kontaktstellen im Asphaltgemisch infolge des größeren Hohlraumanteils erklären. Die eingetragenen Zugkräfte führen dann bei gleicher Beanspruchung zu größeren Verformungen und infolge dessen zu geringeren E-Moduln.

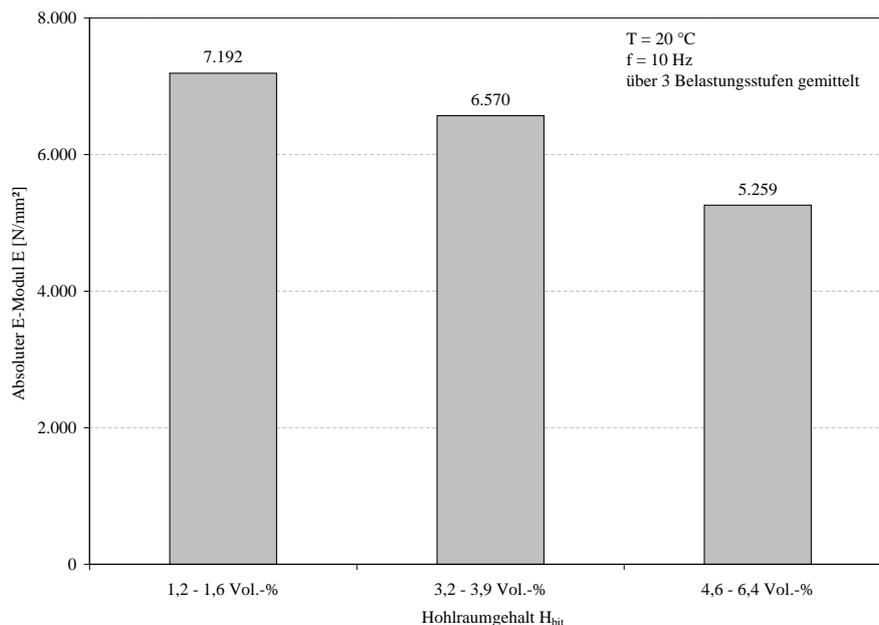


Abbildung 6.4: Abhängigkeit des E-Moduls vom Hohlraumgehalt - SMA 0/11 S Gabbro

Vergleich der berechneten und versuchstechnisch bestimmten E-Modul-Funktionen

Zusätzlich wurden die mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten E-Modul-Funktionen den E-Modul-Funktionen nach Francken/Verstraeten gegenübergestellt. Abbildung 6.5 zeigt die Abweichungen zwischen der versuchstechnisch bestimmten Funktion und der berechneten E-Modul-Funktion für den SMA 0/11 S Gabbro. Die dünne Linie (Rauten) bildet die ermittelte Kennlinie ab, die auf den Versuchen bei -5 , $+5$ und 20°C basiert. Die dicke Linie (Quadrate) zeigt die nach Francken/Verstraeten berechnete E-Modul-Funktion.

Die versuchstechnisch ermittelten E-Moduln liegen unter den berechneten Werten, die anhand der Ergebnisse der Mischgutuntersuchungen bestimmt wurden. Abbildung 6.6 zeigt den Vergleich der berechneten und versuchstechnisch bestimmten E-Modul-Funktion für den AB. Die Abweichungen sind hier viel geringer. Weiterhin fällt auf, dass für den AB die nach Francken/Verstraeten berechnete E-Modul-Funktion unter der versuchstechnisch bestimmten Funktion liegt. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass es für die Bestimmung der E-Modul-Funktion grundsätzlich notwendig ist, Versuche durchzuführen, da sich sonst signifikante Unterschiede ergeben, die die rechnerische Dimensionierung entscheidend beeinflussen.

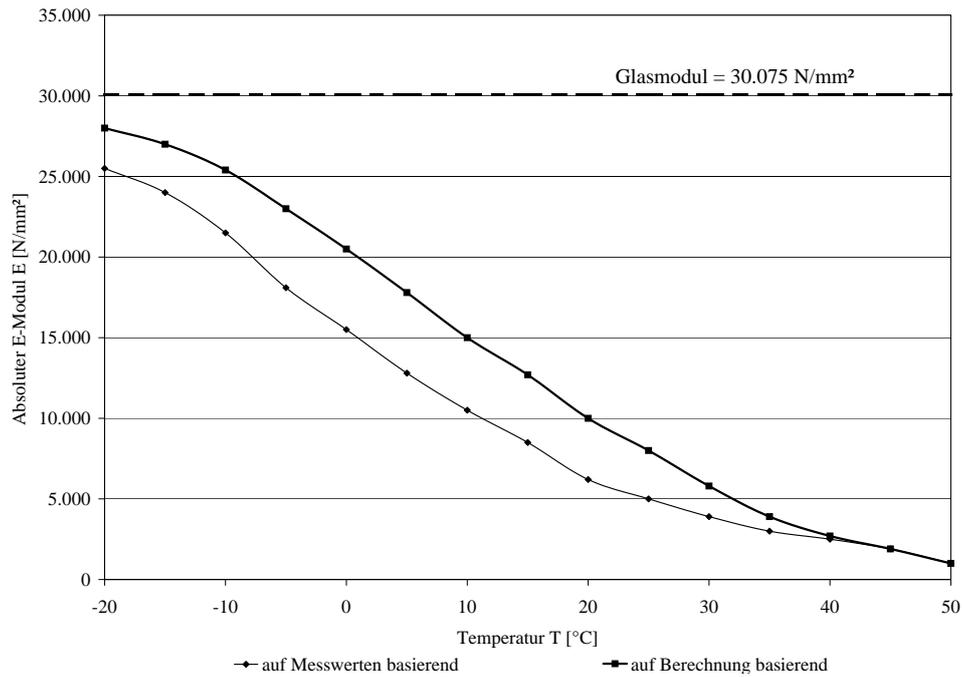


Abbildung 6.5: Vergleich der versuchstechnisch ermittelten und der berechneten E-Modul-Funktion - SMA 0/11 S Gabbro

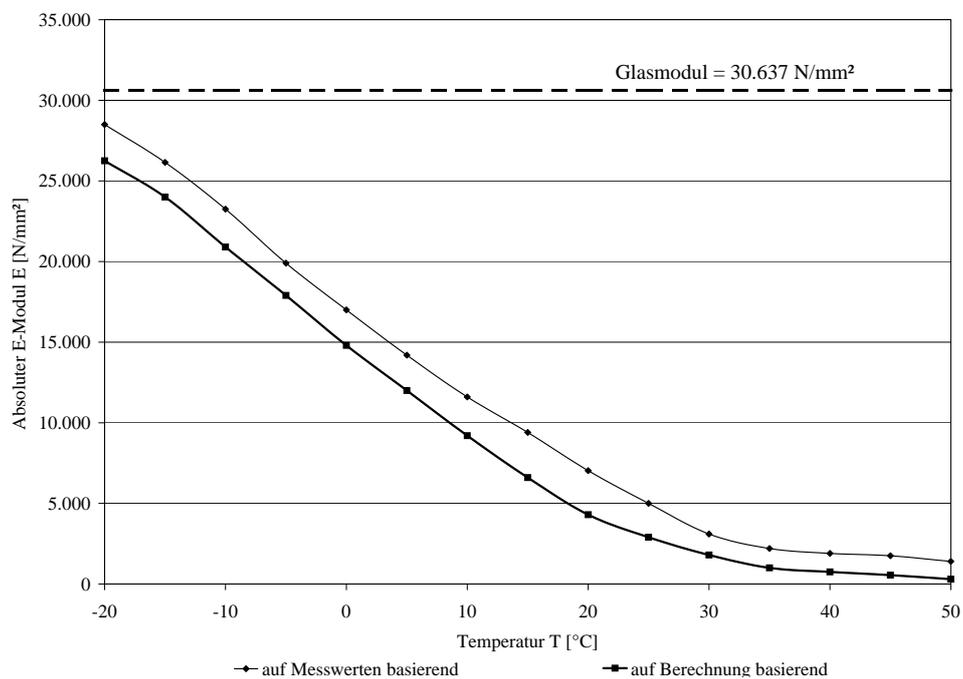


Abbildung 6.6: Vergleich der versuchstechnisch ermittelten und der berechneten E-Modul-Funktion - AB 0/11 S Moräne

Einfluss der Mischgutart auf den E-Modul

Die Zusammenstellung der E-Moduln der untersuchten Asphalte in Abbildung 6.7 zeigt, dass die E-Moduln der Asphalte mit Normalbitumen (AB und ATS) bei tiefen Temperaturen größere Werte

annehmen als die E-Moduln der Asphalte mit polymermodifizierten Bitumen. Den insgesamt geringsten E-Modul besitzt der OPA 0/8 trotz Verwendung eines hochpolymermodifizierten Bitumens. Dies ist auf die vergleichsweise geringe Anzahl von mit Bitumen verklebten Kornkontaktpunkten zurückzuführen. Es zeigt sich, dass der E-Modul (bezogen auf eine Zugbeanspruchung) durch die Sieblinie, das Bindemittel und den Hohlraumgehalt bestimmt wird. Daraus lässt sich ableiten, dass die E-Moduln aller Asphalte einer Befestigung für die rechnerische Dimensionierung bekannt sein müssen, d.h. diese sind anhand von Versuchen zu ermitteln. Weiterhin kann von der verwendeten Bitumenart bzw. -sorte nicht auf die E-Modul-Funktion eines damit hergestellten Asphaltes geschlossen werden.

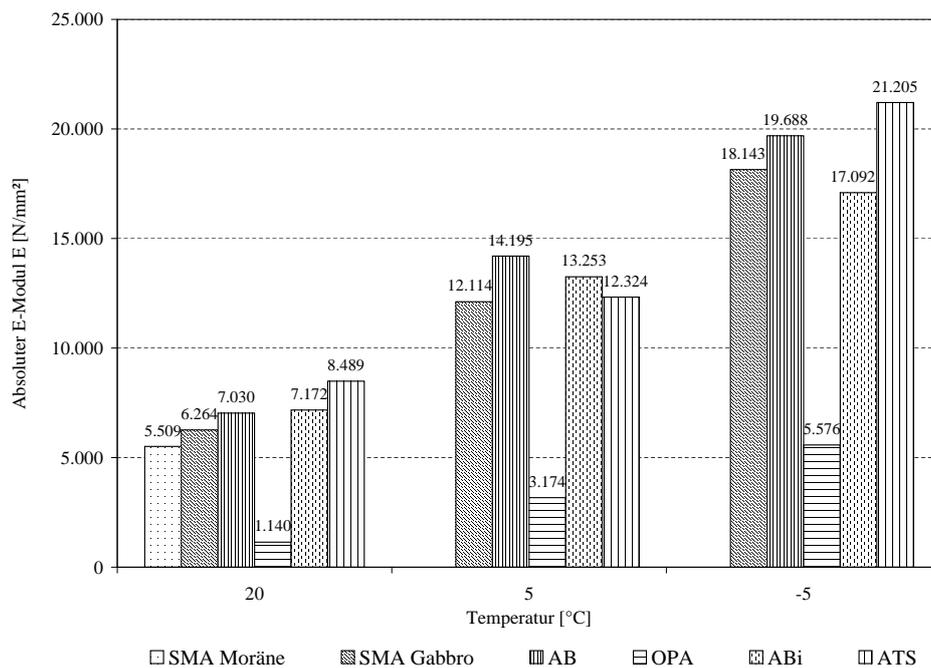


Abbildung 6.7: Vergleich der mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten E-Moduln verschiedener Asphalte bei 10 Hz

6.2.2 Einflussfaktoren auf die Parameter der Ermüdungsfunktion

Unterschiede in den Ermüdungsfunktionen von Asphalten können auf verschiedene Einflussgrößen zurückgeführt werden. Die Asphaltart, die Sieblinie, das Bitumen selbst, die Affinität zwischen Gestein und verwendeten Bitumen, der Hohlraumgehalt und auch die Art der Belastung im Versuch beeinflussen das Ermüdungsverhalten maßgeblich.

Anisotropie

Aufgrund der Kornform der Gesteine und der Verdichtungsrichtung verhält sich eine Asphaltprobe anisotrop. Anisotropie ist insbesondere bei der Verwendung von Gesteine mit plattigem Korn zu erwarten.

Huschek [22] untersuchte in seiner Arbeit das Verformungsverhalten von Asphaltbetonen unter Druckbeanspruchung. Er erkannte, dass sich der größte Verformungswiderstand in der Richtung einstellt, die bei der Verdichtung der größten Druckspannung unterliegt. Weiterhin konnte Huschek die Größe des anisotropen Materialverhaltens unter Druck quantifizieren. Das Verhältnis zwischen den Gesamtdehnungen der beiden Hauptachsen des anisotropen Materials liegt in einem Bereich von 1,25 bis 1,73.

Um die Auswirkungen des anisotropen Materialverhaltens für die Ermüdungseigenschaften von Asphalt beurteilen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Versuche am SMA 0/11 S Gabbro durchgeführt. Dazu wurden Bohrkerne waagrecht aus 12 cm dicken Asphaltplatten entnommen und anschließend in Scheiben gesägt. Die Lagerung der plattigen Körner war an den Stirnflächen der Probekörper sehr gut erkennbar. In Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse drei verschiedener Probekörperserien dargestellt:

- Vergleichprobekörper (Kennzeichnung: *normal*)
Die Probekörper wurden senkrecht aus 4 cm dicken Asphaltplatten herausgesägt.
- Vertikale Ausrichtung der plattigen Körner (Kennzeichnung: *vertikal*)
Die Probekörper wurden waagrecht aus 12 cm dicken Asphaltplatten herausgesägt. Die Probekörper wurden so zwischen den Lasteintragungsschienen positioniert, dass die plattigen Körner vertikal ausgerichtet waren.
- Horizontale Ausrichtung der plattigen Körner (Kennzeichnung: *horizontal*)
Die Probekörper wurden waagrecht aus 12 cm dicken Asphaltplatten herausgesägt. Die Probekörper wurden so zwischen den Lasteintragungsschienen positioniert, dass die plattigen Körner horizontal ausgerichtet waren.

Um keine zusätzliche Einflussgröße berücksichtigen zu müssen, wurden nur Probekörper mit annähernd gleichen Hohlraumgehalt verwendet. Aufgrunddessen liegt z.B. für die Probekörperserie *horizontal* nur ein einzelnes Versuchsergebnis vor. Die Auswirkung der unterschiedlichen Ausrichtung der plattigen Körner lässt sich jedoch trotzdem erkennen.

Die Bohrkernscheiben wurden bei 20°C und 10 Hz geprüft. Die Unterschiede, die sich zwischen den Ermüdungsfunktionen zeigen, sind so gering, dass sie auf Versuchsstreuungen zurückgeführt werden. Es kann also festgehalten werden, dass die Anisotropie keinen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat, da Zugbeanspruchungen hauptsächlich über das Bindemittel und nicht über das Korngerüst abgetragen werden.

Hohlraumgehalt

Der aus verschiedenen Literaturquellen (z.B. Leutner et al. [25]) bereits bekannte Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Ermüdungsfunktion eines Asphaltgemisches konnte bestätigt werden. Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse für den SMA 0/11 S Gabbro. Mit abnehmendem Hohlraumgehalt verbessert sich die Ermüdungsfunktion deutlich. Aus Abbildung 6.4 wird ein gleichzeitiger Anstieg des E-Moduls ersichtlich. Aus diesen Ergebnissen ist zu schlussfolgern, dass ein nicht ausreichend verdichteter Asphalt sehr viel früher Ermüdungserscheinungen zeigen wird.

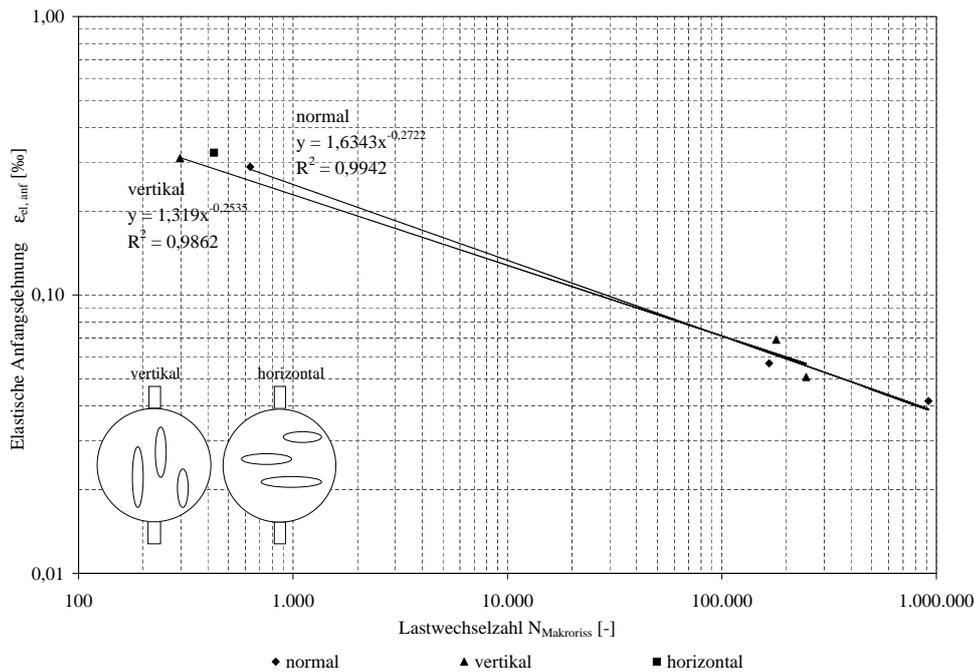


Abbildung 6.8: Einfluss der Anisotropie auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Gabbro

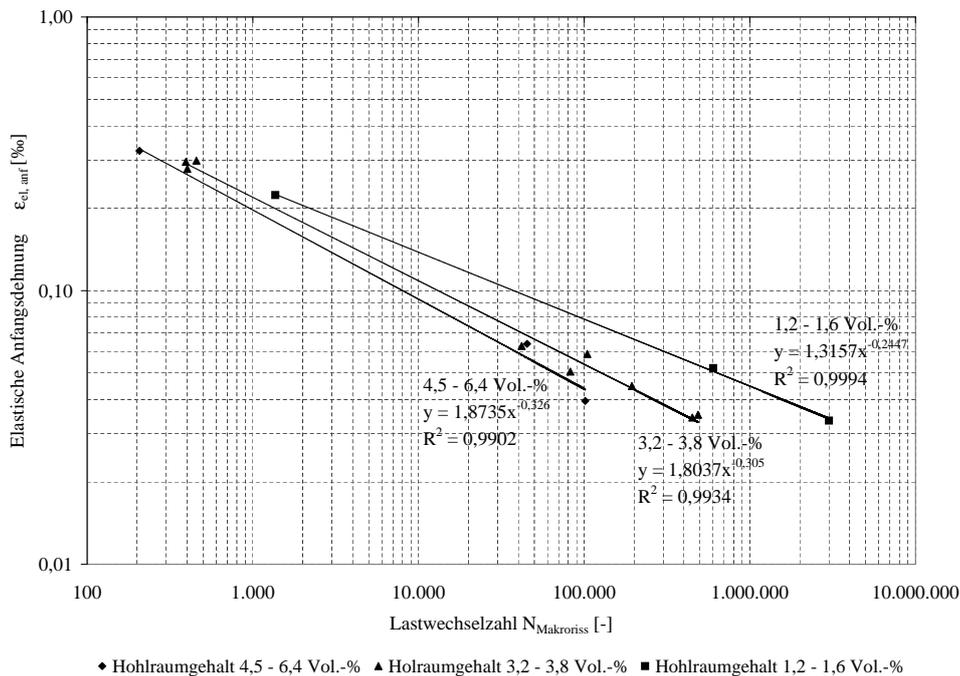


Abbildung 6.9: Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Gabbro

Probekörperabmessungen

Entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 3.3 sind die Probekörperabmessungen auf ein Verhältnis $h/D = 0,4$ zu beschränken. Bei der untersuchten Asphalttragschicht ATS 0/32 CS wurden

Probekörper mit einem Verhältnis $h/D = 90\text{ mm}/150\text{ mm} = 0,6$ (aufgrund des Größtkorns) und mit einem Verhältnis $h/D = 60\text{ mm}/150\text{ mm} = 0,4$ untersucht.

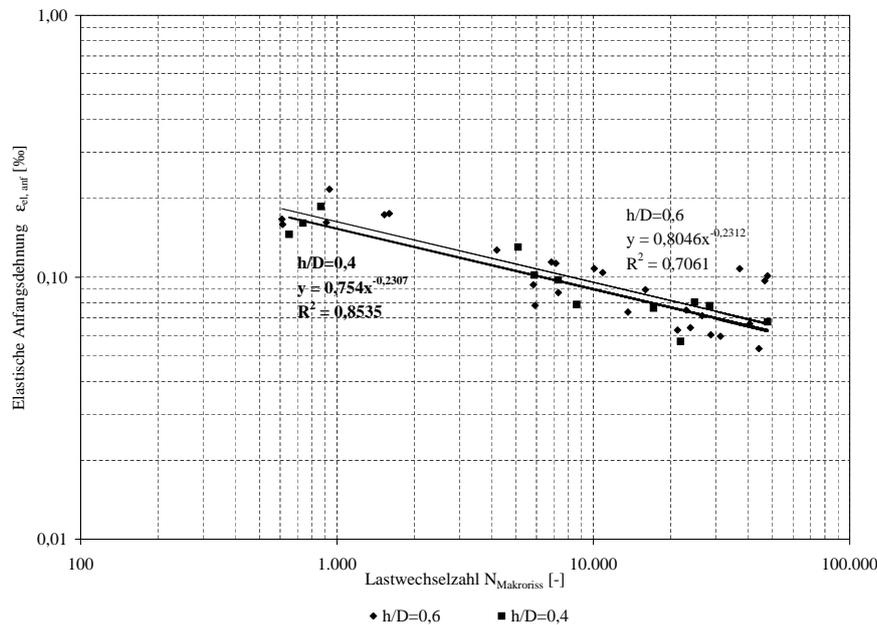


Abbildung 6.10: Einfluss der Probekörperabmessungen auf die Ermüdungsfunktion der ATS

Aus Abbildung 6.10 wird deutlich, dass die Ermüdungsfunktion, basierend auf den Probekörpern mit einer Höhe von 60 mm geringfügig schlechter, gleichzeitig das Bestimmtheitsmaß wesentlich besser ist. Die theoretischen Betrachtungen zum Spaltzugschwellversuch (siehe Abschnitt 3.3) haben bereits gezeigt, dass der angenommene Spannungszustand nur bei Scheiben geringer Dicke (nahezu Null) vorhanden ist. Weiterhin kann festgehalten werden, dass mit dem niedrigeren Verhältnis h/D geringere Prüfstreuungen auftreten.

Der Einfluss des Verhältnis h/D auf den E-Modul ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Ein Einfluss auf den E-Modul (Verminderung gegenüber $h/D = 0,6$) konnte nur bei einer Prüftemperatur von -5°C festgestellt werden. Dieser Umstand kann auf die geringe Anzahl von Einzelversuchen (siehe Anhang B.2.10) zurückgeführt werden.

Die Untersuchungen zu unterschiedlichen Probekörperabmessungen wurden auch am OPA durchgeführt. Im Hinblick auf die Herstellung der Probekörper (Kantenausbrüche - siehe Abschnitt 6.1) waren die Untersuchungen notwendig. Die Vorversuche wurden bei 20°C und einer Belastungsfrequenz von 10 Hz durchgeführt, wobei festgestellt werden musste, dass bei dieser Prüftemperatur die Lastwechselzahl bis zum Makroriss nicht festgestellt werden konnte. In Abbildung 6.12 sind daher die Lastwechselzahlen bis zum Mikroriss angegeben. Der Hohlraumgehalt der Probekörper mit einem Verhältnis $h/D = 0,4$ beträgt ca. $21,5\text{ Vol.} - \%$ und für die Probekörper mit einem Verhältnis $h/D = 0,6$ rund $29,5\text{ Vol.} - \%$. Die Auswirkungen dieser Hohlraumunterschiede werden entweder durch den Einfluss der Probekörperabmessung überdeckt oder sind für offenporige Asphalte weniger ausgeprägt.

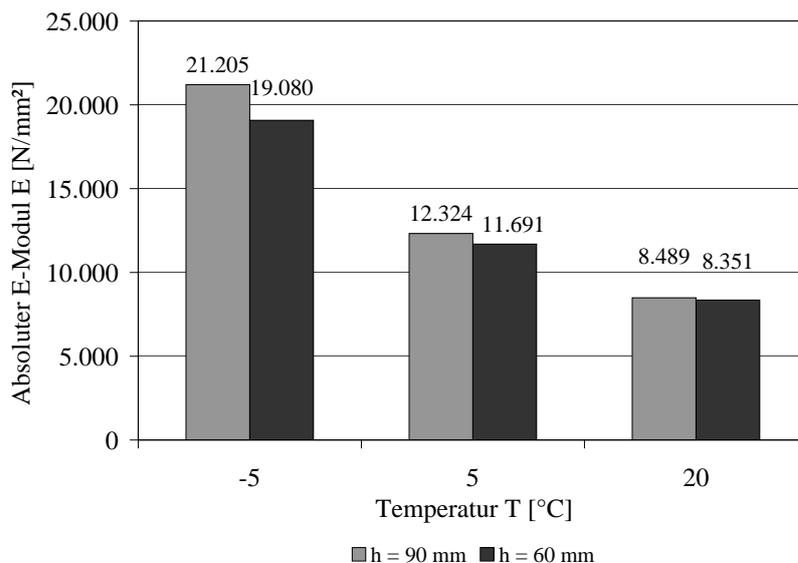


Abbildung 6.11: Einfluss der Probekörperabmessungen auf den E-Modul der ATS

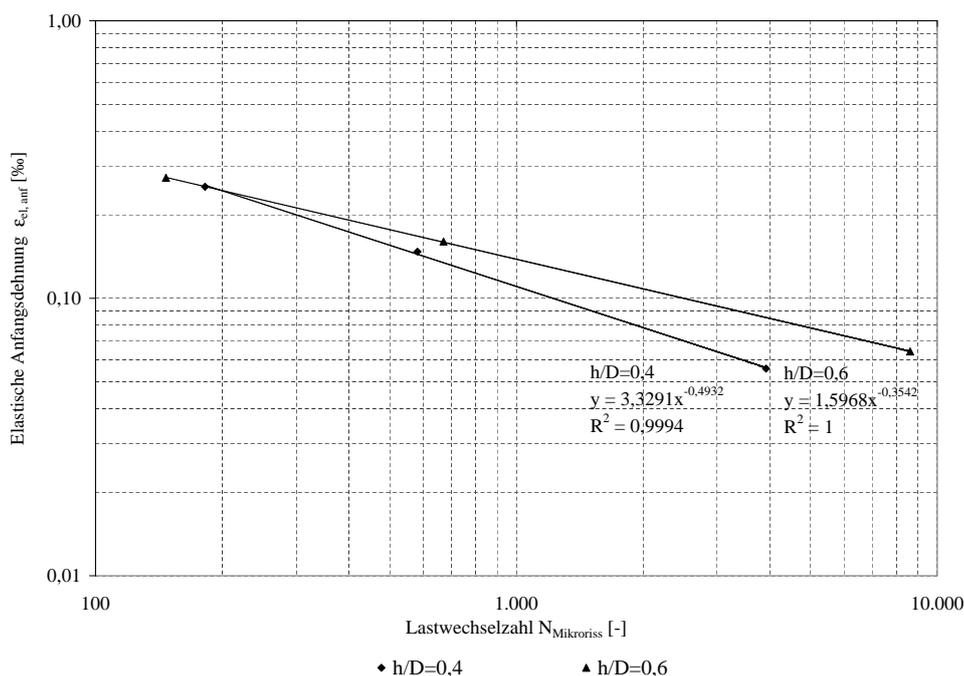


Abbildung 6.12: Einfluss der Probekörperabmessungen auf den Zeitpunkt der Entstehung von Mikrorissen - OPA

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass Probekörper mit einem größeren Verhältnis h/D mehr Lastwechsel bis zum Versagenkriterium ertragen. Dieses Ergebnis kann auf die Änderung des Beanspruchungszustandes (insbesondere der Horizontalspannung) infolge der Änderung der Probekörpergeometrie zurückgeführt werden. Die Unterschiede des Horizontalspannungszustandes

bei verschiedenen Probekörperhöhen ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Mischgutzusammensetzung

Anhand zweier Splittmastixasphalte (SMA 0/11 S) mit unterschiedlichem Gestein (Gabbro und Moräne) und polymermodifizierten Bindemittel verschiedener Hersteller konnte festgestellt werden, in welchen Größenordnungen die Unterschiede hinsichtlich der Ermüdungsfunktion und des E-Moduls liegen. Beide Asphalte wurden nach den geltenden deutschen Regelwerken (ZTV Asphalt-StB 01 [9]) konzipiert. Abbildung 6.13 zeigt die Ermüdungsfunktionen der beiden Splittmastixasphalte.

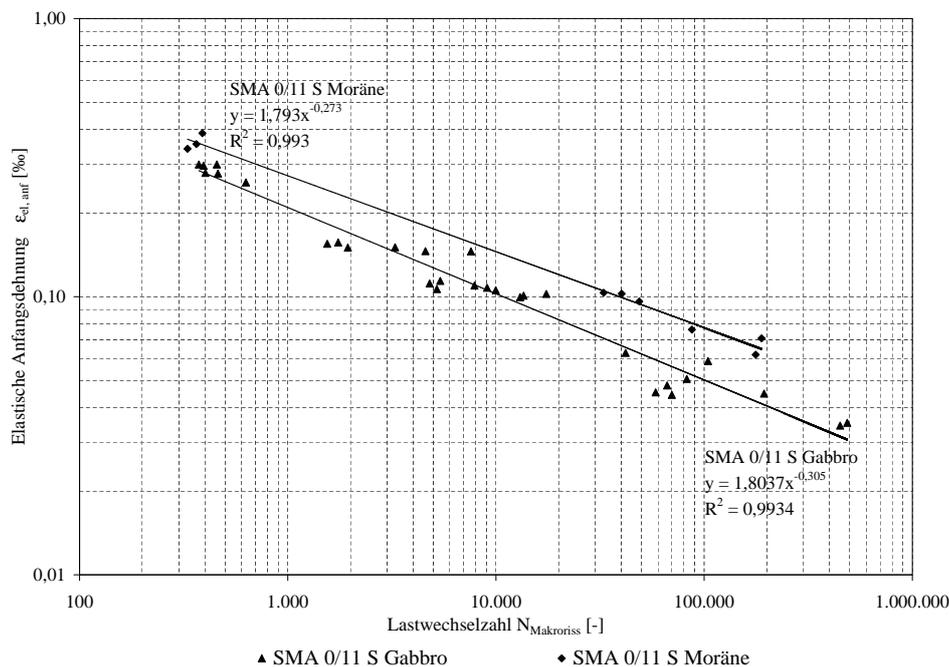


Abbildung 6.13: Vergleich der Ermüdungsfunktionen zweier SMA 0/11 S PmB 45A, 10 Hz

Die E-Moduln unterscheiden sich bei 20°C und einer Belastungsfrequenz von 10 Hz nur geringfügig. Für den SMA 0/11 S Gabbro ist $E = 6.260\text{ N/mm}^2$ und für den SMA 0/11 S Moräne ist $E = 5.510\text{ N/mm}^2$. Die dargestellten Unterschiede (siehe Abbildung 6.13) verdeutlichen, dass die Anwendung von allgemeingültigen Standard-Ermüdungsfunktionen für Splittmastixasphalte nicht möglich ist. Das gilt vermutlich für alle Asphaltarten. Für Dimensionierungsrechnungen ist die Aufstellung von Ermüdungsfunktionen für den jeweiligen Asphalt auf der Grundlage von Versuchen unbedingt notwendig.

In einer an der Professur für Straßenbau der TU Dresden in Kooperation mit der EUROVIA SERVICES GmbH durchgeführten Diplomarbeit (Meissner [27]) wurde der Einfluss der Mischgutzusammensetzung (Sieblinie und Bindemittelgehalt) auf das Ermüdungsverhalten eines Asphaltbetones systematisch untersucht. Die Ergebnisse sollen hier nur kurz zusammengefasst werden. Für die Ermüdungsuntersuchungen wurden zwei stetige Sieblinien mit $n = 0,4$ und $n = 0,6$ entsprechend

der Talbot-Funktion ausgewählt.

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (6.1)$$

mit:

A	[$M. - \%$]	Siebdurchgang
d	[mm]	beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
D	[mm]	Größtkorndurchmesser
n	[$-$]	Exponent der Talbot-Funktion

Die Asphalte mit den entsprechenden Sieblinien wurden jeweils mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten (6,2; 6,6 und 7,0 $M. - \%$) konzipiert. Da die Asphaltplatten für die Probekörper kombiniert weg-/kraftgeregelt im Walzsektorverdichter hergestellt wurden, weichen die Hohlraumgehalte der einzelnen Asphalte voneinander ab. Dieser zusätzliche Einfluss ist bei den Ergebnissen zu berücksichtigen.

Ein Einfluss des Bindemittelgehaltes ist für die drei Asphalte der Sieblinie $n = 0,4$ vorhanden, äußert sich jedoch ausschließlich in unterschiedlichen Anstiegen der Ermüdungsfunktion. Der Hohlraumgehalt der drei Asphalte mit $n = 0,4$ ist nahezu null, da es sich um sehr verdichtungswillige Materialien bzw. Sieblinie handelt. Für die verdichtungsunwilligen Asphalte mit der Sieblinie $n = 0,6$ konnte kein Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Ermüdungsfunktion festgestellt werden. Die Ermüdungsfunktionen für diese drei Asphalte sind trotz des großen Hohlraumgehaltes ($H_{bit} = 6,6$ bis $12,0 Vol. - \%$) im Vergleich zu den anderen drei Asphalten mit $n = 0,4$ günstiger. Weiterhin zeigte sich, dass die innerhalb der Diplomarbeit untersuchten sechs Asphaltbetone eine wesentlich bessere Ermüdungsfunktion aufweisen als der bereits untersuchte Asphaltbeton dieser Arbeit, der jedoch einen deutlich größeren E-Modul aufweist.

Diese ersten Ergebnisse zeigen also, dass für die Konzeption eines ermüdungsbeständigen Asphalttes ausreichend Potential vorhanden ist, welches nur im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung berücksichtigt werden kann.

Mischgutart

Die bereits beschriebenen Einflussfaktoren bewirken in der Summe die Unterschiede im Ermüdungsverhalten verschiedener Asphaltarten. In Abbildung 6.14 sind die Ermüdungsfunktionen der mit dem Spaltzugschwellversuch untersuchten Asphalte dargestellt. Der OPA 0/8 weist die günstigste Ermüdungsfunktion auf, besitzt jedoch gleichzeitig den geringsten E-Modul (siehe Abbildung 6.7). Für den Asphaltbeton AB 0/11 S konnte bei sehr hohen E-Modul-Werten die ungünstigste Ermüdungsfunktion nachgewiesen werden.

Um das Ermüdungsverhaltens der untersuchten Deckschichtmaterialien fundiert beurteilen zu können, sind Dimensionierungsrechnungen notwendig. Zur Verdeutlichung der Unterschiede wurde der Verformungs- und Beanspruchungszustand des bereits beschriebenen Beispiels (siehe Abschnitt 2.2.1) unter Berücksichtigung der verschiedenen Deckschichtmaterialien für den sommerlichen Temperaturfall berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Als Nachweispunkte

wurde der Bereich der maximalen Zugspannung σ_x an der Oberseite der Deckschicht ausgewählt. Dieser Bereich liegt mittig zwischen den Rollspuren. Die unter den Deckschichten liegenden Schichten (Parameter) wurden nicht verändert.

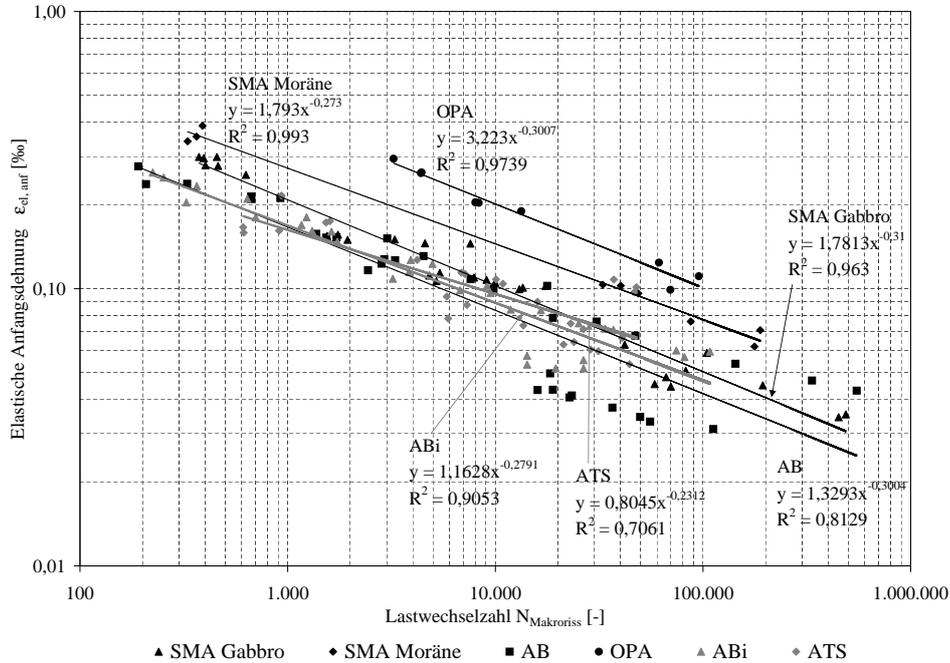


Abbildung 6.14: Vergleich der mit Spaltzugschwellversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen

Deckschichtmaterial	E-Modul [N/mm^2]	$\sigma_{x,max}$ [N/mm^2]	$\varepsilon_{x,max}$ [%]	$N_{Makroriss}$ [—]
SMA Gabbro	3.600	0,0673	0,020797	1.408.043
SMA Moräne	3.000	0,058707	0,0218	9.903.040
AB	3.300	0,062955	0,021351	384.539
OPA	≈ 800	0,01898	0,026359	7.391.593

Tabelle 6.1: Vergleich des Lastwechselzahlen bis zum Eintreten des Ermüdungskriteriums für die verschiedenen Deckschichtmaterialien

Anhand von Tabelle 6.1 wird deutlich, dass der OPA am Nachweispunkt aufgrund des sehr geringen E-Moduls die größten Dehnungen ertragen muss, aber ein Makroriss aufgrund der günstigen Ermüdungsfunktion erst nach rund $7,4 \cdot 10^6$ Lastwechseln eintritt. Die höchste Lastwechselzahl bis zum Ermüdungskriterium erträgt der SMA Moräne, da der E-Modul im Vergleich zu den anderen Materialien nur unwesentlich geringer ausfällt, aber die Ermüdungsfunktion sehr gut ist. Das aufgrund der ungünstigen Ermüdungsfunktion zu erwartende schlechte Ermüdungsverhalten des AB wurde bei der Berücksichtigung der E-Modul-Funktion bestätigt.

Belastungsfrequenz

Neben dem E-Modul ist auch die Ermüdungsfunktion eines Asphalttes frequenzabhängig. Abbildung 6.15 zeigt den Einfluss der Belastungsfrequenz am Beispiel des SMA 0/11 S Moräne. Es ist zu erkennen, dass es kaum einen Unterschied zwischen den Funktionen für 5 Hz und 10 Hz gibt. Erst bei noch niedrigeren Belastungsfrequenzen verschlechtert sich die Ermüdungsfunktion.

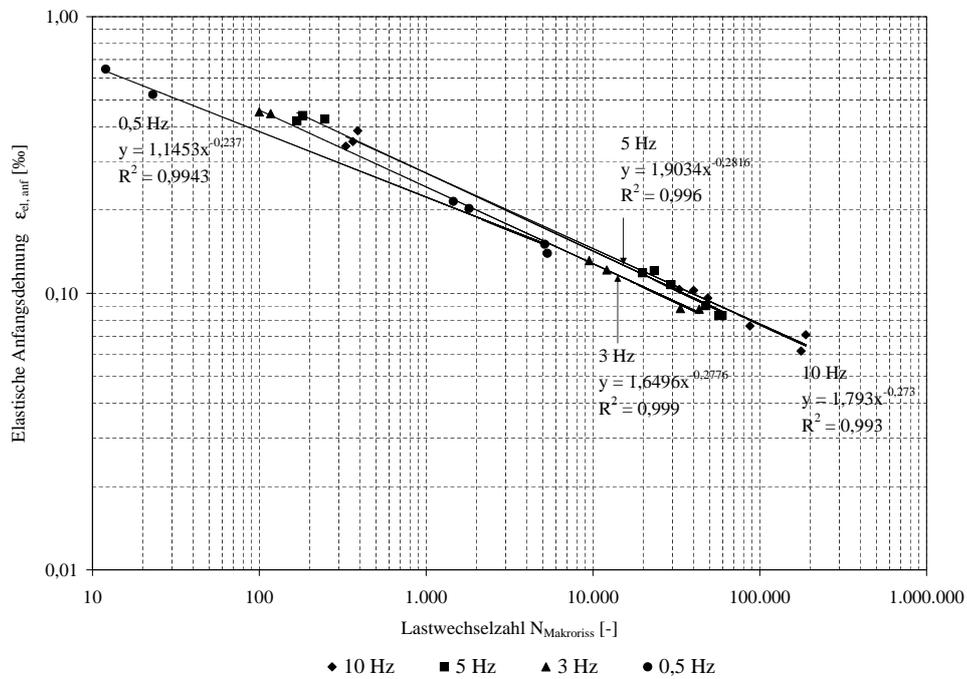


Abbildung 6.15: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Moräne

Kapitel 7

Ergänzende Betrachtungen und Ergebnisse der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung

7.1 Voruntersuchungen zur Probekörperherstellung

Für die Probekörperherstellung für die Triaxialversuche mussten vorab verschiedene Verfahren getestet werden, um das günstigste Verfahren zu ermitteln. Ziel dieser Voruntersuchung war es, Asphaltprobekörper mit einem über den Probekörper gleichen Hohlraumgehalt herzustellen. Für die Voruntersuchungen wurden ausschließlich Verfahren gewählt, die unter Laborbedingungen gut realisierbar sind und bei gleichbleibenden Randbedingungen voraussichtlich zu gleichwertigen Probekörpern führen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden Probekörper aus einem ABi 0/16 S mit Bitumen 30/45 hergestellt. Die Raumdichte, ermittelt an einem Marshall-Probekörper, betrug $2,34 \text{ g/cm}^3$. Die Probekörper folgender Herstellungsverfahren wurden im Referat S4 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) einer radiometrischen Dichtemessung über die Höhe unterzogen, um Unstetigkeitsstellen aufzuzeigen.

- Lagenweise Verdichtung des Asphaltmischgutes in vorgeheizten Stahlformen mit dem Bohrerhammer und einer Stampferplatte.
- Verdichtung des Asphaltmischgutes mit dem Gyrator. Die Probekörper werden durch Verkleben einzelner Gyratorprobekörper mit Bitumen gewonnen.
- Verdichtung des Asphaltmischgutes mit einem Walzsegmentverdichter. Die Probekörper werden durch Bohrkernentnahme aus den Asphaltplatten gewonnen.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der radiometrischen Dichteuntersuchungen dargestellt. Auf der x-Achse ist jeweils die auf der Grundlage von Messungen ermittelte Raumdichte und auf der y-Achse die zugehörige Höhe des Probekörpers abgetragen. Die Messungen wurden in allen drei Fällen an stehenden zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 150 mm vorgenommen.

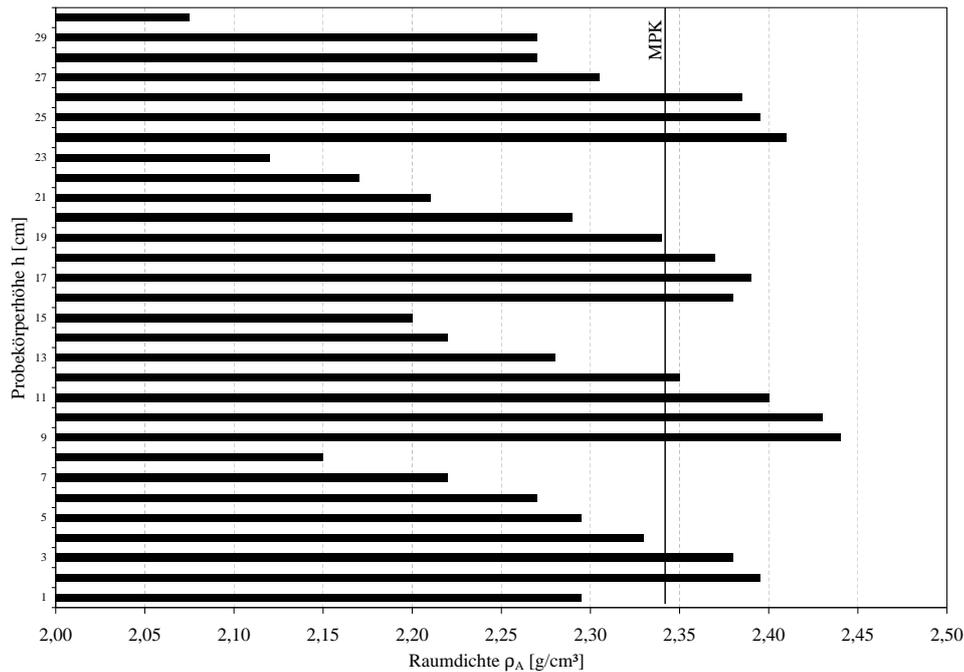


Abbildung 7.1: Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Bohrhammer, [38]

In Abbildung 7.1 ist zu erkennen, dass bei der lagenweise durchgeführten schlagenden Verdichtung mit dem Bohrhammer keine homogene Dichteverteilung erzielt wird. Die Ergebnisse der Raumdichtemessung des Probekörpers liegen im Bereich von $2,075$ bis $2,440 \text{ g/cm}^3$. Die Grenzflächen der einzelnen Lagen sind deutlich zu erkennen und weisen die höchsten bzw. niedrigsten Werte für die Raumdichte auf. Die Werte für die Raumdichte liegen zum Teil über und zum Teil unter der Bezugsraumdichte des MPK. Die Ursache für die ungleichmäßige Verdichtung liegt offensichtlich in der unzureichenden Verdichtungszeit für jede einzelne Schicht. An der Unterseite der jeweiligen Schicht konnte das Asphaltgemisch erfolgreich verdichtet werden. Für das darüberliegende Material war die Einwirkzeit der Verdichtungsenergie zu kurz.

Im nächsten Schritt der Voruntersuchungen wurden die Probekörper des Gyratorverfahrens untersucht. Die Höhe der Probekörper ist bei einem Durchmesser von 150 mm aufgrund der Stahlformen auf ca. 180 mm begrenzt. Daher mussten die Probekörper für die Triaxialversuche aus zwei kleineren Probekörpern zusammengesetzt werden. Ein Probekörper wurde in der Mitte auseinander gesägt und anschließend oben und unten mit entsprechendem Bitumen an den zweiten Probekörper angeklebt, so dass ein insgesamt 300 mm hoher Probekörper entstand.

Aus Abbildung 7.2 ist abzuleiten, dass mit dem (knetenden) Gyratorverfahren ein homogenerer Dichteverlauf als mit der schlagenden Verdichtung durch den Bohrhammer erreicht werden kann, wobei die Klebefugen deutlich als Unstetigkeitsstellen mit sehr geringer Raumdichte zu erkennen sind. Ohne diese Störstellen liegt die Raumdichte in einem Bereich von $2,37$ bis $2,47 \text{ g/cm}^3$. Die erzielten Dichten liegen deutlich über der Referenzdichte des MPK.

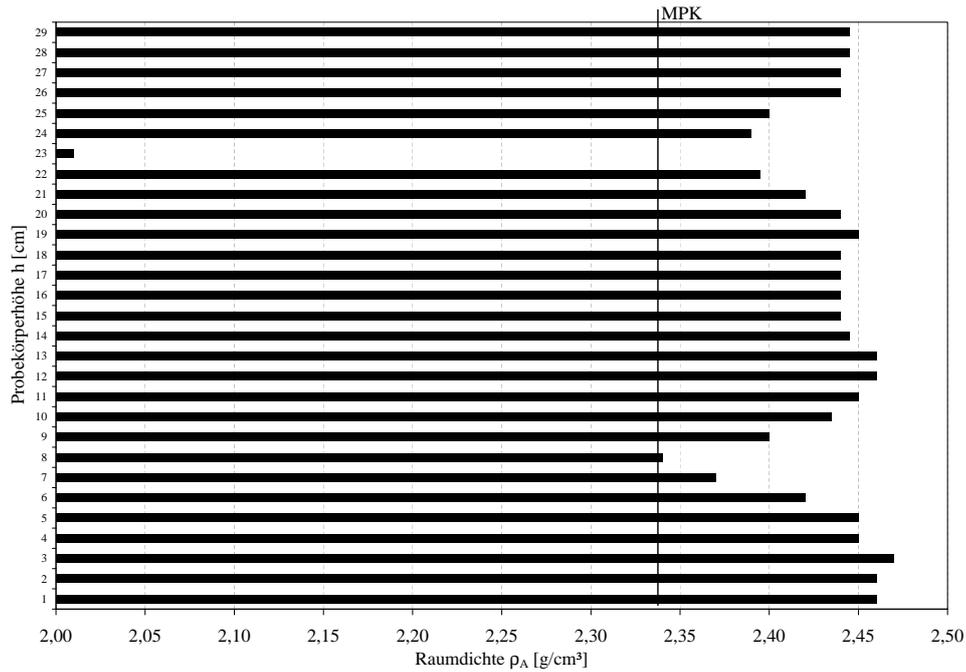


Abbildung 7.2: Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Gyrator, [38]

Abschließend wurde die Herstellung und Verdichtung von Platten dem Walzsektorverdichter und anschließender Probekörpergewinnung durch Bohrkernentnahme untersucht. Dazu wurden Asphaltplatten der Abmessungen $50 \times 40 \times 17 \text{ cm}$ an der FMPA der BTU Cottbus hergestellt. Die walzende Verdichtung kommt den realen Verdichtungsbedingungen mit Walzen am nächsten.

Die Entnahme der Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm erfolgte in waagerechter Richtung aus den Asphaltplatten, so dass ein 400 mm langer Bohrkern entstand.

In Abbildung 7.3 ist der Dichteverlauf über die Höhe eines Bohrkerns dargestellt. Die Messergebnisse liegen für diesen Probekörper im Bereich von $2,025$ bis $2,435 \text{ g/cm}^3$, wobei die geringsten Werte in den Randbereichen auftreten. Da lediglich Probekörper mit einer Länge von 300 mm erforderlich sind, werden diese Randbereiche durch Absägen entfernt. Dadurch wird die Referenzdichte des MPK von $2,34 \text{ g/cm}^3$ im gesamten Probekörper erreicht bzw. nur geringfügig überschritten. Die genaue Einstellung der Dichte erfolgt über die Variation der Maximalkraft während der Verdichtung und die Mischguteinwaage.

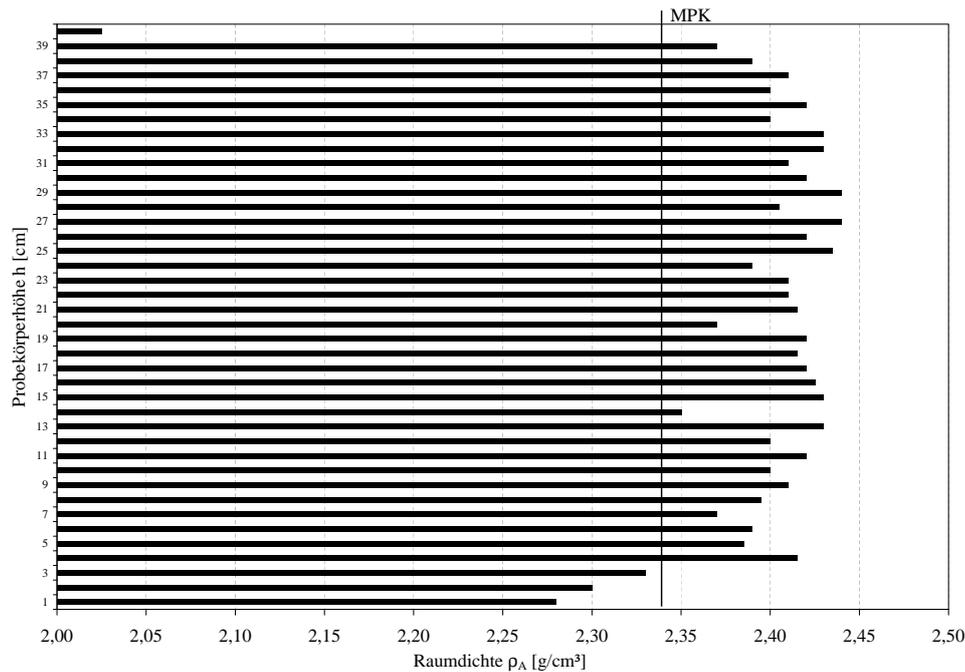


Abbildung 7.3: Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Walzsektorverdichter, [38]

7.2 Probekörperherstellung und -vorbereitung

Anhand der beschriebenen Vorversuche zur Probekörperherstellung wurde entschieden, die Probekörper für die Triaxialversuche aus Asphaltplatten herauszubohren. Diese wurden im Walzsektorverdichter der BTU Cottbus / FMPA hergestellt. Für das Asphalttragschichtmaterial musste das Programm mit weggeregelter Verdichtung verwendet werden, da der erforderliche Mindesthohlraumgehalt nur so erzielt werden konnte. Das Programm der weggeregelten Verdichtung ist folgendermaßen untergliedert:

- Der Walzsektor wird abgesenkt bis eine Kraft von $1,00 \text{ kN}$ erreicht wird. Danach beginnt die walzende Verdichtung.
- Je Walzübergang wird das Asphaltgemisch in der Stahlform um $0,3 \text{ mm}$ zusammengedrückt bis die eingegebene Zielhöhe der Platte erreicht ist. Dabei werden mit zunehmendem Fortschritt größere Druckkräfte aufgebracht.
- Abschließend werden weitere 15 Walzübergänge bei unveränderter Höhe ausgeführt.

Die Platten der Deckschichtmaterialien und des Asphaltbinders wurden mit dem am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig entwickelten kombinierten Programm mit weg-/kraftgeregelter Verdichtung hergestellt. Die jeweilige Probe wird dabei zuerst weggeregelt vorverdichtet und anschließend einer kraftgeregelten Hauptverdichtung unterzogen. Die Vor- und Hauptverdichtung ist jeweils in drei Phasen gegliedert.

Weggeregelte Vorverdichtung

- Vorbelastung: Für die weggeregelte Vorverdichtung wird der Walzsektor bis 200 mm über den Stahlboden abgesenkt und dann mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm pro Walzübergang nach unten bewegt. Zum Erreichen des Weges von 0,5 mm ist nach jedem Walzübergang eine zunehmende Kraft erforderlich. Die Vorbelastung wird beendet, sobald die Verdichtungskraft einen Wert von 4,0 kN erreicht hat.
- Halten: Es werden fünf Walzübergänge bei unverändertem Weg ausgeführt.
- Entlasten: Der Walzsektor wird mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm pro Walzübergang von der Mischgutprobe entfernt, bis die Probe vollständig entlastet ist.

Kraftgeregelte Hauptverdichtung

- Glätten: Zum Glätten werden 15 Walzübergänge mit der geringen Last von 0,8 kN ausgeführt.
- Verdichten: Die Last wird stufenweise (Laststeigerung von z.B. 0,67 kN je Walzübergang) bis zum Erreichen der Höchstlast von z.B. 10 kN gesteigert. Dazu sind insgesamt 15 Walzübergänge erforderlich.
- Entlasten: Mit der Entlastungsphase wird ein nochmaliges Glätten der Probe erreicht. Dabei sinkt die Belastung in Stufen von z.B. 0,67 kN innerhalb von 15 Walzübergängen bis auf Null ab.

In Tabelle 7.1 sind die Kennwerte der Hauptverdichtung für das in Braunschweig entwickelte Verdichtungsprogramm zusammengefasst.

Mischgutart /-sorte	Übergänge			Maximal- kraft	Mischgut- temperatur
	Glätten	Verdichten	Entlasten		
SMA Gabbro	15	15	15	10 kN	145°C
SMA Moräne	15	15	15	9 kN	145°C
ABi	15	15	15	9 kN	145°C
ATS	weggeregelte Verdichtung			-	135°C

Tabelle 7.1: Kennwerte der Hauptverdichtung für die untersuchten Asphalte

Aufgrund des hohen materiellen und zeitlichen Aufwandes bei der Herstellung wurde der zulässige Raumdichte- bzw. Hohlraumgehaltsbereich der Probekörper für die Triaxialversuche vergrößert. Bei der Probekörperauswahl wurde jedoch angestrebt, dass die Hohlraumunterschiede für die Einzelversuche bei einer Belastungsfrequenz möglichst gering ausfielen (siehe Anhang B.1). In Tabelle 7.2 sind die Werte zusammengefasst.

Mischgutart /-sorte	Raumdichte [g/cm ³]	Hohlraumgehalt [Vol. – %]
SMA 0/11 S Gabbro	2,421 - 2,525	6,99 - 3,00
SMA 0/11 S Moräne	2,291 - 2,343	5,76 - 3,62
ABi 0/16 S	2,315 - 2,384	7,92 - 5,17
ATS 0/32 CS	2,369 - 2,441	6,92 - 4,10

Tabelle 7.2: Grenzen von Raumdichte und Hohlraumgehalt für die Probekörper der Triaxialversuche

7.3 Ergebnisse der Triaxialversuche

7.3.1 Wiederholbarkeit der Triaxialversuche

Um die Auswirkungen der Einfachbelegung der Triaxialversuche beurteilen zu können, wurde eine Spannungskombination am SMA Gabbro dreifach wiederholt (siehe Probekörper S32-1, S38-1 und S52-1 in Anhang B.1.1). Die Versuchsbedingungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Vertikalspannung $\sigma_{x;o} \approx 1,00 \text{ N/mm}^2$
- Horizontalspannung $\sigma_{y/z;o} \approx 0,90 \text{ N/mm}^2$
- Prüftemperatur 20°C
- Belastungsfrequenz 10 Hz

Der Hohlraumgehalt der drei Probekörper lag zwischen 3,0 und 4,5 Vol. – %. Die Grenzen, in denen der Hohlraumgehalt nur einen untergeordneten Einfluss auf das Materialverhalten hat, waren somit eingehalten. In Abbildung 7.4 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche dargestellt. Die ermittelten E-Moduln sind ebenfalls eingetragen.

Für den Probekörper S32-1 wurde der höchste absolute E-Modul und auch die größte Differenz zum Mittelwert des E-Moduls für die Versuchsreihe bei 20°C und 10 Hz bestimmt. Weiterhin liegt der Datenpunkt bezogen auf die drei identischen Versuche am weitesten von der Ermüdungsfunktion entfernt. Dieser Probekörper könnte aufgrund dieser Kriterien als Ausreißer definiert werden. Er wurde jedoch in der Auswertung berücksichtigt.

In Tabelle 7.3 sind die Materialparameter und das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung für die Ermüdungsfunktion zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Ermüdungsfunktion nur in sehr geringem Maße durch die Berücksichtigung der mehrfach wiederholten Spannungskombination verändert wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass es für die Qualität einer Ermüdungsfunktion besser ist ein weites Dehnungsspektrum abzudecken, anstelle der mehrfachen Wiederholung ein und derselben Spannungs- bzw. Dehnungsstufe.

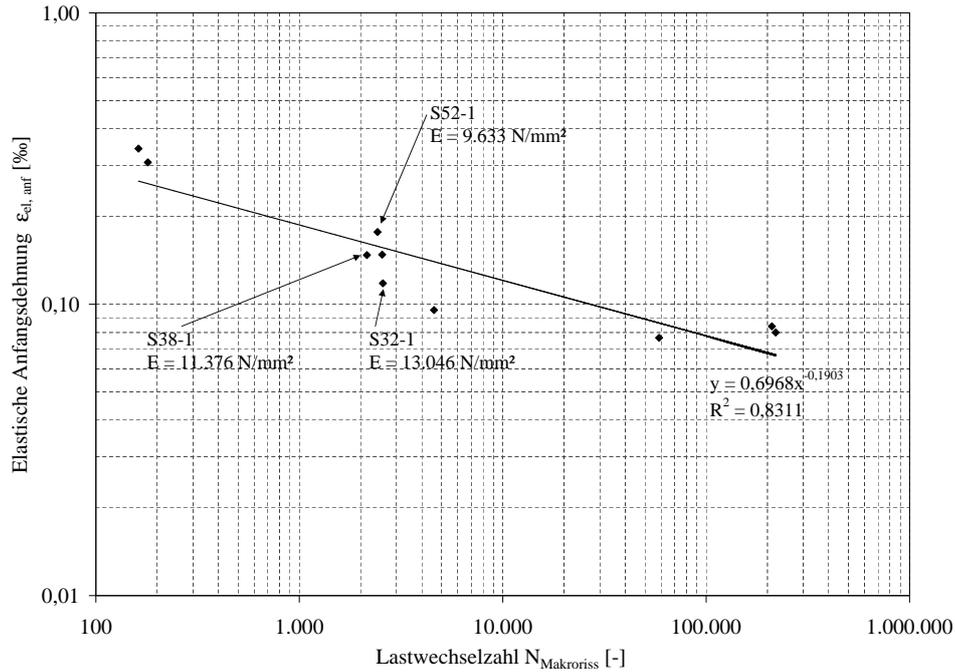


Abbildung 7.4: Wiederholbarkeit von Triaxialversuchen - SMA Gabbro, 10 Hz

berücksichtigt	A	B	R^2
S32-1	0,6944	-0,1902	0,8340
S32-1, S38-1	0,6788	-0,1887	0,8319
S32-1, S38-1, S52-1	0,6968	-0,1903	0,8311

Tabelle 7.3: Materialparameter der Ermüdungsfunktion bei mehrfacher Wiederholung

7.3.2 E-Modul

Die Frequenzabhängigkeit des sich aus der elastischen Anfangsdehnung ergebenden E-Moduls, ermittelt im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung, konnte festgestellt werden. Abbildung 7.5 zeigt den Zusammenhang für den SMA 0/11 S Gabbro. Der absolute E-Modul verringert sich bei beiden Prüftemperaturen mit abnehmender Belastungsfrequenz.

Die Gegenüberstellung aller E-Moduln der mit dem Triaxialversuch untersuchten Asphalte (siehe Abbildung 7.6) zeigt den vergleichsweise sehr hohen Wert der Asphalttragschicht, die mit Normalbindemittel hergestellt wurde. Die Werte für die Asphalte mit polymermodifizierten Bindemitteln unterscheiden sich bei -10°C kaum voneinander. Bei 20°C kann jedoch eine Unterscheidung erfolgen, die zeigt, dass der SMA Gabbro den höchsten E-Modul-Wert besitzt.

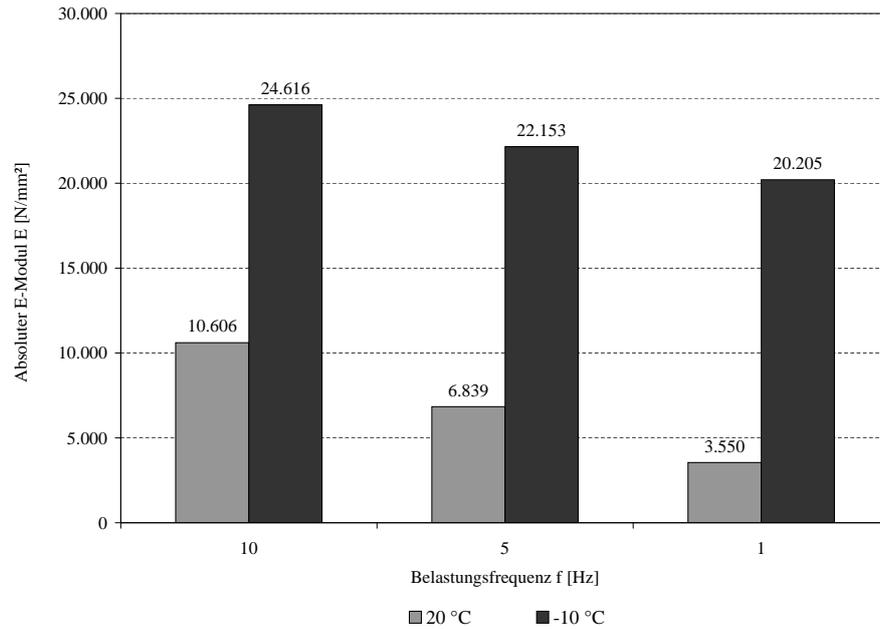


Abbildung 7.5: Frequenzabhängigkeit des absoluten E-Moduls im Triaxialversuch - SMA 0/11 S Gabbro

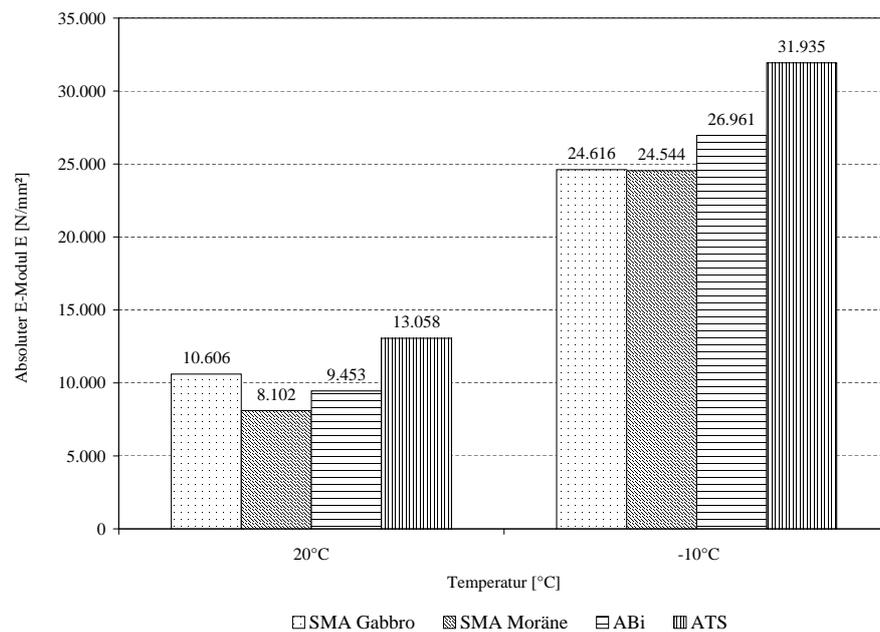


Abbildung 7.6: Vergleich der im Triaxialversuch ermittelten E-Moduln

Für den SMA Gabbro wurden Versuche bei 20°C , einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und verschiedenen Spannungskombinationen durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Spannungskomponenten und E-Modul zu ermitteln. In Abbildung 7.7 und 7.8 sind die Ergebnisse dargestellt. Der Zusammenhang zwischen den Spannungskomponenten σ_x und $\sigma_{y/z}$ ist anhand der Versuchsergebnisse nur schwer beschreibbar. Die Tendenzen werden offensichtlich infolge der Prüfstreuungen nicht

erkennbar. Es scheint jedoch, dass der absolute E-Modul mit steigendem σ_x abnimmt. Änderungen bei der Spannungskomponente $\sigma_{y/z}$ hingegen führen nicht zu einheitlichen Tendenzen. Es kann bzw. muss davon ausgegangen werden, dass der E-Modul spannungsabhängig ist. Die aufgezeigten Unterschiede nur auf die Prüfstreuungen zurückzuführen, erscheint nicht möglich.

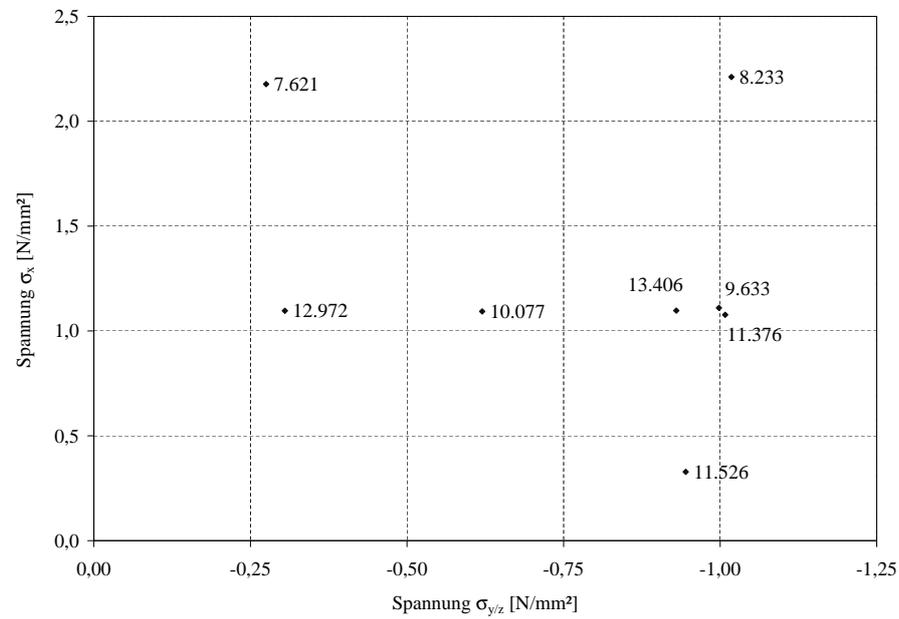


Abbildung 7.7: Zusammenhang zwischen den Spannungskomponenten σ_x und $\sigma_{y/z}$ und dem E-Modul - SMA Gabbro, 10 Hz

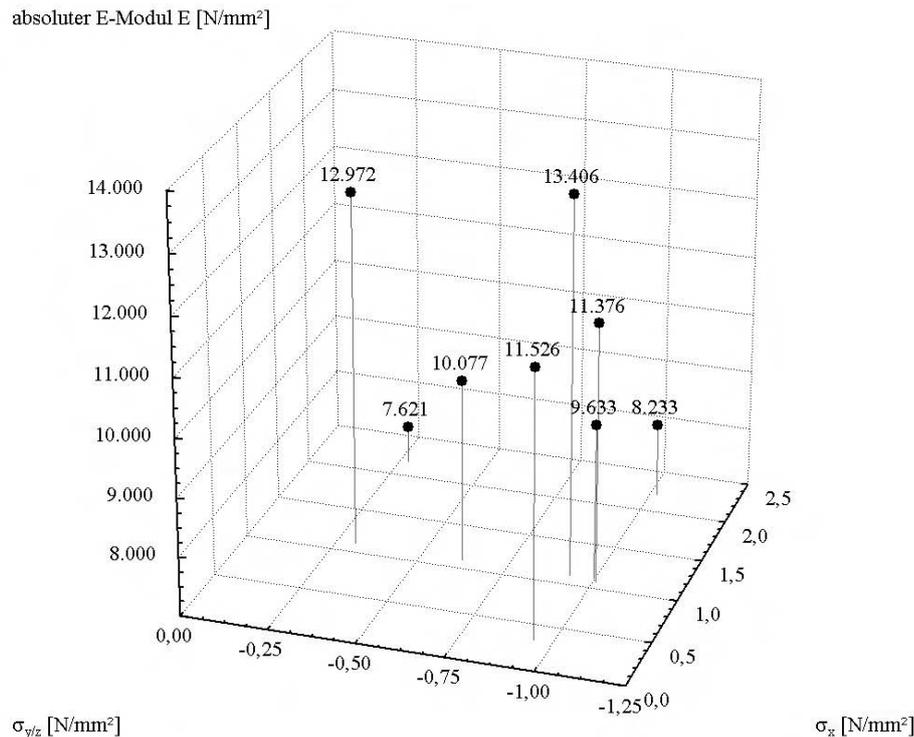


Abbildung 7.8: Dreidimensionale Darstellung des Zusammenhanges zwischen den Spannungskomponenten σ_x und $\sigma_{y/z}$ und dem E-Modul - SMA Gabbro, 10 Hz

7.3.3 Einflussfaktoren auf die Parameter der Ermüdungsfunktion

Mischgutzusammensetzung

Die beiden Splittmastixasphalte wurde auch mit dem Triaxialversuch untersucht, so dass auch hier ein Vergleich möglich ist. Die mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelte Reihenfolge der Ermüdungsfunktionen kann bestätigt werden (siehe Abbildung 7.9).

Mischgutart

Der Asphaltbeton und der offenporige Asphalt konnten aus finanziellen Gründen nicht mit dem Triaxialversuch untersucht werden. Der Vergleich der anderen Asphalte in Abbildung 7.10 zeigt im Gegensatz zu den Ergebnissen der Spaltzugschwellversuche einen viel größeren Unterschied zwischen dem Asphaltbinder ABi 0/16 S und der Asphalttragschicht ATS 0/32 CS. Abweichungen zwischen dem ABi und SMA 0/11 S Gabbro sind jedoch kaum vorhanden. Weiterhin fällt das geringe Bestimmtheitsmaß der Regression der Ermüdungsfunktion für die ATS auf. Dieser Umstand ist auf den Einfluss aus Größtkorn und Probekörperabmessungen zurückzuführen.

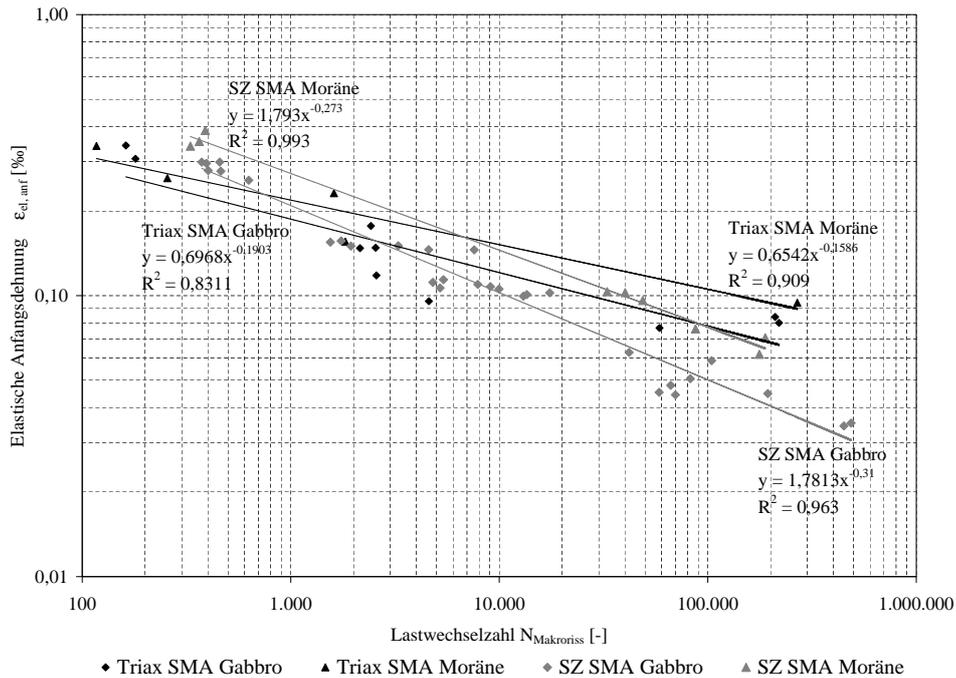


Abbildung 7.9: Vergleich der Ermüdungsfunktionen der SMA bei 10 Hz

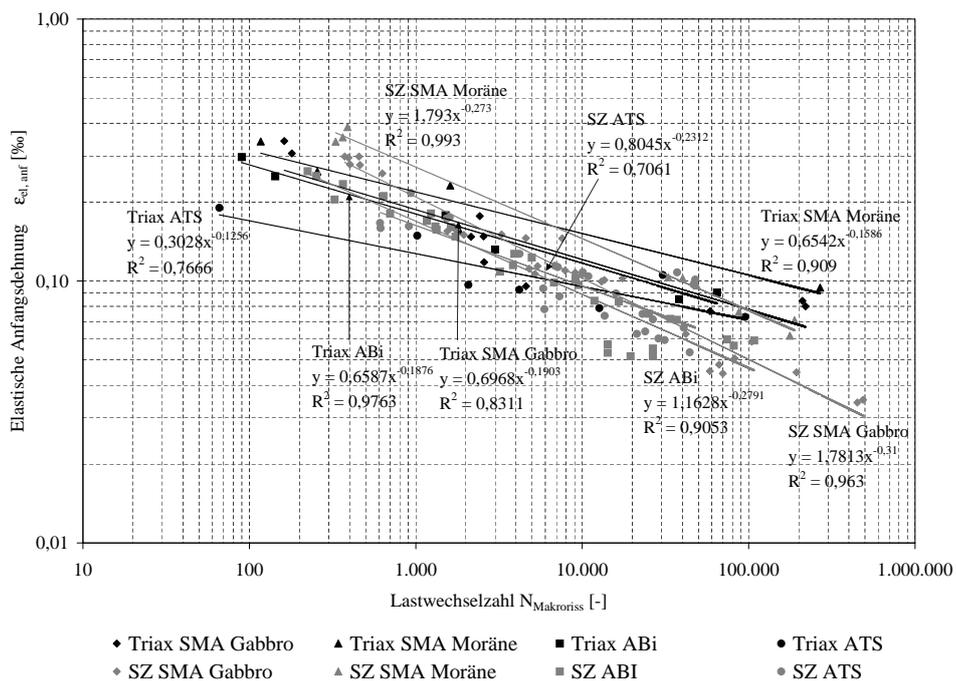


Abbildung 7.10: Vergleich der Ermüdungsfunktionen bei 10 Hz

Belastungsfrequenz

Abschließend soll die Belastungsfrequenz als Einflussfaktor auf die Ermüdungsfunktion eines Asphaltgemisches betrachtet werden. Wie auch bei den Ergebnissen der Spaltzugschwellversuche sind

die Differenzen zwischen den einzelnen Ermüdungsfunktionen nur sehr gering ausgeprägt. Zwischen den Werten für 1 und 5 Hz in Abbildung 7.11 kann kaum unterschieden werden.

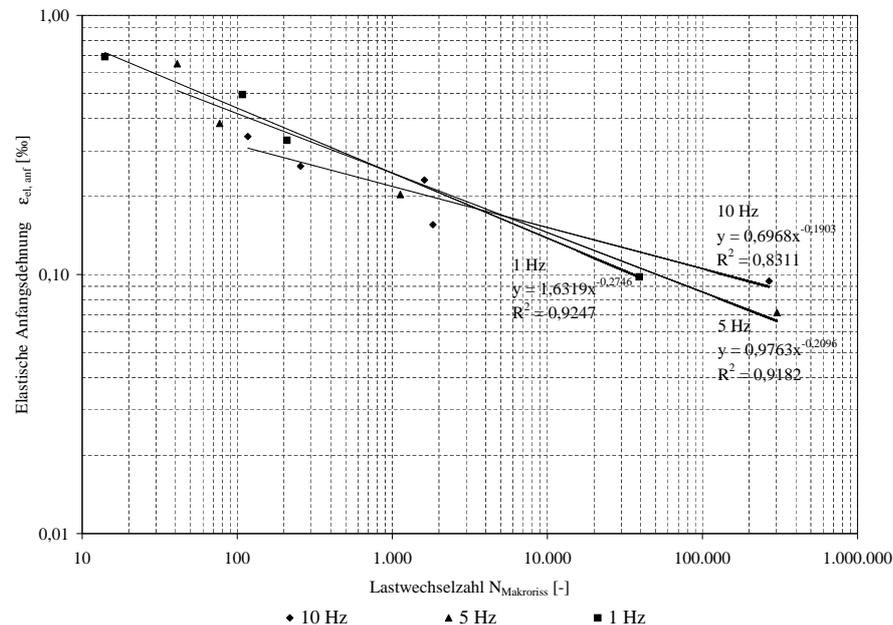


Abbildung 7.11: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Moräne

7.3.4 Zusätzliche Anmerkungen zum Ermüdungskriterium Makroriss

Einleitung

Zur Auswertung der Vertikalverformungen im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung werden ausschließlich die Daten des Magnetmesssystems verwendet (siehe Abschnitt 3.4). Im Rahmen von Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Auswertung nach dem Prinzip der dissipierten Energie auch dann möglich ist, wenn sich der sichtbare Riss, der zum Abbruch des Versuches geführt hat, außerhalb der Magnetebenen, also z.B. an der Klebefläche ausbildet [38].

Ein Beispiel dafür ist ein Triaxialversuch an einem Splittmastixasphalt, der unter folgenden Prüfbedingungen durchgeführt wurde.

- Prüftemperatur: $-10^{\circ}C$
- Belastungsfrequenz: $10\ Hz$
- $\sigma_{x;0} = 2,2\ N/mm^2$ und $\sigma_{y/z;0} = 0,927\ N/mm^2$.

In Abbildung 7.12 ist der Verlauf der dissipierten Energie während dieses Versuches dargestellt. Es wird deutlich, dass das Ermüdungskriterium Makroriss im Probekörper zwischen den Magneten des axialen Messsystems eingetreten ist, obwohl der Riss, der zum Versuchsende geführt hat, in der unteren Klebefläche (siehe Foto) aufgetreten ist.

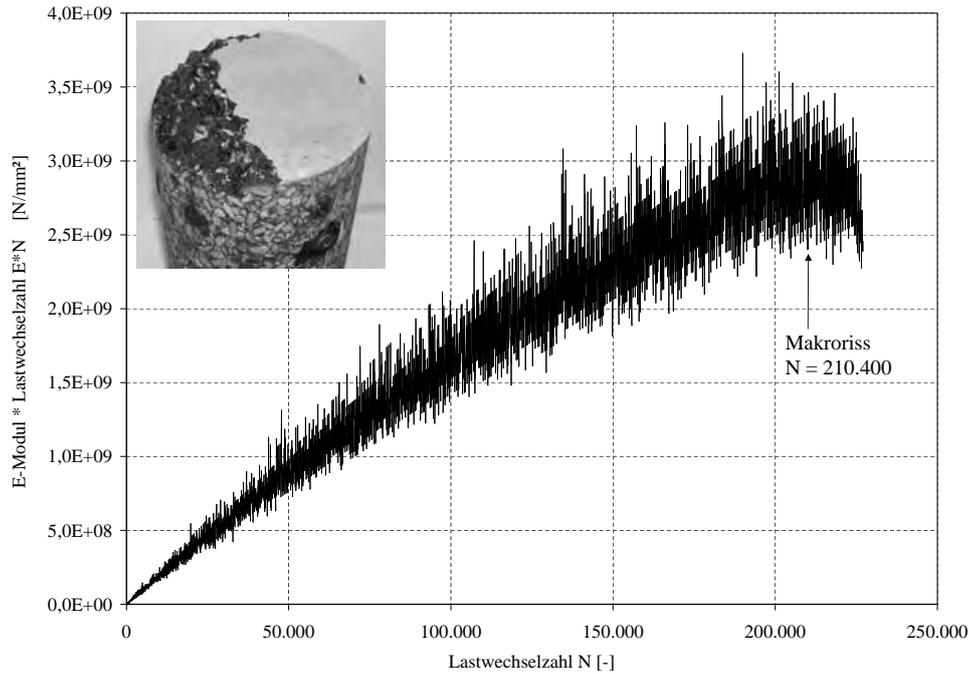


Abbildung 7.12: Eintreten des Ermüdungskriteriums Makroriss zwischen den Magneten trotz sichtbaren Risses in der unteren Klebefuge

Ein weiteres Beispiel für diese Beobachtung ist ein Triaxialversuch mit konstanter Spannungskomponente $\sigma_{y/z} = 0,05 \text{ N/mm}^2$, die zum Anlegen der radialen Wegaufnehmer an die Mantelfläche des Probekörpers erforderlich ist. Die Vertikalbeanspruchung betrug $\sigma_{x;0} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz . Der Probekörper wurde bei 35°C also nahezu einaxial beansprucht. Die Auswertung des Ermüdungsversuches zeigt das Auftreten des Makrorisses deutlich (siehe Abbildung 7.13). Im Gegensatz zu dem in Abbildung 7.12 dargestellten Versuch, konnte in diesem Fall jedoch kein sichtbarer Riss wahrgenommen werden. In der Abbildung sind zusätzlich die plastischen Dehnungen über die Versuchsdauer aufgetragen, wodurch gezeigt werden kann, dass die tertiäre Schädigungsphase (siehe Abbildung 4.6) eingetreten ist, nachdem der Makroriss entsprechend der Definition aufgetreten ist. Für den dargestellten Einzelversuch liegen die beiden Zeitpunkte nahezu übereinander.

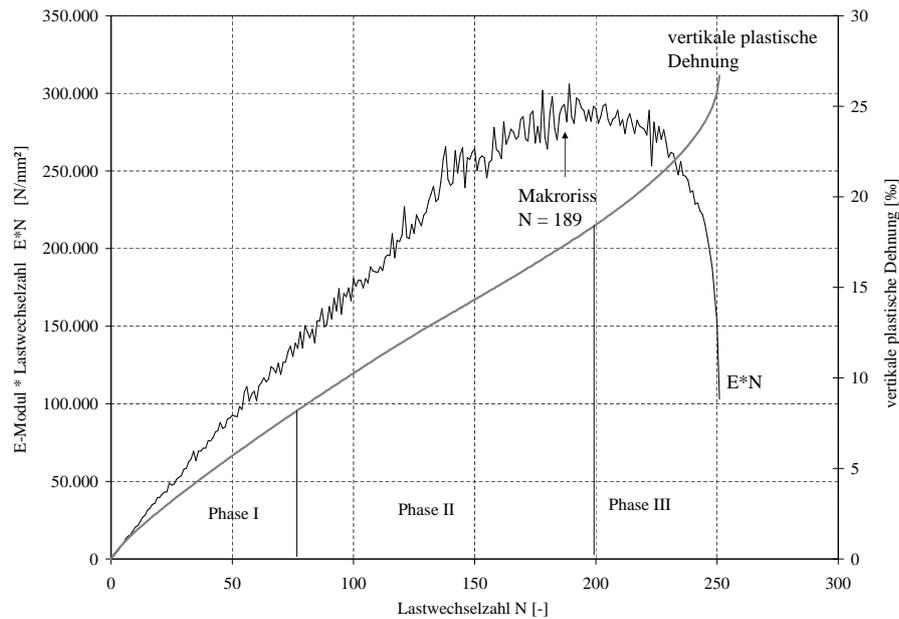


Abbildung 7.13: Eintreten des Ermüdungskriteriums Makroriss im Triaxialversuch ohne sichtbaren Riss im Probekörper

Zusätzliche Versuche zur Untersuchung des Ermüdungskriteriums Makroriss

Aus den beschriebenen Beobachtungen lässt sich ableiten, dass sich die Makrorisse im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung (und vermutlich auch bei Einaxialen Zugschwellversuchen) über die gesamte Probekörperhöhe ausbilden. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass das Kriterium Makroriss bereits lange vor Versuchsende (Bruch des Probekörpers) eintritt. Ein sichtbarer Riss an der schwächsten Stelle (geringster Querschnitt bzw. Festigkeit) oder an der Stelle mit den höchsten Beanspruchungen (z.B. infolge der Querdehnungsbehinderung in der Nähe der Adapterplatten) führt immer erst nach dem Erreichen des Makrorisskriteriums zum Versuchsende. Im Rahmen des Forschungsprojektes *Nachhaltiger Straßenbau* [38] konnte der sichtbare Riss (Probekörperzerstörung) bei 95% der durchgeführten Triaxialversuchen in den querschnittsgeschwächten Bereichen der Magnetebenen beobachtet werden. Bei den restlichen Versuchen trat der sichtbare Riss in der Klebefuge, ober- bzw. unterhalb der Magnetebenen oder gar nicht auf. Im letzten Fall wurde das Versuchsende durch die Maschinenschutzparameter festgelegt.

Das beschriebene Phänomen der Makrorissentstehung wurde mit Spaltzugschwellversuchen weiter untersucht. Dazu wurden aus den nach Augenschein rissfreien Mittelstücken von geprüften Triaxialprobekörpern Bohrkernscheiben entnommen, die dann mit dem Spaltzugschwellversuch ein weiteres Mal untersucht wurden. Die Untersuchungen erfolgten an einem Asphaltbinder. Die vorangegangenen Triaxialversuche unterschieden sich in Prüftemperatur und aufgebrachtter Belastung. Im Vergleich zum Triaxialversuch ändert sich in den Spaltzugschwellversuchen die Richtung der Zugbeanspruchung des Asphalttes. Abbildung 7.14 soll dies verdeutlichen. Vor den Spaltzugschwellversuchen lagerten die so gewonnenen Probekörper zwischen 17 und 56 Tagen bei Raumtemperatur. Die Raumdichte und damit der Hohlraumgehalt wurden nicht noch ein weiteres Mal bestimmt, da

vorhandene Glycerinanhaftungen zu fehlerhaften Ergebnissen geführt hätten.

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche (nach den Triaxialversuchen - Probekörper Durchmesser 150 mm , Höhe 60 mm) wurden mit der bereits vorab an ungebrauchten Probekörpern im Spaltzugschwellversuch ermittelten Ermüdungsfunktion des Asphaltbinders verglichen. Die Probekörper hierfür unterschieden sich in den Abmessungen. Die sog. „Standardversuche“ wurden an Probekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 40 mm durchgeführt. Das Verhältnis h/D war jedoch das Gleiche.

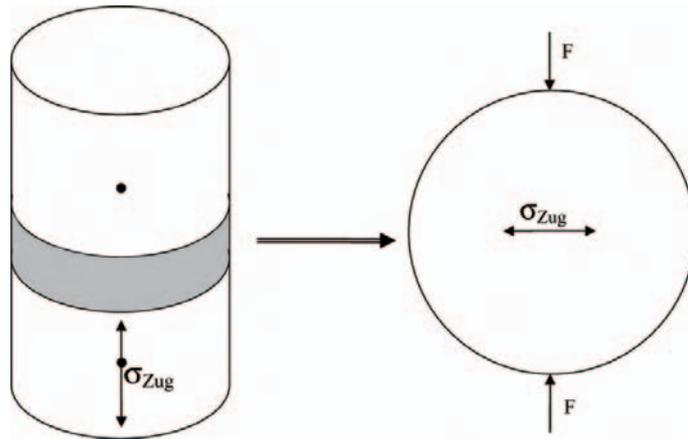


Abbildung 7.14: Probekörpergewinnung und unterschiedlichen Zugbeanspruchungsrichtung

Die Ergebnisse in Abbildung 7.15 zeigen, dass mit dem Spaltzugschwellversuch keine vorzeitige Ermüdung aufgrund der Vorbelastung des Probekörpers im Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung festgestellt werden kann. Die Unterschiede zwischen den Ermüdungsfunktionen, bestimmt aus Spaltzugschwellversuchen ohne und mit Vorschädigung durch die Triaxialversuche deuten eher auf eine Verfestigung der Probekörper in Richtung der „neuen“ Zugbeanspruchung hin. Die Verfestigung könnte durch die Spannungskomponente $\sigma_{y/z}$ entstanden sein. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Ermüdung des Asphaltprobekörpers ausschließlich in Richtung der Zugbeanspruchung auftritt. In die anderen Hauptspannungsrichtungen können somit noch Zugkräfte aufgenommen werden.

Aus diesen Untersuchungsergebnissen lässt sich ableiten, dass bei der Übertragung von Ergebnissen aus Laborversuchen in die Realität zusätzlich der Spannungszustand im Versuch berücksichtigt werden muss. An der Unterseite einer Asphalttragschicht treten in x- und in y-Richtung gleich große Zugspannungskomponenten auf, die derzeit durch keinen Ermüdungsversuch abgebildet werden können. Dieser Zustand führt jedoch in zwei Hauptrichtungen zur Ermüdung. Die daraus resultierenden Auswirkungen können nicht abgeschätzt werden und somit auch nicht in die rechnerische Dimensionierung einfließen (siehe auch Kapitel 9).

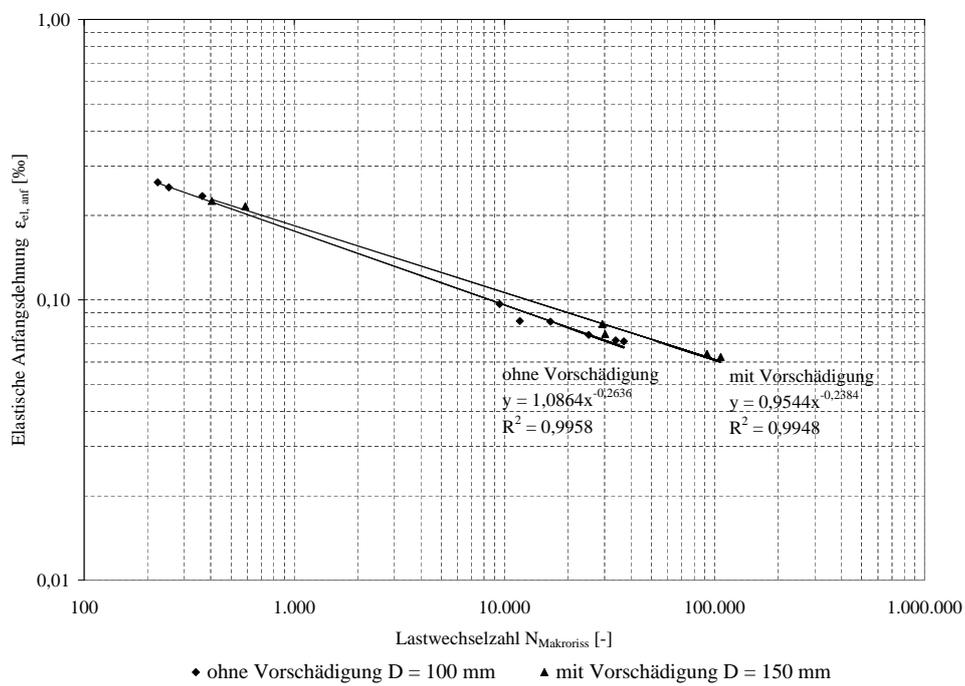


Abbildung 7.15: Ermüdungsfunktionen der vorgeschädigten und nicht vorgeschädigten Probekörper

Kapitel 8

Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Einaxialem Zugschwellversuch, Spaltzugschwellversuch und Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung

8.1 Vergleich der E-Moduln

Der Vergleich der E-Moduln ermittelt mit den drei Versuchsarten zeigt, dass der absolute E-Modul vom vorherrschenden Beanspruchungszustand abhängt. Aus Abbildung 8.1 geht hervor, dass der mit dem Triaxialversuch bestimmte E-Modul den größten Wert annimmt. Die E-Moduln, bestimmt mit dem Einaxialen Zugschwellversuch und dem Spaltzugschwellversuch, sind für den betrachteten Asphalt für die untersuchten Prüftemperaturen nahezu gleich. Für die anderen Asphalte konnten deutliche Unterschiede zwischen den E-Modul-Werten dieser beiden Versuchsarten beobachtet werden. Der E-Modul bestimmt mit dem Triaxialversuch ist jedoch in allen Fällen (unter Berücksichtigung von Prüftemperatur und Belastungsfrequenz) der höchste. Für die rechnerische Dimensionierung resultiert aus diesen Ergebnissen ein unterschiedliches Sicherheitsniveau bei der Verwendung der jeweiligen Daten.

Ein Grund für die Unterschiede in den anhand der Messungen bestimmten E-Moduln liegt in den verschiedenen Messsystemen bzw. Theorien. Prinzipiell müsste für ein Asphaltgemisch unabhängig von der Versuchsart immer der gleiche E-Modul-Wert ermittelbar sein. Die Messung der Verformungen erfolgt im Triaxialversuch unmittelbar im ungestörten Mittelbereich des Probekörpers. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die anhand der Messwerte des Triaxialversuchs ermittelten E-Moduln den tatsächlichen Werten entsprechen. Beim Spaltzugschwellversuch erfolgt die Messung zwar direkt am Probekörper, aber die Dehnung in der Probekörpermitte wird mit Hilfe theore-

tischer Betrachtungen (siehe Abschnitt 3.3) aus der an der Mantelfläche gemessenen Verformung berechnet. Verbesserungen könnten erzielt werden, wenn die Verformungen in der Probekörpermitte z.B. mit Hilfe von Dehnungsgebern bestimmt werden. Beim Einaxialen Zugschwellversuch werden die Verformungen derzeit über die gesamte Probekörperhöhe sowie die Klebefuge und die Adapter gemessen. Da sich im Bereich der Stirnflächen des Probekörpers infolge der Klebung Unstetigkeitsstellen des Spannungszustandes und somit des Dehnungszustandes ausbilden, wird anhand der Messwerte ein gemittelter E-Modul berechnet.

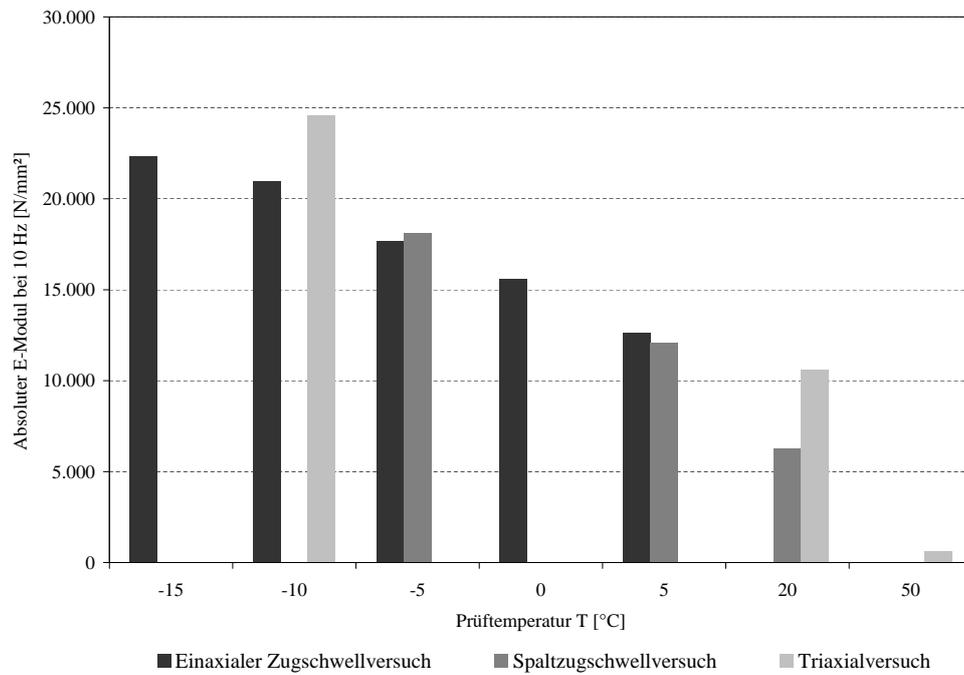


Abbildung 8.1: Vergleich der E-Moduln für unterschiedliche Versuche - SMA Gabbro, 10 Hz

8.2 Vergleich der Ermüdungsfunktionen

Molenaar beschreibt in [29], den Einfluss verschiedener Versuchsarten auf die dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen eines Asphalttes. Er führt an, dass sich ausschließlich der Koeffizient der Funktion (siehe Gleichung 4.4) ändert und nicht der Exponent, der den Anstieg der Funktion bei doppelt logarithmischer Darstellung bestimmt. Dieser Zusammenhang kann anhand der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden. Die Exponenten der Ermüdungsfunktionen liegen zwischen $-0,1848$ und $-0,3100$ und auch visuell sind große Unterschiede in den Anstiegen der Funktionen zu erfassen. Abbildung 8.2 zeigt die dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen des SMA Gabbro bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz .

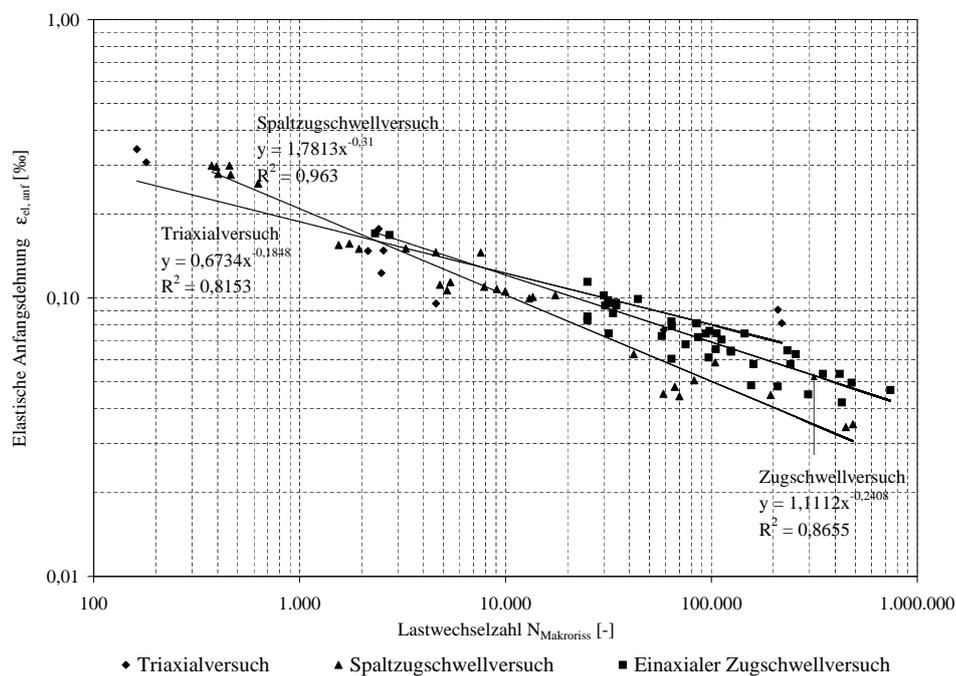


Abbildung 8.2: Vergleich der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen für unterschiedliche Versuche - SMA Gabbro, 10 Hz

Weiterhin ergibt sich aus in verschiedenen Literaturquellen (Di Benedetto [13] und Molenaar [29]) beschriebenen Versuchsergebnissen, dass beim Spaltzugschwellversuch gegenüber anderen Versuchsarten bei sonst gleichen Bedingungen die geringsten Lastwechselzahlen bis zum Versagen infolge Ermüdung beobachtet werden können. Diese Aussagen wurden durch die eigenen Untersuchungen bestätigt. Als Ursache kann der „Reißverschluss-Effekt“ angeführt werden. Infolge der induzierten Zugspannung in der Probekörpermitte tritt nach wiederholter Belastung das Materialversagen ein und in diesem Bereich können keine Zugkräfte mehr übertragen werden. Es kommt zur Spannungumlagerung in die angrenzenden Bereiche, die dann infolge wiederholter Belastung schneller Versagen. In Abbildung 8.3 ist das Prinzip skizziert, dass in dieser Art auch in realen Straßenbefestigungen auftritt.

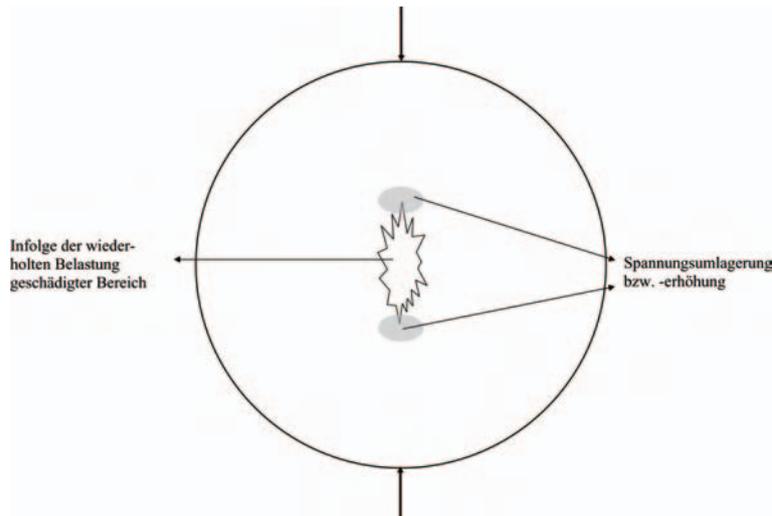


Abbildung 8.3: Reißverschlussprinzip beim Versagen eines Probekörpers im Spaltzugschwellversuch

Wird die in Zugspannungsrichtung gemessene elastische Anfangsdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bis zum Makroriss aufgetragen, so zeigt sich zunächst, dass der Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung, im maßgebenden Dehnungsbereich unterhalb von $0,1\%$ die größten ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Makroriss ausweist. Die mit dem Einaxialen Zugschwellversuch ermittelten Ermüdungsfunktionen prognostizieren im Vergleich dazu eine geringere Lastwechselzahl bis zum Makroriss. Die geringste Ermüdungsbeständigkeit wird mit der anhand der Ergebnisse des Spaltzugschwellversuchs aufgestellten Ermüdungsfunktion bestimmt. Daraus resultieren für die Anwendung dieser Ermüdungsfunktionen für Dimensionierungsberechnungen die größten Sicherheitsreserven.

Um zu überprüfen, ob eine direkte Umrechnung der Ermüdungsfunktionen unterschiedlicher Herkunft ineinander möglich ist, wurden die Parameter \bar{A} und \bar{B} der Ermüdungsfunktionen (Gleichung 4.5) gegenübergestellt. Es ergibt sich ein annähernd linearen Zusammenhang für das jeweilige Asphaltgemisch. In Abbildung 8.4 ist der Zusammenhang zwischen den Parametern bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz für die Asphalte dargestellt, die in allen drei Versuchsarten untersucht wurden.

Die Anordnung der Parameter der einzelnen Versuchsarten ist unabhängig vom Mischgut. Die Materialparameter der Ermüdungsfunktionen der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung sind am kleinsten. Es folgen dann die Parameter der Ermüdungsfunktionen aufgestellt mit dem Einaxialen Zugschwellversuch und die größten Materialparameter \bar{A} und \bar{B} können für die mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten Ermüdungsfunktionen beobachtet werden. Die Parameter der ATS weichen geringfügig von dieser Verteilung ab. Gründe hierfür können das eingesetzte Normalbitumen und die Streuungen der Versuchsergebnisse infolge des Größtkorns sein.

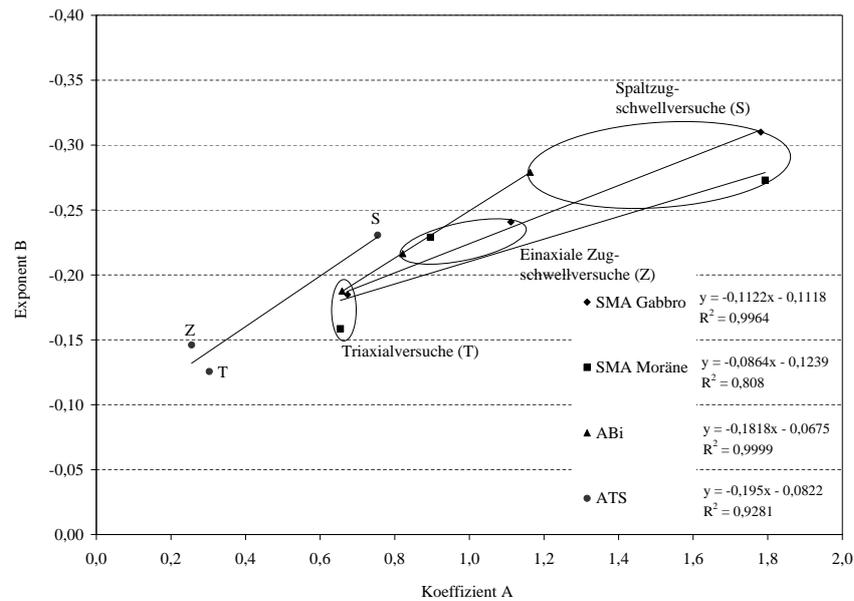


Abbildung 8.4: Zusammenhang der Parameter A und B der Ermüdungsfunktionen für die verschiedenen Versuchsarten

Die Abweichungen vom linearen Zusammenhang der Materialparametern \bar{A} und \bar{B} ist für den SMA Moräne am größten, da bereits das Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktion aus den Ergebnissen des Einaxialen Zugschwellversuch mit $R^2 = 0,60$ sehr niedrig lag. Dieser Umstand muss auf das verkürzte Versuchsprogramm des SMA Moräne zurückgeführt werden.

Der dargestellte lineare Zusammenhang ermöglicht keine Berechnung/Prognose der Materialparameter für die fehlende Versuchsart. Eine direkte Umrechnung ist aufgrund der ungleichmäßigen Abstände (sowohl in x- als auch in y-Richtung) zwischen den einzelnen Datenpunkten nicht möglich. Auch ist es nicht möglich einzelne Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen anderer Versuchsarten zu vergleichen. Diese Vorgehensweise ist somit nicht zielführend.

Bereits Abbildung 8.2 zeigt, dass die Unterschiede zwischen den Ermüdungsfunktionen der einzelnen Versuche im Hinblick auf die Streuungen moderat sind. In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde die Regressionsgleichung über alle Versuchsergebnisse eines Asphaltens, unabhängig von der Versuchsart, bestimmt, um so eine Aussage zu den Ergebnissen der verschiedenen Versuche treffen zu können. In Abbildung 8.5 ist die zusammenfassende Ermüdungsfunktion des SMA Gabbro für eine Belastungsfrequenz von 10 Hz gezeigt.

Vergleicht man das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung über alle Versuchsergebnisse mit den Werten der nach Versuchsart getrennten Ermüdungsfunktionen, so ergibt sich ein guter Wert, obwohl die Streuungen der Einzelergebnisse um die Funktion nicht unerheblich sind. Die Bestimmtheitsmaße für alle zusammenfassenden Ermüdungsfunktionen liegen in einem Bereich von $R^2 = 0,7 - 0,88$. Im Vergleich dazu liegen die Bestimmtheitsmaße der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen aus den Einaxialen Zugschwellversuchen zum Teil deutlich unter $0,7$.

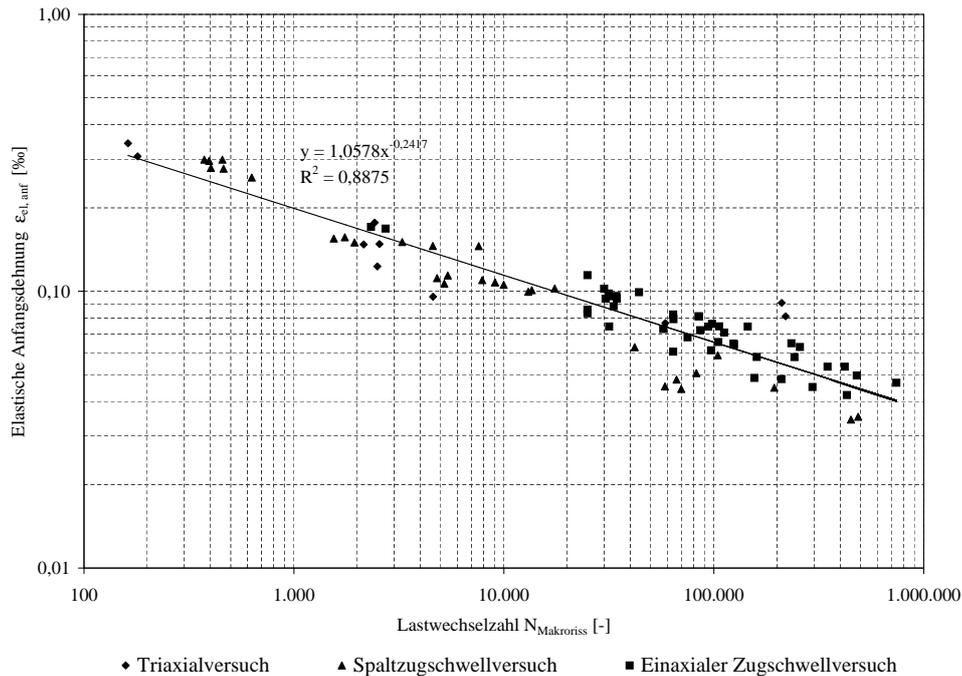


Abbildung 8.5: Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion für alle Versuche am Beispiel des SMA Gabbro bei 10 Hz

Die Auswirkungen der Anwendung einer Ermüdungsfunktion über alle Versuchsergebnisse unabhängig von der Versuchsart auf die rechnerische Dimensionierung werden in Abschnitt 8.5 näher betrachtet.

Der Vergleich der Ermüdungsfunktionen für die anderen Asphalte bzw. Prüffrequenzen ist in Anhang C enthalten. Anhand der dort abgebildeten Diagramme für den Asphaltbeton ist zu erkennen, dass das Bestimmtheitsmaß für die Ermüdungsfunktion über alle Versuchsergebnisse (unabhängig vom Versuchstyp) stark vermindert ist, wenn keine Ergebnisse aus Triaxialversuchen einfließen. Eine Ausnahme bildet jedoch die ATS. Hier ist das Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktion trotz der Berücksichtigung der Ergebnisse aus Triaxialversuchen sehr niedrig. Dies ist u. a. auf die großen Streuungen der Einzelwerte infolge des Größtkorneinflusses zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.2.2). Die Diagramme für den OPA und die ATS zeigen eine abweichende Reihung der Ermüdungsfunktionen. Die Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche liegen unterhalb der Ergebnisse aus den Spaltzugschwellversuchen.

Die Aufstellung von Ermüdungsfunktionen unabhängig von der Versuchsart muss noch weiter untersucht werden. Hierbei ist insbesondere auf die Messung der Verformung direkt am Probekörper zu achten, so dass daraus resultierende Streuungen vermieden werden und so bessere Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichungen erreicht werden können.

8.3 Aufstellung dreidimensionaler Ermüdungsflächenfunktionen

8.3.1 Aufspaltung der gemessenen Dehnung

Zur Beurteilung der Ergebnisse der drei Ermüdungsversuche wurden die gemessenen elastischen Anfangsdehnungen $\varepsilon_{el,anf}$ in zwei Anteile aufgeteilt. In den Anteil ε^* , der infolge der aufgetragenen bzw. induzierten maximalen Zugspannung σ_x entsteht und in den Anteil ε^{**} , der aufgrund der zusätzlichen maximalen Druckspannungskomponente $\sigma_{y/z}$ bedingt durch die Querkontraktion auftritt. In Abbildung 8.6 ist die Aufteilung der gemessenen elastischen Anfangsdehnung für den Spaltzugschwellversuch schematisch dargestellt.

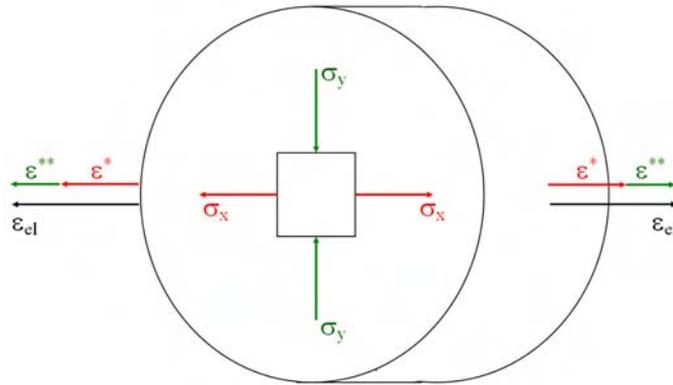


Abbildung 8.6: Aufspaltung der elastischen Anfangsdehnung am Beispiel des Spaltzugschwellversuches

Für die Ermittlung des Dehnungsanteils ε^* gilt unabhängig von der Art des durchgeführten Ermüdungsversuches:

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma_x}{E} \quad (8.1)$$

Der Dehnungsanteil ε^{**} wird in Abhängigkeit des durchgeführten Ermüdungsversuches bestimmt. Für den Einaxialen Zugschwellversuch gilt für große Bereiche des Probekörpers der einaxiale Spannungszustand und somit:

$$\varepsilon^{**} = 0 \quad (8.2)$$

Da sich infolge der Klebefläche an den Stirnseiten gestörte Zonen ausbilden und die Messung der Verformung über den gesamten Probekörper sowie die Klebefugen erfolgt, stimmt diese Betrachtungsweise nur bedingt. Dennoch wird die Gleichung 8.2 für das Verfahren angewandt.

Im Spaltzugschwellversuch beträgt der zweite Dehnungsanteil infolge der zusätzlichen Druckspannungskomponente σ_y :

$$\varepsilon^{**} = \frac{-\mu}{E \cdot \sigma_y} \quad (8.3)$$

Für den Triaxialversuch mit Zug-/Druckschwellbelastung am zylindrischen Probekörper kann der Dehnungsanteil ε^{**} , der durch die radiale Druckspannung $\sigma_{y/z}$ hervorgerufen wird, bestimmt werden

mit:

$$\varepsilon^{**} = \frac{-\mu}{2 \cdot E \cdot \sigma_{y/z}} \quad (8.4)$$

Auch beim Triaxialversuch ist der Spannungszustand im Bereich der Stirnflächen infolge der Klebung gestört. Die Messung der Verformungen wird jedoch in der ungestörten Mitte des Probekörpers vorgenommen, so dass die Betrachtungsweise korrekt ist.

Die beiden Dehnungsanteile sind somit für die betrachteten Versuchsarten immer positiv. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge werden die beiden Dehnungsanteile in Abbildung 8.7 in einem Diagramm dargestellt. Hierbei liegen die Dehnungsanteile der Einaxialen Zugschwellversuche auf der Abszissenachse, da infolge des einaxialen Spannungszustandes $\varepsilon^{**} = 0$ ist. Die Dehnungsanteile der Spaltzugschwellversuche liegen aufgrund des konstanten Spannungsverhältnisses $\sigma_x/\sigma_y = 1/3$ auf einer Kurve, die sich durch ein Polynom 2. Grades beschreiben lässt. Die Dehnungsanteile der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung liegen im Allgemeinen zwischen den Grenzen, die durch die Werte der Einaxialen Zugschwell- und der Spaltzugschwellversuche gebildet werden.

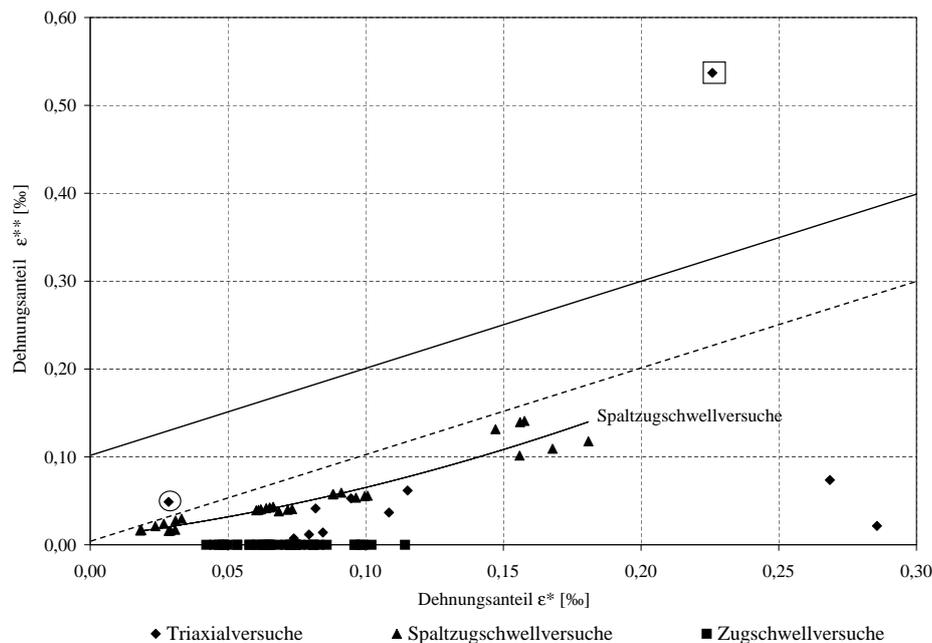


Abbildung 8.7: Dehnungsanteile ε^* und ε^{**} für die drei verschiedenen Ermüdungsversuche - SMA Gabbro, 10 Hz

Zwei Datenpunkte bilden für das gezeigte Beispiel eine Ausnahme, da sie oberhalb der Grenzlinie der Spaltzugschwellversuche liegen. Die für diese Triaxialversuche gewählten Spannungsverhältnisse entsprechen jeweils dem des Spaltzugschwellversuchs. Der Versuch bei 20°C ist mit einem Kreis markiert und wurde mit einer maximalen axialen Zugbeanspruchung von $\sigma_x = 0,3 \text{ MPa}$ und einer maximalen radialen Druckbeanspruchung von $\sigma_{y/z} = 0,9 \text{ MPa}$ durchgeführt. Der Versuch endete nach 79.351 Lastwechseln bei einer vertikalen Verformung von 11 mm. Am Probekörper zeigten sich deutliche Risse, der Probekörper war jedoch nicht in zwei Teile zerbrochen. Die Lastwechselzahl bis

zum Makroriss wurde mit 58.701 bestimmt. Der zweite Versuch wurde bei $50^{\circ}C$ durchgeführt und ist mit einem Quadrat markiert. Die maximale axiale Zugbeanspruchung betrug $\sigma_x = 0,2 MPa$ und die maximale radiale Druckbeanspruchung $\sigma_{y/z} = 0,6 MPa$. Dieser Versuch wurde nach 171 Lastwechseln und einer axialen plastischen Verformung von $8 mm$ (entspricht $27,9\%$) abgebrochen, um die Versuchseinrichtung vor einer möglichen Beschädigung zu schützen. In der Auswertung konnte bei diesem Versuch kein Makroriss als Ermüdungskriterium festgestellt werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu vermuten, dass bei Beanspruchungszuständen, die Dehnungsverhältnisse von $\varepsilon^* \ll \varepsilon^{**}$ hervorrufen, im Probekörper kein Makroriss erzeugt wird. Der vermutete Bereich liegt in Abbildung 8.7 oberhalb der durchgezogenen Linie. Der Probekörper würde durch die große Druckspannungskomponente eine Längenänderung in Richtung der geringeren Zugspannungskomponente erfahren, ohne dass ein Riss auftritt. Da der Grenzverlauf unter Berücksichtigung der bisherigen Versuche nicht eindeutig zu definieren ist, wird die Grenze $\varepsilon^* = \varepsilon^{**}$ lediglich mit einer gestrichelten Linie markiert.

Daraus ergibt sich, dass die Dehnung infolge der Zugspannung nur innerhalb des Bereiches $\varepsilon^* > \varepsilon^{**}$ die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Makrorisses bestimmt. Für die rechnerische Dimensionierung könnten somit alle anderen Beanspruchungs- bzw. Dehnungssituationen im Hinblick auf das Ermüdungsverhalten vernachlässigt werden.

8.3.2 Dehnungsabhängige Ermüdungsflächenfunktionen

Um eine Ermüdungsflächenfunktion aufzustellen, werden die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Makrorisses ($N_{Makroriss}$) in einer dreidimensionalen Darstellung über die zugehörigen Dehnungsanteile ε^* und ε^{**} aufgetragen. Die Ermüdungsflächenfunktion ist nur für positive Dehnungsanteile ε^* und ε^{**} definiert, d.h. das Kombinationen mit zwei Zugspannungsanteilen nicht zulässig sind (siehe Kapitel 9). In Abbildung 8.8 sind Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche, der Spaltzugschwellversuche und der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung für den SMA Gabbro bei einer Belastungsfrequenz von $10 Hz$ dargestellt.

Die bei der nichtlogarithmischen Darstellung sichtbare Fläche kann mit der folgenden Flächenfunktion approximiert werden, wobei die Parameter A, B, K, J materialspezifisch sind.

$$N(\varepsilon^*; \varepsilon^{**}) = (A + K \cdot \varepsilon^{**}) \cdot \varepsilon^{*(B+J \cdot \varepsilon^{**})} \quad (8.5)$$

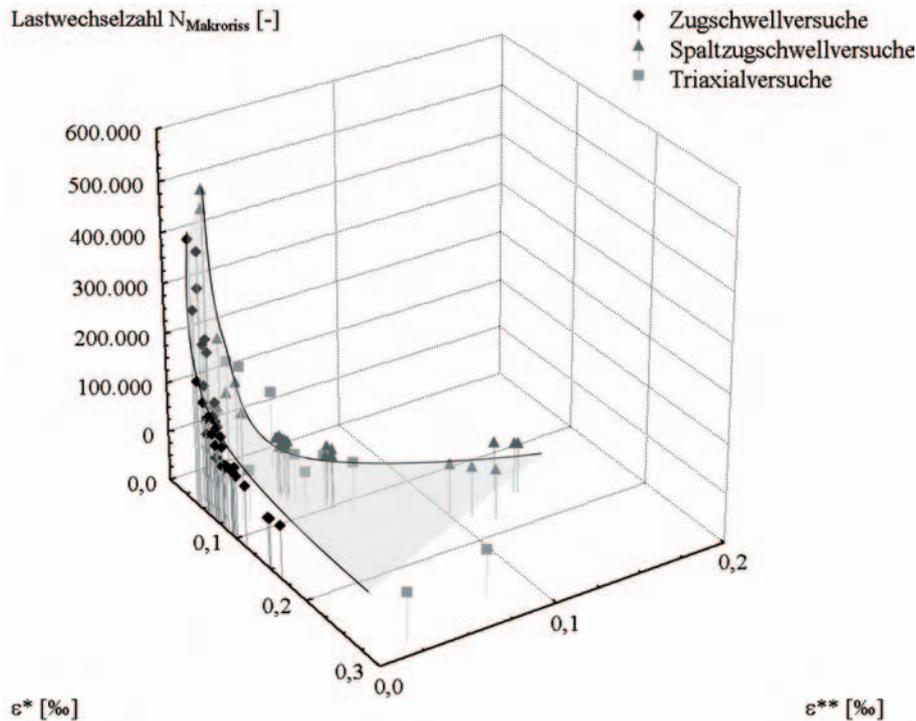


Abbildung 8.8: Dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse aus den drei Ermüdungsversuchen - SMA Gabbro, 10 Hz

Es wird deutlich, dass sich Gleichung 8.5 für den Einaxialen Zugschwellversuch mit $\varepsilon^{**} = 0$ vereinfacht zu:

$$N(\varepsilon^*) = A \cdot \varepsilon^{*B} \quad (8.6)$$

Die Parameter A und B werden also ausschließlich durch die Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche bestimmt, was die grundlegende Bedingung für die Auswahl der dreidimensionalen Funktion war. Für die Bestimmung der Parameter K und J sind sowohl Triaxial- als auch Spaltzugschwellversuche erforderlich, da nur durch eine ausreichende Datengrundlage gute Bestimmtheitsmaße für die Ermüdungsflächenfunktion erzielt werden können.

In Abbildung 8.9 ist die Fläche, ermittelt mit den Parametern der Ermüdungsflächenfunktion, für den SMA Gabbro im Vergleich zu den tatsächlichen Versuchsergebnissen dargestellt. Die mit Hilfe der Ermüdungsflächenfunktion prognostizierten Lastwechselzahlen sind schwarz und die tatsächlichen Versuchsergebnisse rot dargestellt. Es wird deutlich, dass die Funktion mit den vorgegebenen Einschränkungen ($\varepsilon^* > \varepsilon^{**}$), positive Dehnungsanteile) geeignet ist, die Ermüdungsflächenfunktion abzubilden.

Die Abbildungen 8.10 und 8.11 sollen durch zwei verschiedene Sichtachsen auf das dreidimensionale Diagramm verdeutlichen, dass die Differenzen zwischen den Versuchsergebnissen und den anhand der Ermüdungsflächenfunktion prognostizierten Lastwechselzahlen bis zum Makroriss begrenzt sind.

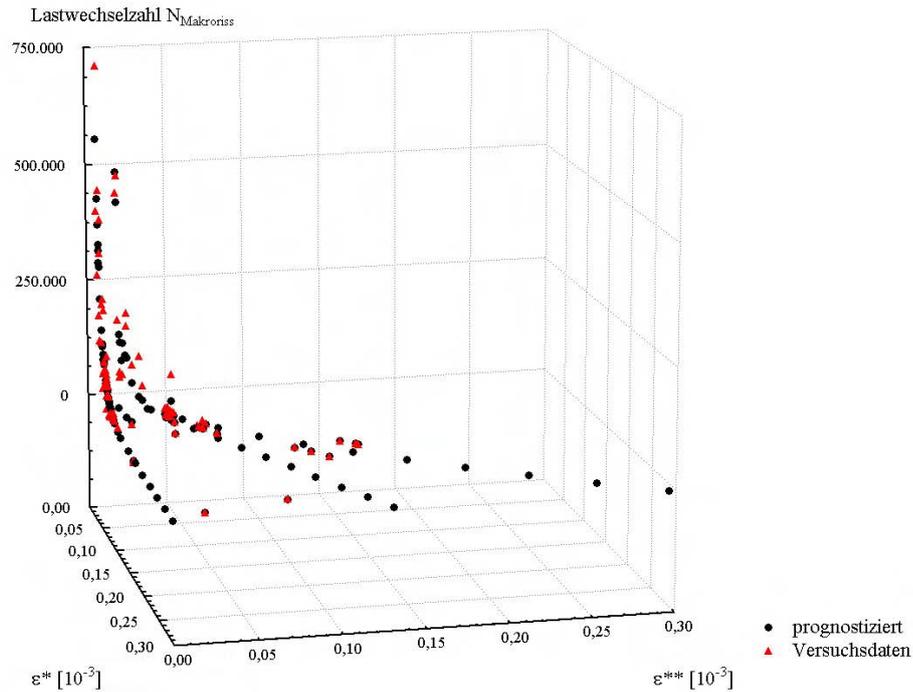


Abbildung 8.9: Darstellung der Ermüdungsflächenfunktion - SMA Gabbro, 10 Hz

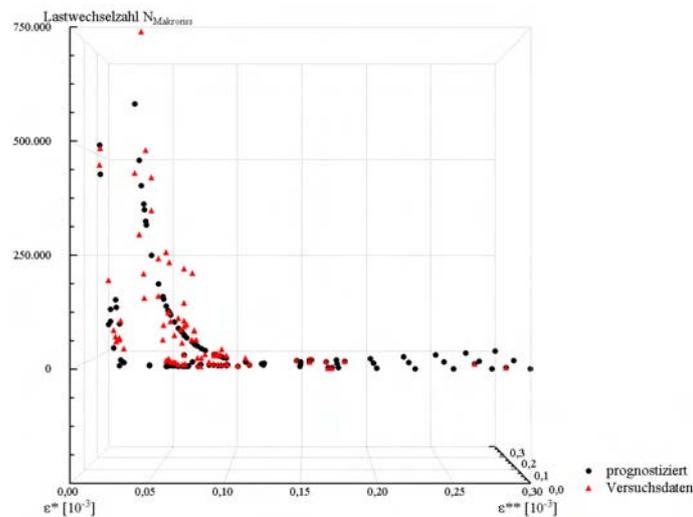


Abbildung 8.10: Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den prognostizierten Werten (Ansicht 1) - SMA Gabbro, 10 Hz

In Tabelle 8.1 sind die Funktionsparameter und das erreichte Bestimmtheitsmaß R^2 für die Ermüdungsflächenfunktionen der untersuchten Asphaltgemische zusammengefasst. Die Parameter der Ermüdungsflächenfunktionen wurden anhand der tatsächlichen Versuchsergebnisse ermittelt. Entsprechend des durchgeführten Versuchsprogramms stand für jedes Material eine unterschiedliche Anzahl von Einzeldatensätzen zur Verfügung.

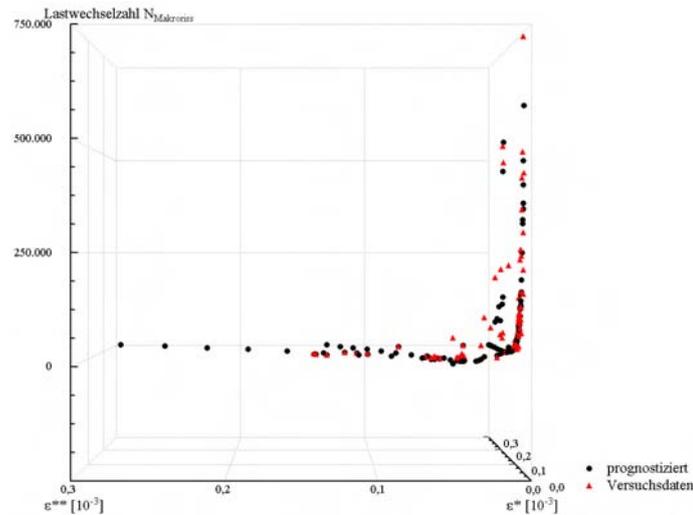


Abbildung 8.11: Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den prognostizierten Werten (Ansicht 2) - SMA Gabbro, 10 Hz

Material	f	Datenanzahl	A	K	B	J	R^2
SMA Gabbro	10	83	6,6608	25,8815	-3,5938	50,0299	0,713
SMA Moräne	10	40	77,221	134890,2	-2,6241	49,600	0,513
AB	10	68	64,237	4002,189	-2,6337	59,372	0,292
ABi	10	85	8,7804	84,996	-3,4547	50,592	0,595
ATS	10	47	0,0308	140,9735	-4,7767	81,6809	0,169
SMA Gabbro	5	72	10,269	-16,9363	-3,1953	21,9867	0,504
AB	5	67	65,816	847,451	-2,4283	33,6950	0,370

Tabelle 8.1: Materialparameter und Bestimmtheitsmaß der Flächenfunktionen für die untersuchten Asphalte

Die Bestimmtheitsmaße der Flächenfunktionen liegen in einem sehr weiten Bereich. Am AB wurden keine Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung durchgeführt, worin das schlechte $R^2 = 0,292$ begründet liegt. Eine geringe Anzahl von Datensätzen in Verbindung mit den ungünstigen Probekörperabmessungen beim Einaxialen Zugschwellversuch ($80 \times 80 \times 160 \text{ mm}^3$) führt für die ATS zu einem schlechten Bestimmtheitsmaß.

Weiterhin hat das Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktionen der Einaxialen Zugschwellversuche einen maßgeblichen Einfluss, da die Parameter A und B aus diesen Versuchen bestimmt werden. In Tabelle 8.2 sind die Werte zusammengefasst. Für die nicht aufgeführten Asphaltgemische bzw. Belastungsfrequenzen lag nur eine ungenügende Anzahl von Datensätzen vor, so dass mit Hilfe von *STATISTICA* keine Bestimmung der Funktionsparameter erfolgen konnte.

	SMA G	SMA M	AB	ABi	ATS	SMA G	AB
f	10	10	10	10	10	5	5
R^2	0,87	0,60	0,60	0,75	0,70	0,67	0,57

Tabelle 8.2: Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktionen aus den Einaxialen Zugschwellversuchen für die Asphalte nach Tabelle 8.1

Um das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung für die Ermüdungsflächenfunktion zu verbessern, wurden die Lastwechselzahlen bis zum Makroriss entsprechend der in den verschiedenen Versuchen bestimmten Dehnungsanteile über die Regressionsgleichungen der jeweiligen Versuchsart erneut bestimmt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 8.3 angegebenen Parameter. Im Vergleich zu Tabelle 8.1 wird das sehr gute Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung der Ermüdungsflächenfunktion deutlich. Diese Verbesserung ergibt sich, da die Streuungen der Einaxialen Zugschwellversuche durch Anwendung der auf Grundlage der Regressionsgleichung berechneten Lastwechselzahlen eliminiert werden konnten.

Material	f	Datenanzahl	A	K	B	J	R^2
SMA Gabbro	10	83	6,6608	827,6831	-3,5938	71,1332	0,979
SMA Moräne	10	40	77,221	45034,95	-2,6241	38,43	0,994
AB	10	68	64,237	1023,805	-2,6337	53,091	0,993
ABi	10	85	8,7804	1609,235	-3,4547	68,894	0,999
ATS	10	47	0,0308	45,9869	-4,7767	64,1689	0,998
SMA Gabbro	5	72	10,269	11,5846	-3,1953	29,2584	0,994
AB	5	67	65,816	276,3317	-2,4283	32,7782	0,993

Tabelle 8.3: Materialparameter und Bestimmtheitsmaß der Flächenfunktionen (berechnete Lastwechselzahlen)

8.3.3 Überlegungen zur Verbesserung des gewählten Ansatzes

Um die Qualität und damit das Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsflächenfunktion zu verbessern, wurde im ersten Schritt versucht, den Typ der Ermüdungsfunktion aus den Einaxialen Zugschwellversuchen (siehe Gleichung 8.6) anzupassen, so dass möglicherweise ein besseres Bestimmtheitsmaß erzielt wird. Dies war nicht möglich, da die Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche sehr stark um die ermittelte Ermüdungsfunktion streuen, wie in Abbildung 8.12 im doppelt logarithmischen Maßstab zu erkennen ist.

Eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes der Ermüdungsflächenfunktion über einen anderen Funktionstyp für die Ermüdungsfunktion der Einaxialen Zugschwellversuche ist somit nicht möglich.

Im zweiten Schritt wurden weitere Funktionen für die Ermüdungsfläche überprüft. Für $\varepsilon^{**} = 0$ muss Gleichung 8.6 weiterhin gelten. Betrachtet wird folgende Funktion:

$$N(\varepsilon^*; \varepsilon^{**}) = (A \cdot \varepsilon^{*B}) + (C \cdot \varepsilon^{**D}) \quad (8.7)$$

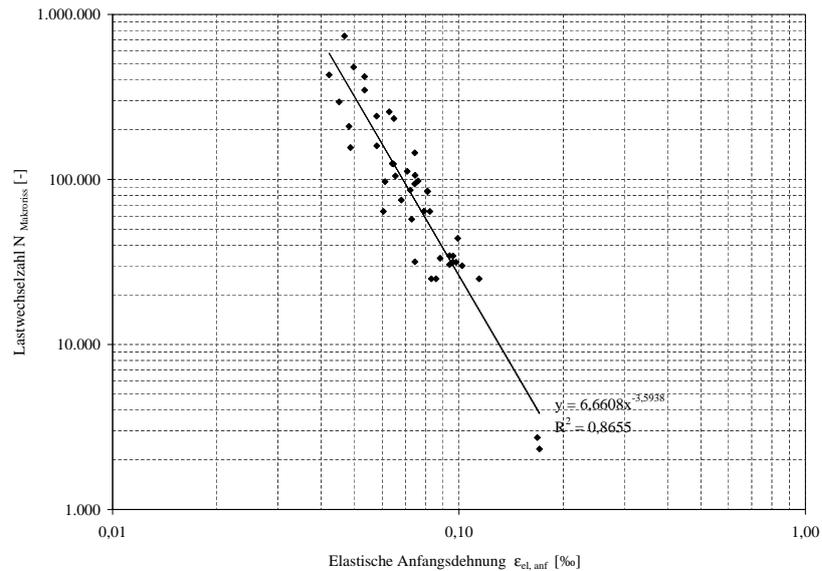


Abbildung 8.12: Ergebnisse aus den Einaxialen Zugschwellversuchen - SMA Gabbro, $10Hz$

Die Untersuchungen wurden für $D = 1, 2, 3$ bzw. als Variable an den Ergebnissen des SMA Gabbro bei $10Hz$ durchgeführt. Mit keiner der genannten Varianten konnte eine verbesserte Ermüdungsflächenfunktion bestimmt werden.

Bereits aus Abbildung 8.9 wurde deutlich, dass die gewählte Funktion (siehe Gleichung 8.5) grundsätzlich für die Darstellung der Ermüdungsfläche geeignet ist. Um ein gutes Bestimmtheitsmaß unter Verwendung der Versuchsergebnisse zu erzielen, müssen Randbedingungen eingehalten sein (sehr gutes Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung der Einaxialen Zugschwellversuche, hohe Anzahl an Datensätzen).

8.4 Anmerkungen zu spannungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktionen

Zur Aufstellung spannungsabhängiger Ermüdungsflächenfunktionen sind Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen bei gleichbleibender Prüftemperatur erforderlich. Für die vorliegenden Versuchsergebnisse war diese Bedingung nicht für alle drei Versuchstypen gleichzeitig erfüllt.

Aufgrund dieser Tatsachen wurde versucht, die Materialparameter der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen für die Einaxialen Zugschwellversuche bei einer Prüftemperatur von 20°C zu prognostizieren, da für diese Temperatur zahlreiche Ergebnisse aus Spaltzugschwellversuchen und Triaxialversuchen mit Zug-/Druckschwellbelastung zur Verfügung stehen. Abbildung 8.13 zeigt die Abhängigkeiten der Materialparameter von der Prüftemperatur und die Auswirkungen der Extrapolation auf z.B. 20°C , wenn der Verlauf der Parameter mit einer kubischen bzw. quadratischen Funktion angenähert wird. Die Lage der daraus resultierenden Ermüdungsfunktion ist in Abbildung 8.14 gezeigt.

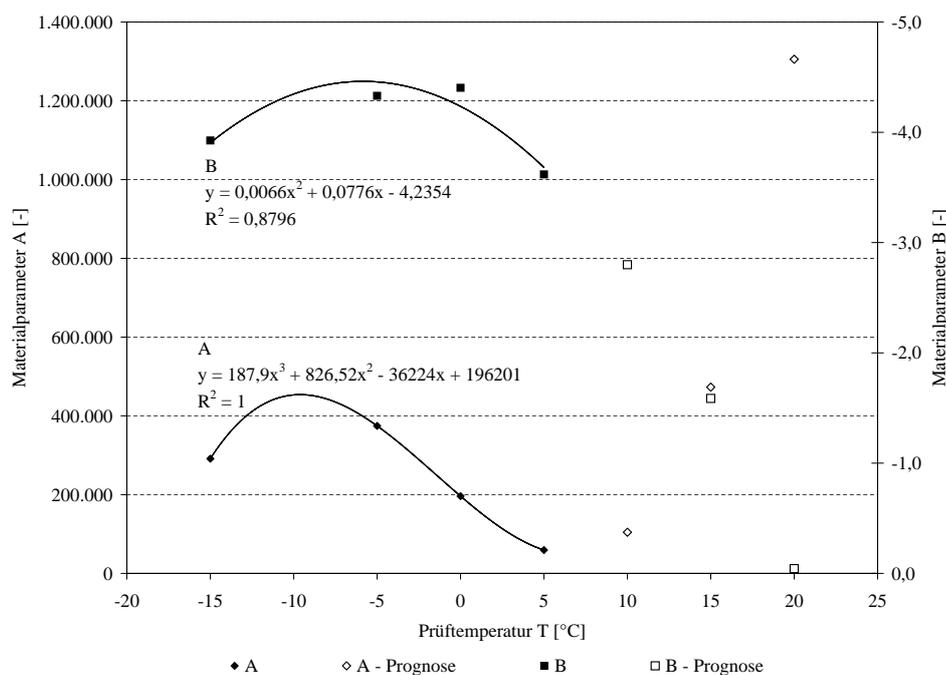


Abbildung 8.13: Zusammenhang zwischen den Materialparametern A bzw. B und der Prüftemperatur für spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen aus Einaxialen Zugschwellversuchen

Es wird deutlich, dass die Ermittlung der Materialparameter für 20°C durch Extrapolation auf Basis der Versuchsergebnisse mit Hilfe der gewählten Ansätze (quadratisch / kubisch) nicht möglich ist. Die Approximation des Zusammenhanges zwischen den Materialparametern A und B und der Temperatur mit anderen Funktionen (z.B. linear) war ebenfalls nicht zielführend.

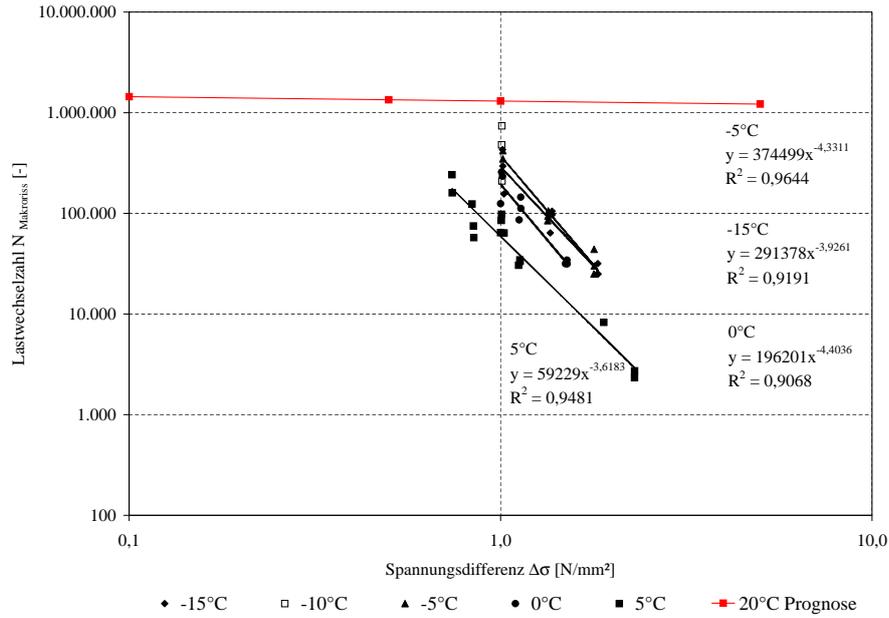


Abbildung 8.14: Prognostizierte spannungsabhängige Ermüdungsfunktion für den Einaxialen Zug-schwellversuche bei 20°C im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Funktionen

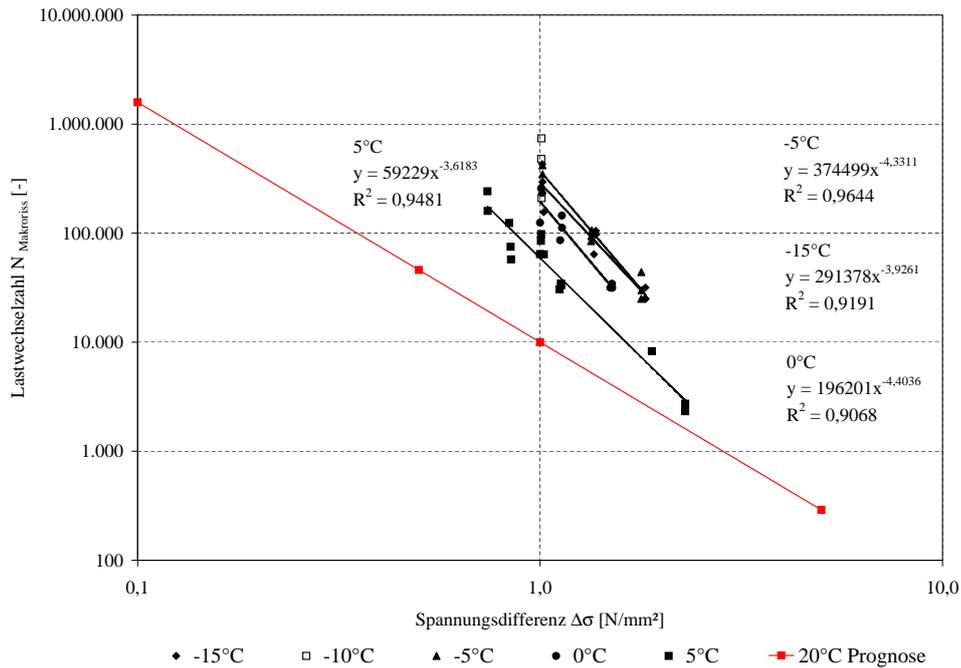


Abbildung 8.15: Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen für den Einaxialen Zug-schwellversuch

Bei einer ersten sinnvollen Annahme der Parameter zu $A = 10.000$ und $B = -2,2$ ergibt sich die in Abbildung 8.15 gezeigte plausible spannungsabhängige Ermüdungsfunktion für $T = 20^\circ C$. Mit dieser wurden die Betrachtungen zur spannungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktion durchgeführt. Um die tatsächliche Abhängigkeit der Materialparameter von der Prüftemperatur feststellen zu

können, müssten Versuche in einem weiten Temperaturspektrum durchgeführt werden oder z.B. durch neuronale Netze oder andere geeignete Hilfsmittel prognostiziert werden.

Die spannungsabhängige Ermüdungsflächenfunktion kann mit dem gleichen Funktionstyp wie die dehnungsabhängigen beschrieben werden.

$$N(\sigma_x; \sigma_{y/z}) = (A + C \cdot \sigma_{y/z}) \cdot \sigma_x^{(B+J \cdot \sigma_{y/z})} \quad (8.8)$$

Für den SMA Gabbro ergeben sich die Parameter A und B gemäß des Ansatzes zu 10.000 und -2,2. Die Variablen C und D wurden mit Hilfe von *STATISTICA* zu 9.969,64 und 1,264 bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß der spannungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktion beträgt $R^2 = 0,871$. In Abbildung 8.16 sind einerseits die Versuchsergebnisse der Spaltzugschwellversuche, der Triaxialversuche sowie die prognostizierten Werte der Einaxialen Zugschwellversuche und andererseits die mit der spannungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktion berechneten Datenpunkte dargestellt. Unter Berücksichtigung der angenommenen Werte für die Einaxialen Zugschwellversuche, die das Bestimmtheitsmaß gegenüber den tatsächlichen Ergebnissen deutlich steigern, kann von einer guten Übereinstimmung ausgegangen werden.

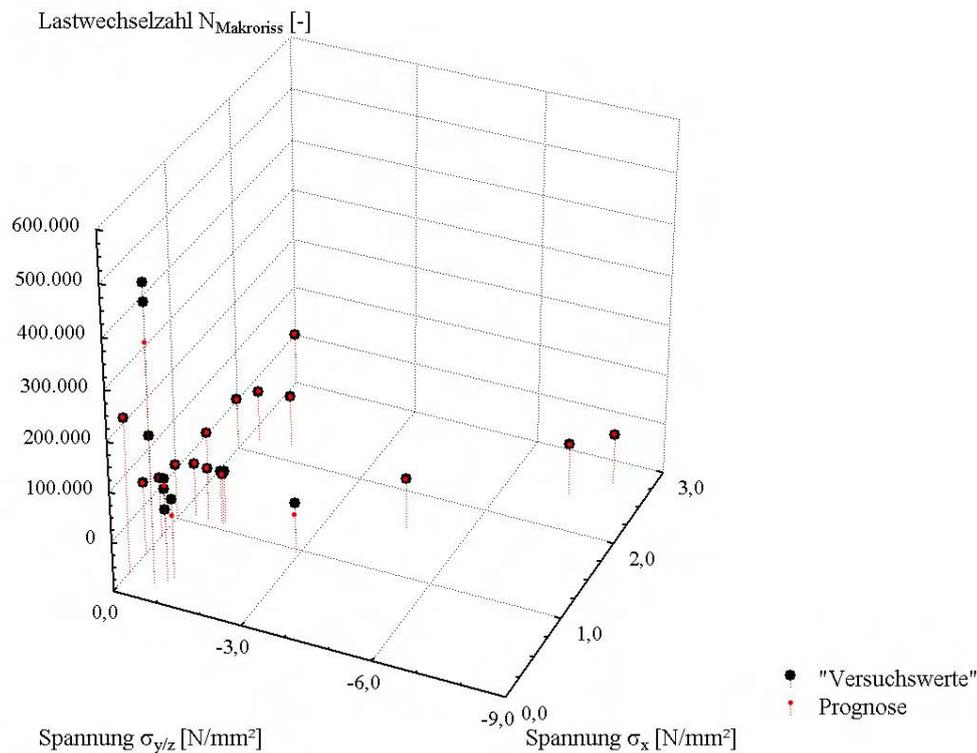


Abbildung 8.16: Prognostizierte spannungsabhängige Ermüdungsflächenfunktion im Vergleich mit den ermittelten Einzelwerten - SMA Gabbro, 10 Hz

Abschließend soll der Vergleich zwischen dehnungs- und spannungsabhängiger Ermüdungsflächenfunktion erfolgen. Dies erfolgt an dem bereits eingeführten Beispiel (siehe Abschnitt 4.3.4) mit einer über die gesamte Befestigungshöhe als konstant angenommenen Temperatur von $T = 20^\circ C$. Als Nachweispunkt wird die Oberseite der Asphaltdeckschicht zwischen den Rollspuren ($x =$

$1,74\text{ m}; y = 0; z = 0,80\text{ m}$) gewählt. Die Spannungen und Dehnungen in diesem Punkt sind in Tabelle 8.4 zusammengefasst.

Richtung i	Spannung σ_i [N/mm ²]	Dehnung ε_i [‰]
x	0,0855	0,01468
y	-0,0334	-0,009054
z	0	-0,00239

Tabelle 8.4: Auftretende Spannungen und Dehnungen an der Oberseite der ADS zwischen den Rollspuren bei $T = 20^\circ\text{C}$

Die Dehnungsanteile ergeben sich zu $\varepsilon^* = 0,013154\text{ ‰}$ und $\varepsilon^{**} = 0,00153126\text{ ‰}$. Da $\sigma_z = 0$ ist, stimmt die Summe aus ε^* und ε^{**} genau mit ε_x überein. Mit Hilfe der Ermüdungsflächenfunktionen für den SMA Gabbro können folgende Lastwechselzahlen bis zum Makroriss ermittelt werden.

- spannungsabhängige Funktion: $N_{Makroriss} = 2.399.041$
- dehnungsabhängige Funktion: $N_{Makroriss} = 27.652.451$

Grundsätzlich sollten mit beiden Ermüdungsflächenfunktionen gleichwertige Lastwechselzahlen bis zum Makroriss ermittelt werden. Der Faktor zwischen den Lastwechselzahlen, ermittelt mit der spannungs- bzw. dehnungsabhängigen Funktion, liegt in etwa bei 10. Die Ergebnisse sollten aufgrund der getroffenen Annahmen (Materialparameter der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktion der Einaxialen Zugschwellversuche) kritisch betrachtet werden, da diese das Ergebnis sehr stark beeinflussen. Eine Wertung der Ergebnisse kann ohne weitere Untersuchungen nicht erfolgen.

Es kann festgehalten werden, dass zur Aufstellung einer spannungs- und somit temperaturabhängigen Ermüdungsflächenfunktion pro Versuchstemperatur zahlreiche Einzelergebnisse vorliegen müssen, was zu einem erhöhten Versuchsaufwand führt. Die Aufstellung spannungsabhängiger Ermüdungsflächenfunktionen ist prinzipiell möglich, ist aber aufgrund der genannten Punkte mit einem erhöhten Versuchsaufwand verbunden und somit nicht empfehlenswert. Anhand des Beispiels konnte gezeigt werden, dass die Extrapolation von für die rechnerische Dimensionierung notwendigen Materialparametern ein großes Fehlerpotential birgt. Die Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktionen im Bereich der ATS ist fraglich, da die zusätzliche Zugbeanspruchung σ_y unbedingt Berücksichtigung finden muss, dieser Zustand bisher jedoch durch Versuche nicht nachbildbar ist.

8.5 Auswirkungen auf die Dimensionierung bei Anwendung von Ermüdungsflächenfunktionen

Die Auswirkungen der Anwendung der dehnungsabhängigen Ermüdungsflächenfunktion auf die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen soll an einem Beispiel gezeigt werden. Für den Vergleich wird das bereits eingeführte Modell (siehe Abschnitt 2.2.1) bei sommerlichem bzw. winterlichem Temperaturfall verwendet. Für den Ermüdungsnachweis wurden folgende Punkte ausgewählt:

- ADS ($x = 1,74 \text{ m}; y = 0; z = 0,80 \text{ m}$) - an der Oberseite der Asphaltdeckschicht zwischen den Lastachsen und
- ATS ($x = 2,76 \text{ m}; y = 0; z = 0,46 \text{ m}$) - an der Unterseite der Asphalttragschicht in der rechten Lastachse.

Die in den Nachweispunkten mit *REFEM* linear-elastisch berechneten Dehnungen infolge des mehraxialen Spannungszustandes (siehe Abbildung 2.8) sind in Tabelle 8.5 zusammengefasst. An der Oberseite der Asphaltdeckschicht treten zwischen den beiden Lastachsen infolge der Querdehnungseffekte im Asphalt trotz $\sigma_z = 0$ Dehnungen ε_z auf.

Nachweis- punkt	Sommerlicher Temperaturfall			Winterlicher Temperaturfall		
	ε_x [‰]	ε_y [‰]	ε_z [‰]	ε_x [‰]	ε_y [‰]	ε_z [‰]
Oberseite ADS	0,021	-0,013	-0,005	0,0075	-0,005	-0,001
Unterseite ATS	0,0449	0,0446	-0,0454	0,0169	0,0164	-0,0089

Tabelle 8.5: Auftretende Dehnungen in den Nachweispunkten für die zwei Temperaturfälle

Für die beispielhaften Dimensionierungsrechnungen bleiben die kryogenen Spannungen unberücksichtigt. Weiterhin erfolgen die Berechnungen ausschließlich mit einer Achslast von $8,5 \text{ t}$. Diese entspricht unter der Annahme einer rechteckförmigen Lasteinleitungsfläche (siehe Abschnitt 2.2.1) einer Beanspruchung von $1,00 \text{ N/mm}^2$.

Bei der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen werden bisher nur die größten Dehnungen an der Unterseite der ATS für den Ermüdungsnachweis berücksichtigt. Für das vorliegende Beispiel ist das jeweils die Dehnung ε_x . Bei Anwendung der Ermüdungsflächenfunktion wird diese Dehnung in zwei Teile aufgespalten, die ihre Ursache im vorherrschenden Spannungszustand haben. Für die Bestimmung des Dehnungsanteils ε^{**} wird im Nachweispunkt Oberseite ADS die Spannungskomponente σ_y und im Nachweispunkt Unterseite ATS die Spannung σ_z einbezogen. Die vorherrschenden Spannungen können Abbildung 2.8 entnommen werden.

Die Dehnungsanteile für die betrachteten Temperaturfälle in den beiden Nachweispunkten sind in Tabelle 8.6 zu finden. Die zweite Zugspannungskomponente σ_y im Nachweispunkt Unterseite ATS wurde nicht berücksichtigt, da für diese Spannungskombination keine Versuchsergebnisse in die

Ermittlung der Ermüdungsflächenfunktion eingeflossen sind. Die Dehnungsanteile wurden entsprechend der Gleichungen 8.1 bis 8.4 berechnet.

Nachweis- punkt	Sommerlicher Temperaturfall			Winterlicher Temperaturfall		
	ε_x [‰]	ε^* [‰]	ε^{**} [‰]	ε_x [‰]	ε^* [‰]	ε^{**} [‰]
ADS	0,021	0,01861	0,002137	0,0075	0,006954	0,0006522
ATS	0,0449	0,06464 (0,04381)	0,001092	0,0169 (0,016741)	0,02072	0,0001595

Tabelle 8.6: Aufspaltung des Dehnungsanteils ε_x im Berechnungsbeispiel

Aufgrund der Tatsache, dass bei der FE-Berechnung sämtliche Spannungsanteile für die Bestimmung der Dehnungen berücksichtigt werden, weicht die Summe aus ε^* und ε^{**} für die ATS von ε_x (dem mit *REFEM* ermittelten Wert) ab. Infolge der zusätzlichen Zugspannungskomponente σ_y und den daraus resultierenden negativen Querdehnungen verringert sich ε_x . In diesem Fall treten somit Schwierigkeiten bei der Übertragung der Spannungszustände aus der Realität in das Modell der Ermüdungsflächenfunktion auf.

Unter Verwendung der ermittelten Dehnungen bzw. Dehnungsanteile wurden basierend auf den verschiedenen Ermüdungsfunktionen die Lastwechselzahlen bis zum Makroriss bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.7 und Tabelle 8.8 zusammengefasst. Die zweite Zugspannungskomponente σ_y wurde vernachlässigt. Für alle dargestellten Ergebnisse muss festgehalten werden, dass die im Beispiel ermittelten Dehnungen unterhalb des geprüften Dehnungsbereiches ($\approx 0,05 - 0,3\%$) liegen. Die Ermüdungsfunktionen der Asphaltgemische wurden trotzdem ohne Änderungen angewandt. Da die Gültigkeit der Extrapolation auf niedrigere Dehnungsbereiche nicht durch Versuchsergebnisse abgesichert ist, können die Ergebnisse fehlerbehaftet sein. Weiterhin ist anzumerken, dass die Versuchsstreuungen der einzelnen Versuchsarten verschieden ist.

	Nachweispunkt			
	Oberseite ADS		Unterseite ATS	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Einaxiale Zug- schwellversuche ε_x	7.130.741	228.771.330	84.405	8.982.646
Spaltzug- schwellversuche ε_x	1.549.757	33.901.592	123.993	4.603.673
Gesamte Ermüdungsfunktion ε_x	5.562.106	192.359.842	88.978	4.033.551
Ermüdungs- flächenfunktion $\varepsilon^*/\varepsilon^{**}$	7.249.431	322.697.801	430.803	15.415.062

Tabelle 8.7: Lastwechselzahlen bis zum Makroriss für das Berechnungsbeispiel in Abhängigkeit von der verwendeten Ermüdungsfunktion

Die Lastwechselzahlen der gesamten Ermüdungsfunktion basieren auf den Ermüdungsfunktionen, die unabhängig von der Versuchsart für jedes Asphaltgemisch aufgestellt wurden (siehe Anhang C). Die Lastwechselzahlen im Nachweispunkt Unterseite ATS basierend auf der Ermüdungsflächenfunktion nach Tabelle 8.1 bzw. 8.3 und sind kritisch zu betrachten. Den Flächenfunktionen liegt nur eine geringe Datenanzahl zugrunde und das Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktion aus den Einaxialen Zugschwellversuchen beträgt nur $R^2 = 0,169$. Die ermittelten Werte zeigen, dass die Lastwechselzahlen auf Grundlage der Einaxialen Zugschwellversuche, der gesamten Ermüdungsfunktion und der Ermüdungsflächenfunktion sehr ähnlich sind. Im Gegensatz dazu sind die ermittelten Lastwechselzahlen auf Grundlage der Spaltzugschwellversuche mit Ausnahme des Nachweises Sommer/Unterseite ATS sehr viel geringer, was auf den bereits in Abschnitt 8.2 beschriebenen Reißverschluss-Effekt zurückzuführen ist. Dieser Effekt ist auch auf reale Straßenbefestigungen übertragbar.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass sich trotz der kleinen Werte für ε^{**} im Beispiel Unterschiede zwischen den Lastwechselzahlen bis zum Makroriss auf Grundlage der Ermüdungsfunktion der Einaxialen Zugschwellversuche und der Ermüdungsflächenfunktion ergeben. Für den Nachweispunkt Oberseite ADS ergeben sich geringfügig höhere Werte. Die berücksichtigte 2. (Druck-) Spannungskomponente wirkt sich positiv aus. Im Nachweispunkt Unterseite ATS werden mit der Ermüdungsflächenfunktion geringere Lastwechselzahlen bis zum Makroriss prognostiziert. Der Einfluss der zweiten Spannungs- bzw. Dehnungskomponente ist wesentlich geringer als erwartet.

	Nachweispunkt			
	Oberseite ADS		Unterseite ATS	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Triaxialversuche ε_x	21.328.056	1.506.399.690	795.807	310.266.998
Gesamte Ermüdungsfunktion ε_x	5.562.106	192.359.842	88.978	4.033.551
Ermüdungsflächenfunktion $\varepsilon^*/\varepsilon^{**}$ nach Tabelle 8.1	7.249.431	322.697.801	430.803	15.415.062
Ermüdungsflächenfunktion $\varepsilon^*/\varepsilon^{**}$ nach Tabelle 8.3	7.601.670	324.968.455	200.575	11.160.133

Tabelle 8.8: Lastwechselzahlen bis zum Makroriss für das Berechnungsbeispiel

Tabelle 8.8 zeigt, dass sich auf Grundlage der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung für die betrachteten Nachweiskfälle die höchsten Lastwechselzahlen bis zum Makroriss im Vergleich zu den anderen aufgeführten Ermüdungsfunktionen ergeben. Dies kann auf den im Versuch vorhersehenden dreiaxialen Beanspruchungszustand zurückgeführt werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Ermüdungsfunktionen ermittelt anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche nur auf einer sehr kleinen Datengrundlage basieren. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Ermüdungsflächenfunktionen nach Tabelle 8.1 und 8.3 sind trotz der großen Unterschiede im Be-

stimmtheitsmaß der einzelnen Funktionen als sehr gering einzuschätzen.

Der Vergleich der Werte zwischen der gesamten Ermüdungsfunktion und der Ermüdungsflächenfunktion zeigt nur geringe Unterschiede. Es ist vorstellbar, dass sich für beide Ermüdungsfunktionen unter Berücksichtigung von Shift-Faktoren bzw. Funktionen gleiche ertragbare Lastwechselzahlen bis zum Ermüdungskriterium bestimmen lassen.

Eine Wertung, welche der dargestellten Ermüdungsfunktionen die tatsächlichen Lastwechselzahlen bis zum Ermüdungskriterium (Makroriss) am besten vorhersagen kann, muss z.B. mit Hilfe einer Beobachtungsstrecke geklärt werden. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung individueller Shift-Faktoren die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ermüdungsfunktionen letztendlich ausgleichen kann. Es muss jedoch festgehalten werden, dass der tatsächliche Beanspruchungszustand einer Straßenbefestigung nur im Triaxialversuch annähernd nachgebildet werden kann und dieser Zustand somit auch Eingang in die Ermüdungsfunktion findet. Unter Berücksichtigung der Versuchsdurchführung und des damit verbundenen Aufwandes (materiell und zeitlich) wäre die Aufstellung von Ermüdungsfunktionen für Asphaltgemische mit einfachen Versuchen (Einaxialer Zugschwellversuch und Spaltzugschwellversuch) zu favorisieren, da mit diesen auch bestehende Strecken untersucht werden könnten, was im Hinblick auf die Bestimmung des Substanzwertes von Bedeutung ist.

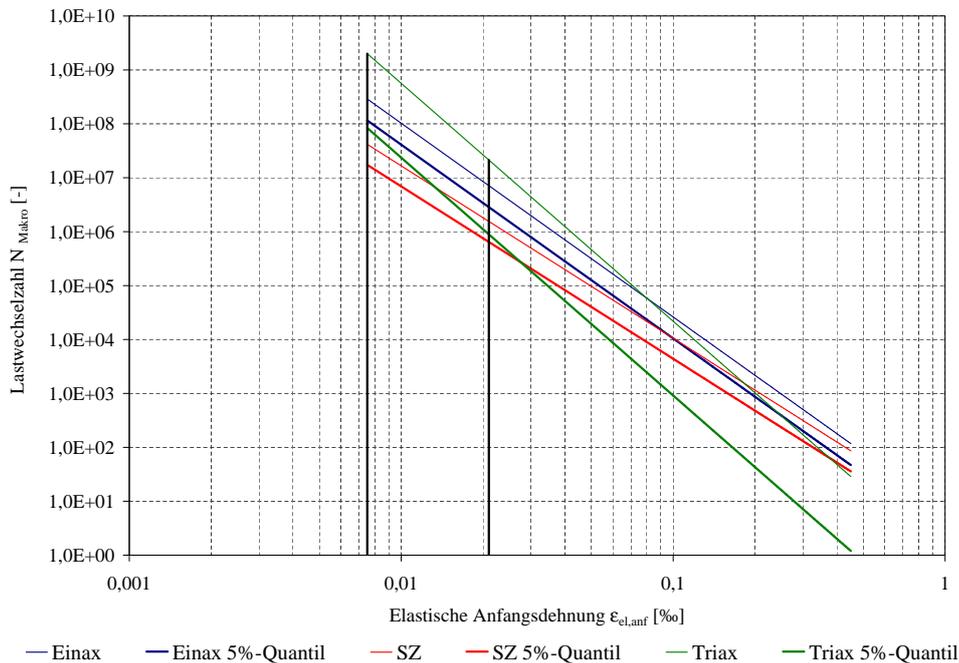


Abbildung 8.17: Regressionsgleichungen und 5%-Quantilwertfunktionen für den SMA 0/11 S Gabro

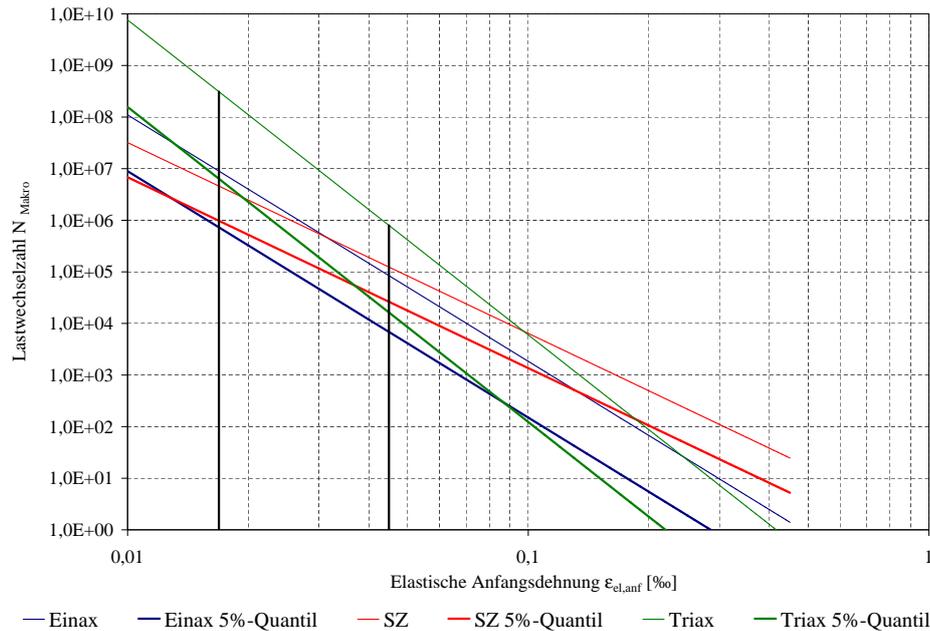


Abbildung 8.18: Regressionsgleichungen und 5%-Quantilwertfunktionen für die ATS 0/32 CS

In Abbildung 8.17 und 8.18 sind die Regressionsgleichungen der betrachteten zwei Asphaltgemische (ADS - SMA Gabbro, ATS) im Vergleich zu den 5%-Quantilwertfunktionen mit einer 95%igen Vorhersagewahrscheinlichkeit dargestellt. Weiterhin sind die Dehnungen des beschriebenen Beispiels eingezeichnet, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Steigungen der Funktionen zu verdeutlichen. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Versuchsarten unterschiedliche Versuchsstreuungen aufweisen.

Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche mit den geringsten Streuungen behaftet sind. Die Streuungen für die Ergebnisse der Triaxialversuche sind im Vergleich dazu relativ groß, was auch auf die geringe Anzahl von Einzelversuchen zurückzuführen ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Differenzen zwischen den verschiedenen Versuchsarten bei Verwendung der 5%-Quantilwertfunktion im Vergleich zu den eigentlichen Regressionsgleichungen geringer werden.

Aus diesen Ergebnissen kann direkt abgeleitet werden, dass bei der Anwendung von Quantilwertfunktionen die Versuchsstreuung ausgeschaltet werden kann und somit ausschließlich das Materialverhalten eines Asphaltgemisches in der rechnerischen Dimensionierung berücksichtigt wird. Gleichzeitig müssen die Shift-Faktoren entsprechend der gewählten Quantilwertfunktion mit Hilfe einer geeigneten Kalibrierung neu bestimmt werden.

Kapitel 9

Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollten auch als Grundlage bzw. Anstoß für weitere Untersuchungen angesehen werden. Folgende Fragestellungen können dabei aus der Arbeit abgeleitet werden:

Um den an der Unterseite einer Asphalttragschicht vorherrschenden Spannungszustand im Labor nachbilden zu können, muss ein geeigneter Versuchsaufbau entwickelt und auf seine Eignung getestet werden. In einem Volumenelement an der Unterseite einer Asphalttragschicht treten zwei gleich große Zugspannungskomponenten in Längs- und Querrichtung sowie eine Druckspannungskomponente in vertikaler Richtung auf. Ein möglicher Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 9.1 dargestellt. Der Probekörper kann aus im Walzsektorverdichter hergestellten Platten gewonnen werden. Dabei ist zu prüfen, welche Probekörperform (z.B. kreuzförmig oder quadratisch mit abgeschrägten Ecken) sowohl aus theoretischen als auch aus praktischen Gesichtspunkten am besten geeignet ist. Im dargestellten Beispiel erfolgt die Lagerung linienförmig an den vier Enden des kreuzförmigen Probekörpers. Die Zugspannungen an der Unterseite des Probekörpers werden durch eine über einen Stempel aufgebrachte Druckkraft erzeugt. Die Dehnungen an der Unterseite des Probekörpers können nur mit Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet werden. Ermüdungsversuche an Probekörpern mit diesem realitätsnahen Spannungszustand könnten dazu beitragen, das beschriebene Verfahren zur Aufstellung von Ermüdungsflächenfunktionen auf bisher noch nicht betrachtete Spannungs-kombinationen auszudehnen.

Weiterhin sollten die Auswirkungen des frequenzabhängigen Ermüdungsverhaltens in der Dimensionierung Berücksichtigung finden. Die E-Modul-Funktion und die Ermüdungsfunktion verschlechtern sich mit Abnahme der Belastungsfrequenz signifikant. Daraus lässt sich ableiten, dass Straßenbefestigungen, die nur mit einer geringen Geschwindigkeit befahren werden besonderen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Eine Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Belastungsfrequenzen auf die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen kann nur durch Untersuchungen unter Verwendung von verschiedenen Geschwindigkeitsprofilen erfolgen.

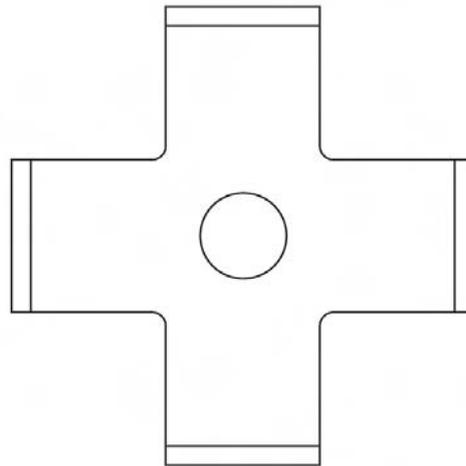


Abbildung 9.1: Prinzipskizze eines möglichen Versuchsaufbaus

Auch der Einfluss einer möglichen Nachverdichtung der Asphaltgemische, ist als Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen anzuführen. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass der Hohlraumgehalt einen maßgeblichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Aufgrund der geringeren Temperaturen (im Vergleich zur Oberfläche der Asphaltbefestigung) während der Sommermonate und der ebenso geringeren vertikalen Druckbeanspruchung aus der Verkehrsbelastung sind Asphalttragschichten für diese Problematik weniger anfällig. Für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltdeckschichten u. a. im Hinblick auf die Rissbildung von oben sollten die Auswirkungen der Nachverdichtung jedoch untersucht werden.

Zur Verbesserung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen ist weiterhin zu untersuchen, welche Quantilwertfunktion bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit zur Anwendung kommen sollte. Entsprechend der gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit könnten unterschiedliche Sicherheitsbedürfnisse bedient werden.

Kapitel 10

Zusammenfassung

Das Ermüdungsverhalten (bestehend aus Ermüdungsfunktion und E-Modul-Funktion) von Asphaltgemischen wird europaweit unter Zuhilfenahme verschiedener Versuchsarten ermittelt. Die Versuche sind durch unterschiedliche Spannungszustände innerhalb der Probekörper und durch die Anwendung individueller Prüfparameter charakterisiert. Der Ermüdungszeitpunkt kann gemäß verschiedener Definitionen (Abfall des E-Moduls auf 50% des Anfangswertes, Lastwechselzahl bis zum Makroriss, usw.) festgelegt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde der Zeitpunkt der Makrorissentstehung, basierend auf dem Konzept der dissipierten Energie, als Ermüdungskriterium definiert.

In den Probekörpern der Einaxialen Zugschwellversuchen, der Spaltzugschwellversuchen und der Triaxialversuchen mit Zug-/Druckschwellbelastung liegt jeweils ein individueller Spannungszustand vor. Die Verwendung zweidimensionaler spannungsabhängiger Ermüdungsfunktionen ist nicht empfehlenswert, da die Temperatur grundsätzlich berücksichtigt werden muss und so deutlich mehr Einzelversuche erforderlich sind, um die Ermüdungsfunktionen für den notwendigen Temperaturbereich zu ermitteln. Weiterhin kann bei der Aufstellung von zweidimensionalen Ermüdungsfunktionen ausschließlich die Zugspannungskomponente einfließen, was zu Ungenauigkeiten führt. Im Gegensatz dazu werden bei der Aufstellung von dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen die Dehnungen als ein Resultat des jeweils vorherrschenden Spannungszustandes, der alle Spannungskomponenten enthält, als maßgebliche Größe verwendet. Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wurde hauptsächlich auf dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen zurückgegriffen.

Das im Rahmen der Arbeit ausgewertete Versuchsprogramm umfasst Einaxiale Zugschwellversuche (durchgeführt am Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, siehe [38]), Spaltzugschwellversuche und Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung an insgesamt sechs verschiedenen Asphalten - zwei Splittmastixasphalte SMA 0/11 S mit Bitumen PmB 45A, einen Asphaltbeton AB 0/11 S mit Bitumen 50/70, einen Offenporigen Asphalt OPA 0/8 mit Bitumen PmBH 40-100/65H, einen Asphaltbinder ABi 0/16 S mit Bitumen PmB 45A und eine Asphalttragschicht ATS 0/32 CS mit Bitumen 50/70. Die Versuchsergebnisse bilden die Grundlage für die Bestimmung der Ermüdungsfunktionen und der E-Moduln in Folge verschiedener Spannungszustände und Prüfbedingungen. Dabei konnten die Einflüsse aus dem Hohlraumgehalt, der Belastungsfrequenz sowie der Mischgutart und -sorte herausgearbeitet werden.

Die Gegenüberstellung der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen eines Asphaltgemisches bestimmt mit den drei genannten Versuchsarten zeigt eine Reihung, die durch den Spannungszustand und die Probekörperabmessungen erklärt werden kann. Die höchsten Lastwechselzahlen in Abhängigkeit von der maßgebenden Dehnung können für den Triaxialversuch gefolgt vom Einaxialen Zugschwellversuch und dem Spaltzugschwellversuch beobachtet werden. Sollen im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung die Ergebnisse verschiedener Versuchsarten eingesetzt werden, so müssen die Unterschiede durch verschiedene Shift-Faktoren (Übertragung der Laborergebnisse auf die Realität) Berücksichtigung finden. Gleichzeitig kann so eine Einordnung in unterschiedliche Sicherheitsniveaus erfolgen.

Die Aufstellung von Ermüdungsflächenfunktionen in Abhängigkeit verschiedener Dehnungsanteile kann für Spannungskombinationen $\sigma_x/\sigma_{y/z}$ = Zugspannung / Druckspannung (rotationssymmetrischer Spannungszustand) erfolgen. Die Gültigkeit der aufgestellten Ermüdungsflächenfunktionen für weitere Spannungskombinationen (z.B. $\sigma_{x/y}/\sigma_z$ = Zugspannung / Druckspannung) muss anhand einer geeigneten Versuchsanordnung geprüft werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung spannungsabhängiger Ermüdungsflächenfunktionen ebenso realisierbar ist. Aufgrund des großen Versuchsaufwandes zur Absicherung der Ergebnisse erscheint diese Vorgehensweise jedoch nicht sinnvoll.

Die Untersuchungen zu den Auswirkungen der verschiedenen Ermüdungsfunktionen auf das Ergebnis der rechnerischen Dimensionierung zeigen, dass die Beurteilung ausschließlich mit Hilfe einer Beobachtungstrecke erfolgen kann. Nur so können die Shift-Faktoren bzw. -Funktionen der verschiedenen Versuchsarten bestimmt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] **AL Sp-Beton**
Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen
Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FGSV Verlag GmbH, Köln, 2006, Deutschland.
- [2] **AL Sp-Asphalt**
Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzugschwellversuch
Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Bearbeitungsstand Februar 2008, Deutschland.
- [3] **DIN EN 12697-6**
Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphaltprobekörpern
Deutsche Fassung, Juni 2003
Beuth-Verlag, Berlin, 2003, Deutschland.
- [4] **DIN EN 12697-24**
Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung
Deutsche Fassung, September 2004
Beuth-Verlag, Berlin, 2004, Deutschland.
- [5] **DIN EN 12697-26**
Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit
Deutsche Fassung, Oktober 2004
Beuth-Verlag, Berlin, 2004, Deutschland.
- [6] **RDO - Asphalt 07 (Entwurf)**
Richtlinien zur Dimensionierung von Oberbauten mit Asphaltdecke
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement
FGSV, Köln, 2007, Deutschland.

- [7] **RStO 01**
Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn
FGSV Verlag GmbH, Köln 2001, Deutschland.
- [8] **TP A-StB**
Technische Prüfvorschrift - Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FGSV Verlag GmbH, Köln, 1994, Deutschland.
- [9] **ZTV Asphalt - StB 01**
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen
FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001, Deutschland.

- [10] **Ayers, M. E.**
Status of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-EPDG)
Technical Services Memo, ACPA
2006, USA.
- [11] **Borek, J.; Müller, F.**
Prüfung des Verhaltens von Asphalt bei tiefen Temperaturen mit Hilfe des modifizierten Spaltzugversuchs unter besonderer Beachtung der Querdehnung
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 885
Bonn, 2004, Deutschland.
- [12] **Castro, M.; Sanchez, J. A.**
Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue Curves
Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, Issue 2, pp. 168-174
ASCE, 2006, USA.
- [13] **Di Benedetto, H.; de La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R.**
Fatigue of bituminous mixtures
Materials and Structures, Vol. 37, pp. 202-216
Springer Verlag, 2004.
- [14] **Durth, W.; Grätz, B.**
Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 723
Bonn-Bad Godesberg, 1996, Deutschland.
- [15] **Eisenman, J.; Hilmer, A.**
Einfluß der Radlasten und Reifenindrücke auf die Spurrinnenbildung bei Asphaltstraßen -
Experimentelle und theoretische Untersuchungen & Vergleich von Einzelbereifung und Zwillingsbereifung bezüglich ihres Einflusses auf die Spurrinnenbildung
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 463
Bonn-Bad Godesberg, 1986, Deutschland.
- [16] **Francken, L.; Verstraeten, J.**
Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending
Transportation Research Record 515, pp. 114-123
Washington D.C., 1974, USA.
- [17] **Gohl, S.**
Vergleich der gemessenen mechanischen Beanspruchungen der Modellstraße der BAST mit den Berechnungsergebnissen ausgewählter Programme
Diplomarbeit, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden
Dresden, 2006, Deutschland.

- [18] **Grohs, S.**
Bestimmung mechanischer Kenngrößen für einen SMA 0/11 S mit Hilfe des dynamischen Triaxialversuchs
Diplomarbeit, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden
Dresden, 2005, Deutschland.
- [19] **Heukelom, W.; Klomp, A. J.**
Road design and dynamic loading
Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 33
1964, USA.
- [20] **Hürtgen, H.**
Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Asphalt aus konventionellen Mischgut- und Bindemitteldaten
Bitumen, Heft 2/1982, Seite 52-58
1982, Deutschland.
- [21] **Hürtgen, H.**
Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie)
Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Universität Hannover, Heft 20
Hannover, 2000, Deutschland.
- [22] **Huschek, S.**
Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck
Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der ETH Zürich, Dissertation
Zürich, 1980, Schweiz.
- [23] **Huurman, M.**
Can we perform tests on materials?
Vortrag im Rahmen des 4PB-Workshops am 8./9.03.2007
Delft, 2007, Niederlande.
- [24] **Kayser, S.**
Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse bei Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen
Dissertation, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden
Dresden, 2007, Deutschland.
- [25] **Leutner, R.; Lorenzl, H.; Schmoeckel, K.**
Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 45
Bergisch-Gladbach, 2006, Deutschland.

- [26] **Loulizi, A.; al-Qadi, I. L.; Elseifi, M.**
Difference between in situ flexible pavement measured and calculated stresses and strains
Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, Issue 7, pp. 574 - 579
ASCE, 2006, USA.
- [27] **Meissner, S.**
Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Asphalten
Diplomarbeit, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden
Dresden, 2007, Deutschland.
- [28] **Miner, M. A.**
Cummulative damage in fatigue
Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, Issue 3
1945, USA.
- [29] **Molenaar, A. A. A.**
Prediction of fatigue cracking in asphalt pavements: Do we follow the right approach?
Transportation Research Board, 86th Annual Meeting
Washington D.C, 2007, USA.
- [30] **Oeser, M.**
Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens von Verkehrswegebefestigungen
Vortrag im Rahmen des Arbeitstreffens des DAV am 26.01.2005
Dresden, 2005, Deutschland.
- [31] **Oeser, M.; Möller, B.; Werkmeister, S.; Wellner F.**
Numerical Simulation of Laboratory Tests on Asphalt - Comparison of the Direct Tensile and
the Indirect Tensile Test
Transportation Research Board, 84th Annual Meeting
Washington D.C, 2005, USA.
- [32] **Radaj, D., Vormwald, M.**
Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure
Springer-Verlag
Berlin, 2007, Deutschland.
- [33] **Read, J.**
Fatigue cracking of bituminous paving mixtures
University of Nottingham, Department of Civil Engineering, Dissertation
Nottingham, 1996, Großbritannien.
- [34] **Renken, P.; Büchler, S.**
Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft 39
Bergisch-Gladbach, 2005, Deutschland.

- [35] **Rowe, G.**
Performance of Asphalt Mixtures in the trapezoidal Fatigue Test
Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 62, pp. 344 - 384
1993, USA.
- [36] **Schrickel, M.; Werkmeister, S.; Otto, A.; Wellner, F.**
Ermittlung der Dauerfestigkeit mit dem dynamischen Spaltzugversuch - Fortführung
Forschungsbericht FGSV-Nr. 1/00
Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau
Dresden, 2004, Deutschland.
- [37] **Van Dijk, W.; Visser, W.**
The energy approach to fatigue for pavement design
Shell Research B.V, Costumer publication 244/76, 1977.
- [38] **Wellner, F. et al.**
Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und
mittelständischer Straßenbauunternehmen
Schlussbericht
Dresden, 2007, Deutschland.
- [39] **Wellner, F.; Weise, C.**
Schadensakkumulation bei unterschiedlicher Beanspruchung unter Berücksichtigung von
Heilungs- und Affinitätseinflüssen an ausgewählten Asphalten
DFG-gefördertes Forschungsvorhaben
Dresden, 2008, Deutschland.
- [40] **Werkmeister, S.; Wellner, F.**
Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen mit dem dynamischen
Spaltzugversuch im Rahmen einer analytischen Bemessung
Bitumen, Heft 3/2004, S. 98-103
2004, Deutschland.
- [41] **Wijk, G.**
Some new theoretical Aspects of indirect Measurements of the Tensile Strength of Rocks
International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts,
Volume 15, pp. 149 - 160
1978, Großbritannien.
- [42] **Witczak, M. W.; Mirza, M.W.**
Development of relationships to predict Poisson's Ratio for paving materials
InterTEAM Technical Report for NCHRP 1-37A
University of Maryland, College Park, 1999, USA.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anwendung der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz nach Hürtgen [21]	7
2.2	Verlauf der Steifigkeit während eines Ermüdungsversuches, Di Benedetto [13]	10
2.3	Unterschied zwischen Ermüdung und bleibender Verformung, Di Benedetto [13]	10
2.4	Ausschnitt einer Straßenbefestigung für die <i>REFEM</i> -Berechnungen	12
2.5	System für die <i>REFEM</i> -Berechnungen	12
2.6	Sommerlicher und winterlicher Temperaturverlauf gemäß Kayser [24]	13
2.7	Horizontalspannungszustand σ_x in einer Straßenbefestigung bei sommerlichen und winterlichen Temperaturen	14
2.8	Mehraxialer Spannungszustand in bzw. zwischen den Rollspuren bei sommerlichen und winterlichen Temperaturen	14
2.9	Dehnungszustand ε_x in einer Straßenbefestigung bei sommerlichen bzw. winterlichen Temperaturen	15
2.10	Dehnungen ε_y an der Unterseite der Asphalttragschicht für verschiedene Temperaturen	16
2.11	Ermüdungsfunktionen einer ATS bis zum Versagen nach Heukelom/Klomp und mit Hilfe von Spaltzugschwellversuchen ermittelt	20
3.1	Verlauf der horizontalen Spannungen in und neben der Lastachse	24
3.2	Prinzip des Einaxialen Zugschwellversuches	25
3.3	Verlauf der vertikalen Spannungskomponente im Einaxialen Zugschwellversuch	26
3.4	Prinzip des Spaltzugschwellversuches	28
3.5	Koordinatensystem für die Spannungsberechnungen im Spaltzugschwellversuch	28
3.6	Spannungsverlauf σ_x und σ_y bei ($z = 0$)	30
3.7	Verlauf der berechneten Horizontalspannung σ_x in der Außenfläche des Probekörpers für unterschiedliche Probekörperhöhen	31
3.8	Brucharten beim Spaltzugversuch an Beton nach Mitchell [14]	32
3.9	Rissentstehung im Spaltzugschwellversuch bei $20^\circ C$	33
3.10	Halterahmen zur Positionierung der Wegaufnehmer im Spaltzugschwellversuch	35
3.11	Prinzip des Triaxialversuches mit Zug-/Druckschwellbelastung	36
3.12	Verlauf der vertikalen Spannungen σ_x im Triaxialversuch	37
3.13	Dresdner Triaxialprüfanlage	38
3.14	Belastungs- und Verdichtungsrichtung bei der Probekörperherstellung für den Triaxialversuch und in der Straßenbefestigung	39
3.15	Darstellung einer möglichen Prüfeinrichtung für den 2-Punkt-Biegeversuch	41

3.16	Vertikaler Spannungszustand σ_x im 2-Punkt-Biegeversuch bei maximaler Auslenkung, Huurman [23]	42
3.17	Darstellung einer möglichen Prüfeinrichtung für den 4-Punkt-Biegeversuch	44
3.18	Horizontalspannungszustand σ_x im 4-Punkt-Biegeversuch infolge einer Druckbelastung	45
3.19	Probekörpergeometrie im 4-Punkt-Biegeversuch	46
4.1	Zugdehnungen infolge der mechanogenen Belastung an der Unterseite des Asphaltberbaus [25]	50
4.2	Einfluss von Versuchsergebnissen mit sehr großen Dehnungen auf die Ermüdungsfunktion eines Aphaltes [38]	51
4.3	Verlauf des E-Moduls während eines Spaltzugschwellversuches	52
4.4	Probekörper nach dem Spaltzugschwellversuch: a - gerissener Probekörper b - zerbrochener Probekörper	53
4.5	Verlauf des E-Moduls	54
4.6	Plastische Vertikalverformung eines Probekörpers während eines Triaxialversuches .	55
4.7	Bestimmung der Lastwechselzahl bis zum Mikro- und Makroriss gemäß Rowe [35] . .	56
4.8	Verlauf der Phasenverschiebung während eines Spaltzugschwellversuches	56
4.9	Schematische Darstellung der Wöhlerkurve für Stahl	59
4.10	Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen eines SMA für drei Prüftemperaturen .	60
4.11	Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion eines SMA	61
4.12	Ermüdungsfunktionen eines SMA für drei Temperaturen bei gleichbleibender Unterspannung	62
4.13	Sehr gute Anpassung der Sinusregression an die Messwerte -Beispiel 1	65
4.14	Ungünstige Anpassung der Sinusregression an die Messwerte - Beispiel 2	66
4.15	Vergleich der Ergebnisse der Sinusregression für 5 bzw. 10 Lastwechsel als Grundlage - Beispiel 2	67
6.1	Probekörper des OPA 0/8 mit einer Höhe von 4 cm und deutlichen Kantenabbrüchen	74
6.2	Probekörper des OPA 0/8 mit einer Höhe von 6 cm und Ausgipsung der Abtaststellen der Wegaufnehmer	74
6.3	Masterkurve des absoluten E-Moduls - SMA 0/11 S Gabbro	75
6.4	Abhängigkeit des E-Moduls vom Hohlraumgehalt - SMA 0/11 S Gabbro	76
6.5	Vergleich der versuchstechnisch ermittelten und der berechneten E-Modul-Funktion - SMA 0/11 S Gabbro	77
6.6	Vergleich der versuchstechnisch ermittelten und der berechneten E-Modul-Funktion - AB 0/11 S Moräne	77
6.7	Vergleich der mit dem Spaltzugschwellversuch ermittelten E-Moduln verschiedener Asphalte bei 10 Hz	78
6.8	Einfluss der Anisotropie auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Gabbro	80
6.9	Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Gabbro . .	80
6.10	Einfluss der Probekörperabmessungen auf die Ermüdungsfunktion der ATS	81
6.11	Einfluss der Probekörperabmessungen auf den E-Modul der ATS	82

6.12	Einfluss der Probekörperabmessungen auf den Zeitpunkt der Entstehung von Mikrorissen - OPA	82
6.13	Vergleich der Ermüdungsfunktionen zweier SMA 0/11 S PmB 45A, 10 Hz	83
6.14	Vergleich der mit Spaltzugschwellversuchen ermittelten Ermüdungsfunktionen	85
6.15	Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Moräne	86
7.1	Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Bohrhammer, [38]	88
7.2	Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Gyrator, [38]	89
7.3	Raumdichteverteilung - Verdichtung mit dem Walzsektorverdichter, [38]	90
7.4	Wiederholbarkeit von Triaxialversuchen - SMA Gabbro, 10 Hz	93
7.5	Frequenzabhängigkeit des absoluten E-Moduls im Triaxialversuch - SMA 0/11 S Gabbro	94
7.6	Vergleich der im Triaxialversuch ermittelten E-Moduln	94
7.7	Zusammenhang zwischen den Spannungskomponenten σ_x und $\sigma_{y/z}$ und dem E-Modul - SMA Gabbro, 10 Hz	95
7.8	Dreidimensionale Darstellung des Zusammenhanges zwischen den Spannungskomponenten σ_x und $\sigma_{y/z}$ und dem E-Modul - SMA Gabbro, 10 Hz	96
7.9	Vergleich der Ermüdungsfunktionen der SMA bei 10 Hz	97
7.10	Vergleich der Ermüdungsfunktionen bei 10 Hz	97
7.11	Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Ermüdungsfunktion - SMA 0/11 S Moräne	98
7.12	Eintreten des Ermüdungskriteriums Makroriss zwischen den Magneten trotz sichtbaren Risses in der unteren Klebefuge	99
7.13	Eintreten des Ermüdungskriteriums Makroriss im Triaxialversuch ohne sichtbaren Riss im Probekörper	100
7.14	Probekörpergewinnung und unterschiedlichen Zugbeanspruchungsrichtung	101
7.15	Ermüdungsfunktionen der vorgeschädigten und nicht vorgeschädigten Probekörper	102
8.1	Vergleich der E-Moduln für unterschiedliche Versuche - SMA Gabbro, 10 Hz	104
8.2	Vergleich der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen für unterschiedliche Versuche - SMA Gabbro, 10 Hz	105
8.3	Reißverschlussprinzip beim Versagen eines Probekörpers im Spaltzugschwellversuch	106
8.4	Zusammenhang der Parameter A und B der Ermüdungsfunktionen für die verschiedenen Versuchsarten	107
8.5	Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion für alle Versuche am Beispiel des SMA Gabbro bei 10 Hz	108
8.6	Aufspaltung der elastischen Anfangsdehnung am Beispiel des Spaltzugschwellversuches	109
8.7	Dehnungsanteile ϵ^* und ϵ^{**} für die drei verschiedenen Ermüdungsversuche - SMA Gabbro, 10 Hz	110
8.8	Dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse aus den drei Ermüdungsversuchen - SMA Gabbro, 10 Hz	112
8.9	Darstellung der Ermüdungsflächenfunktion - SMA Gabbro, 10 Hz	113
8.10	Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den prognostizierten Werten (Ansicht 1) - SMA Gabbro, 10 Hz	113

8.11	Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den prognostizierten Werten (Ansicht 2) - SMA Gabbro, 10 Hz	114
8.12	Ergebnisse aus den Einaxialen Zugschwellversuchen - SMA Gabbro, 10 Hz	116
8.13	Zusammenhang zwischen den Materialparametern A bzw. B und der Prüftemperatur für spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen aus Einaxialen Zugschwellversuchen .	117
8.14	Prognostizierte spannungsabhängige Ermüdungsfunktion für den Einaxialen Zugschwellversuche bei 20°C im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Funktionen . .	118
8.15	Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen für den Einaxialen Zugschwellversuch . .	118
8.16	Prognostizierte spannungsabhängige Ermüdungsflächenfunktion im Vergleich mit den ermittelten Einzelwerten - SMA Gabbro, 10 Hz	119
8.17	Regressionsgleichungen und 5%-Quantilwertfunktionen für den SMA 0/11 S Gabbro	124
8.18	Regressionsgleichungen und 5%-Quantilwertfunktionen für die ATS 0/32 CS	125
9.1	Prinzipskizze eines möglichen Versuchsaufbaus	128

Tabellenverzeichnis

2.1	Querdehnzahlen nach Gleichung 2.7 für übliche Prüftemperaturen	8
2.2	Für die Berechnungen verwendete Materialparameter und Temperaturen in den einzelnen Asphaltsschichten bei $f = 10 Hz$	13
2.3	Unterschiede zwischen den Ermüdungsfunktionen nach Heukelom/Klomp und denen aus Spaltzugschwellversuchen	21
3.1	Probekörperabmessungen im Einaxialen Zugschwellversuch	26
3.2	Breite der Lasteintragungsschienen im Spaltzugversuch	32
3.3	Probekörperabmessungen im Spaltzugversuch	34
3.4	Abmessungen der prismatischen Probekörper für den 2-Punkt-Biegeversuch	43
3.5	Abmessungen der trapezförmigen Probekörper für den 2-Punkt-Biegeversuch	43
3.6	Grenzwerte für die Abmessungen der prismatischen Probekörper für den 4-Punkt-Biegeversuch	46
5.1	Kenngrößen und Herkunft der untersuchten Asphalte, siehe [38]	70
5.2	Übersicht der ausgeführten Versuche	71
5.3	Übersicht der jeweils angesetzten Unterspannung	71
6.1	Vergleich des Lastwechselzahlen bis zum Eintreten des Ermüdungskriteriums für die verschiedenen Deckschichtmaterialien	85
7.1	Kennwerte der Hauptverdichtung für die untersuchten Asphalte	91
7.2	Grenzen von Raumdichte und Hohlraumgehalt für die Probekörper der Triaxialversuche	92
7.3	Materialparameter der Ermüdungsfunktion bei mehrfacher Wiederholung	93
8.1	Materialparameter und Bestimmtheitsmaß der Flächenfunktionen für die untersuchten Asphalte	114
8.2	Bestimmtheitsmaß der Ermüdungsfunktionen aus den Einaxialen Zugschwellversuchen für die Asphalte nach Tabelle 8.1	115
8.3	Materialparameter und Bestimmtheitsmaß der Flächenfunktionen (berechnete Lastwechselzahlen)	115
8.4	Auftretende Spannungen und Dehnungen an der Oberseite der ADS zwischen den Rollspuren bei $T = 20^\circ C$	120
8.5	Auftretende Dehnungen in den Nachweispunkten für die zwei Temperaturfälle	121

8.6	Aufspaltung des Dehnungsanteils ε_x im Berechnungsbeispiel	122
8.7	Lastwechselzahlen bis zum Makroriss für das Berechnungsbeispiel in Abhängigkeit von der verwendeten Ermüdungsfunktion	122
8.8	Lastwechselzahlen bis zum Makroriss für das Berechnungsbeispiel	123

Anhang A

Gegenüberstellung Eignungsprüfungs- und Kontrollprüfungsergebnisse der untersuchten Asphaltgemische

A.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro

Kenngröße		Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungsergebnisse	
			1.	2.
Sieblinie	[<i>M.</i> – %]			
0-0,09	[mm]	9,0	8,0	8,0
0,09-0,25		12,0	11,5	12,4
0,25-0,71		16,4	15,9	17,7
0,71-2,0		25,0	24,2	27,0
2,0-5,0		36,4	35,9	36,1
5,0-8,0		57,1	60,8	60,3
8,0-11,2		96,8	95,6	96,5
11,2-16		100,0	100,0	100,0
16,0-22,4				
22,4-31,5				
>31,5				
Bindemittelgehalt	[<i>M.</i> – %]	7,0	5,96	6,14
EP Ring und Kugel	[°C]	59,0	69,4	71,0
Nadelpenetration	[1/10 mm]		20	23
Rohdichte	[g/cm ³]	2,563	2,611	2,603
Raumdichte	[g/cm ³]	2,476	2,531	2,492
Hohlraumgehalt	[Vol. – %]	3,4	3,06	4,3

A.2 SMA 0/11S PmB 45A Moräne

Kenngröße		Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungs- ergebnisse
Sieblinie	[M. – %]		
0-0,09	[mm]	10,9	8,8
0,09-0,25		13,6	13,0
0,25-0,71		16,9	16,7
0,71-2,0		23,8	23,0
2,0-5,0		34,1	33,1
5,0-8,0		55,2	52,3
8,0-11,2		97,0	96,6
11,2-16		100,0	100,0
16,0-22,4			
22,4-31,5			
>31,5			
Bindemittelgehalt	[M. – %]	6,7	6,51
EP Ring und Kugel	[°C]	62	67,4
Nadelpenetration	[1/10 mm]	42	26
Rohdichte	[g/cm ³]	2,432	2,431
Raumdichte	[g/cm ³]	2,351	2,335
Hohlraumgehalt	[Vol. – %]	3,4	3,9

A.3 AB 0/11S 50/70 Moräne

Kenngröße		Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungs- ergebnisse
Sieblinie	[<i>M.</i> – %]		
0-0,09	[mm]	9,4	10,2
0,09-0,25		14,5	15,8
0,25-0,71		25,1	25,7
0,71-2,0		46,7	45,7
2,0-5,0		63,9	66,0
5,0-8,0		80,1	77,2
8,0-11,2		98,7	98,8
11,2-16		100,0	100,0
16,0-22,4			
22,4-31,5			
>31,5			
Bindemittelgehalt	[<i>M.</i> – %]	6,0	6,04
EP Ring und Kugel	[° <i>C</i>]	52	56,4
Nadelpenetration	[1/10 <i>mm</i>]	59	???
Rohdichte	[<i>g/cm</i> ³]	2,450	2,466
Raumdichte	[<i>g/cm</i> ³]	2,370	2,400
Hohlraumgehalt	[<i>Vol.</i> – %]	3,0	2,66

A.4 OPA 0/8 PmB 45H Moräne

Kenngröße		Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungs- ergebnisse
Sieblinie	[<i>M.</i> – %]		
0-0,09	[mm]	4,6	4,4
0,09-0,25		5,0	4,8
0,25-0,71		5,0	5,2
0,71-2,0		5,2	6,2
2,0-5,0		7,4	10,7
5,0-8,0		92,7	95,4
8,0-11,2		100,0	100,0
11,2-16			
16,0-22,4			
22,4-31,5			
>31,5			
Bindemittelgehalt	[<i>M.</i> – %]	6,2	5,89
EP Ring und Kugel	[°C]	87	72,4
Nadelpenetration	[1/10 mm]	50	???
Rohdichte	[g/cm ³]	2,407	2,412
Raumdichte	[g/cm ³]	1,826	1,832
Hohlraumgehalt	[<i>Vol.</i> – %]	24,1	24,0

A.5 ABi 0/16S PmB 45A Moräne

Kenngröße	Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungsergebnisse	
		1.	2.
Sieblinie	[M. – %]		
0-0,09	[mm]	7,1	6,0
0,09-0,25		10,3	10,0
0,25-0,71		16,1	16,2
0,71-2,0		28,0	27,7
2,0-5,0		40,0	42,0
5,0-8,0		51,8	53,9
8,0-11,2		70,0	66,9
11,2-16		99,3	99,1
16,0-22,4		100,0	100,0
22,4-31,5			
>31,5			
Bindemittelgehalt	[M. – %]	4,5	4,49
EP Ring und Kugel	[°C]	60	67
Nadelpenetration	[1/10 mm]	45	24
Rohdichte	[g/cm ³]	2,514	2,525
Raumdichte	[g/cm ³]	2,365	2,339
Hohlraumgehalt	[Vol. – %]	5,9	7,4

A.6 ATS 0/32CS 50/70 Muschelkalk

Kenngröße		Eignungs- prüfung	Kontrollprüfungs- ergebnisse
Sieblinie	[M. – %]		
0-0,09	[mm]	7,8	8,5
0,09-0,25		11,3	11,6
0,25-0,71		18,9	19,2
0,71-2,0		32,2	32,7
2,0-5,0		45,5	45,6
5,0-8,0		56,1	58,0
8,0-11,2		63,4	64,6
11,2-16		74,0	72,4
16,0-22,4		89,1	88,8
22,4-31,5		100,0	100,0
>31,5			
Bindemittelgehalt	[M. – %]	4,2	4,34
EP Ring und Kugel	[°C]	52,0	58,2
Nadelpenetration	[1/10 mm]	59	???
Rohdichte	[g/cm ³]	2,520	2,540
Raumdichte	[g/cm ³]	2,391	2,424
Hohlraumgehalt	[Vol. – %]	5,1	4,6

Anhang B

Ergebnisse der Triaxialversuche mit Zug-/Druckschwellbelastung, der Spaltzugschwellversuche und der Einaxialen Zugschwellversuche

B.1 Ergebnisse der Triaxialversuche

B.1.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro

T [°C]	f [Hz]	PK.-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	H [mm]	$\sigma_{x,0}$ [N/mm ²]	$\sigma_{y/z,0}$ [N/mm ²]	N _{Makronriss} [-]	N _{Ende} [-]	$\epsilon_{el,anf}$ [%]	E-Modul [N/mm ²]
20	10	S31-2	3,00	153,35	279,30	1,096	-0,305	4,594	6,035	0,0955	12,972
		S32-2	3,00	153,40	279,83	1,093	-0,620	2,554	2,944	0,1480	10,077
		S32-1	3,15	153,39	279,79	1,097	-0,930	2,574	3,292	0,1180	13,046
		S38-1	3,65	148,04	283,97	1,077	-1,008	2,148	2,712	0,1475	11,376
		S52-1	4,34	152,21	290,30	1,110	-0,998	2,423	2,660	0,1770	9,633
		S37-2	5,15	148,09	284,22	2,177	-0,275	180	209	0,3070	7,621
		S51-1	4,34	152,17	289,44	2,211	-1,018	162	195	0,3422	8,233
-10		S27-1	3,42	153,32	285,13	0,328	-0,945	58,701	79,351	0,0767	11,526
		S48-1	5,57	152,26	288,73	2,190	-0,927	210,401	227,003	0,0840	27,570
		S49-2	5,84	152,31	288,47	2,200	-0,623	219,601	243,402	0,0800	29,758
		S40-1	3,96	153,95	279,58	1,090	-0,313	2,554	2,878	0,1888	6,814
		S31-1	3,80	153,43	278,82	1,088	-0,592	1,725	2,050	0,1956	7,370
		S44-2	4,15	147,89	284,93	1,097	-0,912	705	825	0,2358	6,960
		S54-1	5,19	152,16	291,28	2,200	-0,233	88	95	0,2962	7,896
-10		S37-1	6,07	148,05	284,96	2,187	-1,083	61	65	0,5495	5,155
		S49-1	6,22	152,26	287,81	2,192	-0,301	49,204	50,403	0,0994	23,102
		S47-2	6,99	152,39	287,55	2,183	-0,917	30,304	30,303	0,1216	20,579
		S38-2	3,53	148,01	283,88	1,097	-0,330	364	387	0,2730	3,298
20	1	S53-1	6,22	152,19	287,22	1,108	-0,605	202	214	0,3517	4,176
		S44-1	4,73	147,87	286,86	1,099	-0,947	97	112	0,5443	3,056
		S43-1	4,57	154,13	278,40	2,18	-0,445	22	24	0,5382	4,543
		S48-2	4,46	152,27	288,99	2,177	-0,916	15	17	1,0186	2,673
-10		S50-2	4,61	152,24	287,87	2,183	-0,304	20,101	26,000	0,1158	19,768

B.1.2 SMA 0/11S PmB 45A Moräne

T [°C]	f [Hz]	Pk.-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	H [mm]	$\sigma_{x,0}$ [N/mm ²]	$\sigma_{y/z,0}$ [N/mm ²]	N _{Makroriss} [-]	N _{Ende} [-]	$\epsilon_{el,anf}$ [%]	E-Modul [N/mm ²]
20	10	M3-1	4,52	148,15	284,16	1,103	-0,284	1,828	2,134	0,1557	8.173
		M7-1	3,62	147,89	286,74	1,077	-0,908	1,611	1,926	0,2315	6.989
		M7-2	3,91	147,91	287,99	2,242	-0,252	256	271	0,2618	9.139
		M6-2	4,28	148,35	285,61	2,197	-0,950	117	126	0,3409	8.106
-10		M11-1	5,55	149,25	285,35	2,213	-0,297	268,807	280,405	0,0943	24.544
		M8-2	5,31	147,90	287,09	1,119	-0,323	1,126	1,295	0,2036	6.442
20	5	M16-1	5,10	148,36	285,45	2,194	-0,308	77	92	0,3832	6.204
		M16-2	5,64	148,37	286,02	2,185	-0,970	41	47	0,6509	4.245
-10		M12-1	5,10	147,90	286,89	2,200	-0,314	302,401	304,803	0,0713	32.390
		M5-2	5,76	148,28	286,73	1,100	0,305	209	227	0,3298	3.887
20	1	M11-2	5,64	149,21	284,11	1,100	0,900	108	120	0,4949	3.306
		M5-1	5,64	148,26	288,75	2,190	0,350	14	16	0,6929	3.461
-10		M13-2	5,76	149,20	285,86	2,202	0,307	39,102	45,203	0,0979	23.574

B.1.3 ABi 0/16S PmB 45A

T [°C]	f [Hz]	Pk.-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	H [mm]	σ _{x,0} [N/mm ²]	σ _{y/z,0} [N/mm ²]	N _{Makroriss} [-]	N _{Ende} [-]	ε _{el,anf} [%]	E-Modul [N/mm ²]
20	10	B32-1	7,32	149,12	285,30	1,105	-0,284	2,998	3,290	0,1318	9.702
		B10-1	5,77	149,31	289,14	1,106	-0,962	1,509	1,703	0,1782	9.422
-10	10	B19-1	7,52	149,21	286,18	2,198	-0,242	143	157	0,2510	9.333
		B19-2	7,60	149,23	284,78	2,188	-0,995	90	94	0,2973	9.354
20	5	B33-2	7,08	149,18	286,89	2,208	-0,294	64,601	74,403	0,0903	25.574
		B31-1	7,12	149,21	288,09	2,216	-0,903	38,202	42,804	0,0852	29.694
-10	5	B20-2	6,13	149,32	287,66	1,104	-0,329	1,328	1,428	0,1457	8.922
		B23-1	7,36	149,31	284,44	1,100	-0,988	469	545	0,2474	6.827
20	1	B23-2	7,92	149,23	282,29	2,198	-0,315	46	56	0,4087	5.837
		B26-1	7,80	149,09	290,11	2,202	-1,093	36	43	0,5236	5.450
-10	1	B32-2	7,72	149,12	286,79	2,196	-0,298	47,800	54,003	0,0866	27.331
		B33-1	7,36	149,24	287,00	2,198	-0,911	24,500	25,703	0,0895	28.106
20	1	B11-1	5,61	149,27	278,18	1,094	-0,318	369	433	0,2219	5.800
		B30-1	6,09	149,10	287,60	1,106	-0,906	82	93	0,4585	3.964
-10	1	B30-2	6,64	149,20	287,02	2,192	-0,325	16	19	0,5218	4.573
		B31-2	6,32	149,15	286,10	2,185	-0,907	8	10	1,0234	2.663
20	1	B26-2	6,68	149,05	290,97	2,205	-0,312	49,208	55,503	0,0856	27.024
		B34-1	6,64	148,54	287,35	2,194	-0,908	10,050	10,050	0,1099	24.923

B.1.4 ATS 0/32CS 50/70

T [°C]	f [Hz]	Pk.-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	H [mm]	σ _{x,o} [N/mm ²]	σ _{y/z,o} [N/mm ²]	N _{Makroriss} [-]	N _{Ende} [-]	ε _{el,anf} [%]	E-Modul [N/mm ²]
20	10	T16-2	6,40	287,33	149,42	0,660	-0,298	12,660	13,605	0,0788	10,642
		T27-1	6,60	284,21	149,33	1,102	-0,304	4,187	4,717	0,0926	13,856
		T26-2	6,21	283,58	149,28	1,100	-0,921	1,020	1,263	0,1490	11,049
		T12-1	4,49	286,69	149,35	1,097	-0,922	2,069	2,472	0,0967	16,684
		T25-2	6,37	283,19	149,38	2,191	-0,284	66	78	0,1903	12,403
-10		T24-2	6,64	288,24	149,40	2,722	-0,286	30,502	30,906	0,1054	26,768
		T29-2	6,64	285,43	149,40	2,214	-0,296	95,400	105,150	0,0729	32,773
		T11-1	5,54	283,87	149,37	0,661	-0,305	8,010	8,043	0,0720	11,825
		T10-2	5,49	284,21	149,32	1,101	-0,307	668	819	0,1044	12,298
		T11-2	5,28	285,72	149,36	1,098	-0,949	405	438	0,1426	11,668
-10	5	T10-1	4,97	283,95	149,31	2,188	-0,320	64	75	0,2049	11,608
		T13-2	4,45	284,36	149,32	2,193	-0,925	64	77	0,2431	11,291
		T13-1	4,41	284,42	149,33	2,746	-0,311	28,745	28,900	0,0781	37,363
		T12-2	4,10	286,69	149,35	2,754	-0,931	8,610	8,610	0,0877	35,100
		T17-2	6,60	286,76	149,37	0,660	-0,310	1,450	1,703	0,1190	7,098
20	1	T22-1	6,52	281,80	149,31	1,100	-0,306	144	181	0,2356	5,443
		T23-2	6,92	285,82	149,26	1,100	-0,914	90	113	0,3299	5,090
		T26-1	6,60	283,58	149,05	2,191	-0,313	12	14	0,5049	4,710
		T16-1	6,76	286,98	149,40	2,187	-0,311	14,905	15,750	0,0825	27,820
		T29-1	6,80	287,78	149,40	2,734	-0,308	12,500	13,105	0,1033	27,514

B.2 Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche

B.2.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 10 Hz

T [°C]	f [Hz]	Pk-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	h [mm]	σ _U [N/mm ²]	σ _O [N/mm ²]	N _{Makroniss} [-]	N _{Ende} [-]	u [mm]	e _{el,anf} [%]	ΔF [N]	E-Modul [N/mm ²]	
20	10	S6-4	3,69	98,75	40,38		1,000	456	528	13,990	0,2986	5,060	5.123	
		S8-1	3,81	98,70	40,40		1,000	402	519	13,050	0,2787	5,130	5.566	
		S7-3	3,86	98,68	40,53		1,000	394	498	13,840	0,2956	5,110	5.211	
		S4-3	3,53	98,70	40,99		1,000	41,948	41,948	2,940	0,0628	1,400	6.645	
		S8-2	3,60	98,80	40,94		0,320	104,349	120,831	2,750	0,0587	1,370	6.960	
		S8-4	3,42	98,70	40,43	0,035	0,320	82,501	82,501	2,370	0,0506	1,260	7.522	
		S4-1	3,36	98,80	40,91		0,249	193,968	193,968	2,100	0,0448	820	5.460	
		S6-2	3,37	98,73	40,30		0,249	449,678	449,678	1,610	0,0344	820	7.229	
		S5-2	3,23	98,85	40,19		0,249	486,725	486,725	1,650	0,0352	870	7.504	
		S49-3	2,92	99,18	40,29		1,600		96	20,424	0,4341	9,320	6.478	
		S49-1	2,62	99,18	40,59		2,500		19	37,213	0,7909	14,750	5.586	
		S46-1	2,56	99,20	40,48		2,750		15	38,185	0,8114	15,900	5.884	
		S22-3	3,37	98,93	40,71		2,000		374	501	13,802	0,2986	11,500	10,049
		S29-2	3,02	98,70	40,43		2,000		629	839	11,868	0,2574	11,490	11,758
		S30-3	2,74	98,80	40,85		2,000		462	659	12,792	0,2772	11,530	10,834
		S10-2	3,87	98,81	40,38		1,224		3,277	4,019	6,948	0,1505	6,560	11,481
S10-3	3,09	98,79	40,69		1,224		4,584	5,647	6,728	0,1458	6,630	11,892		
S12-4	2,98	98,71	40,57		1,224	0,106	7,583	8,973	6,708	0,1455	6,610	11,927		
S11-2	3,48	98,70	40,67		1,000		9,076	12,235	4,963	0,1076	5,250	12,772		
S13-4	3,08	98,70	40,68		1,000		17,456	22,526	4,718	0,1023	5,340	13,662		
S22-2	2,71	98,85	40,11		1,000		9,974	12,073	4,873	0,1055	5,220	13,114		
S21-3	3,86	99,00	40,35		0,944		7,886	9,584	5,073	0,1097	4,950	11,875		
S17-4	3,40	99,00	40,29		0,944		13,567	17,516	4,665	0,1009	4,960	12,957		
S16-4	2,75	99,13	40,33		0,944		13,058	15,050	4,610	0,0995	4,940	13,046		
S20-4	3,47	98,85	40,26		2,210		1,746	2,330	7,178	0,1566	10,940	17,377		
S19-2	3,27	99,00	40,43		2,210		1,548	2,076	7,113	0,1549	10,990	17,542		
S22-1	2,84	98,93	40,36		2,210		1,943	2,622	6,883	0,1500	10,840	17,912		
S17-1	3,33	98,93	40,28		1,767		5,398	6,849	5,228	0,1140	8,190	17,853		
S23-4	3,10	99,18	40,60	0,445	1,767		4,803	6,185	5,128	0,1115	8,260	18,212		
S21-4	2,86	98,85	40,21		1,767		5,201	7,114	4,880	0,1065	8,170	19,111		
S17-2	3,36	99,08	40,64		1,000		58,459	74,189	2,080	0,0453	3,430	18,625		
S19-4	3,09	98,83	40,64		1,000		66,414	78,669	2,198	0,0480	3,430	17,629		
S25-2	2,95	98,85	40,24		1,000		69,958	88,185	2,033	0,0443	3,390	19,025		

B.2.2 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 5 Hz

T	f	PK-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makroriss}	N _{Ende}	u	e _{el, anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%o]	[N]	[N/mm ²]
20		S5-3	3,30	98,80	40,18		1,000	315	385	18,670	0,3983	5,380	4,102
		S6-1	3,22	98,70	40,59		1,000	322	429	16,920	0,3614	5,450	4,539
		S9-4	3,27	98,70	40,81		1,000	261	362	16,550	0,3535	5,380	4,556
		S9-2	3,06	98,70	40,90		0,320	47,702	47,702	3,750	0,0801	1,590	5,930
		S1-2	2,84	98,70	40,50	0,035	0,320	129,969	129,969	3,090	0,0660	1,550	7,085
		S7-1	2,72	98,68	40,43		0,320	36,616	36,616	3,670	0,0784	1,580	6,091
		S13-2	2,99	98,75	40,72		0,249	129,478	221,454	2,620	0,0559	1,180	6,327
		S14-3	3,03	98,76	40,68		0,249	178,066	212,751	2,728	0,0582	1,160	5,980
		S13-3	2,92	98,72	40,75		0,249	180,708	197,152	2,675	0,0571	1,150	6,035
		S19-1	3,20	99,28	40,38		2,000	301	416	12,732	0,2745	11,290	10,782
		S28-3	2,91	98,80	40,38		2,000	267	389	13,290	0,2879	11,230	10,275
		S28-4	2,72	98,75	40,05		2,000	372	550	12,438	0,2696	11,120	10,961
		S17-3	3,79	99,10	40,49		1,223	1,528	1,975	7,508	0,1622	6,710	10,838
5	5	S18-2	3,42	99,18	40,10		1,223	2,126	2,627	7,203	0,1555	6,640	11,288
		S24-3	2,77	98,85	40,59	0,106	1,223	2,125	2,947	7,133	0,1545	6,720	11,397
		S20-2	3,52	98,83	40,29		1,000	3,833	5,108	5,980	0,1295	5,340	10,882
		S18-3	3,34	99,25	40,35		1,000	6,431	8,826	5,715	0,1233	5,340	11,370
		S24-4	2,79	98,85	40,11		1,000	4,057	4,997	5,930	0,1284	5,270	10,879
		S18-1	3,46	99,07	40,60		0,944	6,061	7,555	5,613	0,1213	4,980	10,731
		S16-2	3,28	99,15	40,20		0,944	5,619	7,285	5,565	0,1201	4,940	10,842
		S22-4	2,83	98,85	40,30		0,944	5,844	7,834	5,030	0,1089	5,000	12,111
		S24-1	3,41	98,85	39,90		2,210	983	1,166	7,360	0,1606	10,650	16,646
		S16-3	3,14	99,18	40,01		2,210	777	958	7,738	0,1683	10,660	15,805
		S20-1	2,97	98,98	40,33		2,210	1,080	1,393	7,393	0,1611	10,790	16,244
		S18-4	3,40	99,20	40,30		1,767	2,125	2,685	5,905	0,1284	8,150	16,677
		-5		S19-3	3,32	99,23	40,20	0,445	1,767	3,116	4,115	5,353	0,1163
S21-1	3,04			98,93	40,48		1,767	3,114	4,291	5,310	0,1158	8,170	17,446
S21-2	3,38			98,85	40,76		1,000	27,986	36,732	2,353	0,0513	3,420	16,371
S23-1	3,21			98,85	40,09		1,000	16,540	20,839	2,408	0,0525	3,400	16,169
S26-3	2,82			98,80	40,60		1,000	36,153	49,644	2,465	0,0538	3,370	15,456

B.2.3 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro, 3 Hz

T [°C]	f [Hz]	Pk-Nr.	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	h [mm]	σ _U [N/mm ²]	σ _O [N/mm ²]	N _{Makroriss} [-]	N _{Ende} [-]	u [mm]	e _{el,anf} [%]	ΔF [N]	E-Modul [N/mm ²]
20		S32-2	3,62	99,10	40,50		1,000	107	139	20,025	0,4260	5,510	3.886
		S32-1	2,84	99,08	40,40		1,000	132	172	18,880	0,4017	5,540	4.155
		S33-4	3,52	99,10	40,49	0,035	0,320	10,562	10,562	4,123	0,0877	1,640	5.620
		S32-3	2,94	99,08	40,25		0,320	9,067	9,067	4,193	0,0892	1,610	5.457
-5	3	S35-3	3,18	99,15	40,66		0,249	17,350	17,350	3,280	0,0697	1,220	5.233
		S35-4	3,12	99,15	40,53		0,249	17,732	19,426	3,050	0,0648	1,220	5.645
		S33-2	3,86	99,15	40,48		2,210	477	594	8,055	0,1752	10,940	15.400
		S34-2	2,78	99,15	40,53		2,210	702	895	7,953	0,1730	10,950	15.594
		S34-4	2,73	99,13	40,35	0,445	1,767	1,277	1,761	6,005	0,1306	8,170	15.477
		S35-2	2,73	99,08	40,58		1,767	1,301	1,750	5,475	0,1192	8,180	16.899
		S33-1	2,67	99,15	40,75		1,000	6,095	8,032	2,876	0,0626	3,430	13.434
		S34-1	2,60	99,13	40,63		1,000	10,750	13,835	2,674	0,0582	3,470	14.660

B.2.4 SMA 0/11S PmB 45A Moräne

T	f	PK-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makroniss}	N _{Ende}	u	ε _{el,anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[N]	[N/mm ²]
20	10	M19-2	4,11	99,20	40,39	0,035	1,000	389	441	18,212	0,3870	5,690	4,425
		M9-2	3,58	99,18	40,40		1,000	330	434	16,008	0,3402	5,680	5,024
		M8-4	3,13	99,33	40,76		1,000	364	447	16,660	0,3536	5,640	4,751
		M16-1	4,11	99,25	40,64		0,352	40,149	43,960	4,826	0,1025	1,890	5,512
	M19-4	3,54	99,23	40,58	0,352		48,769	52,178	4,524	0,0961	1,930	6,013	
	M9-3	3,08	99,20	40,68	0,352		32,900	32,900	4,862	0,1033	1,860	5,379	
	M16-4	4,07	99,18	40,49	0,273		87,298	90,990	3,58	0,0761	1,410	5,561	
	M19-3	3,45	99,25	40,29	0,273		188,668	199,079	3,33	0,0708	1,430	6,089	
	M10-4	3,00	99,13	40,65	0,273		176,863	212,943	2,91	0,0618	1,410	6,823	
	M22-3	4,07	99,25	40,48	1,000		182	249	20,67	0,4391	5,870	4,012	
M24-3	3,50	99,28	40,49	1,000	247	303	20,10	0,4268	5,900	4,147			
M15-1	3,00	99,20	40,60	1,000	168	220	19,77	0,4202	5,870	4,183			
M14-1	4,03	99,20	40,39	0,352	23,323	23,323	5,68	0,1208	1,890	4,709			
M16-3	3,50	99,23	40,73	0,352	29,366	36,121	5,06	0,1075	1,960	5,442			
M13-1	3,00	99,15	40,64	0,352	19,816	19,816	5,58	0,1186	1,900	4,794			
M25-2	3,99	99,30	40,29	0,273	47,503	47,503	4,25	0,0902	1,440	4,810			
M10-1	3,45	99,15	40,55	0,273	57,102	65,804	3,91	0,0832	1,450	5,228			
M12-4	3,00	99,18	40,41	0,273	59,489	65,400	3,91	0,0831	1,450	5,249			
M19-1	3,95	99,18	40,55	1,000	117	136	20,99	0,4462	5,850	3,931			
M8-2	3,37	99,20	40,70	1,000	100	124	21,30	0,4525	5,870	3,874			
M4-3	3,95	99,15	40,79	0,352	12,105	13,719	5,71	0,1214	1,960	4,812			
M1-1	3,37	99,13	41,75	0,352	9,498	11,567	6,17	0,1312	2,010	4,462			
M18-2	3,95	99,23	40,50	0,273	33,423	40,537	4,15	0,0881	1,440	4,905			
M20-2	3,33	99,30	40,55	0,273	43,373	52,735	4,12	0,0875	1,440	4,925			
M2-4	3,91	99,15	40,34	1,000	12	21	30,40	0,6463	5,930	2,766			
M15-4	2,96	99,20	40,35	1,000	23	33	24,61	0,5230	5,960	3,433			
M17-1	3,91	99,20	40,45	0,352	1,456	1,526	10,12	0,2150	1,980	2,768			
M2-3	2,96	99,13	40,90	0,352	1,810	1,975	9,53	0,2026	2,010	2,951			
M17-3	3,87	99,23	40,64	0,273	5,334	5,334	6,57	0,1395	1,490	3,194			
M3-3	2,96	99,10	40,66	0,273	5,144	5,144	7,08	0,1505	1,490	2,962			

B.2.5 AB 0/11S 50/70, 10 Hz

T	f	PK-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makroniss}	N _{Ende}	u	ε _{el,anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[N]	[N/mm ²]
20		A2-1	4,22	99,40	40,38		1,000	191	234	13,03	0,2763	5,020	5.458
		A3-2	3,61	99,55	40,50		1,000	208	272	11,25	0,2383	5,090	6.389
		A3-3	3,04	99,68	40,30		1,000	328	402	11,30	0,2390	5,100	6.405
		A9-4	4,22	99,50	40,61		0,311	18,355	19,294	2,34	0,0495	1,170	7.058
		A7-2	3,69	99,45	40,58		0,311	15,976	15,976	2,03	0,0431	1,140	7.906
		A7-4	3,08	99,45	40,65	0,035	0,311	23,358	23,358	1,94	0,0412	1,150	8.331
		A4-4	4,18	99,03	40,56		0,242	55,646	55,646	1,56	0,0332	770	6.972
		A8-4	3,69	99,08	40,23		0,242	49,793	49,793	1,62	0,0345	810	7.109
		A1-1	3,28	99,25	40,30		0,242	112,060	120,368	1,47	0,0312	790	7.641
		A2-3	3,93	99,45	40,38		1,000	7,602	9,546	5,03	0,1082	5,410	13.091
		A1-2	3,77	99,03	40,36		1,000	17,767	18,500	4,74	0,1024	5,340	13.720
5	10	A2-2	3,45	99,53	40,60		1,000	9,805	11,292	4,64	0,0998	5,450	14.197
		A1-3	3,81	99,00	40,40		1,350	2,918	3,956	5,91	0,1277	7,530	15.498
		A6-2	3,49	99,45	40,98		1,350	3,017	3,725	7,06	0,1519	7,670	13.026
		A6-4	3,49	99,55	40,93		1,350	4,508	4,781	6,10	0,1311	7,670	15.096
		A10-2	4,18	99,05	40,35		2,000	667	799	9,95	0,2150	11,460	14.015
		A14-2	3,57	99,05	40,48	0,056	2,000	922	1,090	9,83	0,2124	11,540	14.243
		A11-3	3,24	99,05	40,45		2,000	667	807	9,74	0,2105	11,500	14.328
		A13-3	4,14	99,05	40,24		0,750	47,216	53,287	3,13	0,0676	3,950	15.398
		A18-3	3,57	99,13	40,35		0,750	18,940	22,758	3,64	0,0785	4,000	13.390
		A17-3	3,24	99,10	40,40		0,750	30,722	36,100	3,52	0,0761	3,990	13.766
		A17-1	3,93	99,13	40,40		0,50	143,246	146,543	2,48	0,0536	2,520	12.337
-5		A22-1	3,61	99,10	40,58		0,50	549,328	613,941	1,99	0,0429	2,680	16.336
		A39-4	3,37	99,15	40,50		0,50	334,802	359,807	2,16	0,0466	2,580	14.481
		A30-2	4,22	99,25	40,40		1,000	18,935	20,876	1,99	0,0432	3,010	17.206
		A37-4	3,77	99,15	40,71		1,000	22,766	27,589	1,86	0,0405	3,030	18.342
		A37-3	3,24	99,18	40,48		1,000	36,600	41,660	1,71	0,0372	3,070	20.327
		A24-2	3,97	99,15	40,05		2,065	2,437	2,976	5,36	0,1165	9,740	20.836
		A26-2	3,77	99,05	40,11	0,515	2,065	3,292	3,640	5,82	0,1266	9,670	19.030
		A23-4	3,28	99,15	40,54		2,065	2,832	3,263	5,66	0,1231	9,700	19.412
		A38-4	4,22	99,13	40,78		2,582	1,373	1,593	7,25	0,1578	13,010	20.191
		A28-1	3,77	99,18	40,10		2,582	1,718	2,014	7,05	0,1532	12,840	20.862
		A28-4	3,20	99,15	40,38		2,582	1,536	1,840	7,03	0,1529	12,980	20.988

B.2.7 OPA 0/8 PmB 45H

T [°C]	f [Hz]	Pk-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	h [mm]	σ _U [N/mm ²]	σ _O [N/mm ²]	N _{Makrocriss} [-]	N _{Ende} [-]	u [mm]	ε _{el,anf} [%]	ΔF [N]	E-Modul [N/mm ²]	
-5	10	O15-4	24,678	98,55	62,14	0,094	0,700	3,234	4,634	8,480	0,2943	5,790	5,043	
		O8-2	24,263	98,45	61,5		0,700	4,411	6,560	7,492	0,2627	5,740	5,718	5,043
		O8-4	23,930	98,48	61,44		0,700	4,380	6,714	7,442	0,2612	5,630	5,652	5,043
		O10-2	24,636	98,47	61,02		0,548	8,314	12,488	5,776	0,2042	4,290	5,587	5,043
		O9-2	24,263	98,52	61,66		0,548	13,333	16,303	5,444	0,1904	4,410	6,030	5,043
		O15-2	23,847	98,62	62,22		0,548	8,017	11,700	5,912	0,2049	4,390	5,478	5,043
		O11-2	24,636	98,47	61,56		0,341	69,593	86,428	2,83	0,0991	2,370	6,249	5,043
		O14-3	24,263	98,65	61,67		0,341	95,510	98,420	3,17	0,1109	2,330	5,467	5,043
		O18-4	23,847	98,55	61,84		0,341	61,342	67,031	3,56	0,1242	2,380	4,959	5,043
	5	O16-1	24,595	98,52	61,22	0,094	0,700	1,328	2,154	9,28	0,2032	5,590	4,515	
		O12-4	24,221	98,49	61,87		0,700	1,624	2,677	8,92	0,1952	5,540	4,610	4,515
		O17-2	23,764	98,47	61,84		0,700	2,367	3,787	8,83	0,1935	5,620	4,722	4,515
		O18-3	24,387	98,52	61,43		0,548	6,278	8,148	6,23	0,1365	4,240	5,082	4,515
		O14-4	24,138	98,62	61,48		0,548	6,061	7,577	6,31	0,1380	4,190	4,959	4,515
		O8-3	23,681	98,45	61,48		0,548	6,727	9,750	5,75	0,1259	4,220	5,481	4,515
		O9-1	24,346	98,45	62,04		0,341	25,037	26,778	3,47	0,0761	2,310	4,922	4,515
		O17-1	24,096	98,58	61,28		0,341	34,164	34,164	3,24	0,0708	2,250	5,205	4,515
		O12-2	23,598	98,5	61,14		0,341	45,864	47,440	3,38	0,0739	2,230	4,959	4,515

B.2.8 ABi 0/16S PmB 45A, 10 Hz

T	f	PK-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makrokrisis}	N _{Ende}	u	ε _{el,anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[N]	[N/mm ²]
20		B4-2	7,00	99,18	40,93		1,000	224	302	12,35	0,2624	5,580	6,316
		B6-2	6,64	99,30	40,83		1,000	253	356	11,86	0,2518	5,550	6,556
		B6-4	5,97	99,33	40,63		1,000	365	527	11,05	0,2344	5,620	7,163
		B10-1	7,00	99,45	40,41		0,443	9,489	11,703	4,56	0,0966	2,260	7,022
		B5-1	6,56	99,23	40,55	0,035	0,443	11,846	16,746	3,96	0,0840	2,280	8,130
		B9-4	5,93	99,40	40,49		0,443	16,569	19,471	3,94	0,0836	2,280	8,171
		B4-1	6,96	99,23	40,23		0,341	25,201	32,351	3,53	0,0750	1,710	6,888
		B5-3	6,56	99,20	40,23		0,341	37,021	44,353	3,35	0,0711	1,650	7,011
		B3-1	5,85	99,23	40,46		0,341	33,842	35,561	3,37	0,0717	1,740	7,291
		B18-2	7,04	99,50	39,88		1,330	1,333	1,356	7,30	0,1571	7,450	12,561
5	10	B25-2	6,36	99,40	40,11		1,330	1,625	2,220	7,46	0,1606	7,460	12,245
		B20-2	6,17	99,35	40,29		1,330	1,733	2,067	6,86	0,1478	7,530	13,381
		B23-1	7,00	99,45	39,93		1,000	4,978	6,233	5,71	0,1229	5,410	11,646
		B18-1	6,40	99,40	39,65		1,000	9,112	11,013	4,75	0,1024	5,330	13,884
		B20-4	6,17	99,35	40,36		1,000	6,761	8,752	4,58	0,0987	5,560	14,769
		B14-3	6,92	99,40	39,49	0,090	0,600	107,938	134,915	2,75	0,0593	3,030	13,680
		B15-3	6,40	99,50	39,76		0,600	74,303	89,391	2,78	0,0599	2,960	13,139
		B20-1	6,13	99,35	39,93		0,600	81,394	96,262	2,63	0,0567	3,090	14,447
		B13-3	6,72	99,40	39,84		1,700	639	743	9,80	0,2110	9,810	12,337
		B23-2	6,60	99,40	39,58		1,700	325	336	9,51	0,2047	9,630	12,567
-5		B24-4	6,25	99,35	39,91		1,700	1,233	1,397	8,40	0,1810	9,820	14,382
		B36-2	7,00	99,45	40,19		2,220	701	874	8,34	0,1808	11,290	15,468
		B29-4	6,52	99,50	41,36		2,220	1,311	1,583	7,45	0,1614	11,720	17,463
		B36-4	5,93	99,40	40,24		2,220	1,166	1,360	7,82	0,1697	11,410	16,639
		B33-4	6,72	99,50	40,01		1,770	3,913	4,401	5,86	0,1270	8,430	16,509
		B30-2	6,52	99,48	39,86		1,770	3,840	4,647	5,30	0,1149	8,540	18,548
		B28-1	6,13	99,50	39,83	0,424	1,770	3,207	3,889	5,01	0,1086	8,520	19,598
		B30-3	6,40	99,45	39,98		1,000	14,222	17,089	2,45	0,0532	3,630	16,983
		B37-1	6,21	99,45	40,05		1,000	19,522	22,587	2,38	0,0516	3,610	17,384
		B27-3	6,64	99,50	40,44		1,000	26,587	32,578	2,38	0,0516	3,640	17,359
B30-1	6,58	99,45	40,23		1,000	26,569	33,095	2,55	0,0553	3,670	16,433		
B35-3	6,24	99,50	40,43		1,000	14,219	17,569	2,64	0,0573	3,640	15,630		

B.2.9 ABi 0/16S PmB 45A, 5 Hz

T	f	Pk-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makrocriss}	N _{Ende}	u	ε _{el,anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[N]	[N/mm ²]
20		B4-4	6,92	99,23	39,95		1,000	90	129	13,84	0,2940	5,660	5.856
		B12-1	6,52	99,38	40,33		1,000	125	162	13,82	0,2932	5,700	5.849
		B6-1	6,05	99,30	40,45		1,000	81	104	15,90	0,3375	5,720	5.088
		B9-2	6,80	99,38	40,48		0,443	5,690	6,583	5,68	0,1205	2,430	6.045
		B6-3	6,40	99,30	40,55	0,035	0,443	3,457	4,067	5,76	0,1222	2,480	6.078
		B5-2	6,01	99,15	39,93		0,443	4,355	5,100	5,18	0,1100	2,390	6.615
		B8-1	6,72	99,35	40,35		0,341	23,020	28,484	3,66	0,0776	1,840	7.131
5		B35-2	6,64	99,40	40,39		0,341	6,389	7,064	4,60	0,0976	1,800	5.537
		B25-3	5,89	99,40	39,79		0,341	15,792	18,695	3,73	0,0791	1,769	6.818
		B21-2	6,84	99,38	39,65		1,330	1,413	1,803	7,50	0,1616	7,440	12.281
		B17-4	6,44	99,45	39,58		1,330	1,478	1,907	7,42	0,1597	7,300	12.208
		B24-1	6,13	99,38	40,00		1,330	877	1,256	7,42	0,1599	7,510	12.421
		B15-2	6,80	99,45	39,76		1,000	3,981	5,424	5,31	0,1142	5,290	12.312
		B14-1	6,48	99,53	39,73		1,000	3,590	5,019	5,27	0,1133	5,490	12.874
-5		B22-2	6,09	99,40	39,76	0,090	1,000	3,803	5,283	5,11	0,1101	5,490	13.262
		B16-3	6,80	99,40	39,13		0,600	52,536	64,252	3,23	0,0696	2,940	11.421
		B20-3	6,56	99,35	39,76		0,600	67,665	86,724	3,00	0,0646	3,070	12.646
		B22-4	5,93	99,50	39,90		0,600	45,412	61,732	2,87	0,0617	3,090	13.258
		B16-2	6,68	99,40	39,76		1,700	246	349	11,93	0,2569	9,690	10.030
		B16-1	6,60	99,35	39,78		1,700	201	259	11,75	0,2532	9,690	10.177
		B21-3	6,21	99,40	40,15		1,700	272	376	10,18	0,2191	9,740	11.705
-5		B36-3	7,00	99,35	40,19		2,220	427	527	8,17	0,1774	10,940	15.285
		B31-2	6,36	99,45	40,20		2,220	389	479	9,26	0,2009	11,080	13.659
		B33-1	5,93	99,50	40,04		2,220	350	552	8,83	0,1914	11,130	14.450
		B26-1	6,64	99,50	40,06		1,770	1,065	1,342	5,12	0,1110	8,340	18.656
		B21-1	6,33	99,38	40,06	0,424	1,770	1,069	1,305	5,39	0,1169	8,310	17.678
		B37-4	6,25	99,48	40,14		1,770	1,781	2,062	5,68	0,1232	8,350	16.798
		B34-3	6,65	99,48	40,19		1,000	7,461	9,191	2,90	0,0629	3,500	13.784
B27-2	6,32	99,50	39,96		1,000	14,006	16,260	2,74	0,0594	3,520	14.756		
B32-4	6,25	99,50	40,39		1,000	24,115	27,861	2,36	0,0512	3,640	17.513		

B.2.10 ATS 0/32CS 50/70, 10 Hz

T [°C]	f [Hz]	Pk-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	h [mm]	σ _U [N/mm ²]	σ _O [N/mm ²]	N _{Makroniss} [-]	N _{Ende} [-]	u [mm]	ε _{el,anf} [%]	ΔF [N]	E-Modul [N/mm ²]
20		T22-2	6,876	153,63	89,99		0,750	909	988	11,80	0,1619	15,430	8.312
		T23-1	6,326	153,55	89,96		0,750	614	904	11,60	0,1592	15,340	8.411
		T20-1	6,051	153,60	89,78		0,750	610	832	12,14	0,1666	15,330	8.048
		T12-1	6,837	153,55	90,41		0,427	5.833	6.476	6,82	0,0937	8,560	7.939
		T26-2	6,326	153,60	89,81		0,427	5.923	11.161	5,69	0,0781	8,360	9.361
		T23-2	6,012	153,55	89,63		0,427	7.298	9.183	6,37	0,0874	8,220	8.240
		T15-1	6,837	153,60	90,11		0,329	31.310	32.283	4,34	0,0595	6,480	9.487
		T6-2	6,287	153,30	90,21		0,329	13.635	15.254	5,36	0,0736	6,280	7.436
T27-2	5,972	153,63	89,88		0,329	28.718	28.718	4,40	0,0603	6,330	9.164		
5	10	T12-2	6,640	153,58	89,99		1,500	1.598	2.039	12,56	0,1751	32,110	13.944
		T26-1	6,365	153,55	89,86		1,500	1.531	1.960	12,43	0,1733	32,120	14.115
		T5-2	6,169	153,38	90,44		1,500	934	1.250	15,53	0,2167	32,050	11.207
		T10-2	6,326	153,58	90,43		1,000	6.862	10.422	8,20	0,1142	21,070	13.958
		T27-1	6,169	153,63	89,90		1,000	7.134	10.779	8,11	0,1130	20,800	14.007
		T4-2	6,444	153,40	90,30		1,000	4.203	5.492	9,10	0,1270	21,340	12.748
		T24-1	6,601	153,60	89,61		0,674	37.191	44.915	7,74	0,1079	13,870	9.814
		T14-2	6,326	153,65	89,88		0,674	47.787	83.605	7,27	0,1013	13,590	10.212
T28-2	6,444	153,55	89,89		0,674	46.635	69.063	6,96	0,0970	13,900	10.912		
-5		T34-1	6,719	149,40	90,08		1,542	10.875	13.780	7,22	0,1042	28,150	19.872
		T7-1	6,208	153,30	90,05		1,542	15.956	19.154	6,37	0,0896	28,990	23.190
		T40-2	5,933	149,40	89,91		1,542	10.076	12.563	7,48	0,1080	28,310	19.311
		T37-2	6,562	149,40	89,88		1,212	23.910	30.705	4,45	0,0642	21,230	24.387
		T24-2	6,208	153,55	90,10		1,212	26.571	35.616	5,08	0,0714	22,030	22.083
		T29-1	5,894	149,35	89,60		1,212	23.038	29.735	5,19	0,0749	21,110	20.853
		T34-2	6,523	149,38	89,68		1,000	40.726	54.257	4,60	0,0664	16,670	18.556
		T35-2	6,208	149,43	89,99		1,000	21.296	31.196	4,36	0,0629	16,810	19.683
T29-2	5,894	149,43	89,84		1,000	44.256	56.276	3,70	0,0534	16,590	22.908		

B.2.11 ATS 0/32CS 50/70 Zusatzversuche, 10 Hz

T [°C]	f [Hz]	Pk-Nr. [-]	H _{bit} [Vol.-%]	D [mm]	h [mm]	σ _U [N/mm ²]	σ _O [N/mm ²]	N _{Makroniss} [-]	N _{Ende} [-]	u [mm]	ε _{el,anf} [%]	ΔF [N]	E-Modul [N/mm ²]
20		T46-1	5,815	152,44	60,37		0,750	651	885	10,55	0,1459	10,070	9,044
		T45-2	5,501	152,46	62,55		0,750	736	973	11,65	0,1611	10,180	7,989
		T46-2	5,373	152,44	62,30		0,427	8,612	11,501	5,70	0,0788	5,610	9,040
		T48-2	5,580	152,41	63,18		0,427	7,292	7,807	7,07	0,0978	5,810	7,442
		T47-1	5,658	152,45	61,59		0,329	17,169	19,990	5,52	0,0763	4,270	7,189
5	10	T45-1	5,540	152,48	60,94		0,329	21,882	24,959	4,12	0,0570	4,130	9,404
		T41-2	6,994	152,38	59,67		0,674	24,830	32,216	5,72	0,0803	8,920	12,004
		T44-2	6,012	152,33	59,72		1,000	5,082	6,590	9,28	0,1304	13,540	11,212
		T43-1	5,855	152,35	58,34		1,500	865	1,131	13,26	0,1863	19,980	11,858
		T43-2	6,208	152,33	61,14		1,000	47,805	57,032	4,78	0,0676	11,390	17,904
-5		T41-1	5,972	152,30	59,44		1,212	28,381	35,174	5,50	0,0779	13,950	19,579
		T44-1	5,776	152,35	61,06		1,542	5,883	7,261	7,21	0,1020	18,940	19,758

B.2.12 ATS 0/32CS 50/70, 5 Hz

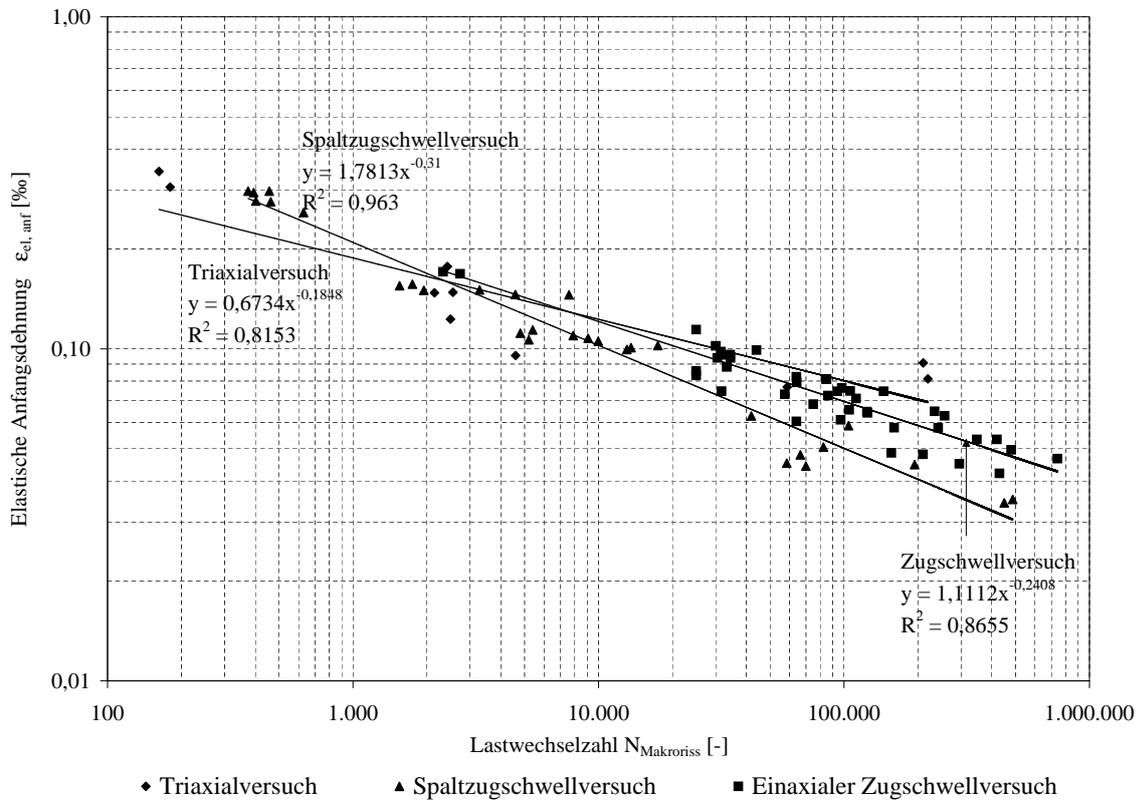
T	f	PK-Nr.	H _{bit}	D	h	σ _U	σ _O	N _{Makroniss}	N _{Ende}	u	ε _{el,anf}	ΔF	E-Modul
[°C]	[Hz]	[-]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[mm]	[%]	[N]	[N/mm ²]
20		T6-1	6,798	153,38	90,43		0,750	155	197	11,67	0,1604	15,070	8,167
		T20-2	6,287	153,55	89,93		0,750	379	513	9,89	0,1358	15,070	9,692
		T14-1	5,933	153,60	90,08		0,750	347	420	10,22	0,1402	15,210	9,451
		T10-1	6,758	153,58	89,36		0,427	2,261	2,877	7,10	0,0974	8,360	7,539
		T21-2	6,287	153,63	90,11		0,427	6,576	4,675	6,66	0,0914	8,470	8,068
		T21-1	5,933	153,60	89,79		0,427	5,091	5,576	6,72	0,0922	8,430	7,994
		T17-1	6,758	153,58	89,96		0,329	8,058	10,426	5,36	0,0735	6,320	7,500
		T11-2	6,248	153,58	90,43		0,329	7,469	7,469	5,26	0,0722	6,450	7,759
5		T8-1	5,855	153,35	90,45	0,025	0,329	6,497	6,968	5,37	0,0738	6,370	7,502
		T13-2	6,562	153,63	89,75		1,500	1,068	1,343	12,02	0,1675	31,350	14,269
		T13-1	6,248	153,58	89,79		1,500	1,044	1,507	13,20	0,1839	31,370	12,999
		T28-1	6,13	153,60	90,05		1,500	927	1,176	14,25	0,1986	31,240	11,955
		T22-1	6,562	153,63	89,88		1,000	4,788	6,828	10,46	0,1457	20,730	10,829
		T17-2	6,248	153,55	89,48		1,000	4,935	6,330	8,72	0,1215	20,700	13,029
		T11-1	6,090	153,55	90,24		1,000	4,943	6,129	9,71	0,1354	20,860	11,687
		T7-2	6,523	153,30	90,10		0,674	16,120	22,241	5,38	0,0752	13,610	13,776
-5		T4-1	6,208	153,33	90,26		0,674	20,582	28,514	5,15	0,0719	13,910	14,699
		T25-2	6,090	153,63	89,79		0,674	29,153	39,276	5,01	0,0699	13,800	15,050
		T39-2	6,012	149,40	89,89		1,542	5,859	7,359	7,44	0,1074	27,370	18,780
		T36-2	6,208	149,40	89,86		1,542	4,065	5,618	7,62	0,1100	27,550	18,473
		T32-1	5,894	149,43	89,83		1,542	4,792	6,028	8,18	0,1181	27,500	17,174
		T37-1	5,972	149,40	89,89		1,212	9,296	11,907	5,38	0,0777	20,540	19,488
		T38-1	6,169	149,40	89,94	0,222	1,212	13,763	17,968	5,74	0,0829	20,790	18,478
		T36-1	5,815	149,43	90,13		1,212	12,878	15,789	4,97	0,0717	20,770	21,283
		T30-1	6,248	149,40	89,70		1,000	21,528	27,873	4,66	0,0672	16,240	17,848
		T31-1	6,051	149,40	90,00		1,000	23,314	29,389	4,17	0,0602	16,440	20,097
		T38-2	5,776	149,38	90,08		1,000	28,685	35,705	4,07	0,0588	16,430	20,570

Anhang C

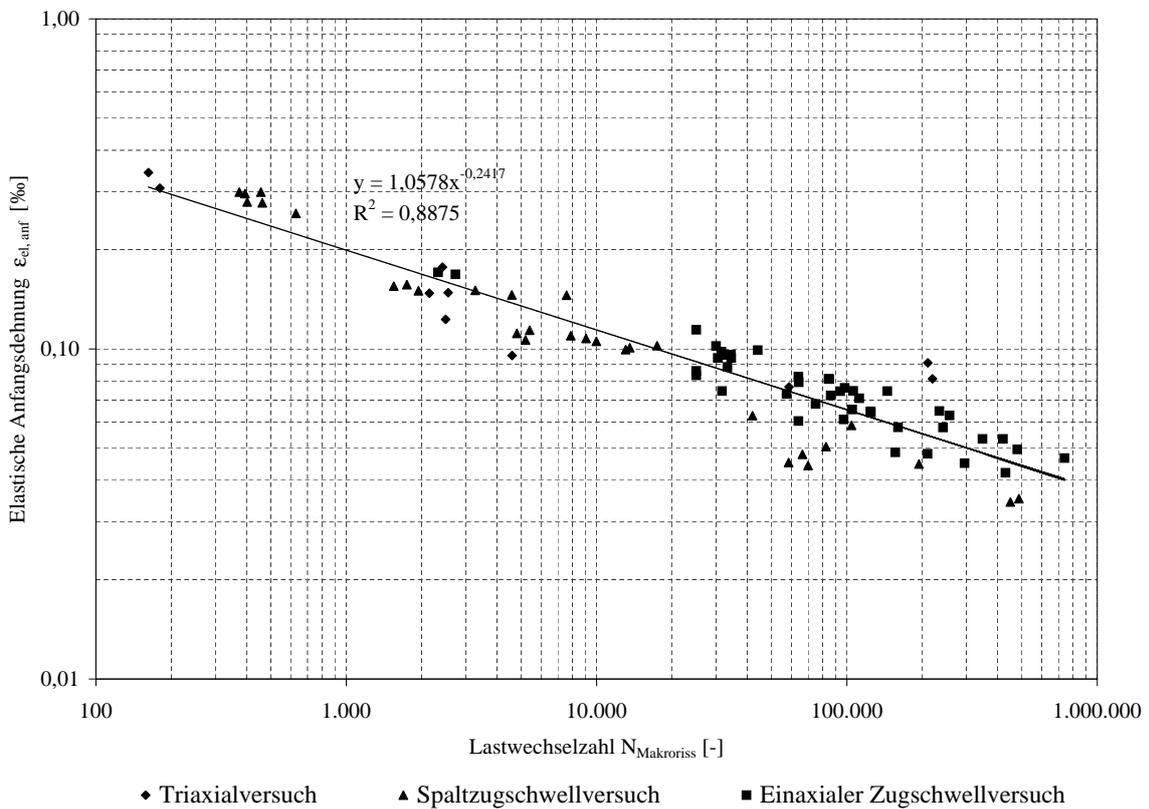
Vergleich der Ermüdungsfunktionen aus Triaxialversuchen mit Zug-/Druckschwellbelastung, Spaltzugschwellversuchen und Einaxialen Zugschwellversuchen

C.1 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro - 10 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

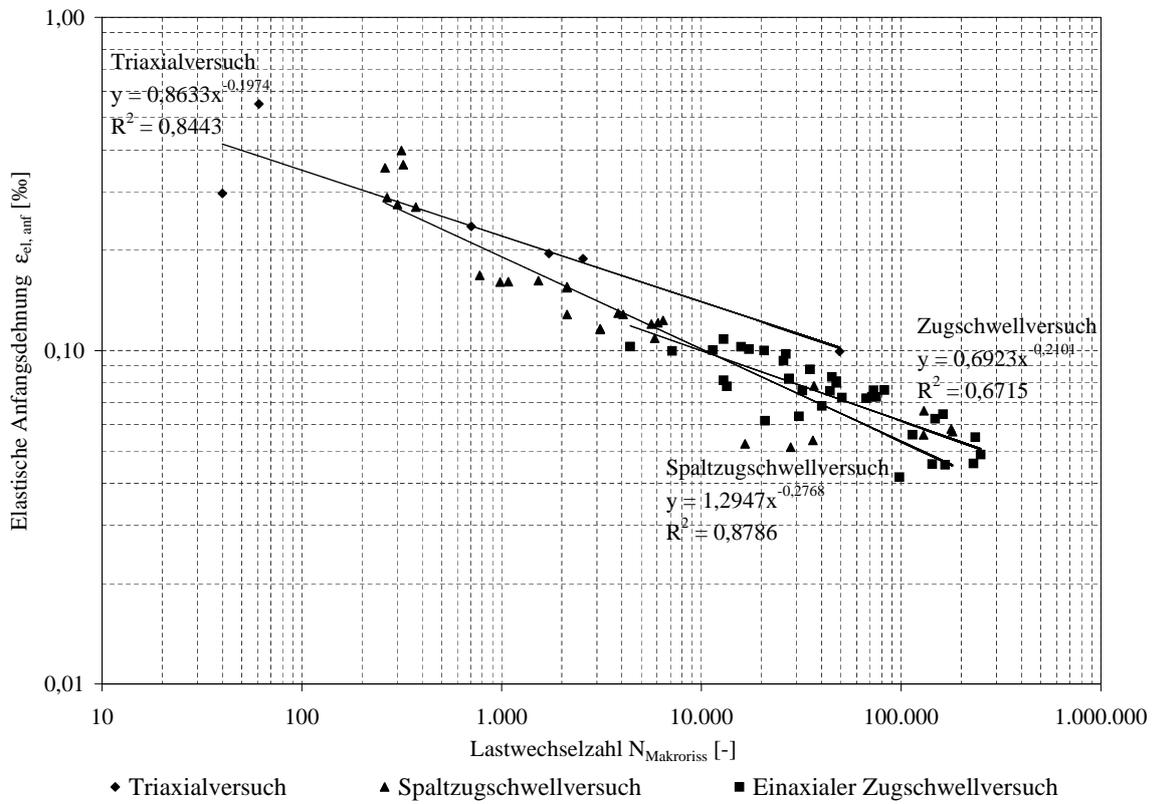


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

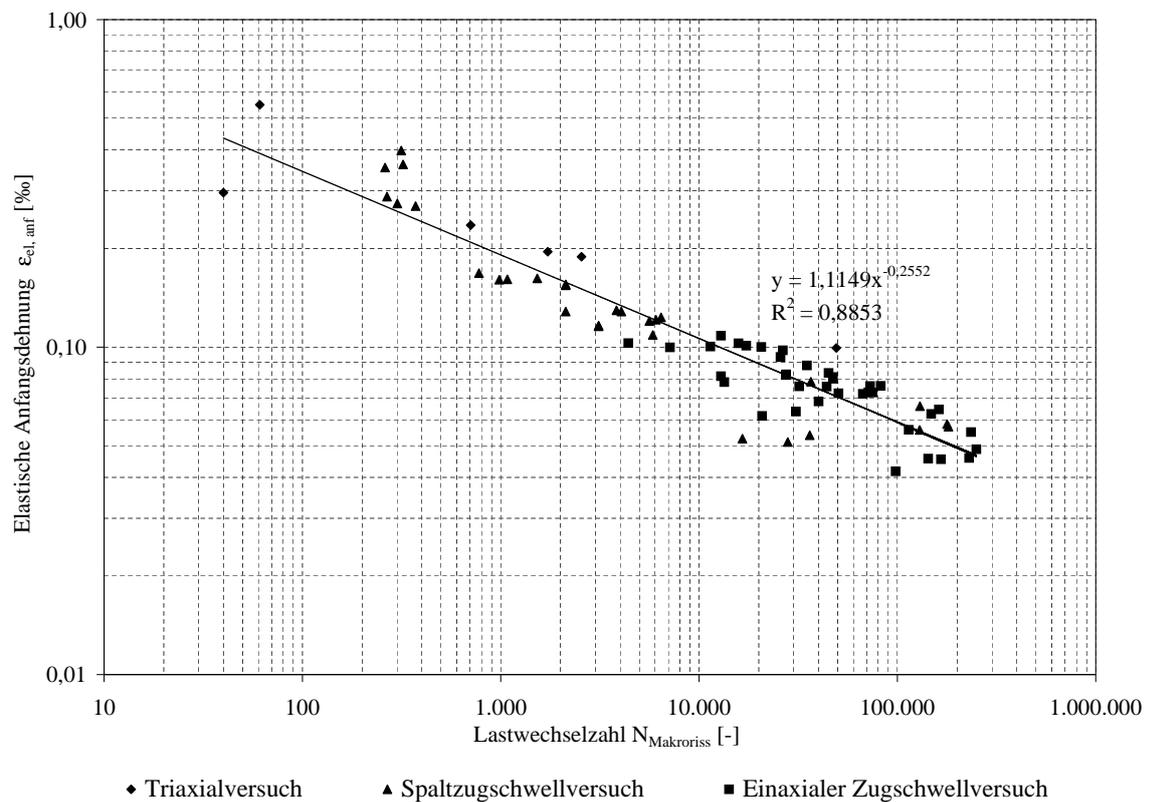


C.2 SMA 0/11S PmB 45A Gabbro - 5 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

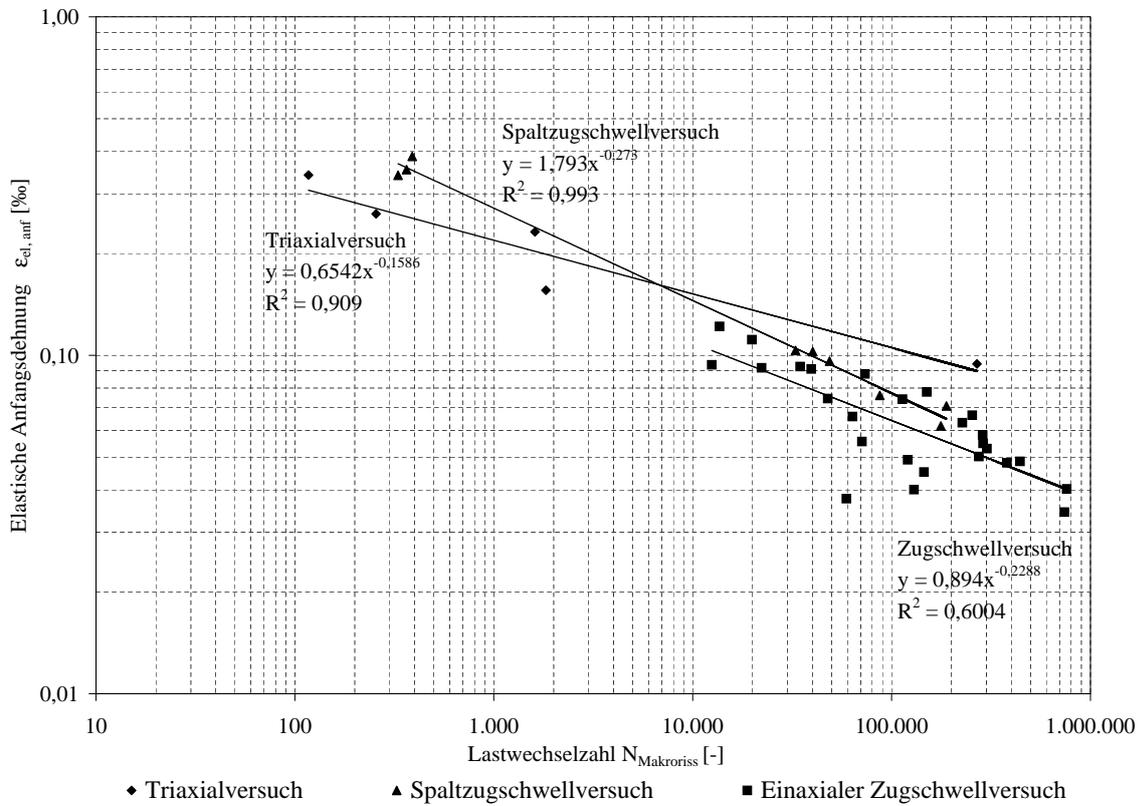


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

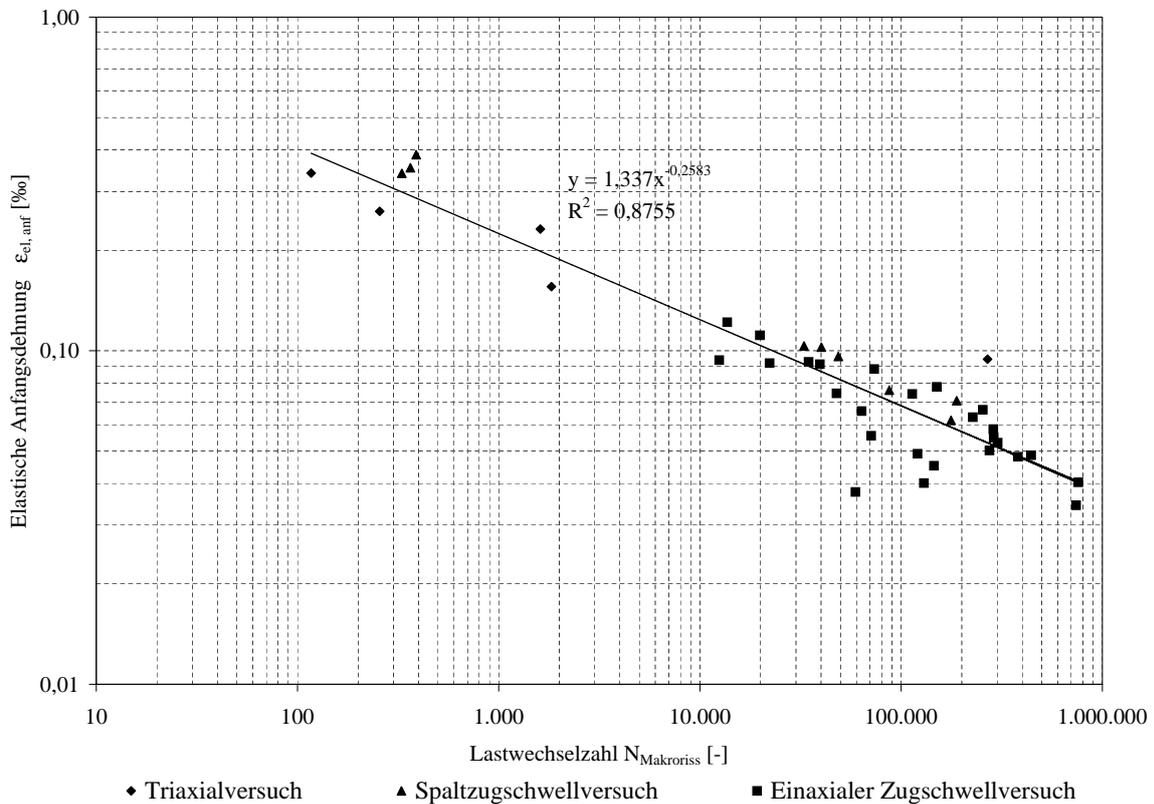


C.3 SMA 0/11S PmB 45A Moräne - 10 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

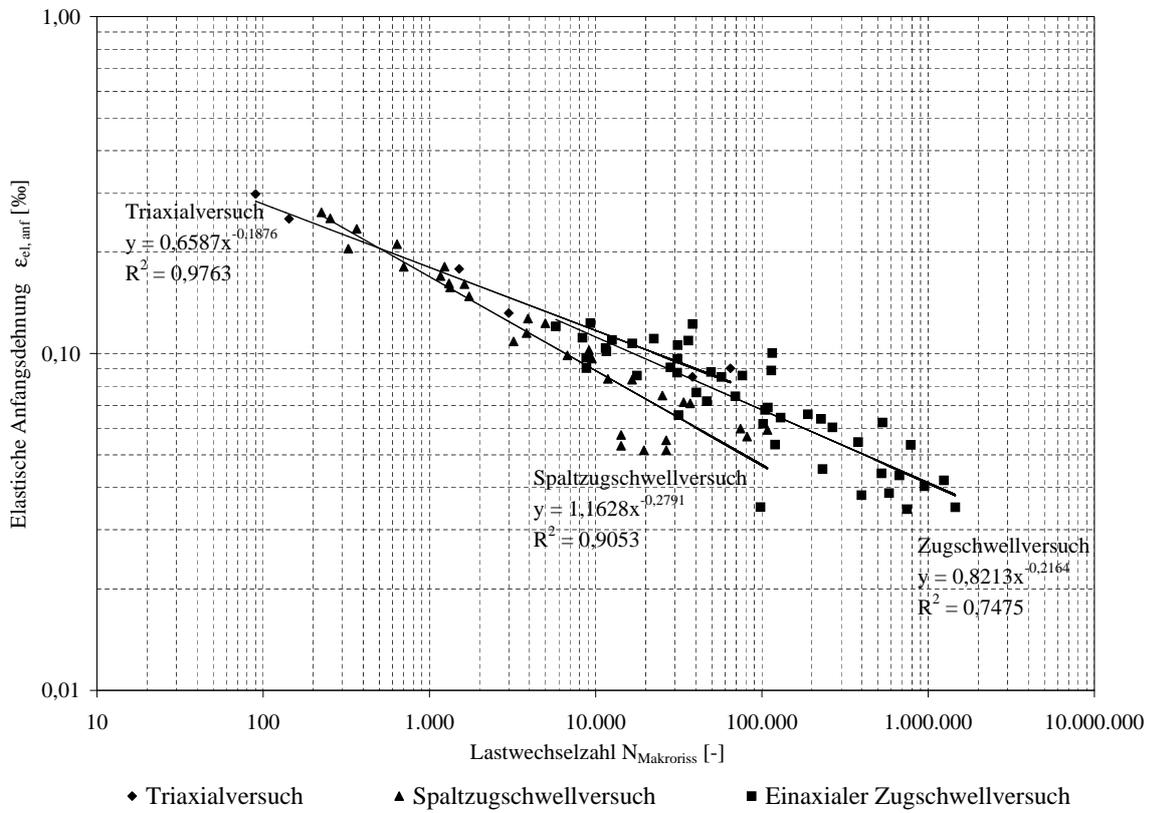


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

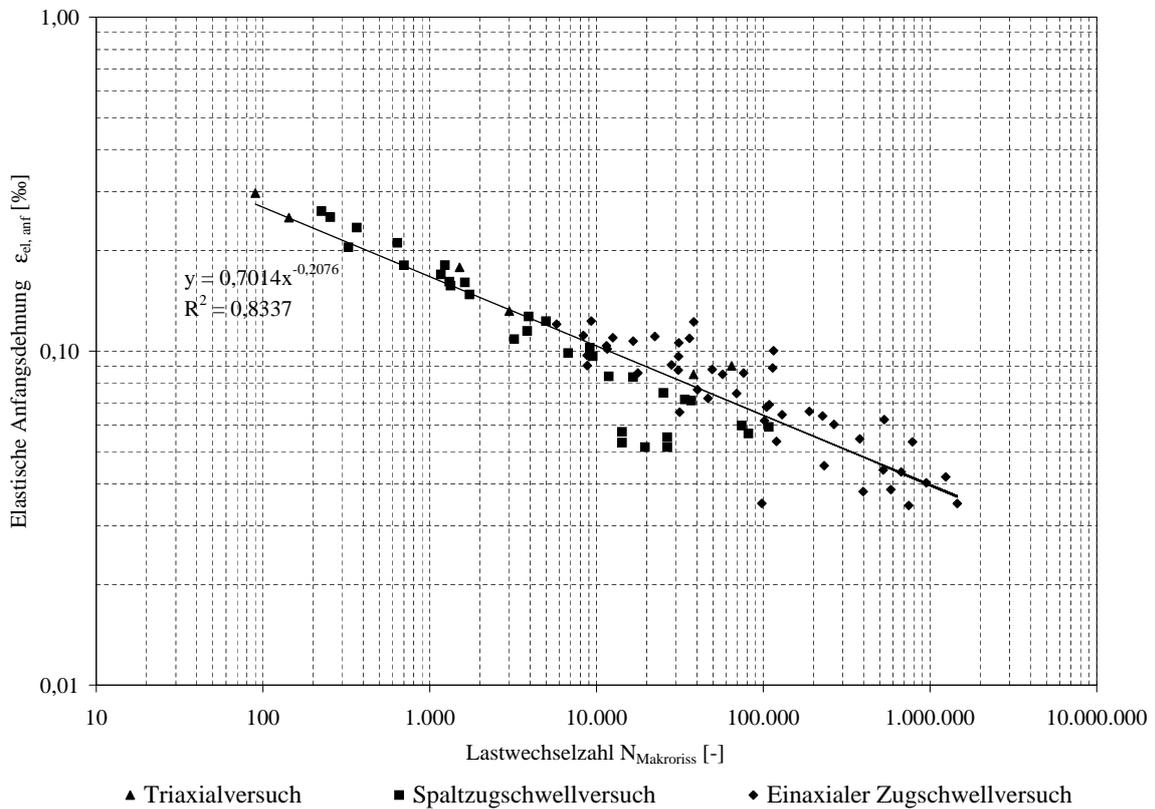


C.4 ABi 0/16S PmB 45A - 10 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

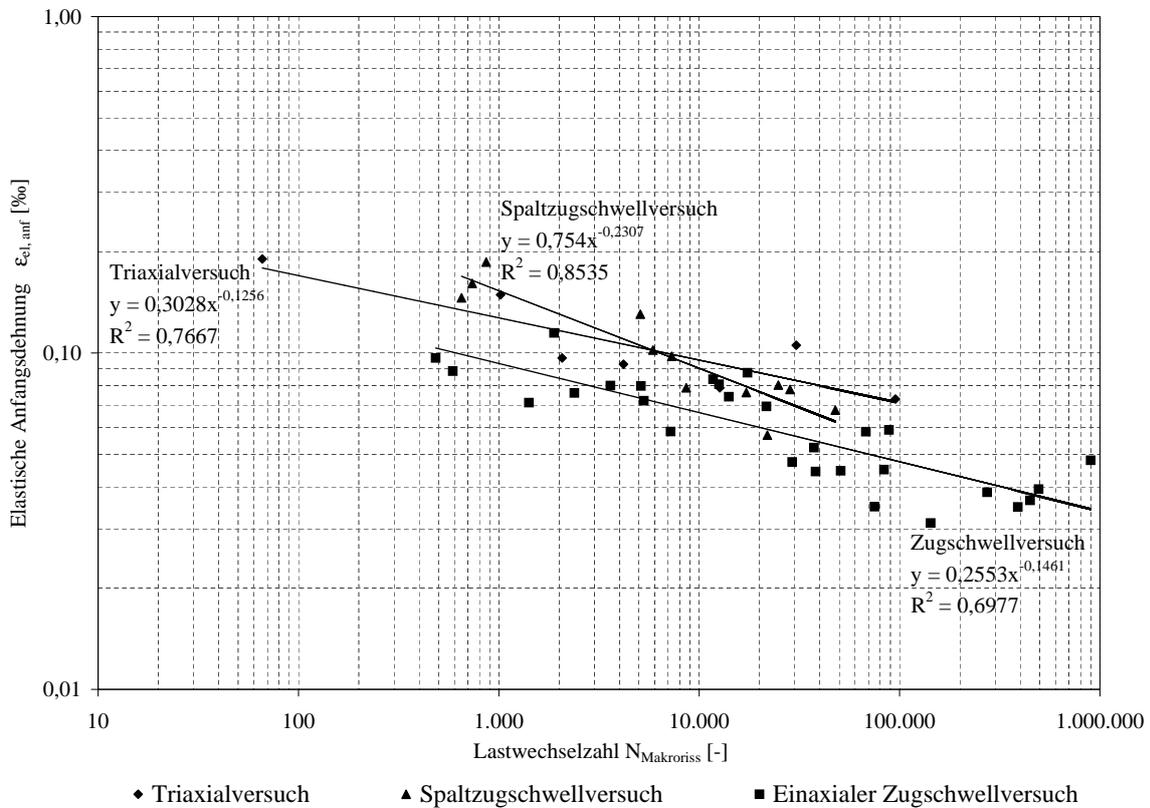


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

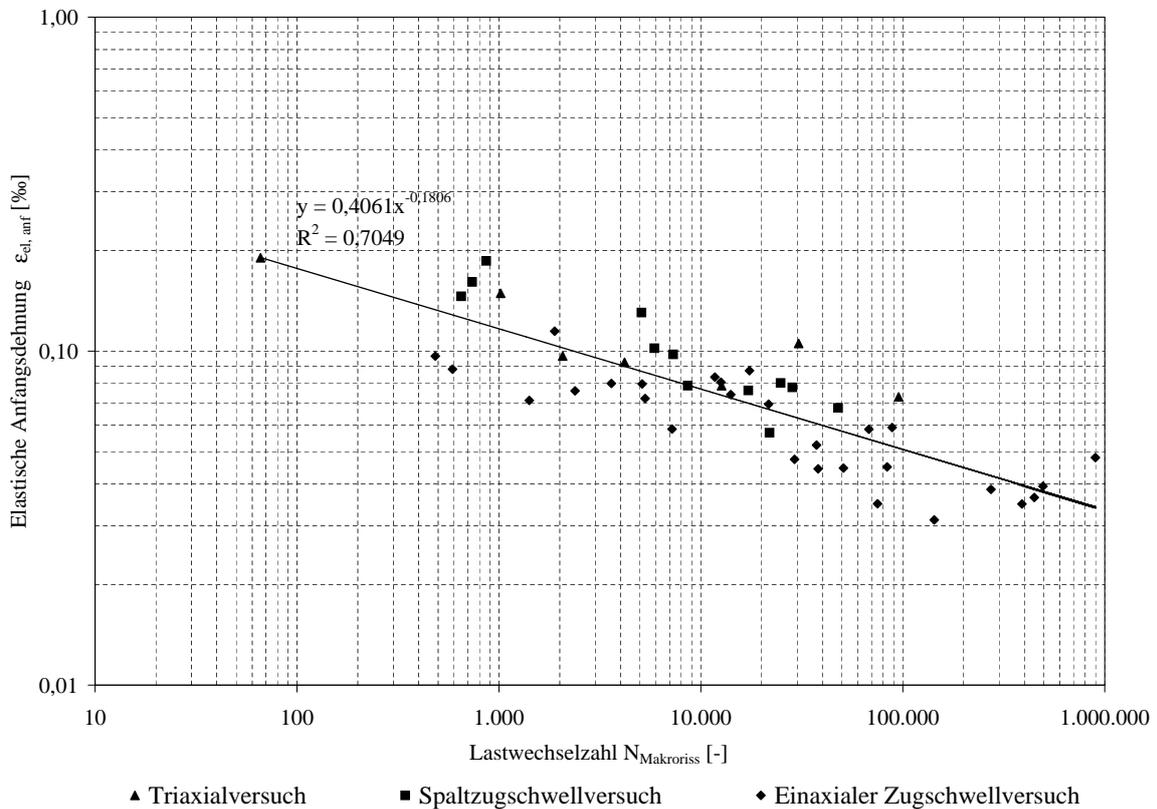


C.5 ATS 0/32CS 50/70 - 10 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

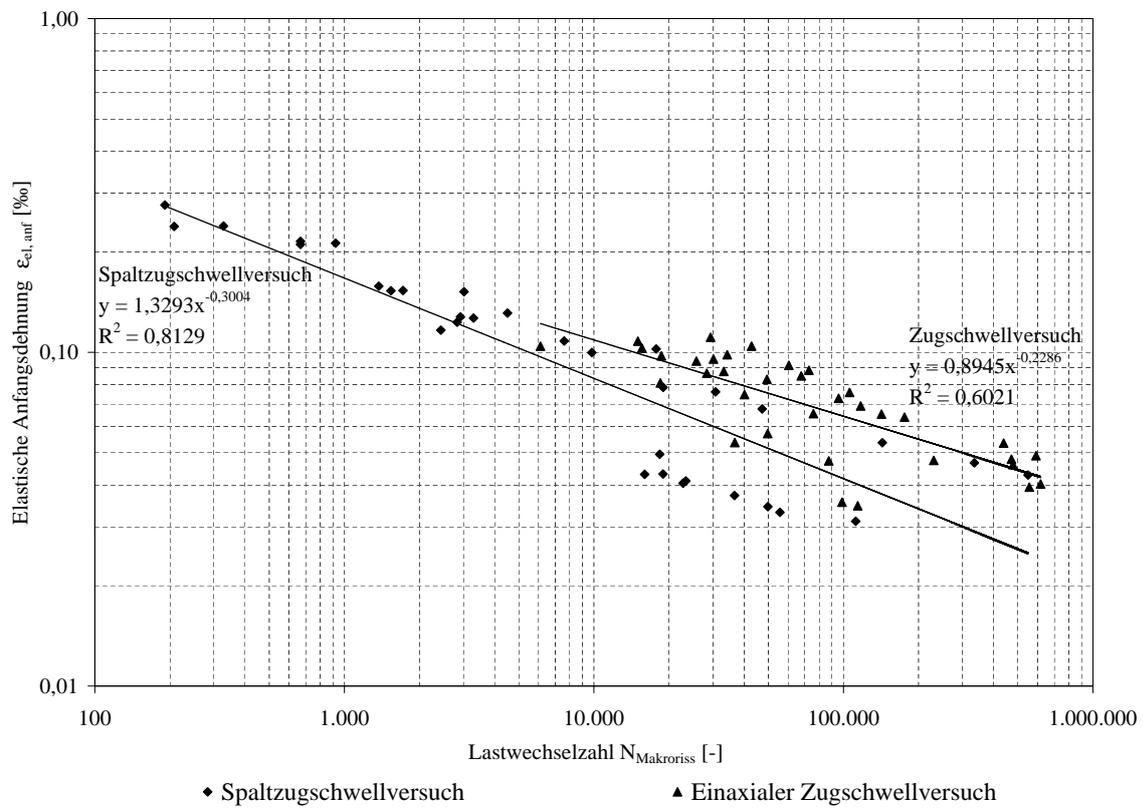


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

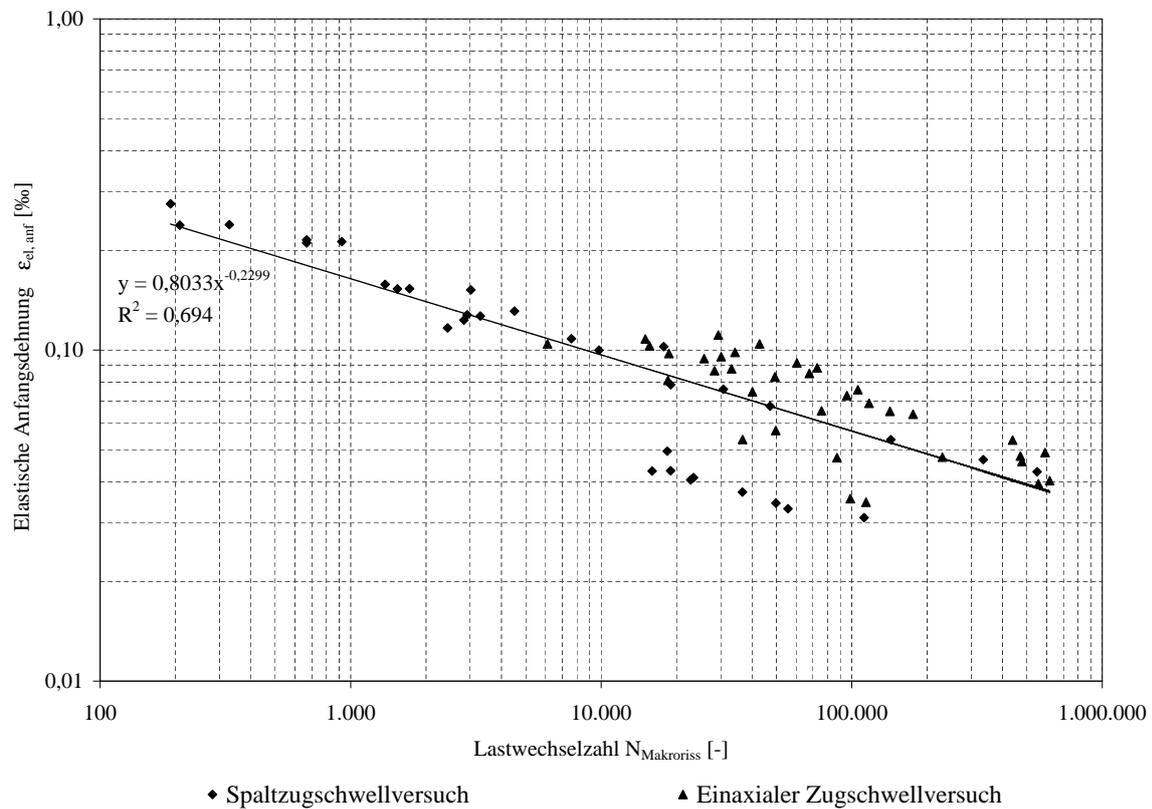


C.6 AB 0/11S 50/70 - 10 HZ

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

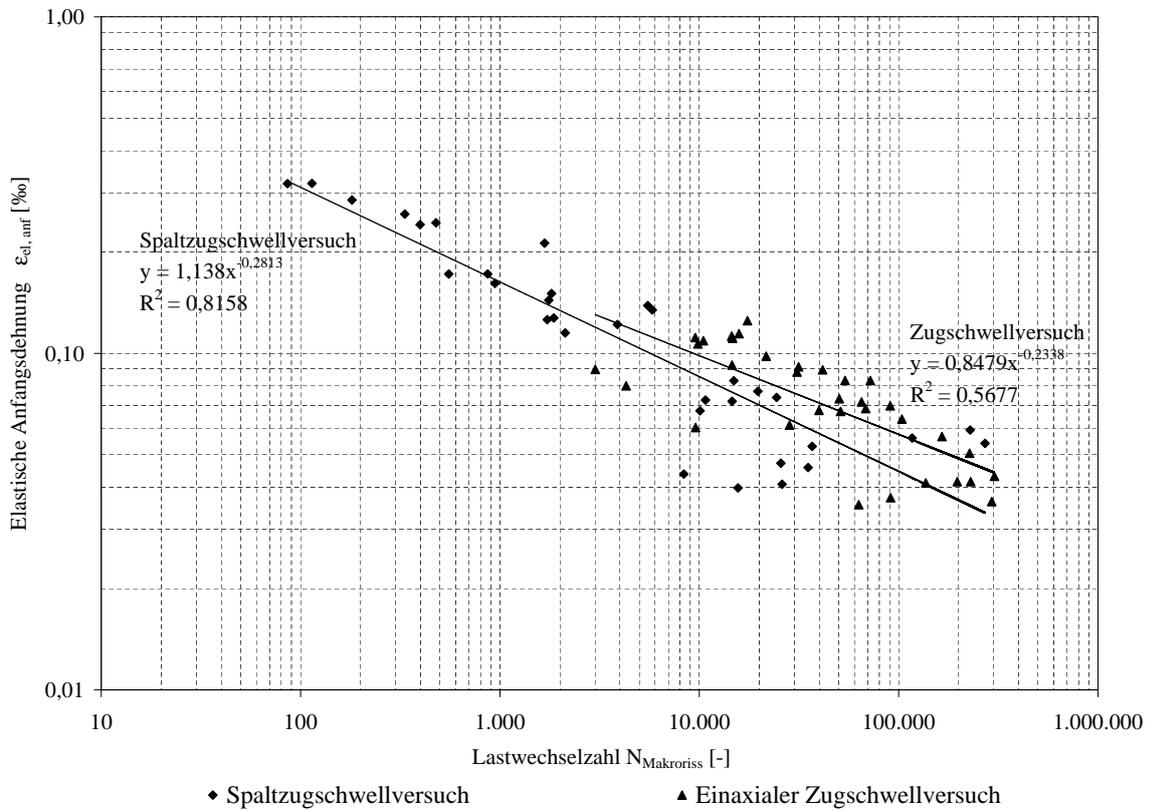


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

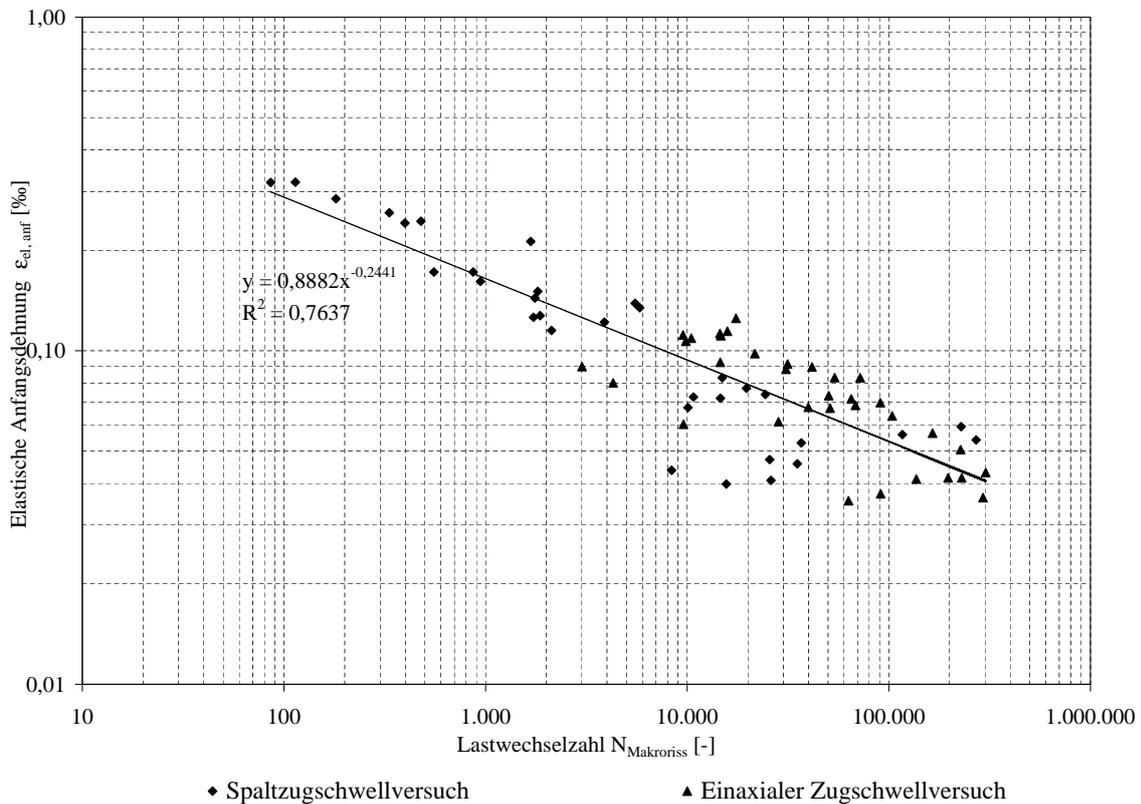


C.7 AB 0/11S 50/70 - 5 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart

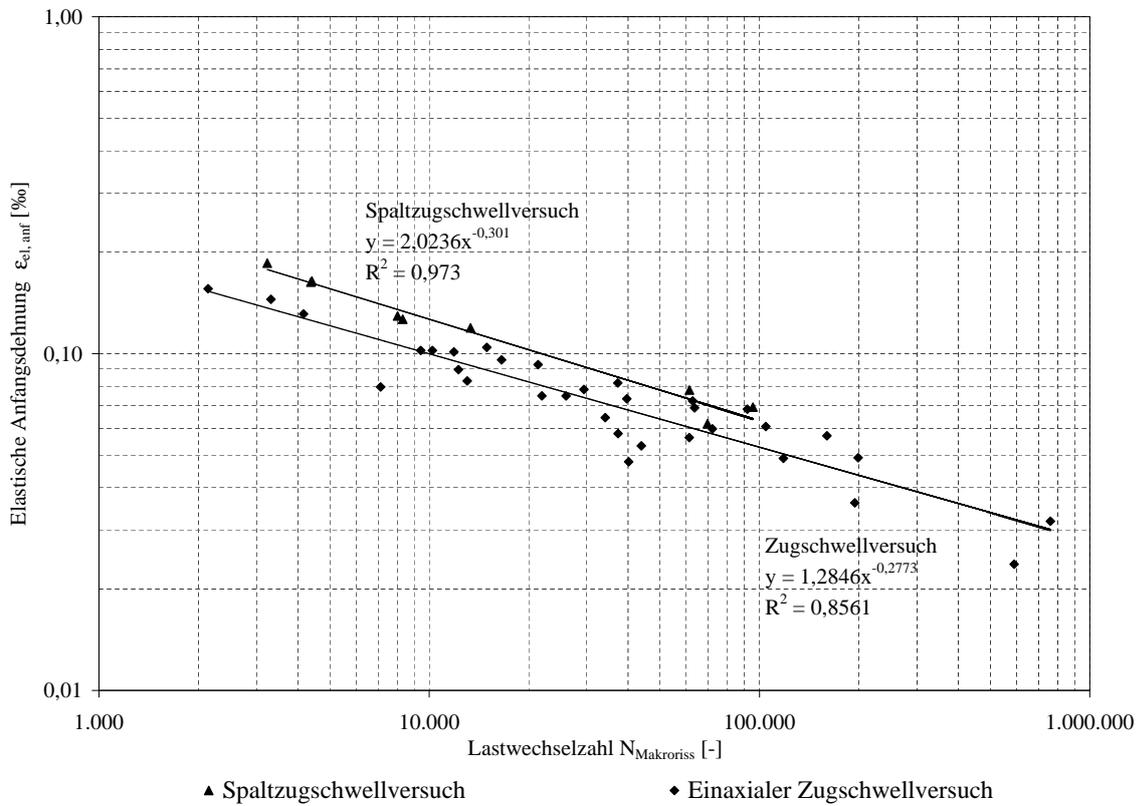


Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart



C.8 OPA 0/8 PmbH 45A - 10 Hz

Ermüdungsfunktionen getrennt nach Versuchsart



Gesamte Ermüdungsfunktion unabhängig von der Versuchsart

