

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt

der Forschungsstelle(n)

Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau

und

Technische Universität Braunschweig, ISBS - Institut für Straßenwesen

Das IGF-Vorhaben Nr. 17634 BG der Forschungsvereinigung Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, Januar 2016

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Wistuba

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

- I. Projektdarstellung und Sachbericht**
- II. Schlussbericht Teil Nr. 1 der Forschungsstelle
Technische Universität Dresden**
- III. Schlussbericht Teil Nr. 2 der Forschungsstelle
Technische Universität Braunschweig**

I Projektdarstellung und Sachbericht

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Forschungsziele.....	3
1.1	Fachlicher Hintergrund	3
1.2	Zielstellungen.....	6
2	Teilaufgaben (Arbeitspakete) und Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und erreichten Ziele.....	8
3	Zusammenfassung	24
4	Sachbericht	31
4.1	Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit – TU Dresden.....	31
4.2	Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit – TU Braunschweig	33
4.3	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft - aktualisiert.....	34
4.4	Auflistung der wissenschaftlichen Publikationen.....	35
4.5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten enthalten.	37
4.5.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	37
4.5.2	Wirtschaftlicher Nutzen.....	38
4.6	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen.....	40
4.7	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	42

1 Einleitung und Forschungsziele

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit des Institutes für Stadtbauwesen und Straßenbau (ISS) der Technischen Universität Dresden und des Institutes für Straßenwesen (ISBS) der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Die Aufgabenstellung der beiden Institute ergänzen sich, konnten wegen der unterschiedlichen Zielstellungen jedoch unabhängig voneinander bearbeitet werden. Hieraus ergab sich die Möglichkeit der Erstellung eines zweiteiligen Schlussberichtes, welche auch genutzt wurde.

Der erste Teil des Abschlussberichtes beinhaltet das Teilprojekt, welches durch das ISS der TU Dresden bearbeitet wurde und der 2. Teil des Schlussberichtes beinhaltet das durch das ISBS der TU Braunschweig bearbeitete Teilprojekt.

1.1 Fachlicher Hintergrund

Im Regelfall besteht das Asphaltpaket einer Straße aus Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht. Die Schichten des Asphaltpaketes werden sowohl durch die vertikal wirkende Radlast als auch durch horizontal wirkende Brems- und Beschleunigungskräfte belastet. Zusätzlich sind witterungsbedingte Belastungen infolge Temperaturänderung und ggf. Durchfeuchtung zu berücksichtigen. Asphaltsschichten werden im Regelfall mittels „heiß auf kalt“ - Einbau der oben liegenden Schicht mit Einbautemperaturen zwischen 130 °C und 170 °C auf die bereits erkaltete unten liegende Schicht eingebaut. Das bedeutet, es müssen entsprechende Maßnahmen zur Erzeugung eines Schichtenverbundes ergriffen werden, welche einen möglichst unnachgiebigen Verbund der Schichten bzw. Lagen über die gesamte Länge und Breite der Befestigung gewährleisten (Abbildung 1). Der Verbund soll die vollständige Übertragung von Scher- und Normalspannungen zwischen den Asphaltsschichten ermöglichen (Abbildung 2). Hierzu wird nach Reinigung der unten liegenden Schicht durch Anspritzen mit einer Bitumenemulsion bzw. einem Haftkleber ein Klebeverbund angestrebt. Es wirken jedoch zusätzlich zu dieser Verklebung die Verzahnung der Gesteinskörner in der Schichtengrenzfläche und die Reibung zwischen den Gesteinskörnern/Grenzflächen. Bei der Übertragung von Scherspannungen über die Schichtengrenzfläche wirken diese drei Faktoren gleichzeitig mit unterschiedlichen Anteilen in Abhängigkeit von den

eingesetzten Asphaltmischgütern, der Temperatur und Belastungsfrequenz, dem Normaldruck sowie der Bitumenemulsionsart und -menge.



Abbildung 1.1: Schichtengrenzfläche bei der Kombination Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht.

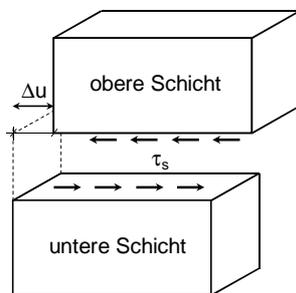


Abbildung 1.2: Scherspannung τ_s und Relativverschiebung Δu zwischen zwei Schichten unter Achsenbeanspruchung (Walther, 2015).

Die entstehenden, teilweise extremen Schubbeanspruchungen an den Schichtengrenzflächen müssen durch bautechnische Maßnahmen so aufgenommen werden können, dass horizontales gegeneinander Gleiten der Schichtgrenzflächen weitestgehend auszuschließen ist. Fehlender Schichtenverbund verändert den dreidimensionalen Beanspruchungszustand, insbesondere die Biegezugbeanspruchung in der gesamten Befestigung, sodass es zu einer vorzeitigen Materialermüdung mit der Folge der Entstehung von Rissen und folglich zu einer deutlich kürzeren Nutzungsdauer der Gesamtbefestigung kommen kann.

Den Unterschied zwischen den Beanspruchungszuständen bei vollständigem Schichtenverbund und bei vollständig aufgehobenem Schichtenverbund zeigt Abbildung 1.3 beispielhaft (Weber, 1991). Zur Veranschaulichung des Spannungsverlaufes innerhalb eines Schichtensystems mit und ohne Schichtenverbund ist ein monolithischer Balken (mit vollständigem Schichtenverbund) einem dreiteiligen Balken (Abbildung 1.31.3, rechts) gegenübergestellt. Für die dreigeteilte Konstruktion wird nach der linearen Biegetheorie eine neunfache Vergrößerung der Durchbiegung in der Mitte des Balkens ermittelt. Betrachtet man den Radialspannungsverlauf kommt es bei dem dreiteiligen

System in den Schichtgrenzen zu Spannungsumlagerungen, die an der Unterseite des Systems zu erheblich höheren Biegezugspannungen resultieren.

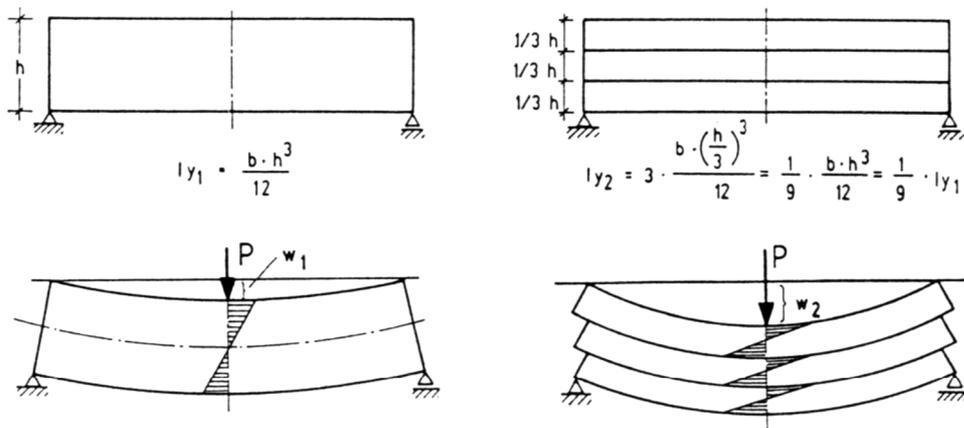


Abbildung 1.3: Darstellung des Spannungsverlaufes unterschiedlicher Verbundsysteme: (links) voller Verbund zwischen den Schichten und (rechts) Auflösung des Verbundes an den Schichtgrenzen (Weber, 1991).

Damit alle Schichten der Asphaltbefestigung bei der Lastabtragung als Einheit wirken können und an der Schichtengrenzfläche keine bzw. nur sehr geringe Relativverschiebungen zwischen den Schichten stattfinden, wird die Herstellung des bestmöglichen Schichtenverbundes stets angestrebt.

In Deutschland basiert die Beurteilung des erreichten Schichtenverbundes einer Asphaltbefestigung zurzeit auf den Ergebnissen des statischen Abscherversuches nach TP Asphalt-StB Teil 80 (FGSV, 2007) für Asphalt-schichten oder -lagen ab 20 mm Schichtdicke. Die Verbundwirkung wird an Bohrkernen aus der Straße mit einem Durchmesser von (150 ± 2) mm bestimmt. Die zur Abscherung notwendige Kraft, welche als Kriterium für die Beurteilung des herstellungstechnisch erzielten Schichtenverbundes herangezogen wird, wird bei einer Vorschubgeschwindigkeit von (50 ± 2) mm/min und einer Prüftemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt. Aus dem Kraft-Weg-Diagramm wird die Höchstkraft als maximale Scherkraft F_{\max} gerundet auf 0,1 kN entnommen und als Versuchsergebnis zusammen mit dem Scherweg angegeben.

Gegenwärtig werden weltweit viele unterschiedliche Geräte für statische Abscherversuche verwendet. Die in der Straßenbefestigung herrschenden Beanspruchungen infolge einer wiederholten Belastung können mit den statischen Prüfverfahren jedoch

nicht simuliert werden. Somit sind die statischen Abscherversuche für die Ableitung von Materialparametern, welche für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen zur Berücksichtigung der Verbundwirkung sowie für eine Prognose der Nutzungsdauer der Straßenbefestigung notwendig sind, nicht geeignet.

Mit Hilfe des zyklischen Belastungsversuches zur Prüfung des Schichtenverbunds, welcher vor Durchführung des Projektes am ISS der TU Dresden neu entwickelt und eine Prüfvorrichtung hergestellt wurde, sollte die praxismgerechte Beschreibung und Beurteilung der Verbundwirkung in Asphaltbefestigungen zur Schaffung eines umfassenden Bewertungshintergrundes weiterentwickelt und die Kenntnisse zu den Einflüssen auf den Schichtenverbund (Bsp. Temperatur, Belastungsfrequenz, Normalspannung) erweitert werden. Auch sollte die Frage geklärt werden, ob der Scherversuch neben der Ermittlung der Schersteifigkeit auch zur Bewertung der Scherermüdung herangezogen werden kann und wenn ja, welche Prüfmodalitäten hierzu festzulegen sind.

Die Schersteifigkeiten wurden im Rahmen des Teilprojektes am ISS der TU Dresden behandelt, die Scherermüdungsbeständigkeiten im Rahmen des Teilprojektes des ISBS der TU Braunschweig.

Es erfolgte die Betrachtung dieser Zielgrößen bei unterschiedlicher Beschaffenheit und unterschiedlichem Verschmutzungsgrad der Oberfläche, bei Verwendung unterschiedlicher Asphaltgemische, Bitumenemulsionsarten sowie -mengen. Weiterhin wurden zusätzlich Kenntnisse über die Vergleichbarkeit der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Probekörpern gewonnen.

1.2 Zielstellungen

Ziel des **ersten Teils** dieses Forschungsprojekts (**ISS, TU Dresden**) war es, die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Zielgröße Schersteifigkeit, Temperatur, Belastungsfrequenz und Normalspannung für unterschiedliche Voraussetzungen bezüglich der Asphaltgemische (Deck- Binder und Tragschichten, der Verzahnung (glatte und raue Schichtgrenzflächen), Verschmutzungsgrade, Emulsionsmengen sowie der Probekörper, hergestellt im Labor als auch aus der Straßenbefestigung entnommen, zu bestimmen. Hierzu war die Durchführung von 450 Einzelversuchen notwendig. Mit der Methode der finiten Elemente und dem Verfahren zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen nach den RDO Asphalt 09 wurden Rückschlüsse auf

die Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Beanspruchung der Asphaltsschichten sowie der zu erwartenden Nutzungsdauer der StraÙenbefestigung und auf die Auswahl von optimalen Bitumenemulsionsarten und -mengen gezogen. Anhand von Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente erfolgte die Prognose der Nutzungsdauer auf der Grundlage der experimentell gewonnenen Ergebnisse.

Ziel des **zweiten Teils** dieses Forschungsprojekts (**ISBS, TU Braunschweig**) war die Frage zu klären, ob ein direkter, zyklischer Scherversuch zur Bewertung der Ermüdung des Schichtenverbundes herangezogen werden kann und wenn ja, welche Prüfmodalitäten hierzu festzulegen sind. Zu diesem Zweck waren zunächst grundlegende Studien zur Anwendbarkeit des direkten, zyklischen Scherversuches durchzuführen, die Prüfmodalitäten zu identifizieren und festzulegen, und danach serienmäßig der Einfluss von verschiedenen Verbundvarianten, Temperaturen und Normalspannungen auf den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes systematisch zu überprüfen. Insgesamt war dazu die Durchführung von ca. 600 Einzelversuchen notwendig. So sollten die optimalen Prüfparameter, die Anwendungsgrenzen und ein Bewertungshintergrund für einen neuen zyklischen Scherversuch für die Prüfung des Dauerverhaltens erarbeitet werden.

2 Teilaufgaben (Arbeitspakete) und Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und erreichten Ziele

Nachfolgend sollen die Teilaufgaben der beteiligten Institute zugeordnet zu den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt und eine Übersicht über die erreichten Ergebnisse gegeben werden.

Arbeitspaket 1: Beschaffung von Material und Herstellung der Probekörper (TU Dresden und TU Braunschweig)

Die Asphaltgemische wurden in dem Mischwerk der Hermann Wegener GmbH & Co. in Braunschweig hergestellt. Zur Herstellung der für die Laborprobekörpergewinnung erforderlichen walzsektorverdichteten Deck-, Binder- und Tragschichtplatten wurden die folgenden drei Asphaltgemische verwendet:

- SMA 11 S,
- AC 16 B S,
- AC 22 T S.

Die Herstellung von Probekörpern erfolgte nach Bedarf über die gesamte Projektlaufzeit.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 1 wurden erreicht.

Arbeitspaket 2: Bewertung der Prüftoleranzen (TU Dresden)

Hauptziel in diesem Arbeitspaket war die Überprüfung, die Überarbeitung und ggf. Bearbeitung des Prüfprogrammes zur Regelung der neu entwickelten Prüfvorrichtung, so dass sie hochgenaue Ergebnisse bei den bevorstehenden zyklischen Versuchen liefert. Bei der Einrichtung der Prüfvorrichtung konnte die Präzision der Regelung um den Faktor 12 im Vergleich zu der alten Prüfvorrichtung nach Wellner / Ascher (2007) verbessert werden, indem die Regelung nach der Kolbenposition, deren Messbereich ca. 1,2 µm war, zu einer Regelung nach den vertikalen Wegaufnehmern (sog. Extension) mit einem Messbereich von 0,1 µm umgestellt wurde (Abbildung).

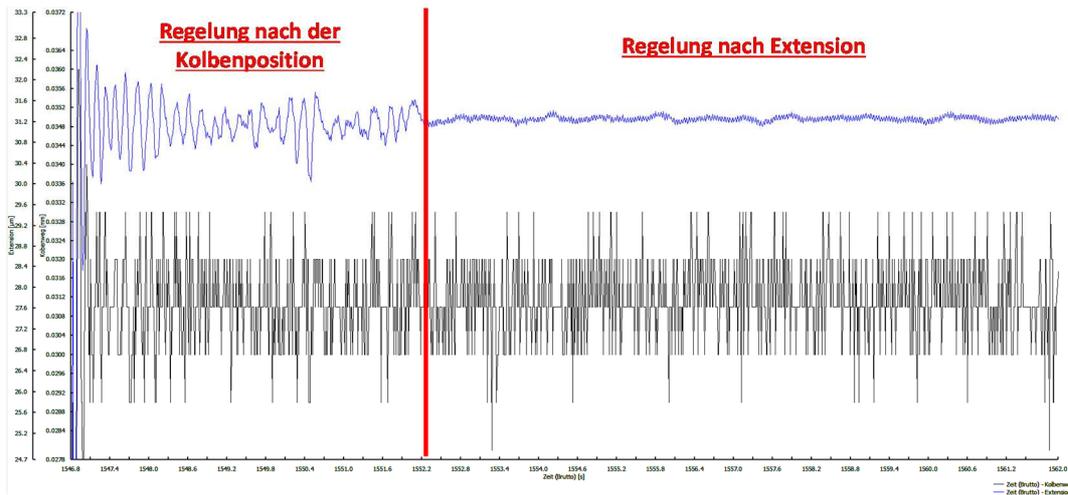


Abbildung 2.1: Verbesserte Präzision der Regelung bei der neu entwickelten Prüfvorrichtung.

Es wurde weiterhin geklärt, wie groß die Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung tatsächlich sind. Mit Hilfe von zwei Wegsensoren mit einem Nennmessbereich von 2,0 mm und einer Genauigkeitsklasse 0,2% wurden die vertikalen Bewegungen der zwei Träger der Prüfvorrichtung während des Versuchs kontinuierlich aufgezeichnet. Die Größenordnung der Abweichungen war somit akzeptabel, so dass keine Korrektur der Ergebnisse mittels Korrekturfaktoren notwendig war. Wie erwartet, war der Weg des vertikal beweglichen Trägers B, mit dem die Scherkraft eingeleitet wurde, größer.

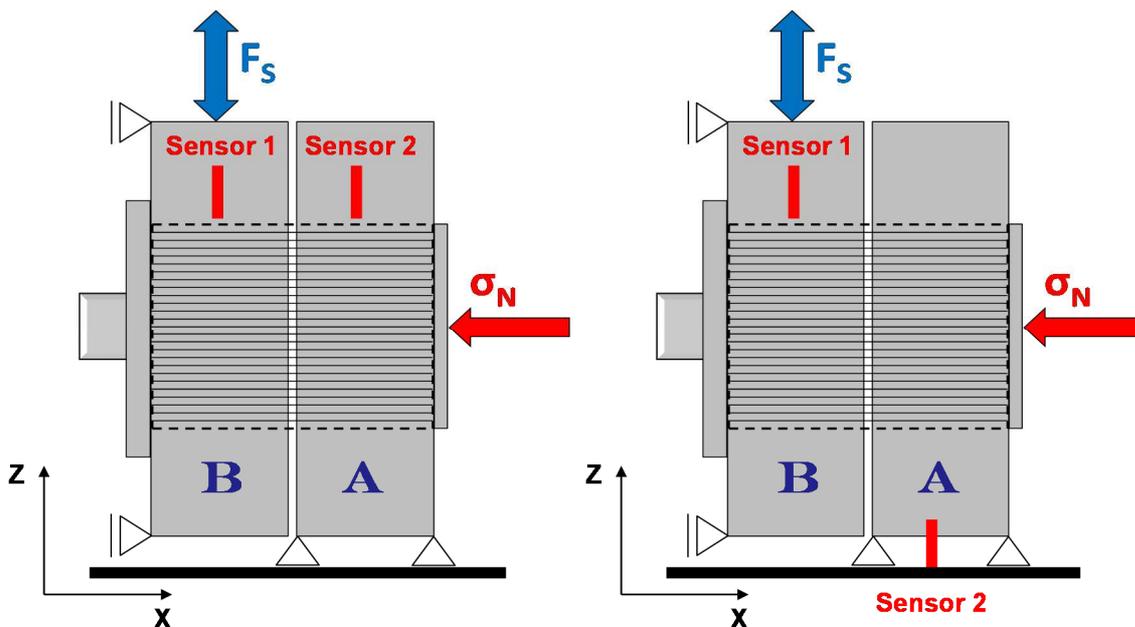


Abbildung 2.1: Anordnung der Wegsensoren zur Überprüfung der Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung.

Damit konnte gezeigt werden, dass bei der neuen Prüfvorrichtung, bedingt durch den Einbau der Doppel-T Präzisionslager aus Edelstahl nur vernachlässigbar kleine vertikale Verschiebungen auftreten.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 2 wurden erreicht.

Arbeitspaket 3: Untersuchungen zu den Mindestschichtdicken der Probekörper (TU Dresden)

Im Arbeitspaket 3 sollte der praxisrelevanten Fragestellung nachgegangen werden, welche Mindestdicken der zwei Schichten des Probekörpers für die Versuchsdurchführung notwendig sind, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Bei der Verwendung von Bohrkernen wurde bislang immer von einer Mindestdicke je Schicht von 40 mm ausgegangen.

Für die Untersuchungen im Arbeitspaket 3 wurde die Verbundkombination Asphaltdeckschicht auf Asphaltbinderschicht mit einer Menge von 200 g/m² Bitumenemulsion C60BP1-S zur Verklebung angewendet. Damit die Asphaltsschichten in gleicher Weise hergestellt und verdichtet waren, wurden alle Platten mit der im Walzsektorverdichter größtmöglichen Höhe von 60 mm je Schicht hergestellt. Nachdem die Bohrkern aus den so hergestellten, zweischichtigen Platten mit 2*60 mm = 120 mm Dicke entnommen wurden, erfolgte das beidseitige Absägen (beide Schichten) auf die gewünschte Dicke je Schicht. Zum Befestigen in den Stahladaptern wurden dann zum Auffüllen der Stahlform auf die bislang übliche 4 cm Gesamtdicke beidseitig Stahldummies angewendet, die an der Stirnfläche jeder Asphaltsschicht und in den Stahladaptern eingeklebt waren. Die Stahldummies wurden mit demselben Durchmesser wie die Probekörper hergestellt.

Geprüft wurden vier Dickenvarianten (15 mm, 30 mm, 40 mm und 60 mm Dicke der jeweiligen Schicht der Probekörper) bei je zwei Prüftemperaturen (-10°C und 50°C) mit 3-facher Belegung.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Ausnahmen der 15 mm dicken Schichten die anderen Schichtendickenvarianten keine unplausiblen Ergebnisse erwarten lassen und somit für zukünftige Untersuchungen angewendet werden können.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 3 wurden erreicht.

Arbeitspaket 4: Ermittlung der Versuchspräzision unter Wiederholbedingungen (TU Dresden)

Zur Validierung des Prüfverfahrens sind Kenntnisse zur Varianz der Prüfergebnisse unerlässlich. Zur Erfassung der Varianz wurden Asphaltplatten mit verschiedenen Verbundvarianten im Labor mittels eines Walzsektor-Verdichtungsgerätes hergestellt und daraus jeweils 4 Bohrkern (Durchmesser 100 mm) entnommen. Diese wurden unter identischen Bedingungen mit dem zyklischen Prüfverfahren untersucht. Anhand der Ergebnisse sollte die Präzision des Verfahrens eingeschätzt werden, so dass gegebenenfalls das Prüfverfahren hinsichtlich der Genauigkeit optimiert werden konnte.

Die Untersuchung zur Versuchspräzision erfolgte an 12 Probekörpern (AC 16 B S auf AC 22 T S), deren zu verklebende Oberflächen vorher zur Vermeidung der Verzahnung fein geschliffen waren und weiterhin an 12 Probekörpern (SMA 11 S auf AC 22 T S, normale Oberflächen) mit 200, 300 und 400 g/m² Bitumenemulsion C60 BP1-S. Die Abbildungen 2.3 und 2.4 zeigen die Vorgehensweise bei der Probekörperherstellung.



Abbildung 2.3: Geschliffene Oberfläche der unteren Asphaltsschicht mit aufgetragener Bitumenemulsion.



Abbildung 2.4: Speziell angefertigte Form zur Herstellung des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen. Links – Teile, rechts – geschlossene Form.

Die Versuchspräzision kann auf der Grundlage der Bewertung der Versuchsergebnisse als ausreichend angesehen werden. Außerdem kann festgestellt werden, dass die Schersteifigkeit größer ist, wenn zusätzlich zur Verklebung, die Reibung und die Verzahnung wirken.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 4 wurden erreicht.

Arbeitspakt 5: Untersuchung von im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Bohrkernen (TU Dresden)

In diesem Arbeitspaket sollten Kenntnisse über die Vergleichbarkeit der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltstraßenbefestigungen entnommenen Probekörpern erlangt werden. Dafür wurden 3 Baustellen ausgewählt, die einen weitgehend identischen Straßenoberbau hatten. Mit den Asphaltgemischen von jeder der drei Baustellen wurden dann im Labor walzsektorverdichtete Platten hergestellt, aus denen die Probekörper herausgebohrt wurden. Anschließend erfolgte die Herstellung des Schichtenverbundes mit dem auf der jeweiligen Baustelle angewendeten Haftvermittler in der entsprechenden Menge. Es wurden insgesamt 18 zweischichtige Probekörper hergestellt. Die Prüfung aller im Labor hergestellten 18 Probekörper und der aus der Baustelle entnommenen 18 Bohrkern erfolgte mittels zyklischer Belastung.

Ziel war es, die Unterschiede in der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltstraßenbefestigungen entnommenen Probekörpern zu beurteilen.

Der Vergleich der berechneten Schersteifigkeits-Flächenfunktionen Labor – Baustelle zeigte eine gute Übereinstimmung im gesamten untersuchten Temperatur-, Frequenz- und Normalspannungsbereich bei beiden Verbundvarianten. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass im Labor praxisnahe Probekörper hergestellt werden können.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 5 wurden erreicht.

Arbeitspaket 6: Untersuchungen zur Ermüdung der Verbundwirkung (TU Braunschweig)

Die bei Asphaltgemischen auftretende Materialermüdung infolge wiederholter Belastung wurde hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verbundwirkung bislang nur unzureichend untersucht. In einem vorangegangenen Projekt [WELLNER und ASCHER, 2006] wurde festgestellt, dass ohne aufgebrachte Normalspannung die Scherspannung nach 1.000 Lastwechseln auf etwa 80% gegenüber den ersten Lastwechseln abfällt. Es sollten die Untersuchungen zur Verbundwirkung im Umfang so erweitert werden, dass verschiedene Verbundvarianten, Temperaturen und Normalspannungen an im Labor hergestellten Probekörpern geprüft werden konnten.

Anhand der Ergebnisse der Scherermüdungsprüfungen bei verschiedenen Normalspannungen und Temperaturen konnten die untersuchten Verbundvarianten bezüglich ihrer Scherermüdungsbeständigkeit miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer baupraktischen Eignung gereiht werden. Prüfungen bei einer Prüftemperatur oberhalb von 30°C und bei Normalspannungen von 0,25 MPa und 0,50 MPa oder oberhalb davon sind praktisch nicht durchführbar und konnten deshalb nicht berücksichtigt werden. Folglich sind zyklische Scherermüdungsprüfungen bei einer Prüftemperatur von 20°C ohne Aufbringung einer Normalspannung durchzuführen.

Für die Bestimmung der Scherermüdungsbeständigkeit einer Verbundvariante wurden drei Temperaturen, drei Normalspannungen und drei Scheramplituden festgelegt und bei jeder Scheramplitude mindestens drei Scherermüdungsprüfungen durchgeführt, sodass eine Verbundvariante 81-fach belegt ist.

Die Auswertung einer Scherermüdungsprüfung erfolgte analog zu herkömmlichen Ermüdungsprüfungen mit dem Ermüdungskriterium $N_{f/50}$. Aus mindestens 9 Versuchsergebnissen wird die Ermüdungsfunktion (Wöhler-Linie) gebildet.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 6 wurden erreicht.

Arbeitspaket 7: Untersuchung des Einflusses der Verzahnung, Reibung und Verklebung auf die Scherkräfte (TU Dresden)

Um die Effekte von Verklebung mit Bitumenemulsion, Verzahnung und Reibung auf eine größere statistische Basis zu stellen und voneinander quantitativ zu trennen, musste der Schichtenverbund unterschiedlich hergestellt werden. Für die Untersuchung der Verklebung wurden 27 Probekörper aus zwei Mischgutzusammensetzungen (SMA 11 S auf AC 22 T S) zyklisch getestet. Ihre Herstellung erfolgte analog zu Arbeitspaket 4a (geschliffene, glatte Asphaltoberfläche in der Schichtenverbundebene), damit keine Verzahnung stattfinden konnte. Dabei wurden polymermodifizierte Bitumenemulsionen C60 BP1-S von zwei Herstellern und die lösemittelhaltige Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) in den Mengen von 200, 300 und 400 g/m² verwendet.

Um lediglich die Einflüsse von Verzahnung und Reibung zu untersuchen, sollte auch der Verbund ohne Anwendung von Bitumenemulsionen getestet werden. Nach Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden drei Oberflächenrauigkeiten und zwei unterschiedliche Varianten der Verbundherstellung wie folgt festgelegt:

- (1) Feine Oberflächen (SMA 11 S auf SMA 11 S)
- (2) Normale Oberflächen (SMA 11 S auf AC 22 T S)
- (3) Grobe Oberflächen (AC 22 T S auf AC 22 T S)
- (4) Heiß auf heiß (SMA 11 S auf AC 16 B S)
- (5) Heiß auf kalt (SMA 11 S auf AC 16 B S)

Für eine 3-fache Belegung wurden insgesamt 42 Probekörper geprüft.

Es konnte ein deutlicher Unterschied der Schersteifigkeit mit und ohne Verklebung der Schichten der Probekörper festgestellt werden. Bei fehlender Verklebung bewirken Reibung und Verzahnung aber auch eine gewisse, wenn auch geringe Schersteifigkeit. Die Prognoserechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente zeigten, dass

allein Reibung und Verzahnung die Nutzungsdauer der Asphaltbefestigungen gegenüber vollständig fehlender Schersteifigkeit positiv beeinflusst.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 7 wurden erreicht.

Arbeitspaket 8: Untersuchung des Einflusses von verschmutzten Oberflächen (TU Dresden)

In diesem Arbeitspaket sollte die Qualität des Schichtenverbundes beim Auftragen von Bitumenemulsionen von zwei verschiedenen Herstellern (zwei unterschiedlichen Ring-Kugel-Werten) und einem Haftkleber in drei Mengen auf unterschiedlich verschmutzten Oberflächen der unteren Asphaltsschicht untersucht werden. Auf diese Weise sollten Kenntnisse über die Wirksamkeit von verschiedenen Bitumenemulsionsarten und den benötigten Mengen zur Herstellung eines ausreichenden Schichtenverbundes gewonnen werden. In vielen bisherigen Veröffentlichungen wird berichtet, dass die Unterlage sauber sein muss, um eine gute Verklebung der Schichten zu erreichen. In der Praxis wird eine gute Sauberkeit der Oberfläche der zu überbauenden Schicht (Kehren, Reinigung mit Hochdruck-Wasserstrahl) angestrebt, jedoch ist in vielen Fällen eine schwer bzw. nicht entfernbare Verschmutzung der Oberfläche vorhanden (erzeugt durch Baustellenverkehr auf der unten liegenden Schicht), deren Auswirkung auf den Schichtenverbund bisher unbekannt ist, jedoch negativ eingeschätzt wird. Im Regelfall wird bei verschmutzter Oberfläche ein Haftkleber (Bitumenemulsion mit Fluxöl) aufgesprüht, der die Schmutzschicht durchdringen soll.

Im Projekt erfolgte die Untersuchung der Verbundkombination Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht für unterschiedliche Verschmutzungsgrade. Die Verschmutzung der Laborprobekörper erfolgte unter Verwendung von feinem Schluff. Um die Menge des bindigen Bodens plausibel zu bestimmen, wurde die Angabe von $0,34 \text{ kg/m}^2$ ($28,29 \text{ g/Platte}$) Schmutz nach Mohammad et al. (2002) überprüft. Dieser Wert erwies sich als sinnvoll und realitätsnah für eine hohe Verschmutzung und wurde aufgerundet auf $0,36 \text{ kg/m}^2$ (30 g/Platte) als höchster Wert in den Untersuchungen angesetzt.

Es wurden die folgenden Verschmutzungsgrade festgelegt:

- sauber 0 g/m^2 bindiger Boden
- mittel verschmutzt 180 g/m^2 Schluff (15 g pro Platte)

- stark verschmutzt 360 g/m² Schluff (30 g pro Platte)

Nach den ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2007) ist für die Belastungsklassen Bk100 bis Bk3,2 eine polymermodifizierte Bitumenemulsion C60BP1-S und für die Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk0,3 eine lösemittelhaltige Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) zu verwenden. Um zu untersuchen, ob Unterschiede im Schichtenverbund bei Verwendung von zwei gleichen polymermodifizierten Bitumenemulsionsarten vorhanden sind, erfolgte, wie bereits beschrieben die Anwendung von Bitumenemulsionen C60BP1-S von zwei unterschiedlichen Herstellern. Der Verbund zwischen den Schichten wurde mit den drei bereits benannten Bitumenemulsionsmengen hergestellt. Die erforderliche Anzahl an geprüften Probekörpern war 81.

Es zeigte sich, dass die Verschmutzung die Schersteifigkeit nur teilweise negativ beeinflusst. Die in den Versuchen teilweise festgestellte positive Wirkung auf die Klebeschicht aus Bitumen kann mit der steifigkeitserhöhenden Wirkung der feinen Gesteinskörnung (Schluff) im Bitumen ähnlich der Wirkung des Füllers im Asphaltmörtel erklärt werden. Es ist trotz dieser Ergebnisse dringend zu empfehlen, die Oberfläche der unten liegenden Asphaltsschicht vor dem Aufbringen der Bitumenemulsion gründlich zu reinigen. Es bleibt jedoch zukünftiger Forschung vorbehalten, zur Steifigkeitserhöhung der Bitumenemulsion durch Zugabe von Füller zu prüfen, ob hierdurch die Schersteifigkeit verbessert werden kann.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 8 wurden erreicht.

Arbeitspaket 9: Berechnungen zur Auswirkung der untersuchten Einflussgrößen auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen (TU Dresden)

Mit Hilfe des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen nach den RDO Asphalt (2009) sollten die Auswirkungen der Verbundwirkung unter Verwendung der in den Arbeitspaketen 3 bis 8 ermittelten Versuchsergebnisse auf das Ermüdungsverhalten und das Risiko der Spurrinnenbildung der gesamten Asphaltbefestigung untersucht werden. Anhand der Ergebnisse der Berechnungen sollten Rückschlüsse auf die erforderliche Qualität des Verbundes und die bei der Auswahl der Bitumenemulsion optimalen Bitumenemulsionsarten und –mengen gezogen werden.

Aus den Versuchen des ISS der TU Dresden konnte die Auswirkung der Schersteifigkeit auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen bestimmt werden. Den Berechnungen wurde die aus den Versuchen abgeleitete schlechteste (Bad Case) und die

beste (Good Case) Funktion zur Beschreibung der Schersteifigkeit für die Kombinationen Deckschicht-Binderschicht und Binderschicht-Tragschicht zugrunde gelegt.

In das Finite-Elemente Programm SAFEM, entwickelt durch das Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem ISS der TU Dresden, wurde die o.g. Funktion zur Beschreibung der Schersteifigkeit implementiert, und die Nutzungsdauer von Befestigungen mit den o.g. Funktionen für die Schersteifigkeit (nicht ermüdet – Bad und Good Case- und vollständig ermüdet) prognostiziert.

Die Berechnungen erfolgten nach der Methodik der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09) für zwei Belastungsklassen (Bk10 mit $B = 32$ Mio und Bk100 für $B = 80$ Mio) nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12). Für den Asphalt wurden die Steifigkeits-Temperaturfunktionen angesetzt, welche im Rahmen des Projektes anhand von Spaltzug-Schwellversuchen ermittelt wurden. Für die Verkehrsbelastung wurde die Häufigkeitsverteilung Fernverkehr gemäß RDO Asphalt angesetzt.

Aus den Ergebnissen der Versuche und den Berechnungen mit den verschiedenen Varianten der Funktionen für den Schichtenverbund können zusammenfassend die folgenden Überlegungen abgeleitet werden:

1. Abbildung 2.5 zeigt eine Einteilung in verschiedene Wirksamkeitsbereiche der in den Versuchen ermittelten Funktionen für den Schichtenverbund bezogen auf die berechnete Nutzungsdauer in Abhängigkeit von den Ursachen (Verzahnung, Reibung, Verklebung). Es sollte prinzipiell der gute Bereich angestrebt werden. Auch wenn der sehr gute Bereich mit den derzeit angewandten Bitumenemulsionen nicht erreicht werden kann, sollte das Erreichen dieser zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten sein.
2. Es wird angenommen, dass die Funktion für den „Bad Case“ in der Regel mindestens erreicht wird und vorausgesetzt werden kann, wenn eine Verklebung der Schichten z. B. am Bohrkern augenscheinlich zwischen den Schichten vorhanden ist und mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscher Versuch nach den Kriterien der ZTV Asphalt Schichtenverbund als ausreichend nachgewiesen wurde. Mit dieser Funktion kann ohne zusätzliche Durchführung

eines zyklischen Versuches zu Bestimmung der Schersteifigkeit gerechnet werden. Weiterhin könnte diese Funktion für zukünftige Kalibrierrechnungen bei Weiterentwicklungen von RDO Asphalt und RSO Asphalt angesetzt werden.

3. Wird jedoch am Bohrkern augenscheinlich kein Schichtenverbund festgestellt, oder mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien nach ZTV Asphalt ermittelt, dass kein ausreichender Schichtenverbund vorhanden ist, dann sollte mit der Funktion der Schersteifigkeit des vollständig ermüdeten Schichtenverbundes gerechnet werden.

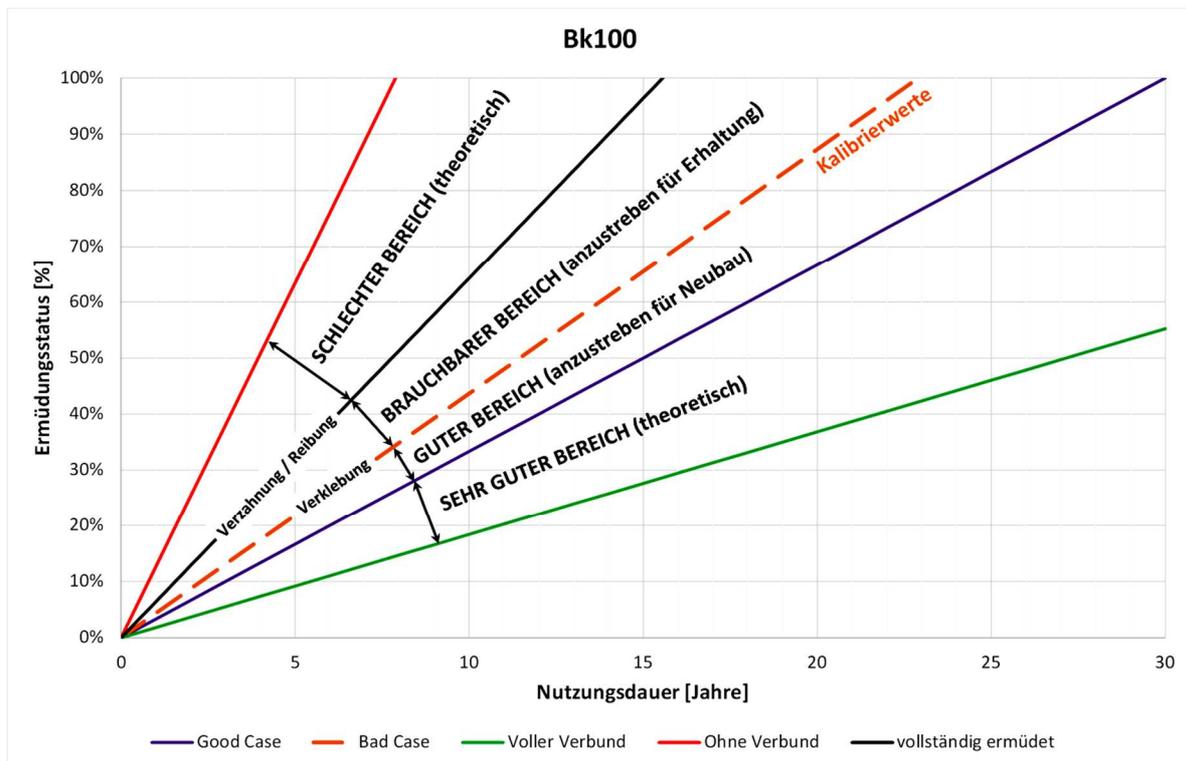


Abbildung 2.5: Qualitätsbereiche des Schichtenverbundes für Neubau und Erhaltung (Bk100)

Ein zyklischer Versuch zur Bestimmung der Funktion für die Schersteifigkeit nach der im vorliegenden Bericht vorgestellten Methode (wird derzeit im Entwurf für eine TP zur Ermittlung und Bewertung der Schersteifigkeit mit zyklischer Belastung umgesetzt) kann dann sinnvoll sein bzw. durchgeführt werden, wenn eine realistische Funktion für den Schichtenverbund gesucht wird, welche besser als für den „Bad Case“ zu erwarten ist.

Die Bewertung des plastischen Verformungsverhaltens von Asphaltstraßenbefestigungen im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus gemäß den

RDO Asphalt (2009) geschieht durch eine Abschätzung der Spurrinnengefährdung anhand der deviatorischen Vergleichsspannung, die in der Lastachse ab der Oberfläche bis zu der Grenze zwischen Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht berechnet wird. Als Maß der Spurrinnengefährdung wird das Maximum dieser Vergleichsspannung für die höchste Lastklasse bei der höchsten, zu erwartenden Oberflächentemperatur zugrunde gelegt.

Die Deviatorspannungen wurden für die nachfolgenden Betrachtungen mit dem Finite-Elemente-Programm SAFEM für die Temperaturklassen 32,5°C, 37,5°C, 42,5°C und 47,5°C in der Lastachse (für 10 t Achslast) für den Fall ohne Schichtenverbund (theoretischer Fall), den schlechten (Bad Case) und vollständigen Schichtenverbund (theoretischer Fall) an der Ober- und Unterseite der Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht ermittelt. Sie wurden als die Differenz zwischen der Spannung in vertikaler Richtung (Z) und dem Mittelwert aus den Spannungen in den drei Richtungen (X, Y, Z) berechnet. Für die Abschätzung der Spurrinnengefährdung wurde die Asphalttragschicht nicht weiter betrachtet. Im Anhang 9 sind die Diagramme für alle Temperaturklassen dargestellt. In Abbildung 2.6 werden lediglich die Werte der deviatorischen Spannungen bei der höchsten und der niedrigsten Temperaturklasse dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass mit abnehmendem Schichtenverbund eine deutliche Erhöhung der Deviatorspannungen sowohl an der Oberfläche als auch an der Schichtengrenzfläche (ADS-ABS) und an der Unterseite der Binderschicht festzustellen ist. Am Beispiel in Abbildung sind die Deviatorspannungen bei fehlendem Verbund und 47,5°C vier bis fünf Mal höher als diejenigen bei vollem Verbund. Die Deviatorspannungen bei dem schlechten Schichtenverbund liegen bei allen vier Temperaturen zwischen den Werten bei fehlendem und vollständigem Verbund. Bei einer Temperatur von 47,5°C sind alle deviatorischen Vergleichsspannungen (vektoriell betrachtet) vertikal gerichtet, das bedeutet Spurrinnengefährdung, während bei 32,5°C an der Oberfläche keine Spurrinnengefährdung bei vollem Schichtenverbund berechnet wurde. Die Werte der Deviatorspannungen für den guten und den vollständig ermüdeten Schichtenverbund wurden anhand der Erkenntnisse aus der Ermüdung interpoliert.

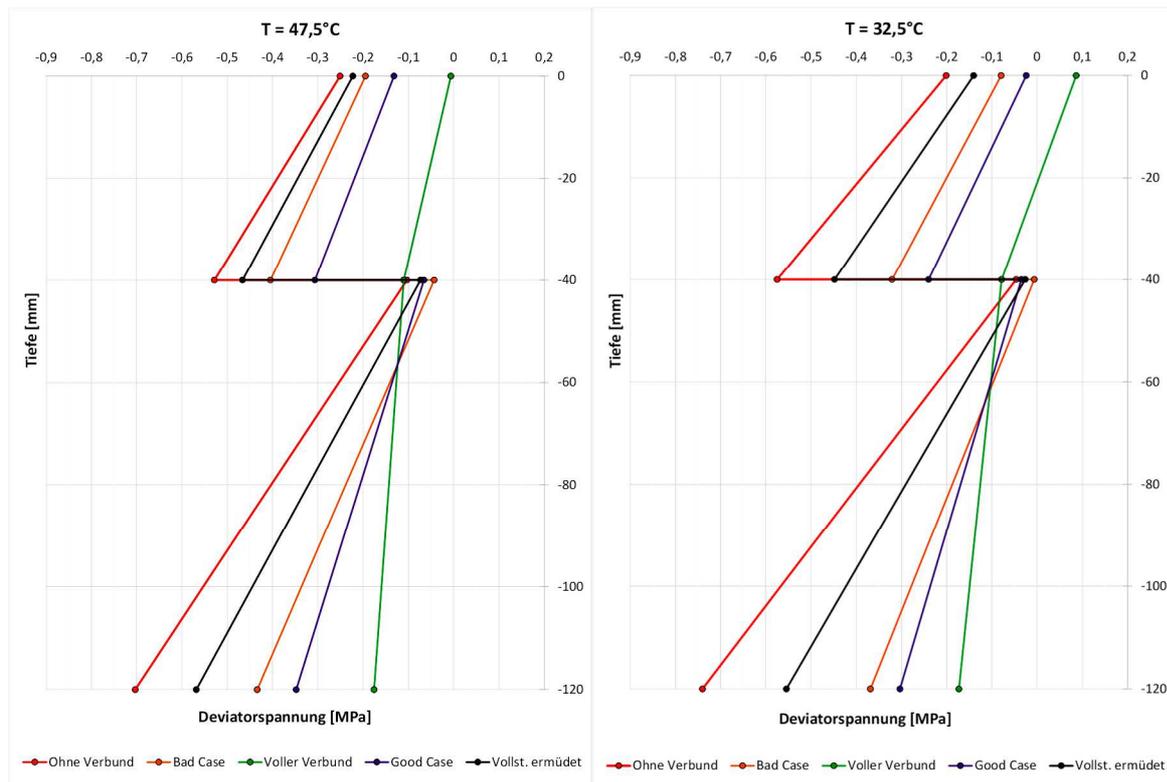


Abbildung 2.6: Deviatorspannungen in der Lastachse an der Ober- und Unterseite der Deckschicht und der Binderschicht bei 47,5°C und 32,5°C

Die Zunahme der Deviatorspannungen mit abnehmender Qualität des Schichtenverbundes zeigt eindeutig, dass ein schlechter Schichtenverbund zu einer erhöhten Spurrinnengefährdung beiträgt. Demzufolge spielt die Qualität des Schichtenverbundes eine sehr wichtige Rolle für die Verformungsbeständigkeit der zwei oberen Asphalt-schichten.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 9 wurden erreicht.

Arbeitspaket 10: Erarbeitung des Bewertungshintergrundes für die zyklische Scherprüfung (TU Dresden und TU Braunschweig)

In Abstimmung mit den Fachbetreuern des projektbegleitenden Ausschusses wurde entschieden, dass Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt werden sollten, um die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen und die Scherermüdungsfunktionen der drei für die Berechnungen verwendeten Asphaltmaterialien SMA 11 S, AC 16 B S und AC 22 T S am ISS der TU Dresden zu bestimmen. Dies war auch für die Berechnungen

mit dem Finite-Elemente-Programm SAFEM zur Anwendung der rechnerischen Dimensionierung nach RDO Asphalt 09 (2009) notwendig. Für die Versuche standen insgesamt 84 Probekörper zur Verfügung.

- **Festlegung von Kriterien zur Anwendbarkeit der Versuchsergebnisse als Eingangsparameter für die rechnerische Dimensionierung und Prognose (TU Dresden)**

Der Versuch zur Bestimmung der Schersteifigkeit nach der im vorliegenden Teilbericht Nr. 1 dargestellten Methode ist äußerst aufwendig. Deshalb wurde im Kap. 4.1 des Teils 1 des Schlussberichtes bereits ein Vorschlag zur Verwendung der aus allen durchgeführten Versuchen hergeleiteten Funktionen erstellt. Dementsprechend soll die Schersteifigkeitsfunktion für den „Bad Case“, hergeleitet aus den Versuchen des ISS der TU Dresden, generell dann angewendet werden, wenn Schichtenverbund nach den Kriterien der ZTV Asphalt als ausreichend angenommen werden kann.

Die Schersteifigkeitsfunktion für vollständig ermüdeten Schichtenverbund, hergeleitet aus den Versuchen des ISBS der TU Braunschweig, soll dann angewendet werden, wenn der Schichtenverbund nach ZTV Asphalt als nicht ausreichend angenommen werden muss. Nur dann, wenn zu erwarten ist, dass eine bessere Funktion als die im Rahmen des vorliegenden Berichtes für den „Bad Case“ erstellt wurde, bestimmt werden könnte, sollten zusätzlich zyklische Schersteifigkeitsversuche durchgeführt werden. Da die Versuchsergebnisse entsprechen der bisherigen Erfahrungen materialbedingt streuen können, sollte bei der Durchführung gemäß Kapitel 4.1 und Bewertung der Ergebnisse nach Kapitel 5.7 vorgegangen werden.

- **Erstellung von Empfehlungen für die Prüfmaschinenausrüstung inkl. Prüfvorrichtung für die zyklische Schersteifigkeitsprüfung und Erarbeitung einer Prüfanleitung (TU Dresden und TU Braunschweig)**

Die Empfehlungen für die Prüfmaschinenausrüstung inkl. Prüfvorrichtung für die zyklische Schersteifigkeitsprüfung und eine Prüfanleitung sind im Entwurf der Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB, Teil 48: Zyklischer Schersteifigkeitsversuch) von 2013 enthalten. Als Ergänzung hierzu sollten die Anzahl und die Größe der

Prüffrequenzen (siehe Abschnitt 3.4) sowie die Methodik zur Berechnung der Masterfunktionen für die Schersteifigkeiten in Analogie zur Auswertung des Spaltzug-Schwellversuches zu Anwendung kommen. Für beide Ergänzungen existieren bereits Textvorschläge in den Entwürfen der überarbeitete AL Sp-Asphalt 09 sowie für den Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt (TP Asphalt-StB, Teil 48: Zyklischer Schersteifigkeitsversuch). Weiterhin erfordert die Anwendung der Schersteifigkeitsfunktionen wegen der Abhängigkeit von der Normalspannung für Prognoserechnungen zwingend die Anwendung der Methode der Finiten Elemente. In das Finite-Elemente-Programm SAFEM wurde die Funktion bereits anwendungsbereit implementiert.

Hinsichtlich der Durchführung von Scherermüdungsprüfungen wurde von der TU Braunschweig eine Vorgehensweise inkl. Prüfanleitung erarbeitet.

- **Erarbeitung von Empfehlungen für die Berücksichtigung der Verbundwirkung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen sowie Grundlage für die Erarbeitung bzw. Überarbeitung von Regelwerken (u. a. Ergänzung zur [RDO Asphalt 2009]) (TU Dresden)**

Abschnitte 4.1 und 5.7 des Teils 1 des Schlussberichtes können als Empfehlungen für die Berücksichtigung der Verbundwirkung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen (RDO Asphalt, Ausgabe 2009) dienen.

- **Vergleich der ermittelten Verbundwirkung mit den Ergebnissen der Schichtenverbund-Prüfung gemäß TP Asphalt-StB Teil 80. Dadurch kann der mit diesem Prüfverfahren erarbeitete Erfahrungshintergrund einfließen (TU Braunschweig).**

Der Vergleich wurde am ISBS der TU Braunschweig durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Kapitel 5.3 (Teil 2 des Schlussberichts) niedergeschrieben.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 10 wurden erreicht.

Arbeitspaket 11: Dokumentation der Ergebnisse (TU Dresden und TU Braunschweig)

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind in dem folgenden Schlussbericht, der aus zwei Teilen besteht, zusammengefasst. Der erste Teil des Abschlussberichtes beinhaltet das Teilprojekt, welches durch das ISS der TU Dresden bearbeitet wurde und der 2 Teil des Forschungsberichtes beinhaltet das durch das ISBS der TU Braunschweig bearbeitete Teilprojekt.

Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 11 wurden erreicht.

3 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen des Institutes für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden (ISS) wird deutlich, dass die neu entwickelte Prüfvorrichtung und das angewandte Prüfverfahren für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes (Schersteifigkeits- und Scherfestigkeitsprüfung) von Asphaltbefestigungen gut geeignet sind. Mit dem bisher bekannten umfangreichen Prüfprogramm kann der Einfluss aus den verschiedenen Kombinationen von Temperatur, Frequenz und Normalspannung auf den Schichtenverbund untersucht werden. Die Qualität des Schichtenverbundes und die Auswirkung dieser drei Einflussgrößen auf den Schichtenverbund wurden anhand der Werte der berechneten Schersteifigkeiten beurteilt. Je höher die Schersteifigkeit umso stärker ist der Schichtenverbund. Es wurde festgestellt, dass die berechneten Schersteifigkeiten stark von der Temperatur abhängig sind. Der Schichtenverbund entsteht durch Verklebung, Reibung und Verzahnung. Diese Faktoren wirken in unterschiedlicher Größe in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Verklebung ist stark temperaturabhängig. Bei der niedrigsten Temperatur von -10°C ist die Verklebung an der Schichtengrenzfläche sehr stark, reduziert sich mit steigender Temperatur stetig und bei 50°C ist sie nicht mehr vorhanden. Bedingt durch die Verschlechterung der Verklebung (Verringerung der Viskosität des Bitumens) nimmt die Schersteifigkeit mit zunehmender Temperatur rasch ab. Dementsprechend verringert sich deutlich die Wirksamkeit des Schichtenverbundes. Versuchstechnisch können die Effekte von Reibung, Verzahnung und Verklebung jedoch nicht getrennt werden. Eine quantitative Trennung kann nur anhand der berechneten Flächenfunktionen für die Schersteifigkeit erfolgen.

Generell bewirken eine Erhöhung der Normalspannungen und der Frequenzen eine Erhöhung der Schersteifigkeit, d.h. eine Verbesserung des Schichtenverbundes. Sowohl die Normalspannung als auch die Belastungsfrequenz haben bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich große Auswirkung auf die Schersteifigkeit. Die Auswirkung der Normalspannung ist bei niedrigen Temperaturen wesentlich kleiner als bei den höheren Temperaturen, unabhängig von der Bitumenemulsionsart und -menge. Bei 50°C , geringer Frequenz und fehlender Normalspannung ist nahezu kein Schichtenverbund vorhanden, weil sowohl die Verklebung als auch die normal-

spannungsabhängige Reibung in der Grenzfläche nicht mehr wirken. Die Belastungsfrequenz hat auch einen signifikanten Einfluss auf die Schersteifigkeit des Schichtenverbundes. Mit zunehmender Frequenz erhöht sich die Schersteifigkeit bei jeder Temperatur, wobei die kleinsten Inkremente bei den zwei extremen Temperaturen von -10 °C und 50 °C beobachtet werden.

Aus den Versuchsergebnissen konnte eine sigmoidale Masterfunktion zur Beschreibung der Schersteifigkeit abgeleitet werden, mit welcher der funktionale Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit, Temperatur, Frequenz und Normalspannung dargestellt werden kann. Die Flächendiagramme der versuchstechnisch ermittelten Werte der Schersteifigkeit haben stets eine sehr gute Übereinstimmung mit den Flächendiagrammen der mit der Masterfunktion berechneten Schersteifigkeiten gezeigt. Diese Masterfunktion wurde in das Finite-Elemente-Programm SAFEM implementiert, um den Einfluss des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung zu untersuchen.

Durch den Vergleich der Flächenfunktionen des Schichtenverbundes zwischen fein geschliffenen Oberflächen und des normal hergestellten Schichtenverbundes konnte eine quantitative Trennung der Effekte von Verklebung, Verzahnung und Reibung erreicht werden. Die gemeinsame Wirkung dieser Effekte bewirkt generell einen stärkeren Schichtenverbund.

Der direkte Vergleich der berechneten Schersteifigkeiten zwischen Laboratorium und Baustelle zeigten eine sehr gute Übereinstimmung bei den zwei geprüften Verbundvarianten. Dadurch konnte die Praxisrelevanz der Herstellung des Schichtenverbundes im Laboratorium überprüft werden.

Es konnte festgestellt werden, dass die optimale Menge der Bitumenemulsion C60BP1-S zur Herstellung des Schichtenverbundes zwischen fein geschliffenen Oberflächen 200 g/m² ist. Bei Anwendung einer Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) ist für die Herstellung des stärksten Schichtenverbundes die größte Menge von 400 g/m² notwendig.

Es wurden auch Versuche zum Schichtenverbund ohne Bitumenemulsion durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die beste Verklebung des Bindemittels bei der Verbundkombination der Asphaltsschichten mit dem höchsten polymermodifizierten

Bindemittelgehalt erreicht wird (Deckschicht auf Deckschicht und Deckschicht auf Binderschicht).

Die stärkste Verzahnung wurde bei der Verbundvariante der heiß-auf-heiß Bauweise und die höchste Reibung bei dem Verbund zwischen groben Oberflächen festgestellt. Generell hat sich gezeigt, dass das Bindemittel, die Korngrößenverteilung und die Einbautechnologie die größte Bedeutung für den Schichtenverbund haben, wenn keine Bitumenemulsion zwischen den Schichten verwendet wird.

Die Untersuchung des Schichtenverbundes bei sauberen, mittelverschmutzten und stark verschmutzten Oberflächen hat gezeigt, dass der Bereich zwischen sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche unkritisch ist und ein guter Schichtenverbund durch die Anwendung von 300 g/m² C60BP1-S erreicht werden kann. Diese Bitumenemulsionsmenge hat sich als optimal erwiesen. Bei starker Verschmutzung der Oberfläche sollte der Haftkleber C40BF1-S mit 400 g/m² angewendet werden. Mit dieser Ausnahme kann die Verwendung der Bitumenemulsion C60BP1-S als optimal angesehen werden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung der Bitumenemulsionsmenge nicht zu einem besseren Schichtenverbund führt. Die Ergebnisse bestätigen außerdem, dass stark verschmutzte Oberflächen eine deutlich negative Auswirkung auf die Qualität des Verbundes haben.

Aus den Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Programm SAFEM unter Anwendung des Verfahrens der rechnerischen Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09 konnten die Auswirkungen des vollständigen, guten („Good Case“), schlechten („Bad Case“), vollständig ermüdeten und fehlenden Schichtenverbund über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren ermittelt werden. Es kann angenommen werden, dass die Funktion für den „Bad Case“ in der Regel mindestens erreicht wird und vorausgesetzt werden kann, wenn eine Verklebung der Schichten z.B. am Bohrkern augenscheinlich zwischen den Schichten vorhanden ist und mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien der ZTV Asphalt Schichtenverbund als ausreichend nachgewiesen wurde. Mit dieser Funktion kann ohne zusätzliche Durchführung eines zyklischen Versuches zur Bestimmung der Schersteifigkeit immer gerechnet werden. Weiterhin könnte diese Funktion für zukünftige Kalibrierrechnungen bei Weiterentwicklungen von RDO Asphalt und RSO

Asphalt angesetzt werden. Wird jedoch am Bohrkern augenscheinlich kein Schichtenverbund festgestellt, oder mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien nach ZTV Asphalt ermittelt, dass kein ausreichender Schichtenverbund vorhanden ist, dann sollte mit der Funktion der Schersteifigkeit des vollständig ermüdeten Schichtenverbundes gerechnet werden.

Auf Nachweis kann auch der gute Bereich angesetzt werden. Weder der sehr gute noch der sehr schlechte Bereich konnte versuchstechnisch nachgewiesen werden. Diese beiden Bereiche können deshalb als nicht bzw. noch nicht praxisrelevant angesehen werden.

Die Abschätzung der Spurrinnengefährdung zur Bewertung des plastischen Verformungsverhaltens wurde anhand der deviatorischen Spannungen in der Lastachse an der Oberfläche und an den Schichtengrenzflächen zwischen Deckschicht und Binderschicht und Binderschicht und Tragschicht mit den verschiedenen aus den Versuchen bestimmten Funktionen für den Schichtenverbund durchgeführt. Bei jeder der untersuchten Temperaturbedingungen führt die Verschlechterung des Schichtenverbundes zu einer deutlich erhöhten Spurrinnengefährdung. Somit hat der Schichtenverbund eine sehr große Bedeutung für die Verformungsbeständigkeit der Asphaltsschichten in den Befestigungen.

In dem vorgestellten Projekt musste festgestellt werden, dass die Ausfallrate der Probekörper teilweise schon bei Einbau bzw. auch während des laufenden Versuches sehr hoch war. In Bezug auf die Probekörperanzahl wird empfohlen, mindestens 50% mehr als die geplante Anzahl an zu prüfenden Probekörpern herzustellen. Die Planung sollte so ausgelegt sein, dass immer eine Dreifachbelegung je Versuchsbedingungen für die Auswertung der Versuche gesichert werden kann.

Inhalt des an der TU Braunschweig bearbeiteten zweiten Teils des Schlussberichtes ist die Entwicklung eines direkten, zyklischen Scherversuches zur Bewertung der Scherermüdung des Schichtenverbundes, die Festlegung der notwendigen Prüfmodalitäten und die Schaffung eines ausreichend großen Bewertungshintergrundes.

Zu diesem Zweck wurden zunächst grundlegende Studien zur Anwendbarkeit des direkten, zyklischen Scherversuches durchgeführt. So konnten die Prüfmodalitäten

identifiziert und festgelegt werden. Danach wurde serienmäßig der Einfluss von verschiedenen Verbundvarianten, Temperaturen und Normalspannungen auf den Scherermüdungswiderstand des Schichtenverbundes systematisch überprüft. Dabei wurde anhand von ca. 600 Einzelversuchen die Gebrauchstemperaturspanne von -10 °C bis +50 °C und ein weiter Bereich der Normalspannung von 0 bis 0,50 MPa abgedeckt.

Die Wahl der Scheramplitude als Eingangsgröße in die Scherermüdungsprüfung ist auf die Prüfvariante abzustimmen (d. h. Verbundvariante, Normalspannung und Prüftemperatur) und ist entscheidend für die Qualität des Prüfergebnisses. Um die für die jeweilige Prüfvariante geeigneten Scheramplituden zu finden und um materialabhängige (Scherermüdungsprüfung im linear-visko-elastischen Bereich) als auch maschinentechnische Vorgaben (optimale Dauer der Scherermüdungsprüfung) zu berücksichtigen, sind Steifigkeitsprüfungen in Form von Amplitudensweeps durchzuführen. Dazu wird die Scheramplitude stufenweise erhöht, mit je 200 Lastwechseln pro Stufe und insgesamt 25 Stufen.

Für die Bestimmung der Scherermüdungsbeständigkeit einer Verbundvariante bei einer Temperatur und einer Normalspannung werden anhand der Schersteifigkeitsversuche drei Scheramplituden festgelegt und bei jeder Scheramplitude mindestens drei Scherermüdungsprüfungen durchgeführt, sodass eine Verbundvariante insgesamt 81-fach belegt ist. Die vorgeschlagene, standardisierte Scherermüdungsprüfung erfolgt bei einer Prüftemperatur von 20 °C ohne Aufbringung einer Normalspannung.

Für die Auswertung und die Interpretation der Scherermüdungsprüfung kann das konventionelle Ermüdungskriterium $N_{f/50}$ herangezogen werden. Sollte die Auswertung von $N_{f/50}$ nicht möglich sein, kann alternativ die Lastwechselzahl $N_{\text{asympt.}}$ bestimmt werden, bei welcher die Schersteifigkeit ihren niedrigsten Wert erreicht und näherungsweise konstant bleibt. Es ist zu vermuten, dass der Schichtenverbund in dieser asymptotischen Phase zerstört und die verbleibende Schersteifigkeit allein auf die Reibung in der Schichtgrenze zurückzuführen ist.

Alle für eine Verbundvariante bestimmten ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Versagen werden als Funktion der aufgetragenen Scheramplitude in einem Diagramm aufgetragen und so die materialspezifische Wöhler-Linie gefunden mit der

Regressionsgleichung $\varepsilon_i = C_1 \cdot N^{C_2}$, mit ε_i als Scheramplitude [mm], N als Lastwechselzahl bei Scherermüdung und C_1 und C_2 als die Parameter der dehnungsabhängigen Scherermüdungsfunktion.

Mit den erhaltenen Scherermüdungsfunktionen können Verbundvarianten vergleichend bewertet und Eingangsparameter für die rechnerische Dimensionierung und die Prognose der Lebensdauer einer Asphaltbefestigung gewonnen werden.

Die Vorgehensweise zur Scherermüdungsprüfung und zur Festlegung der Prüfeinstellungen ist im Bericht in Form einer Prüfanleitung beschrieben.

Im Bericht sind die Ergebnisse aus insgesamt ca. 600 Einzelprüfungen berücksichtigt, womit ein solider Bewertungshintergrund für die Scherermüdungsprüfung geschaffen ist. Bei den Prüfvarianten sind unterschieden: Verbundvarianten mit unterschiedlichen Kombinationen an Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten, Einbau „heiß auf heiß“ und „heiß auf kalt“, Schichtenverbund ohne und mit Emulsion sowie mit polymermodifizierter und nicht modifizierter Emulsion, drei Prüftemperaturen, drei Normalspannungen und drei Scheramplituden. Daraus ergeben sich insgesamt 11 Verbundvarianten.

In der Mehrzahl der an sämtlichen Verbundvarianten durchgeführten Versuche nimmt der Schersteifigkeitsmodul exponentiell ab, d. h. der Kurvenverlauf folgt einer Exponentialfunktion. Für diese Fälle kann der Verlauf der Scherermüdung mit guter Näherung mit einer vierparametrischen Exponentialfunktion mathematisch beschrieben werden. Die Parameter a_0 , a_1 und a_3 der Exponentialfunktion können physikalisch interpretiert werden: a_0 ist die verbleibende Restschersteifigkeit infolge Reibung und Verzahnung, a_1 ist der Startwert der Schersteifigkeit und a_3 ist der Schersteifigkeitsabfall. Der Parameter a_2 ist physikalisch nicht interpretierbar. Er bewirkt in einigen Fällen eine horizontale Verschiebung der Funktion, in der Mehrzahl der Fälle gilt $a_2 = 0$.

Die Scheramplitude bestimmt dominant den gesamten Schersteifigkeitsverlauf, d. h. Startwert, Schersteifigkeitsabfall und Restschersteifigkeit. Hohe Scheramplituden bewirken einen schnellen Abfall der Steifigkeit und eine niedrige Reststeifigkeit. Mit zunehmender Prüftemperatur sinkt der Startwert a_1 . Mit steigender Normalspannung geht eine parallele Verschiebung des Schersteifigkeitsverlaufes einher.

Die erzielte Reihung der Verbundvarianten entspricht den baupraktischen Erfahrungen. Beispielweise ergeben die „heiß auf heiß“ eingebauten Verbundvarianten generell die höchsten Scherermüdungsbeständigkeiten. Die feinkörnigen Verbundvarianten (Deckschicht auf Deckschicht oder Binderschicht) sind vorteilhaft gegenüber den gröberen Verbundvarianten (Binderschicht auf Binderschicht oder Tragschicht). Die polymermodifizierte Emulsion C60BP1-S ist aufgrund der Modifikation und des erhöhten Bindemittelgehaltes vorteilhaft gegenüber der Emulsion C40BF1-S.

Werden die mittels Scherermüdungsprüfung erzielten Ergebnisse jenen aus statischen Abscherversuchen gemäß TP Asphalt-StB Teil 80 gegenübergestellt, so sind die aus den unterschiedlichen Prüfmethoden erzielten Reihungen annähernd gleichwertig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem entwickelten Verfahren zur Scherermüdungsprüfung eine plausible Bewertung des Dauerverhaltens des Schichtenverbundes erfolgen kann.

4 Sachbericht

4.1 Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit – TU Dresden

Die Tätigkeiten am **Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (ISS) der TU Dresden**, wie in dem Plan in Tabelle 6 des Antrages gezeigt, konnten antragsgemäß abgeschlossen werden. Die geplante Zeit war für die im Antrag angegebene erforderliche Probekörperanzahl einschließlich der erforderlichen Versuche zum Ausgleich von fehlerhaften Versuchen angemessen. Insofern wurde die gesamte Zeit ausgeschöpft und die finanziellen Mittel angemessen angesetzt. Der Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals war die wichtigste Voraussetzung für die planmäßige Durchführung der Versuche, die Auswertung, die Analyse der Ergebnisse einschließlich der Durchführung der Prognoserechnungen mit der Methode der Finiten Elemente und das Zusammenstellen des Schlussberichtes. Es wurden keine Geräte mit einem Beschaffungswert über 2.500 € angeschafft und keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

Die Einsatzmonate des wissenschaftlich-technischen Personals zur Bearbeitung der Aufgaben in den einzelnen Arbeitspaketen gemäß der zahlenmäßigen Nachweise **der TU Dresden** für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sind nachfolgend aufgelistet:

- | | | |
|-----|------------------|-----|
| 1) | Arbeitspaket 1: | 2 |
| 2) | Arbeitspaket 2: | 1 |
| 3) | Arbeitspaket 3: | 4 |
| 4) | Arbeitspaket 4: | 1,5 |
| 5) | Arbeitspaket 5: | 4 |
| 6) | Arbeitspaket 7: | 4 |
| 7) | Arbeitspaket 8: | 4,5 |
| 8) | Arbeitspaket 9: | 3 |
| 9) | Arbeitspaket 10: | 2 |
| 10) | Arbeitspaket 11: | 2,4 |

Die geleistete Arbeit war notwendig zur Erreichung der im Antrag formulierten Zielstellung und dementsprechend angemessen. In Tabelle 1 ist das gesamte Versuchsprogramm des ISS der TU Dresden zusammengefasst dargestellt.

AP	Anzahl Platten	Anzahl Pk	Anzahl Bk (Baustelle)	Schichtenkombination	Höhe ADS	Höhe ABS	Höhe ATS	Oberfläche	C60BP1-S (Hersteller 1)	C60BP1-S (Hersteller 2)	C60BP1-S (Baustelle)	C40BF1-S	
					cm	cm	cm		g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	
2	1	4	-	AC16BS-AC22TS	-	5	5	WSV	200	-	-	-	
	1	4	-	AC16BS-AC22TS	-	5	5	WSV	400	-	-	-	
3	8	24	-	SMA11S-AC16BS	6	6	-	WSV	200	-	-	-	
4	4a	3	12	-	AC16BS-AC22TS	-	5	6	geschliffen	200, 300, 400	-	-	-
	4b	3	12	-	SMA11S-AC22TS	4	-	6	fein auf grob	200, 300, 400	-	-	-
5	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
7	7a	18	27	-	SMA11S-AC22TS	4	-	6	geschliffen	200, 300, 400	200, 300, 400	-	200, 300, 400
	7b	1	3	-	SMA11S-SMA11S	8	-	-	fein	-	-	-	-
		1	3	-	SMA11S-AC22TS	4	-	6	normal	-	-	-	-
		1	3	-	AC22TS-AC22TS	-	-	12	grob	-	-	-	-
		1	3	-	SMA11S-AC16BS	4	5	-	heiß auf kalt	-	-	-	-
		1	3	-	SMA11S-AC16BS	4	5	-	heiß auf heiß	-	-	-	-
8	27	81	-	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	200, 300, 400	200, 300, 400	-	200, 300, 400	
10	14	28	-	AC22TS	-	-	6	WSV	-	-	-	-	
	7	28	-	AC16BS	-	4	-	WSV	-	-	-	-	
	7	28	-	SMA11S	4	-	-	WSV	-	-	-	-	

Tabelle 1: Erforderliches Versuchsprogramm für FS 1 (TU Dresden)

Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Anzahl der geprüften Probekörper zu der laut Antrag erforderlichen Probekörperanzahl in den einzelnen Arbeitspaketen. Unerwartete Zerstörung der Probekörper beim Einbau dieser in die Prüfeinrichtung und maschinenbedingten Ausfälle konnten innerhalb der geplanten Zeit ausgeglichen werden, die geplante Mindestanzahl von 3 auswertbaren Versuchen je Versuchsbedingung wurde eingehalten. Der Teilbericht zum Schlussbericht des ISS der TU Dresden war am 15.09.2016 (rechtzeitig vor Projektende 30.11.2016) fertiggestellt.

Arbeitspaket	Beschreibung	Erforderliche Probekörperanzahl	Geprüfte Probekörper
2	Bewertung der Prüftoleranzen	8	8
3	Untersuchungen zu den Mindestschichtdicken der Probekörper	24	43
4	Ermittlung der Versuchspräzision unter Wiederholbedingungen	24	65
5	Untersuchung von im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Bohrkernen	36	55
7a	Einfluss der Verklebung auf die Scherkräfte	27	44
7b	Einfluss der Verzahnung/Reibung auf die Scherkräfte	15	15
8	Untersuchung des Einflusses von verschmutzten Oberflächen	81	144
10	Erarbeitung des Bewertungshintergrundes für die zyklische Scherprüfung (Spaltzug-Schwellversuch)	84	84
Summe		299	458

Tabelle 2: Anzahl der erforderlichen und der geprüften Probekörper

4.2 Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit – TU Braunschweig

Die Einsatzmonate des wissenschaftlich-technischen Personals zur Bearbeitung der Aufgaben in den einzelnen Arbeitspaketen gemäß der zahlenmäßigen Nachweise **der TU Braunschweig** für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sind nachfolgend aufgelistet:

- 1) Arbeitspaket 1: 6
- 2) Arbeitspakete 6, 10 und 11: 22,5

Am **Institut für Straßenwesen ISBS der TU Braunschweig** erfolgte zur Bearbeitung des Vorhabens in einer ersten Phase

- die Beschaffung der benötigten Materialien (3 Asphaltarten),
- die Inbetriebnahme des neu angeschafften Prüfgeräts und
- die Festlegung der zielführenden Versuchsbedingungen,

siehe dazu die Kapitel 1 bis 3 sowie die Teilkapitel 4.1 und 4.2 des Teilberichtes 2. Dies entspricht den AP 1.

In der anschließenden, personal- und zeitintensiven Prüfphase (über 600 Einzelprüfungen bei 11-facher Variation der Schichtenaufbaus bzw. der Bitumenemulsionen) erfolgte

- die Probekörperherstellung,
- die Probenvorbereitung,
- die Durchführung und
- die Auswertung der Prüfungen,

siehe dazu die Kapitel 4.3 und 4.4 im Teilbericht. Dies entspricht dem AP 6 sowie Teilen des AP 10.

In der abschließenden Phase erfolgte

- die Zusammenstellung,
- die Interpretation der Ergebnisse und
- die funktionale Beschreibung der Ergebnisse,

siehe dazu die Kapitel 4.3 bis 4.5 und Kapitel 5 des Teilberichtes. Dies entspricht den AP 10 und 11.

Aus dem Vorhaben wurden keine Geräte finanziert und keine Leistungen an Dritte vergeben.

4.3 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft - aktualisiert

Maßnahme	Ziel	Bemerkung
Information der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses	Präzisere Beurteilung des Schichtenverbundes und dadurch Verbesserung der rechnerischen Dimensionierungsverfahren für Asphaltbefestigungen durch KMU	Abgeschlossen. In insgesamt 5 Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt.
Umbau der Prüfvorrichtung, die für Demonstrationzwecke nach Abschluss des Vorhabens an der TU Dresden verbleibt	Durchführung von Versuchen im Rahmen der Lehre und Forschung an der TU Dresden und der TU Braunschweig	Abgeschlossen. Die Prüfvorrichtung wird an der TU Dresden und der TU Braunschweig für Lehrveranstaltungen und an der TU Dresden für weitere Untersuchungen im Rahmen einer DFG Forschergruppe und eines ZIM Projektes genutzt.
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre an der TU Dresden und TU Braunschweig	Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden bei der Weiterentwicklung von rechnerischen Dimensionierungsverfahren für Asphaltbefestigungen Verwendung finden.	Abgeschlossen. Die Ergebnisse werden im Rahmen der Vorlesungen sowie in Übungen an der TU Dresden und der TU Braunschweig zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen eingebunden.
Vorstellung der Ergebnisse: - in den Arbeitskreisen der FGSV - in anderen Fachverbänden z.B. VSVI	Berücksichtigung der Forschungsergebnisse bei der Neufassung bzw. Aktualisierung des technischen Regelwerkes für den Straßenbau	Teilweise abgeschlossen: Die Ergebnisse wurden in den Arbeitsausschüssen Substanzbewertung (4.4) und Dimensionierung (4.5) FGSV sowie bei

		Weiterbildungsveranstaltungen des VSVI bereits vorgestellt. Eine weitere Vorstellung ist in den AK Prüfverfahren (7.3) und ad-hoc AG Asphaltperformance (7.0.2) der FGSV geplant. Die Einarbeitung in das bundesdeutsche Regelwerk des Straßenbaus hat begonnen.
Wissenschaftliche Publikationen	Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden bei der Weiterentwicklung von rechnerischen Dimensionierungsverfahren für Asphaltbefestigungen Verwendung finden.	Siehe Auflistung nach der Tabelle
Dissertation Isailovic	Qualitative und quantitative Bewertung der Ermüdungseigenschaften von bitumengebundenen Straßenbaustoffen	(vorauss.) Ende 2017
Einarbeitung in EN 12697-48 auf Europäischer Normungsebene	Europäische Normierung	bis 2017

Tabelle 3: Aktualisiertes Transferkonzept

4.4 Auflistung der wissenschaftlichen Publikationen

- **Während der Projektbearbeitung erstellt**

Hristov, B.: Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt. *Poster für den Deutschen Straßen- und Verkehrskongress, Stuttgart 2014*

Falchetto, A. C./ Büchler, S. / Wistuba, M. P. / Wellner, F. / Hristov, B.: Exploratory Investigation on Shear Fatigue Behavior of Asphalt Mixture. *International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Raleigh, 2014*

Wellner, F. / Hristov, B.: Numerically Supported Experimental Determination of the Behavior of the Interlayer Bond in Asphalt Pavement. *Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board (TRB), No. 2506, Washington, D.C. 2015*

Hristov, B.: Praxisrelevante Ansprache des Schichtenverbundes im Labor. *Vortrag Asphalt-Seminar DAI, Willingen, März 2015*

Hristov, B.: Experimental Determination of the Interlayer Bond Shear Stiffness. *8th International Road Conference, Nessebar, Bulgaria, 2015*

- **Nach Projektende erstellt**

Hristov, B.: Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag und Veröffentlichung, 4. Dresdner Asphalttage, 2015*

Isailovic, I.: Zyklische Scherermüdungsprüfung zur Bewertung des Schichtenverbundes. *Vortrag und Veröffentlichung, 4. Dresdner Asphalttage, 2015*

Hristov, B.: Bestimmung der Schersteifigkeit des Schichtenverbunds und seiner Auswirkung auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag, Workshop an der TU Dresden, 2016*

- **Weiterhin geplant**

Hristov, B. / Wellner, F. / Canon Falla, G.: Experimental and Numerically Supported Determination of the Interlayer Bond Shear Stiffness. *Presentation and Full Paper at the 4th International CEW event on Functional Pavement Design, Delft, the Netherlands, 2016*

Hristov, B. / Wellner, F. The Effect of Interlayer Bond on the Service Life of Asphalt Pavements. *Presentation and Full Paper at ACE 2016, Singapore, 2016*

Hristov, B. / Wellner, F. / Reinhard, U.: Ableitung einer Masterfunktion für die Schersteifigkeit des Schichtenverbunds und Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. Veröffentlichung in *Straße und Autobahn*, 2016

Wellner, F. / Hristov, B.: Schichtenverbund - Performanceprüfung und Auswirkung auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag und Beitrag zum Deutschen Straßenkongress*, Bremen. September 2016

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Ein neues Prüfverfahren für die Beurteilung der Scherermüdung des Schichtenverbundes. *Straße und Autobahn*, in Bearbeitung

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Interlayer fatigue behavior under cyclic shear stress. *Construction and building materials*, in Bearbeitung

Isailovic, I.: Qualitative und quantitative Bewertung der Ermüdungseigenschaften von bitumengebundenen Baustoffen (Arbeitstitel), Dissertation, Technische Universität Braunschweig, in Bearbeitung

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Fatigue Investigation of Asphalt Concrete Layer Interfaces. EATA Conference, Zürich, 2017, in Bearbeitung

4.5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten enthalten.

4.5.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Mit den Ergebnissen des abgeschlossenen Projektes ist es nach Kenntnis der bearbeitenden Institutionen erstmals gelungen, auf breiter versuchstechnischer Basis die Wirksamkeit des Schichtenverbundes in Asphaltbefestigungen funktional zu beschreiben und die beiden maßgebenden Zielgrößen – die Schersteifigkeit und die Scherermüdungsbeständigkeit quantitativ mit Hilfe von Funktionen und deren Parameter für

verschiedene Bedingungen (Bitumenemulsionsmengen, -steifigkeiten, Verschmutzungsgrade, Oberflächenbeschaffenheit der Schichten in der Schichtgrenzfläche usw.) zu beschreiben.

Weiterhin ist die Implementierung der Funktionen in ein Finite-Elemente-Programm gelungen. Damit können nun Berechnungen zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen und Prognose zur Dauerhaftigkeit dieser Befestigungen (Rissbildung, Spurrinnenbildung) auf realitätsnaher Grundlage bezüglich des Schichtenverbundes durchgeführt werden. Die erzielten Berechnungsergebnisse sind vollständig plausibel.

Damit steht erstmals ein versuchstechnisch optimiertes und rechnerisches Instrument zur Abschätzung der quantitativen Auswirkung verschiedener Schersteifigkeiten und Scherermüdungsbeständigkeiten auf das Verhalten von Asphaltbefestigungen zur Verfügung.

Mit dem derzeit eingesetzten statischen Abscherversuch ist es nicht möglich, die Verbundwirkung in einer z. B. für die Dimensionierung ausreichenden Präzision zu quantifizieren.

Als Ergebnis des Projekts wird der Straßenbauindustrie im Einzelnen eine wesentliche Weiterentwicklung des Prüfverfahren zur Ermittlung der Schersteifigkeit zur Verfügung gestellt, das eingesetzt werden kann, um Alternativen zur Herstellung der Verbundwirkung vergleichend zu bewerten und zu optimieren. Darüber hinaus wurde ein neues zyklisches Prüfverfahren zur Bestimmung der Scherermüdung erarbeitet und erprobt, so dass auch das Langzeitverhalten unterschiedlicher Verbundsysteme auf der Grundlage anerkannter Analysemethoden (z. B. Auswertung nach konventionellen Ermüdungskriterien; Bildung einer Ermüdungsfunktion in Form einer Wöhler-Kurve) bewertet werden kann.

Durch diese Ergebnisse und die Erarbeitung eines ausreichenden Bewertungshintergrundes ist ein Werkzeug für Ingenieure in der Planung, für Prüflabore und für Bauleitung und Verwaltung geschaffen, welches das bisherige Vorgehen zur Bewertung des Schichtenverbundes in einer Asphaltbefestigung in seiner Aussagekraft bei Weitem übertrifft und vollständig ersetzen kann.

4.5.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Bisherige Überlegungen zur Wirksamkeit des Schichtenverbundes gingen davon aus, dass es zwei Fälle zu berücksichtigen gibt:

Fall 1: es ist vollständiger Schichtenverbund vorhanden, das bedeutet es gibt kein Gleiten in der Schichtgrenze zwischen den eingebauten Asphaltsschichten. Dieser Fall wurde bisher als Bezugsvariante vorausgesetzt.

Fall 2: es ist kein Schichtenverbund vorhanden, das bedeutet, es ist vollständiges Gleiten zwischen den aufeinanderliegenden Schichten anzunehmen.

Dieser Fall wurde daran festgemacht, ob ein Klebeverbund visuell erkennbar ist - gezogene Bohrerkerne fallen bei der Entnahme aus der Befestigung auseinander, und es werden bestimmten Anforderungen bezüglich der Scherkraft nicht erreicht, welche mit Hilfe eines statischen Abscherversuches bestimmt wurden.

Aus den im Projekt durchgeführten Untersuchungen ist folgendes abzuleiten:

- Die Ergebnisse des statischen Abscherversuches können nicht zur Grundlage für die Einschätzung der Wirksamkeit des Schichtenverbundes verwendet werden.
- Die beiden oben beschriebenen extremen Fälle 1 und 2 konnten mit den zyklischen Scherversuchen nicht nachgewiesen werden, sowohl vollständiges Gleiten als auch vollständiges ausschließen des Gleitens wird mit der bisherigen, in der Praxis realisierten Methode zur Herstellung des Schichtenverbundes erreicht.

Aus den oben beschriebenen Fällen ergibt sich jedoch bei bisher durchgeführten Prognoserechnungen eine derart große (rechnerische) Nutzungsdauerdifferenz, welche das Ausfräsen der eingebauten Schichten nahelegt, und in vielen Fällen in der Praxis bei nach bisheriger Methode festgestelltem „fehlenden“ Schichtenverbund realisiert wurde.

Aus den im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen ergibt sich jedoch die (rechnerische) Nutzungsdauerdifferenz bei vorhandenem und nicht vorhandenem (Klebe-)Verbund in einer Größenordnung von lediglich 20 - 25 %, wenn die aus den Versuchen gewonnenen realistischeren Funktionen zur Beschreibung der Schersteifigkeit / -festigkeit angesetzt werden. Damit besteht in Zukunft in der Praxis eine wesentlich sinnvollere Möglichkeit der Ahndung eines mangelhaften Schichtenverbundes als bisher. Dies wird dazu führen, dass insbesondere die für KMU wirtschaftlich schwerwiegenden Entscheidungen (Ausfräsen und Neubau der Schichten) ersetzt werden können durch realitätskonformere Möglichkeiten.

Weiterhin steht nunmehr für Ingenieure in der Planung, für Prüflabore und für Bauleitung und Verwaltung ein Werkzeug zur Verfügung, auf dessen Grundlage Untersuchungen zu bautechnisch besseren Lösungen zur Herstellung des Schichtenverbundes in Praxis und damit zur Verlängerung der Nutzungsdauern von Asphaltbefestigungen möglich ist. Es ist zu erwarten, dass bei Erreichung eines wesentlich besseren Schichtenverbundes als durch die Funktion für den good case beschrieben, eine Verdopplung der Nutzungsdauer (Versagen der Asphalttragschicht durch Ermüdung) bei sonst gleichen Bedingungen möglich sein kann, und die Spurrinnenresistenz im Deck- und Binderschichtbereich verbessert werden kann.

Ein entsprechendes ZIM-Projekt (ZF4064701HF5 und ZF4076901HF5) wurde erfolgreich beantragt und befindet sich bereits in Bearbeitung.

4.6 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

Hristov, B.: Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt. *Poster für den Deutschen Straßen- und Verkehrskongress, Stuttgart 2014*

Falchetto, A. C./ Büchler, S. / Wistuba, M. P. / Wellner, F. / Hristov, B.: Exploratory Investigation on Shear Fatigue Behavior of Asphalt Mixture. *International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Raleigh, 2014*

Wellner, F. / Hristov, B.: Numerically Supported Experimental Determination of the Behavior of the Interlayer Bond in Asphalt Pavement. *Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board (TRB), No. 2506, Washington, D.C. 2015*

Hristov, B.: Praxisrelevante Ansprache des Schichtenverbundes im Labor. *Vortrag Asphalt-Seminar DAI, Willingen, März 2015*

Hristov, B.: Experimental Determination of the Interlayer Bond Shear Stiffness. *8th International Road Conference, Nessebar, Bulgaria, 2015*

Hristov, B.: Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag und Veröffentlichung, 4. Dresdner Asphalttage, 2015*

Isailovic, I.: Zyklische Scherermüdungsprüfung zur Bewertung des Schichtenverbundes. *Vortrag und Veröffentlichung, 4. Dresdner Asphalttage, 2015*

Hristov, B.: Bestimmung der Schersteifigkeit des Schichtenverbunds und seiner Auswirkung auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag, Workshop an der TU Dresden, 2016*

Hristov, B. / Wellner, F. / Canon Falla, G.: Experimental and Numerically Supported Determination of the Interlayer Bond Shear Stiffness. *Presentation and Full Paper at the 4th International CEW event on Functional Pavement Design, Delft, the Netherlands, 2016*

Hristov, B. / Wellner, F. The Effect of Interlayer Bond on the Service Life of Asphalt Pavements. *Presentation and Full Paper at ACE 2016, Singapore, 2016*

Hristov, B. / Wellner, F. / Reinhard, U.: Ableitung einer Masterfunktion für die Schersteifigkeit des Schichtenverbunds und Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Straße und Autobahn, 2016 (geplant)*

Wellner, F. / Hristov, B.: Schichtenverbund - Performanceprüfung und Auswirkung auf die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen. *Vortrag und Beitrag zum Deutschen Straßenkongress, Bremen. September 2016*

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Ein neues Prüfverfahren für die Beurteilung der Scherermüdung des Schichtenverbundes. *Straße und Autobahn, in Bearbeitung*

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Interlayer fatigue behavior under cyclic shear stress. *Construction and building materials, in Bearbeitung*

Isailovic, I.: Qualitative und quantitative Bewertung der Ermüdungseigenschaften von bitumengebundenen Baustoffen (Arbeitstitel), Dissertation, Technische Universität Braunschweig, in Bearbeitung

Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Fatigue Investigation of Asphalt Concrete Layer Interfaces. EATA Conference, Zurich, 2017, in Bearbeitung

4.7 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Das aktualisierte Transferkonzept ist zum großen Teil bereits realisiert worden (siehe Tabelle 3). Die derzeit noch laufenden Arbeiten zur Überführung der Ergebnisse in das Bundesdeutsche Regelwerk des Straßenbaus werden als erfolgversprechend eingeschätzt. Die Technische Prüfvorschrift zur Durchführung des Versuches ist im Entwurf weitestgehend fertiggestellt, so dass Ende 2016 / Anfang 2017 die Abstimmung in den Gremien der FGSV stattfinden kann. Die Ergebnisse werden weiterhin bei der Überarbeitung der Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO Asphalt) sowie in den Entwurf der Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise (RSO Asphalt) eingearbeitet.

Schlussbericht

zum IGF Vorhaben

Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt

Teilbericht Nr. 1 der Forschungsstelle

Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau

Das IGF-Vorhaben Nr. 17634 BG der Forschungsvereinigung Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, im Januar 2016

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner,
Dr.-Ing. Borislav Hristov

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	18
2	Stand der Forschung und des Regelwerkes	20
2.1	Statische Abscherversuche	20
2.2	Prüfverfahren mit zyklischer Scherbelastung	21
2.3	Schlussfolgerungen für die Untersuchung.....	43
3	Untersuchungsmethodik	44
3.1	Probekörperherstellung	44
3.1.1	Beschaffung von Asphaltmischgütern und Bitumenemulsionen (Arbeitspaket 1).....	44
3.1.2	Untersuchte Verbundkombinationen	45
3.1.3	Herstellung der Asphaltplatten mit dem Walzsektor- Verdichtungsgerät	45
3.1.4	Vorbereitung der Probekörper für die zyklischen Versuche.....	48
3.2	Beschreibung der dynamischen Prüfvorrichtung zur Prüfung des Schichtenverbundes	50
3.3	Temperierungsprogramm	52
3.4	Prüfprogramm.....	60
3.5	Bestimmung der Materialkenngrößen von den Asphaltmischgütern	62
3.5.1	Bestimmung des Steifigkeitsmoduls	62
3.5.2	Bestimmung der Ermüdung.....	65
3.6	Untersuchung der Materialeigenschaften des verwendeten Klebers	66
3.7	Modellierung des Probekörpers mit REFEM	69

3.8	Erstellung des FE-Modells.....	70
3.8.1	Materialparameter	73
3.8.2	Kopplung der einzelnen Blöcke	75
4	Auswertung der Versuchsergebnisse	78
4.1	Vorgehensweise für die Bestimmung der Masterfunktionen.....	78
4.2	Bestimmung des funktionalen Zusammenhanges zwischen Schersteifigkeit und Scherkraft aus den Finite-Elemente- Rechnungen mit REFEM.....	88
5	Versuchsergebnisse	93
5.1	Bewertung der Prüftoleranzen der Prüfvorrichtung (Arbeitspaket 2)	93
5.2	Untersuchungen zu den Mindestschichtdicken der Probekörper (Arbeitspaket 3)	98
5.3	Ermittlung der Versuchspräzision unter Wiederholbedingungen (Arbeitspaket 4)	109
5.3.1	Verklebung von fein geschliffenen Oberflächen (4a).....	109
5.3.2	Normal hergestellter Schichtenverbund (4b)	112
5.4	Untersuchung von im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Bohrkernen (Arbeitspaket 5)	118
5.5	Untersuchung des Einflusses der Verzahnung, Reibung und Verklebung auf die Scherkräfte (Arbeitspaket 7)	122
5.5.1	Fein geschliffene Oberflächen (7a).....	122
5.5.2	Schichtenverbund ohne Bitumenemulsion (7b)	126
5.6	Untersuchung des Einflusses von verschmutzten Oberflächen (Arbeitspaket 8).....	131
5.6.1	Saubere (unverschmutzte) Oberfläche.....	132

5.6.2	Mittelverschmutzte Oberfläche	132
5.6.3	Stark verschmutzte Oberfläche	133
5.6.4	Ergebnisse	135
5.7	Berechnungen zur Auswirkung der untersuchten Einflussgrößen auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen (Arbeitspaket 9).....	139
5.8	Erarbeitung des Bewertungshintergrundes für die zyklische Scherprüfung (Arbeitspaket 10).....	150
5.8.1	Bestimmung der Steifigkeitsmodule	150
5.8.2	Ermittlung der Ermüdungsfunktionen	154
6	Zusammenfassung	159
7	Literaturverzeichnis	163

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schichtengrenzfläche bei der Kombination Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht.....	19
Abbildung 2.1:	Darstellung eines Scherkraft–Scherweg–Diagramms nach Stöckert (2002)	20
Abbildung 2.2:	Prüfvorrichtung nach Assi (1981)	22
Abbildung 2.3:	Prüfgerät „Shear Box“ nach Braddy / Brown (1985).....	22
Abbildung 2.4:	Prüfgerät „Shear Box“ nach Sanders (1999)	23
Abbildung 2.5:	Typisches Verhalten des Probekörpers beim Versuch mit dem Prüfgerät „Shear Box“ (de Bondt, 1999).....	23
Abbildung 2.6:	Probekörper und Prüfvorrichtung DST nach Diakhaté u.a. 2008	24
Abbildung 2.7:	Verlauf des Schersteifigkeitsmoduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel nach Diakhaté u.a. (2011)	25
Abbildung 2.8:	Superpave Shear Test (SST) nach Raab (2007).....	25
Abbildung 2.9:	Abhängigkeit zwischen dem komplexen Schermodul und der Belastungsfrequenz ("Superpave Shear Tester", 2008).....	26
Abbildung 2.10:	Probekörper und Prüfvorrichtung SST nach Witzak u.a. (2002).....	26
Abbildung 2.11:	Schematische Darstellung der FST-Prüfvorrichtung nach Harrigan (2002)	27
Abbildung 2.12:	Verbesserte FST-Prüfvorrichtung nach Harrigan (2002).....	28
Abbildung 2.13:	Komplexer Schermodul in Abhängigkeit von der Prüffrequenz ermittelt mit SST und FST bei 40°C nach Harrigan (2002)	28
Abbildung 2.14:	Virginia Tech Prüfvorrichtung nach Donovan u.a. (2000).....	29
Abbildung 2.15:	„Direct Shear Test“ Prüfgerät nach Al-Qadi u.a. (2008)	30
Abbildung 2.16:	GCTS-Prüfvorrichtung SDS-150 (Arizona, USA).....	30
Abbildung 2.17:	Schematische Darstellung der SFT Prüfvorrichtung nach Romanoschi (1999)	31

Abbildung 2.18: UTM Prüfvorrichtung nach Wheat (2007) in der Prüfmaschine (links) und Platzierung der induktiven Wegaufnehmer (rechts).....	32
Abbildung 2.19: Schematische Darstellung des Prüfgerätes (links) und des Probekörpers (rechts) nach de Bondt (1999).....	33
Abbildung 2.20: Position der induktiven Wegaufnehmer, die an dem Probekörper befestigt sind (de Bondt, 1999).....	33
Abbildung 2.21: Effekt des relativen Belastungsgrades auf die Lebensdauer des Probekörpers (de Bondt 1999).....	33
Abbildung 2.22: FEM-Model des Versuches und verformter Probekörper (überhöht) nach de Bondt (1999)	34
Abbildung 2.23: Prüfvorrichtung nach Wellner / Ascher (2007).....	35
Abbildung 2.24: Vorbereitungsvorrichtung zum Einkleben der Probekörper in den 4 Halbschalen nach Ascher (2007)	35
Abbildung 2.25: Ablauf des Prüfprogramms nach Ascher (2007).....	36
Abbildung 2.26: Schematische Darstellung des Zug-Druck Verhaltens von zweischichtigen Probekörpern für den Fall einer Biegung zwischen zwei parallelen Platten.....	38
Abbildung 2.27: Prüfgerät CAST (links) und Dimensionen (rechts) nach Sokolov u.a. (2005) und Kim u.a. (2011).....	38
Abbildung 2.28: FE-Modell nach Sokolov u.a. (2005) und Kim u.a. (2011).....	39
Abbildung 2.29: Spannungen bei vollem Verbund (links) und bei fehlendem Verbund (rechts) nach Kim u.a. (2011).....	39
Abbildung 2.30: Vergleich zwischen den Masterkurven von den drei Trennschichten nach Kim u.a. (2011).....	40
Abbildung 2.31: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Biegung bei 1 Hz (links) und 8 Hz (rechts) nach Kim u.a. (2011).....	40
Abbildung 2.32: Schematische Darstellung des Versuches (links) und 3D-Modell in ABAQUS (rechts) nach Coleri u.a. (2011).....	40
Abbildung 2.33: Vergleich zwischen den labortechnisch gemessenen und mit dem 3D numerischem Modell prognostizierten Werten des Schermoduls (links - dicht gestuftes polymermodifiziertes Mischgut, rechts - gummi-modifiziertes Mischgut mit Ausfallkörnung).....	41

Abbildung 2.34: Darstellung der Probekonfiguration nach Mo u.a. (2006)	41
Abbildung 2.35: Zusammenhang zwischen Schadensrate und aufgebrachte Spannung bei statischen und zyklischen Versuchen nach Mo u.a. (2006)	42
Abbildung 2.36: Prüfvorrichtung Sapienza Dynamic Shear Testing Machine nach D'Andrea u.a. (2014)	43
Abbildung 3.1: Walzsektor-Verdichtungsgerät zu Herstellung von Asphaltplatten mit Abmessungen 320 x 260 mm an der TU Dresden	46
Abbildung 3.2: Gebohrte Platte und Asphaltprobekörper	46
Abbildung 3.3: Einkleben des Asphaltprobekörpers in der Klebevorrichtung	49
Abbildung 3.4: Modell der Klebevorrichtung (Quelle: Wille)	49
Abbildung 3.5: Prüfmaschine SHM 63 mit Temperierkammer der TU Dresden	51
Abbildung 3.6: Vorrichtung für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes ohne und mit eingebautem Probekörper	51
Abbildung 3.7: Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung	52
Abbildung 3.8: Schema von dem zweischichtigen Probekörper mit Bohrloch und eingesetzten Temperatursensor (links) und Vorderansicht des Bohrloches (rechts)	53
Abbildung 3.9: Temperaturmessung im Probekörper (links – offene Prüfvorrichtung, rechts – geschlossene Prüfvorrichtung)	54
Abbildung 3.10: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch ohne Temperaturübersteuerung (Temperiertest Nr. 1)	55
Abbildung 3.11: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 30-minütigen Temperaturübersteuerung um $ 10^{\circ}\text{C} $ (Temperiertest Nr. 2)	56
Abbildung 3.12: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 60-minütigen Temperaturübersteuerung um $ 10^{\circ}\text{C} $ (Temperiertest Nr. 3)	57

Abbildung 3.13: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 45-minütigen Temperaturübersteuerung um $ 10^{\circ}\text{C} $ (Temperiertest Nr. 4)	58
Abbildung 3.14: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit variablen Übersteuerungs- und Temperierungsdauer (Temperiertest Nr. 5)	59
Abbildung 3.15: Prüfprogramm für die zyklischen Schersteifigkeitsversuche.....	61
Abbildung 3.16: Horizontaler Spannungsverlauf im zylindrischen Probekörper beim Spaltzug-Schwellversuch nach AL Sp-Asphalt 09	62
Abbildung 3.17: Rissbildung im Asphaltprobekörper nach dem Ermüdungsversuch (Asphaltdeckschicht SMA 11 S)	63
Abbildung 3.18: Formzylinder und Formgrundplatte nach DIN EN 12697-30 (2004)	67
Abbildung 3.19: Formzylinder mit überzogener Innenwand (links) und geglättete Oberfläche des Epoxidharzklebergemisches (rechts)	68
Abbildung 3.20: Auspressvorrichtung im Labor der TU Dresden	68
Abbildung 3.21: Fertiger Probekörper aus 2-komponenten-Epoxidharzkleber Sikadur [®] -30	68
Abbildung 3.22: Steifigkeitsmodul des in den Versuchen verwendeten Epoxidharzklebers Sikadur [®] -30 in Abhängigkeit von der Temperatur.....	69
Abbildung 3.23: Für die Käseecke verwendeter Quader	72
Abbildung 3.24: Element Kreisplatte für die Stahlschalen.....	72
Abbildung 3.25: Blöcke im Modell	73
Abbildung 3.26: Materialparameter des Asphaltprobekörpers und der Stahlschalen und -scheiben bei $T = -10^{\circ}\text{C}$	75
Abbildung 3.27: Materialparameter der Interface-Elemente bei $T = -10^{\circ}\text{C}$	75
Abbildung 3.28: Interface-Elemente im Modell.....	75
Abbildung 3.29: An der Schichtengrenzfläche wirkende Spannungen.....	77
Abbildung 3.30: Zuordnung der Elemente und der Knoten im Interface.....	77

Abbildung 4.1:	Verlauf der Schersteifigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung.....	80
Abbildung 4.2:	Beispiele einer konstant bleibenden Schersteifigkeit bei -10°C und 10°C	80
Abbildung 4.3:	Beispiel einer konstant bleibenden Schersteifigkeit bei -10°C und 10°C	81
Abbildung 4.4:	Beispiel einer Schersteifigkeit, die durch die Normalspannung nicht beeinflusst wird.....	81
Abbildung 4.5:	Beispiel eines gebrochenen Schichtenverbundes.....	82
Abbildung 4.6:	Funktionale Abhängigkeit zwischen experimentell bestimmter Schersteifigkeit und Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Parameter zur Bestimmung der Parameter a und b (C60BP1-S, 400 g/m ²).....	84
Abbildung 4.7:	Funktionale Abhängigkeit der Parameter a und b von der Normalspannung.....	85
Abbildung 4.8:	Flächenplot aus den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeitswerten (links) und mit Gleichung 24 bestimmtes Flächendiagramm (rechts)	86
Abbildung 4.9:	Vergleich zwischen der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeit und der nach Gleichung 24 berechneten Schersteifigkeit.....	86
Abbildung 4.10:	Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für alle vier untersuchten maximalen Scherwege bei -10°C	89
Abbildung 4.11:	Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für alle vier untersuchten maximalen Scherwege bei 50°C.....	89
Abbildung 4.12:	Horizontale Verschiebungen bei fehlendem (links) und bei vollem Verbund (rechts) bei -10°C.....	90
Abbildung 4.13:	Verteilung der Spannungen σ_Y bei T = -10°C, $s_w = 0,11$ mm, $G_s = 100$ MPa/mm (links) und 100000 MPa/mm (rechts)	90
Abbildung 4.14:	Verteilung der Scherspannungen τ_{zy} bei T = -10°C, $s_w = 0,11$ mm, $G_s = 100$ MPa/mm (links) und 100000 MPa/mm (rechts).....	91

Abbildung 4.15:	Flächenfunktionen bei -10°C, 10°C, 30°C und 50°C	92
Abbildung 5.1:	Verbesserte Präzision der Regelung bei der neu entwickelten Prüfvorrichtung	93
Abbildung 5.2:	Anordnung der Wegsensoren zur Überprüfung der Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung	94
Abbildung 5.3:	Wiederholung der statisch aufgebrachten Scherlast von 5000 N bis -5000 N zur Bestimmung der Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung.....	95
Abbildung 5.4:	Verlauf der statisch aufgebrachten Scherkraft eines Zyklus.....	95
Abbildung 5.5:	Präzisionslagern aus Edelstahl zur Vermeidung der vertikalen Bewegung des horizontal beweglichen Trägers.....	96
Abbildung 5.6:	Vertikale Abweichungen des vertikal beweglichen Trägers B (Sensor 1) und des horizontal beweglichen Trägers A (Sensor 2) beim Wechsel der Scherlast von 5000 N bis -5000 N	96
Abbildung 5.7:	Aufgezeichnete Schwingung der Grundplatte der Prüfvorrichtung	97
Abbildung 5.8:	Einkleben eines 80 mm langen zweischichtigen Asphaltprobekörpers und zwei Stahldummies.....	99
Abbildung 5.9:	Einkleben eines 30 mm langen zweischichtigen Asphaltprobekörpers und zwei Stahldummies.....	99
Abbildung 5.10:	FE-Modelle der Konfigurationen bei den unterschiedlichen Schichtdicken mit Stahldummies.....	100
Abbildung 5.11:	Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für der vier Schichtdicken bei -10°C und 50°C	101
Abbildung 5.12:	Verzerrungen V_z [μm] bei $G_s = 100\,000$ MPa/mm bei -10°C (a) und 50°C (b).....	102
Abbildung 5.13:	Verlauf der Verzerrungen V_z bei -10°C (links) und 50°C (rechts) für alle vier Schichtdicken.....	103
Abbildung 5.14:	Verlauf der Verzerrungen bei einer Schichtdicke von 15 mm, $G_s = 100\,000$ MPa/mm, $sw = 0,03$ mm bei -10°C (links) und 50°C (rechts) -10 0,03 100 000.....	103

Abbildung 5.15:	Dehnungen ε_{ZY} bei $G_S = 100\ 000$ MPa/mm, $T = -10^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm (links) und 30 mm (rechts)	104
Abbildung 5.16:	Dehnungen ε_{ZY} bei $G_S = 100\ 000$ MPa/mm, $T = 50^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm (links) und 30 mm (rechts)	105
Abbildung 5.17:	Dehnungen ε_{ZY} bei $G_S = 100$ MPa/mm, $T = -10^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm.....	105
Abbildung 5.18:	Dehnungen ε_{ZY} bei $G_S = 100$ MPa/mm, $T = 50^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm.....	105
Abbildung 5.19:	Dehnungen ε_{ZY} bei fehlendem (links) und vollem (rechts) Verbund, $T = -10^\circ\text{C}$	106
Abbildung 5.20:	Dehnungen ε_{ZY} bei fehlendem (links) und vollem (rechts) Verbund, $T = 50^\circ\text{C}$	106
Abbildung 5.21:	Scherspannungen τ_{ZY} bei vollem (links) und bei fehlendem Verbund (rechts)	106
Abbildung 5.22:	Schersteifigkeitsverläufe für die vier untersuchten Schichtdicken bei -10°C	107
Abbildung 5.23:	Schersteifigkeitsverläufe für die vier untersuchten Schichtdicken bei 50°C	108
Abbildung 5.24:	Geschliffene Oberfläche der unteren Asphaltsschicht mit aufgetragener Bitumenemulsion.....	110
Abbildung 5.25:	Speziell angefertigte Form zur Herstellung des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen. Links – Teile, rechts – geschlossene Form	111
Abbildung 5.26:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen bei $200\ \text{g/m}^2$, $300\ \text{g/m}^2$ und $400\ \text{g/m}^2$	111
Abbildung 5.27:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen bei $200\ \text{g/m}^2$, $300\ \text{g/m}^2$ und $400\ \text{g/m}^2$	112
Abbildung 5.28:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei $200\ \text{g/m}^2$, $300\ \text{g/m}^2$ und $400\ \text{g/m}^2$	113

Abbildung 5.29: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei 200 g/m ² , 300 g/m ² und 400 g/m ²	113
Abbildung 5.30: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei 200 g/m ² , 300 g/m ² und 400 g/m ² bei Wiederholung der tiefsten Temperatur	115
Abbildung 5.31: Vergleich der zwei optimalen Bitumenemulsionsmengen von 200 g/m ² bei reiner Verklebung zwischen den Asphaltsschichten und bei normal hergestelltem Schichtenverbund.....	116
Abbildung 5.32: Vergleich der optimalen Schersteifigkeiten bei reiner Verklebung und bei dem kombinierten Effekt aus Verklebung, Verzahnung und Reibung (200 g/m ² C60 BP1-S, $\sigma_N = 0$ MPa und $f = 10$ Hz)	117
Abbildung 5.33: Vergleich der optimalen Schersteifigkeiten bei reiner Verklebung und bei dem kombinierten Effekt aus Verklebung, Verzahnung und Reibung (200 g/m ² C60 BP1-S, $\sigma_N = 0,9$ MPa und $f = 10$ Hz)	117
Abbildung 5.34: Bohrlöcher	118
Abbildung 5.35: Vergleich zwischen den Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten für die Kombination ADS-ABS zwischen Baustelle und Laboratorium.....	119
Abbildung 5.36: Vergleich zwischen den Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten für die Kombination ABS-ATS zwischen Baustelle und Laboratorium	120
Abbildung 5.37: Vergleich zwischen den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für die Kombination ADS-ABS zwischen Baustelle und Laboratorium.....	120
Abbildung 5.38: Vergleich zwischen den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für die Kombination ABS-ATS zwischen Baustelle und Laboratorium.....	121
Abbildung 5.39: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 1 auf fein geschliffenen Oberflächen.....	123

Abbildung 5.40:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 1 auf fein geschliffenen Oberflächen	123
Abbildung 5.41:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 2 auf fein geschliffenen Oberflächen.....	124
Abbildung 5.42:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 2 auf fein geschliffenen Oberflächen	124
Abbildung 5.43:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) auf fein geschliffenen Oberflächen.....	125
Abbildung 5.44:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) auf fein geschliffenen Oberflächen	126
Abbildung 5.45:	Anteile von Verklebung (orange), Verzahnung (blau) und Reibung (grau) für Verbundvariante (3) bei den vier Normalspannungen	127
Abbildung 5.46:	Anteile von Verklebung (orange), Verzahnung (blau) und Reibung (grau) für Verbundvariante (4) bei den vier Normalspannungen	128
Abbildung 5.47:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (1), (2) und (3) ohne Anwendung von Bitumenemulsion	128
Abbildung 5.48:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (1), (2) und (3) ohne Anwendung von Bitumenemulsion	129
Abbildung 5.49:	Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (4) und (5) ohne Anwendung von Bitumenemulsion	130
Abbildung 5.50:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (4) und (5) ohne Anwendung von Bitumenemulsion	130
Abbildung 5.51:	Beispiel einer mittel verschmutzten Oberfläche. a – 15 g/Platte aufgestreuter Schluff, b – mit 10 g Wasser	

	angefeuchtete Oberfläche, c und d – mittelverschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (300 g/m ²).....	133
Abbildung 5.52:	Beispiel einer stark verschmutzten Oberfläche. a – 15 g/Platte aufgestreuter Schluff, b – mit 10 g Wasser angefeuchtete Oberfläche, c und d – mittelverschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (300 g/m ²).....	134
Abbildung 5.53:	Stark verschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (a - 200 g/m ² , b - 300 g/m ² , c - 400 g/m ²).....	134
Abbildung 5.54:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei sauberer (a), mittelverschmutzter (b) und stark verschmutzter Oberfläche (c) mit 300 g/m ² Bitumenemulsionsmenge	136
Abbildung 5.55:	Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei stark verschmutzter Oberfläche und 400 g/m ² Bitumenemulsionsmenge	136
Abbildung 5.56:	Vergleich der Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten zwischen den drei Bitumenemulsionsmengen bei sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche.....	137
Abbildung 5.57:	Vergleich der experimentell ermittelten Schersteifigkeiten bei sauberer, mittel und stark verschmutzter Oberfläche und 300 g/m ² Bitumenemulsionsmenge.....	137
Abbildung 5.58:	Vergleich der experimentell ermittelten Schersteifigkeiten bei sauberer, mittel und stark verschmutzter Oberfläche und 400 g/m ² Bitumenemulsionsmenge.....	138
Abbildung 5.59:	Ermüdungsfunktionen für den Schichtenverbund.....	140
Abbildung 5.60:	Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C, 20°C und 30°C bei fehlender Normalspannung.....	141
Abbildung 5.61:	Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C, 20°C und 30°C bei einer Normalspannung von 0,25 MPa.....	142

Abbildung 5.62: Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C und 20°C bei einer Normalspannung von 0,50 MPa	142
Abbildung 5.63: Zusammenhang zwischen verbleibender Schersteifigkeit bei vollständig ermüdetem Schichtenverbund und Normalspannung	143
Abbildung 5.64: Straßenbefestigungsaufbau für die Belastungsklassen Bk100 und Bk32 nach RStO 12.....	145
Abbildung 5.66: Verlauf des Ermüdungsstatus bei unterschiedlichen Schichtenverbund-funktionen über die gesamte Nutzungsdauer bei Bk100	145
Abbildung 5.67: Verlauf des Ermüdungsstatus bei unterschiedlichen Schichtenverbundfunktionen über die gesamte Nutzungsdauer bei Bk32	146
Abbildung 5.68: Qualitätsbereiche des Schichtenverbundes für Neubau und Erhaltung (Bk100)	146
Abbildung 5.69: Deviatorspannungen in der Lastachse an der Ober- und Unterseite der Deckschicht und der Binderschicht bei 47,5°C und 32,5°C	149
Abbildung 5.70: Abhängigkeit des Phasenwinkels δ vom absoluten E-Modul zur Abschätzung des Grenzmoduls $ E _{\max}$ für SMA 11 S	150
Abbildung 5.71: Masterfunktion des absoluten E-Moduls für SMA 11 S in Abhängigkeit von der korrigierten Frequenz (f_{kor})	151
Abbildung 5.72: Masterfunktionen der drei Materialien	151
Abbildung 5.73: Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für SMA 11 S, AC 16 B S, AC 22 T S	152
Abbildung 5.74: Vergleich der absoluten E-Moduln der drei Asphaltmaterialien bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und vier Temperaturen.....	153
Abbildung 5.75: Vergleich der absoluten E-Moduln des Asphaltdeckschichtmaterials SMA 11 S bei vier Belastungsfrequenzen und vier Temperaturen.....	154
Abbildung 5.76: Bestimmung der Lastwechselzahl N_{Makro} bis zum Kriterium „Makroriss“ (Probekörper Nr. 7 AC 22 T S, siehe Anhang 10)	155

Abbildung 5.77: Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschicht,
Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht bei einer
Belastungsfrequenz von 10 Hz und $T = 20^{\circ}\text{C}$ 156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kombinationen und Anzahl der Probekörper in der Untersuchung von Wheat (2007).....	31
Tabelle 2.2:	Experimentelles Versuchsprogramm mit dem Prüfgerät CAST nach Kim u.a. (2011).....	38
Tabelle 3.1:	Beschaffte Asphaltmischgüter zur Herstellung der Probekörper im Labor.....	44
Tabelle 3.2:	Bitumenemulsionsarten und -mengen zur Herstellung des Schichtenverbundes	47
Tabelle 3.3:	Anzahl der erforderlichen und der geprüften Probekörper	48
Tabelle 3.4:	Erforderliches Versuchsprogramm für FS 1	48
Tabelle 3.5:	Zusammenfassung der 5 Temperierungsprogramme	54
Tabelle 3.6:	Temperierungsprogramm für die Schersteifigkeitsversuche in den Arbeitspakete 2 und 4	59
Tabelle 3.7:	Temperierungsprogramm für die Schersteifigkeitsversuche in den Arbeitspakete 5 bis 8.....	60
Tabelle 3.8:	Zeitlicher Ablauf des Prüfprogramms für Arbeitspakete 5 bis 8.....	62
Tabelle 4.1:	Parameter a und b für die Grundgesamtheit aller Versuche	85
Tabelle 5.1:	Werte der Deviatorspannungen in der Lastachse an der Ober- und Unterseite der Deckschicht und der Binderschicht bei 47,5°C und 32,5°C	149
Tabelle 5.2:	Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaß der Masterfunktionen für die drei verwendeten Asphaltmischgüter.....	151
Tabelle 5.3:	Ermittelte Regressionsparameter für den Zusammenhang zwischen E-Modul und Temperatur.....	153
Tabelle 5.4:	Zusammenstellung der Regressionsparameter für die Ermüdungsfunktionen für SMA 11 S, AC 16 B S, AC 22 T S.....	156

1 Einleitung und Zielstellung

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit des Institutes für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden (ISS) und des Institutes für Straßenwesen der TU Braunschweig (ISBS) durchgeführt. Der erste Teil des Abschlussberichtes beinhaltet das Teilprojekt, welches durch das ISS bearbeitet wurde und der 2 Teil des Forschungsberichtes beinhaltet das durch das ISBS bearbeitete Teilprojekt.

In der Regel besteht das Asphaltpaket einer Straße aus Asphaltdeck-, Asphaltbinde- und Asphalttragschicht. Die Schichten des Asphaltpaketes werden sowohl in vertikaler Richtung durch Radlasten als auch in horizontaler Richtung durch Brems- und Beschleunigungslasten belastet. Zusätzlich wirken witterungsbedingte Beanspruchungen infolge Temperaturänderung und Durchfeuchtung. Bei dem Verbund der Asphalt-schichten entstehen einbaubedingt Übergangsbereiche (Schichtengrenzflächen) zwischen den Schichten bzw. Lagen über die gesamte Länge und Breite der Befestigung (Abbildung 1.1). Der Schichtenverbund soll als vollflächige Verbindung zwischen den einzelnen Schichten bzw. Lagen der Verkehrsflächenbefestigung hergestellt werden. Er soll die vollständige Übertragung von Scher- und Normalspannungen zwischen den Asphalt-schichten ermöglichen und wirkt über die Verzahnung der Gesteinskörner in der Schichtengrenzfläche, die Reibung zwischen den Gesteinskörnern und die Verklebung mit Bitumen. Bei der Übertragung von Scherspannungen über die Schichtengrenzfläche wirken diese drei Faktoren gleichzeitig mit unterschiedlichen Anteilen in Abhängigkeit von den eingesetzten Asphaltmischgütern, der Temperatur, dem Normaldruck sowie der Bitumenemulsionsart und -menge.

Die entstehenden, teilweise extremen Schubbeanspruchungen an den Schichtengrenzflächen müssen durch bautechnische Maßnahmen so aufgenommen werden können, dass horizontales gegeneinander Gleiten der Schichtgrenzflächen weitestgehend ausgeschlossen wird. Fehlender Schichtenverbund verändert den dreidimensionalen Beanspruchungszustand in der gesamten Befestigung so, dass es zu einer Reduktion bzw. zu einem Verlust der Tragfähigkeit, vorzeitiger Materialermüdung, ggf. zum Lösen des Verbundes mit der Folge der Entstehung von Schäden und so zu einer deutlich kürzeren Nutzungsdauer der Gesamtbefestigung kommen kann. Damit alle Schichten der Asphaltbefestigung bei der Lastabtragung als Einheit wirken können und an der Schichtengrenzfläche keine bzw. nur sehr geringe Relativverschiebungen zwischen den Schichten stattfinden, wird die Herstellung des bestmöglichen Schichtenverbundes stets angestrebt.



Abbildung 1.1: Schichtengrenzfläche bei der Kombination Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht

Mit Hilfe des zyklischen Belastungsversuches zur Prüfung des Schichtenverbunds mit der neu entwickelten Prüfvorrichtung soll die praxisgerechte Beschreibung und Beurteilung der Verbundwirkung in Asphaltbefestigungen zur Schaffung eines umfassenden Bewertungshintergrundes weiterentwickelt und die Kenntnisse zu den Einflüssen auf den Schichtenverbund erweitert werden.

Dabei sollen alle auf den Schichtenverbund wirkenden Einflussparameter (Temperatur, Belastungsfrequenz, Normalspannung) in dem Prüfprogramm berücksichtigt werden. Die Schersteifigkeiten (TU Dresden) und Scherfestigkeiten (TU Braunschweig) sollen bei unterschiedlicher Beschaffenheit und unterschiedlichem Verschmutzungsgrad der Oberfläche, bei Verwendung unterschiedlicher Asphaltgemische, Bitumenemulsionsarten sowie -mengen ermittelt werden. Es sollen zusätzlich Kenntnisse über die Vergleichbarkeit der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Probekörpern gewonnen werden.

Hauptziel dieser Arbeit ist es, die funktionalen Zusammenhänge zwischen Schersteifigkeit, Temperatur, Belastungsfrequenz und Normalspannung zu bestimmen. Mit der Methode der finiten Elemente und dem Verfahren zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen nach den RDO Asphalt 09 sollen Rückschlüsse auf die Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Straßenbefestigung und auf die Auswahl von optimalen Bitumenemulsionsarten und -mengen gezogen werden. Anhand von Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente soll auf der Grundlage der experimentell gewonnenen Ergebnisse die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen prognostiziert werden.

2 Stand der Forschung und des Regelwerkes

2.1 Statische Abscherversuche

Der Bau von Prüfgeräten zur Untersuchung des Schichtenverbundes in Asphaltbefestigungen leitet sich ursprünglich aus Schertests der Bodenmechanik ab. Ende der 70er Jahren wurden in Deutschland und in den USA die ersten Geräte zur Prüfung des Schichtenverbundes durch Abscheren für den Straßenbau hergestellt (Uzan u.a. 1978 und Leutner, 1979). Diese weit verbreiteten statischen Abscherversuche zur qualitativen Untersuchung des Schichtenverbundes stellen immer noch den Stand der Wissenschaft und Technik in vielen Ländern dar. Das Prinzip aller statischen Abscherversuche ist gleich: die eine Schicht des Asphaltprobekörpers wird fixiert und die andere Schicht wird an der Schichtengrenzfläche über Scherbacken weitestgehend momentfrei mit konstantem Vorschub bis zum Bruch abgeschert. Dabei werden die maximale Scherkraft und der zugehörige Scherweg bis zum Bruch ermittelt. Der Unterschied zwischen allen statischen Versuchen besteht in den Prüfparametern Prüftemperatur, Vorschubgeschwindigkeit, Probekörperform und -abmessungen und Abstand zwischen den Scherbacken

Die Versuchsergebnisse werden am häufigsten als Kraft–Weg–Diagramme dargestellt (Abbildung 2.1).

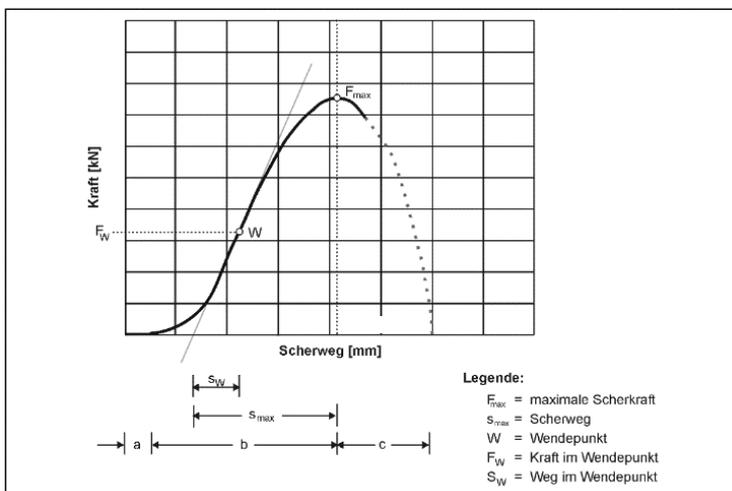


Abbildung 2.1: Darstellung eines Scherkraft–Scherweg–Diagramms nach Stöckert (2002)

In Deutschland basiert die Beurteilung des erreichten Schichtenverbundes einer Asphaltbefestigung zurzeit auf den Ergebnissen des statischen Abscherversuches nach TP Asphalt-StB Teil 80 (FGSV, 2007). Das Prüfverfahren für Asphalt Schichten oder -lagen ab 20 mm Schichtdicke wurde durch Leutner entwickelt. Die Verbundwirkung wird an Bohrkernen mit einem Durchmesser von (150 ± 2) mm bestimmt, die aus der Straße entnommen worden sind. Die zur Abscherung notwendige Kraft,

welche als Kriterium für die Beurteilung des herstellungstechnisch erzielten Schichtenverbunds herangezogen wird, wird bei einer Vorschubgeschwindigkeit von (50 ± 2) mm/min und einer Prüftemperatur von 20°C ermittelt. Aus dem Kraft-Weg-Diagramm wird die Höchstkraft als maximale Scherkraft F_{\max} gerundet auf 0,1 kN entnommen und als Versuchsergebnis zusammen mit dem Scherweg angegeben.

Mit den meisten statischen Abschergeräten wird der Versuch ohne gleichzeitige Eintragung einer Normalspannung durchgeführt (Leutner 1979, Uzan u.a. 1978, Raab / Partl 1999, Witczak u.a. 2002, Sholar u.a. 2004, Canestrari / Santagata 2005, West u.a., 2005, Mohammad u.a. 2005, Miró u.a. 2003, Mohammad u.a. 2012). Nur wenige Prüfvorrichtungen wurden so erweitert bzw. neu konstruiert, dass die zwischen den Asphaltsschichten auftretenden Normalspannungen zusätzlich zur Scherbeanspruchung aufgebracht werden können (Uzan u.a. 1978, Chowdhury u.a. 2002, Mohammad u.a. 2009, Raab u.a. 1999, Millien u.a. 1996, West u.a. 2005, Al-Qadi u.a. 2008, Romanoschi, 1999, Mohammad u.a. 2012 - NCHRP 712, D'Andrea 2013 - SHSTM).

Gegenwärtig werden weltweit viele unterschiedliche Geräte für statische Abscherversuche verwendet. Die in der Straßenbefestigung herrschenden Beanspruchungen infolge einer wiederholten Belastung können mit den statischen Prüfverfahren jedoch nicht simuliert werden. Somit sind die statischen Abscherversuche für die Ableitung von Materialparametern, welche für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen zur Berücksichtigung der Verbundwirkung sowie für eine Prognose der Nutzungsdauer der Straßenbefestigung notwendig sind, nicht geeignet.

Die Prüfgeräte und –parameter sowie die Prüfabläufe für die statischen Abscherversuche sind in den Forschungsarbeiten von Stöckert (2002), Wheat (2007), Tayebali u.a. (2007), Wellner / Ascher (2007), Al-Qadi u.a. (2008), Kim u.a. (2011) und Mohammad u.a. (2012) ausführlich aufgelistet und ausreichend beschrieben. Da in diesem Forschungsprojekt eine neuentwickelte Prüfvorrichtung für zyklische Schersteifigkeitsprüfung verwendet wird, sind die statischen Versuche für die Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung und werden in der Literaturanalyse nicht weiter beschrieben.

2.2 Prüfverfahren mit zyklischer Scherbelastung

Zur realitätsnäheren Prüfung des Schichtenverbundes an Asphaltprobekörpern wurden Prüfgeräte entwickelt, mit denen es möglich ist, über zyklische Lasten Scherbeanspruchungen in die Probekörper unter Zusammenwirkung mit Normallasten zu erzeugen. Manche Geräte können sowohl für statische als auch dynamische (zyklische) Versuche verwendet werden (z.B. Romanoschi / Metcalf 2002, De

Bondt 1999, Crispino u.a. 1997, Harrigan 1994, Sanders u.a. 1999, Wellner / Ascher 2007). Diese Prüfvorrichtungen unterscheiden sich hinsichtlich des Prüfablaufs, der Belastungsart, der Prüftemperaturen und der Normalspannungen.

Bereits im Jahr 1981 entwickelte Assi am LCPC das Gerät in Abbildung 2.2 für das einfache Abscheren. Die prismatischen Probekörper haben eine Höhe von 112 mm und eine Breite von 56 mm bzw. 42 mm. Es ist möglich, entweder eine statische oder eine dynamische Prüfung durchzuführen. Leider fehlen in der Veröffentlichung Angaben zu Frequenz, Temperatur, Normalkraft und Scherkraft.

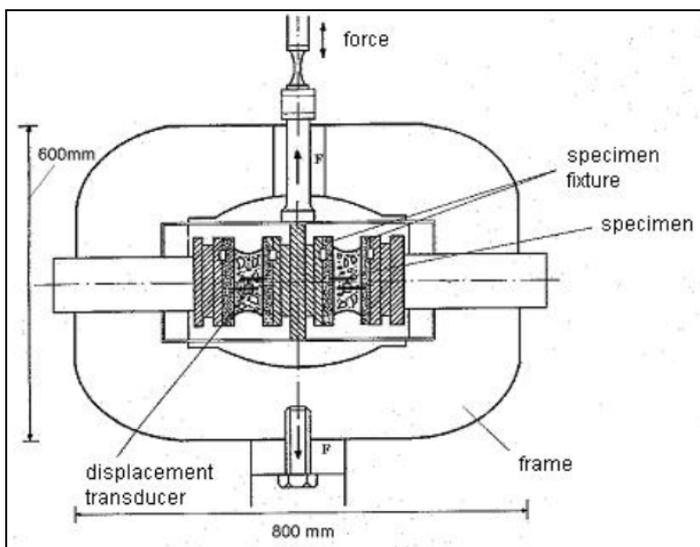


Abbildung 2.2: Prüfvorrichtung nach Assi (1981)

Im Jahre 1985 konstruierten Braddy und Brown an der Universität in Nottigham die in Abbildung 2.3 dargestellte dynamische Prüfvorrichtung - "Shear Box" zur Prüfung des Schichtenverbundes bei prismatischen Probekörpern mit Abmessungen 320 mm x 200 mm x 120 mm.

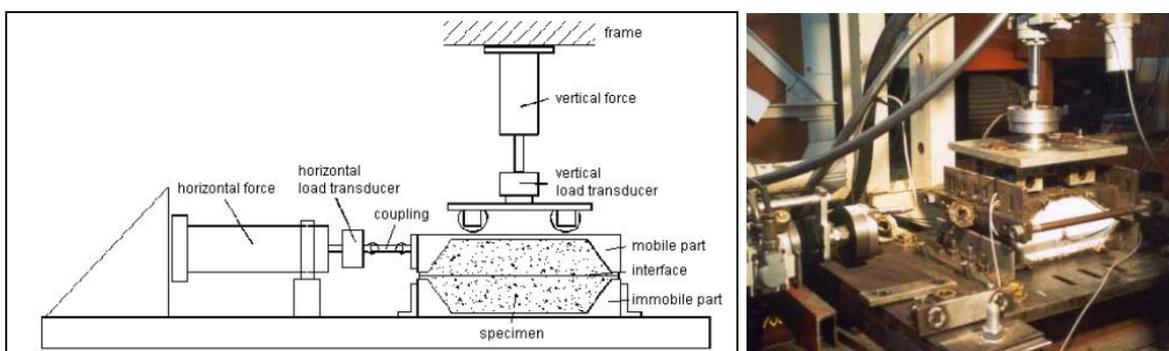


Abbildung 2.3: Prüfgerät „Shear Box“ nach Braddy / Brown (1985)

Die Scherkraft wurde sinusförmig mit einer konstanten Frequenz von 2 Hz aufgebracht. Die Normalspannung wurde konstant gehalten (200 kPa), während die

Scherspannung in 5 Stufen (50, 100, 150, 200 und 250 kPa) mit je 1000 Wiederholungen bis zum Bruch erhöht wurde. Die Scherwege wurden mit zwei Wegsensoren an beiden Seiten des Probekörpers gemessen.

Dieselbe Prüfvorrichtung wurde auch von Sanders (1999) verwendet. Bei 1000 Wiederholungen erhöht er die Scherspannungen in Schrittgröße von 100 kPa bei einer Frequenz von 2 Hz und konstanter Temperatur von 20°C bis zum Versagen des Schichtenverbundes bzw. bis einer signifikanten Verringerung der Haftfestigkeit festgestellt wurde.

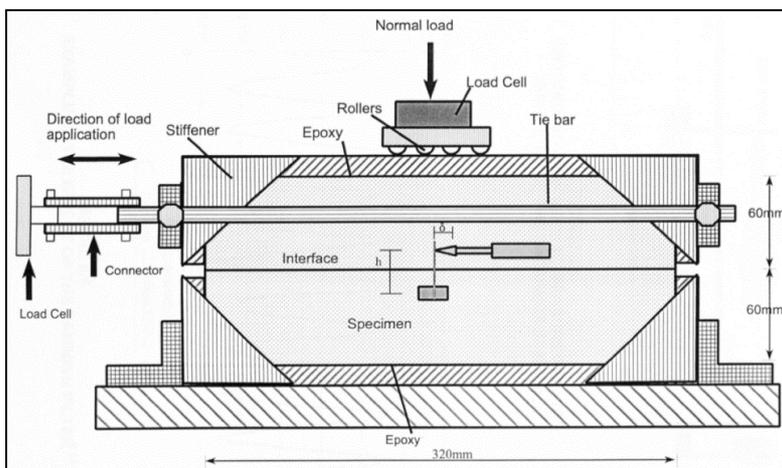


Abbildung 2.4: Prüfgerät „Shear Box“ nach Sanders (1999)

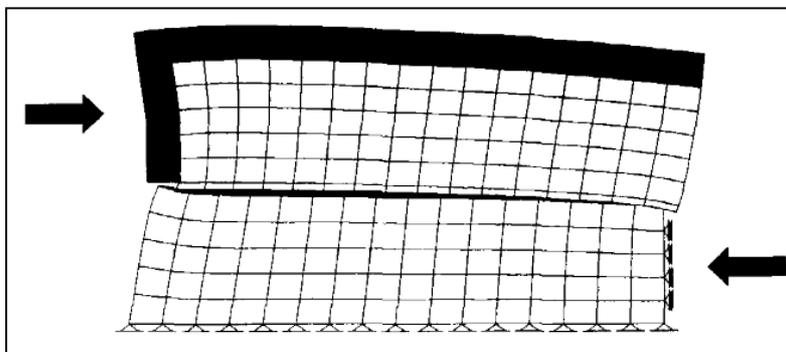


Abbildung 2.5: Typisches Verhalten des Probekörpers beim Versuch mit dem Prüfgerät „Shear Box“ (de Bondt, 1999)

Ein anderes Prüfgerät für die dynamische (zyklische) Untersuchung des Schichtenverbundes wurde an der Universität in Limoges in Frankreich entwickelt, das DST (Double Shear Test) genannt wurde (Rosier u.a. 1996, Millien u.a. 1996, Petit u.a. 2002, Diakhaté u.a. 2007, 2008, 2011, Petit u.a. 2012). Der Probekörper mit Abmessungen 105 mm x 70 mm x 50 mm besteht aus drei Schichten, die paarweise mit oder ohne Bitumenemulsion verbunden sind (Abbildung 2.6). Der Probekörper

wird in einen Metallrahmen eingesetzt, in dem die beiden seitlichen Schichten festgehalten werden, während die mittlere Schicht einer sinusförmigen Belastung unterzogen wird. Dadurch entstehen symmetrische Scherkräfte an den beiden Grenzflächen. Der Abstand zwischen den abscherenden Stahlplatten beträgt 5 mm. Mit der DST-Prüfvorrichtung ist keine Normalkrafteintragung möglich.

Für die durchgeführten Versuche wurden unterschiedliche Parametereinstellungen angewendet. In seiner Dissertation führt Diakhaté (2007) die Versuche kraftgesteuert mit den Frequenzen 0,5 Hz, 1 Hz und 10 Hz, Amplitude des Scherweges von ± 1 mm und Spannungsamplituden $\pm 0,2$ kN, ± 1 kN; ± 6 kN und ± 10 kN durch.

In der Untersuchung zur Ermüdung des Schichtenverbundes wurden 48 Probekörper bei einer Frequenz von 10 Hz und einer Temperatur von 10°C dynamisch und 21 Probekörper bei zwei Temperaturen von 10°C und 20°C und Belastungsgeschwindigkeiten von 0,2 MPa/s, 0,5 MPa/s und 3,0 MPa/s statisch geprüft.

In einer weiteren Untersuchung analysieren Diakhaté u.a. (2011) die prozentuale Verringerung des Schersteifigkeitsmoduls (Abbildung 2.7) im Zusammenhang mit der Anzahl der Lastwechsel um mit Hilfe von analytischen Berechnungen die Ermüdungsversuche zu verkürzen.

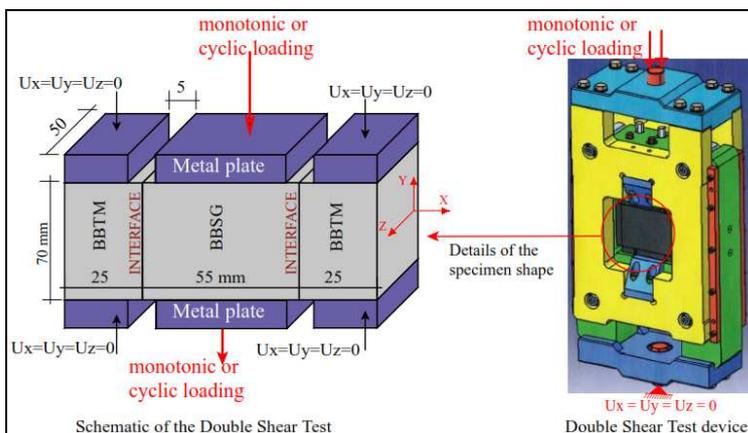


Abbildung 2.6: Probekörper und Prüfvorrichtung DST nach Diakhaté u.a. 2008

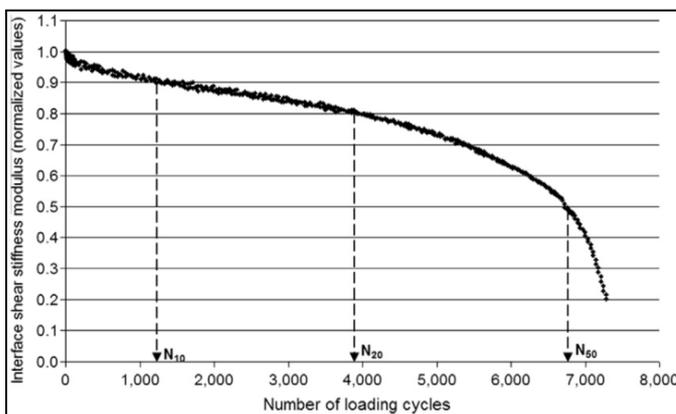


Abbildung 2.7: Verlauf des Schersteifigkeitsmoduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel nach Diakhaté u.a. (2011)

In der Untersuchung von Diakhaté u.a. (2007) wurde versucht, eine Rückrechnungsmethode zu entwickeln, um die Ermüdungseigenschaften des Haftvermittlers vom statischen Abscherversuch analytisch zu bestimmen. Zur quantitativen Erfassung der Abhängigkeit zwischen Temperatur bzw. Belastung und Spannung in der Schichtengrenzfläche wurden die Probekörper mit der DST-Prüfvorrichtung bei mehreren Belastungsgeschwindigkeiten (von 0,002 bis 4,8 MPa/s, d.h. von 5 bis 22.000 N/s je nach Probekörpergeometrie) und bei zwei Temperaturen (10°C und 20°C) getestet.

Während des Strategischen Programms für Straßenwesen (SHRP) wurde in den USA der Superpave Shear Tester (SST) im Jahr 1993 entwickelt, mit dem sowohl statisch als auch dynamisch geprüft werden kann (Abbildung 2.8). Das Gerät wurde aber nicht zur Bewertung des Schichtenverbunds zwischen Asphaltsschichten entwickelt, sondern um den Widerstand der Asphaltsschichten gegen bleibende Verformung zu charakterisieren. Die Ergebnisse aus diesem dynamischen Test (Frequency Sweep at a Constant Height, FSCH) wurden zur Bestimmung des komplexen Schermoduls (G^*) und des Phasenwinkels (ϕ) verwendet. Ein Beispiel der Ergebnisse ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

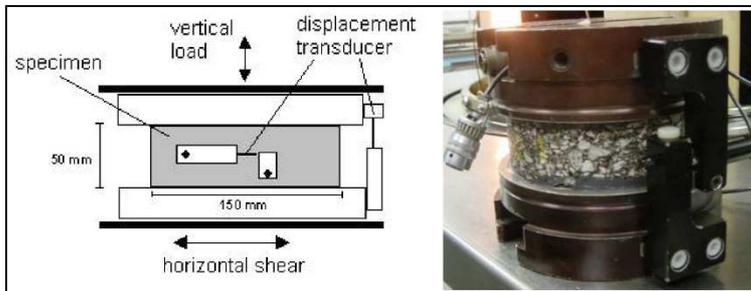


Abbildung 2.8: Superpave Shear Test (SST) nach Raab (2007)

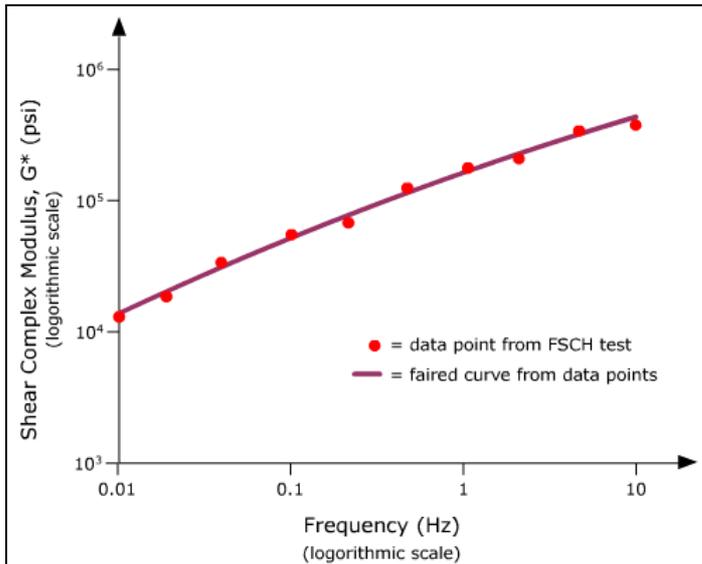


Abbildung 2.9: Abhängigkeit zwischen dem komplexen Schermodul und der Belastungsfrequenz ("Superpave Shear Tester", 2008)

Witzak u.a. (2002) haben die SST-Prüfvorrichtung verwendet und haben die Werte des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels für verschiedene Kombinationen von Belastung, Temperatur und Belastungsfrequenz erfasst. Die Versuche wurden bei fünf Temperaturen (-18°C , 4°C , 21°C , 38°C und 54°C) und vier Frequenzen (0,01 Hz, 0,1 Hz, 1 Hz und 10 Hz) durchgeführt. Es wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 50 mm verwendet. Der Probekörper wurde zwischen zwei Formenträger aus Aluminium eingeklebt. Die Scherbeanspruchung wurde über die untere Platte eingeleitet und die Verschiebungen wurden über Messsensoren gemessen, die horizontal auf der Probe montiert waren. Die Probekörperhöhe wurde durch Druck oder Zug durch einen vertikalen Antrieb konstant gehalten und die vertikale Verformung wurde mit Messsensoren gemessen.

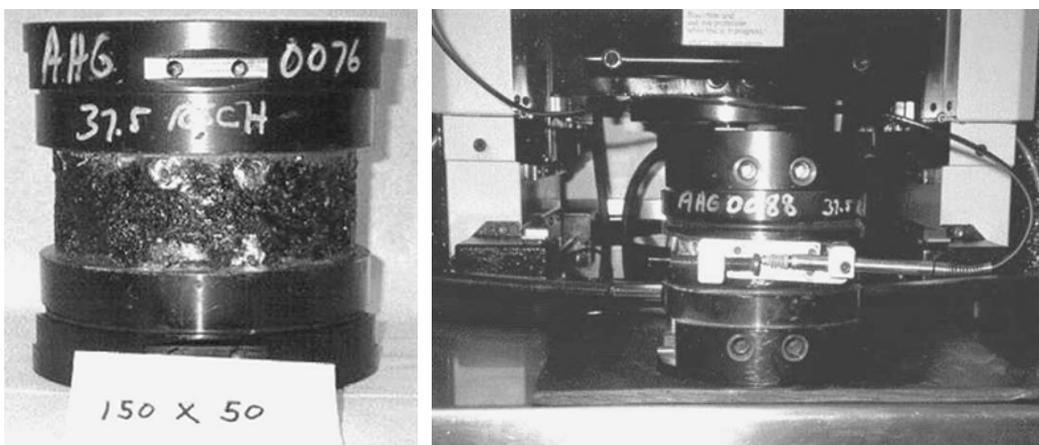


Abbildung 2.10: Probekörper und Prüfvorrichtung SST nach Witzak u.a. (2002)

Im NCHRP Projekt 9-18 (2002) erfolgte die Herstellung des ersten Prototyps der Prüfvorrichtung FST (Field Shear Tester) (Abbildung 2.11). Das Gerät wurde als eine Verbesserung des SST Prüfgerätes entwickelt, um den Einbau des Probekörpers zu vereinfachen und dadurch die Durchführung der Versuche zu vereinfachen und zu beschleunigen. Der Probekörper musste nicht mehr gesägt und eingeklebt werden. Während beim SST eine zyklische Scherdehnung von 100 microstrain vorgegeben, und dabei die Scherspannung als Funktion der Frequenz gemessen wird, werden die Versuche beim FST kraftgeregelt durchgeführt, wobei eine konstante sinusförmige Scherspannung eigeleitet wird und die Scherdehnung als Funktion der Prüffrequenz gemessen wird. Der Durchmesser des Probekörpers beträgt 150 mm und die Höhe 115 mm. Der Abstand zwischen den Einspannungsschalen ist 22 mm.

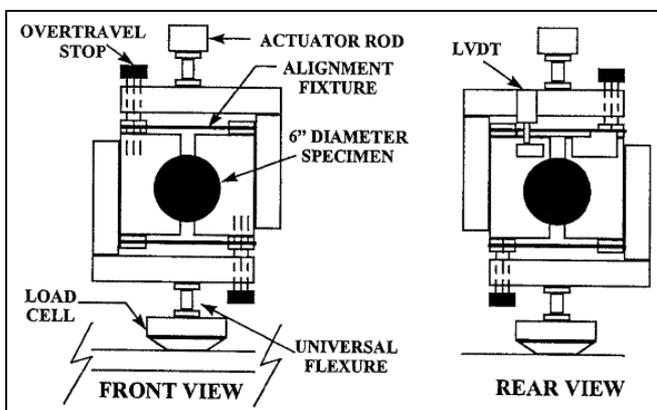


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der FST-Prüfvorrichtung nach Harrigan (2002)

Es wurde festgestellt, dass mit dieser Prüfvorrichtung keine genauen Messungen des komplexen Schermoduls oder der maximalen permanenten Scherdehnung möglich waren (Cominsky u.a. 1998, Killingsworth 1998). Deshalb wurde eine verbesserte FST Prüfvorrichtung entwickelt, bei der die beiden Schichten des Probekörpers mit Hilfe von hydraulischen Klemmen festgehalten werden (Abbildung 2.12). Bei FST waren die Versuchsoperationen erheblich vereinfacht. Christensen u.a. (2002) berichten, dass die FST Prüfvorrichtung am besten für die Messung des komplexen Modul (G^*) bei Temperaturen von etwa 40°C und bei Frequenzen von 5 Hz und 10 Hz geeignet ist. In Abbildung 2.13 ist ein Vergleich zwischen den komplexen Schermodulen dargestellt, die mit SST und FST ermittelt wurden.



Abbildung 2.12: Verbesserte FST-Prüfvorrichtung nach Harrigan (2002)

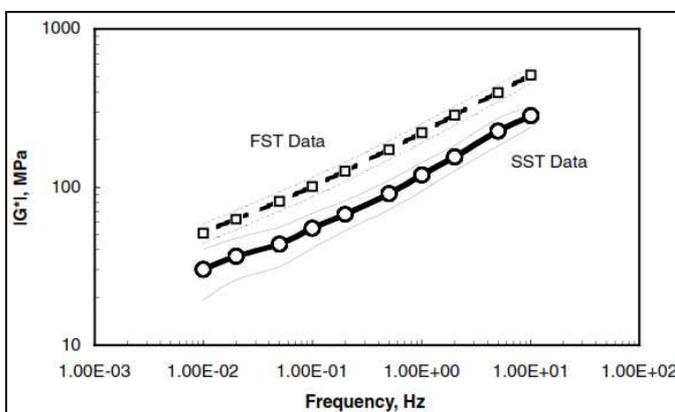


Abbildung 2.13: Komplexer Schermodul in Abhängigkeit von der Prüffrequenz ermittelt mit SST und FST bei 40°C nach Harrigan (2002)

Mit dem FST Prüfgerät haben auch Witzak u.a. (2002) Versuche durchgeführt. Sie verwendeten Probekörper aus dem Gyrator Verdichter, die 150 mm Durchmesser hatten und die auf $70 \pm 2,5$ mm abgesägt wurden. Die Probekörper wurden bei 37,8°C und 54,44°C geprüft und jeder Probekörper wurde dreimal getestet.

- Test 1 $f = 10, 5, 2, \text{ und } 1$ Hz
- Test 2 $f = 1; 0,5; 0,2 \text{ und } 0,1$ Hz
- Test 3 $f = 0,1; 0,05; 0,02 \text{ und } 0,01$ Hz

Bei $T = 37,8^\circ\text{C}$ wurden bei den drei Scherspannungen die folgenden Scherdehnungen bei 10 Hz ermittelt:

- $\tau_1 = 20$ kPa $\gamma = 50 \dots 150$ microstrain
- $\tau_2 = 40$ kPa $\gamma = 150 \dots 300$ microstrain
- $\tau_3 = 60$ kPa $\gamma = 300 \dots 500$ microstrain

An der Virginia Tech wurde eine Laboruntersuchung durchgeführt, um die optimale Menge des bitumenhaltigen Haftvermittlers auf beiden Seiten eines Geovlieses zwischen zwei Asphaltsschichten festzustellen (Donovan u.a. 2000). Die optimale Haftvermittlermenge wurde als die Menge des benötigten Haftvermittlers definiert, mit der die maximale Lastwechselzahl bis zum Bruch erreicht wird. Um dies zu untersuchen, wurde eine Prüfvorrichtung entwickelt (Abbildung 2.14), mit der der Schichtenverbund zyklisch geprüft werden konnte. Die Autoren empfehlen die Verwendung von den folgenden Mengen an Bitumen als Haftvermittler beim Kontakt zwischen Geovliesoberfläche und drei unterschiedlichen Schichtvarianten:

- Kontakt mit der Asphaltbinderschicht - 1,40 kg/m²
- Kontakt mit der Asphaltdeckschicht - 1,50 kg/m²
- Kontakt mit der Betondeckschicht bei Brückenbauwerken – 1,75 kg/m²

Es wurde berichtet, dass die Probekörper mit dieser Prüfvorrichtung auch mit Normalspannungen belastet werden können und der Schichtenverbund ohne Geovlies geprüft werden kann.

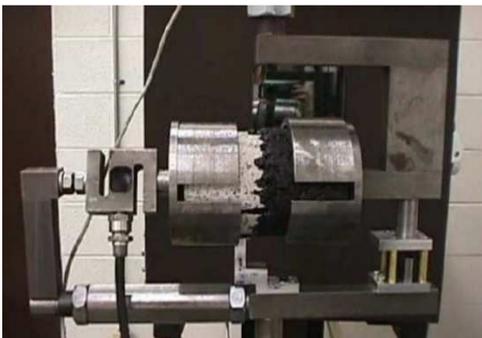


Abbildung 2.14: Virginia Tech Prüfvorrichtung nach Donovan u.a. (2000)

Zur Untersuchung des Schichtenverbunds verwenden Al-Qadi u.a. (2008) eine modifizierte Version des Virginia Tech Prüfgerätes (Abbildung 2.15) und berichten, dass mit ihm sowohl zyklische als auch statische Versuche durchgeführt werden können. Um die optimale Haftvermittlermenge zu bestimmen wurden zwei Kriterien angewendet: maximale Schubspannung für die statischen Versuche und maximale Anzahl von Zyklen bis zum Ausfall für die zyklischen Versuche. Die Autoren führen nur den statischen Versuch durch und machen keine weiteren Angaben zum zyklischen Prüfungsvorgang.

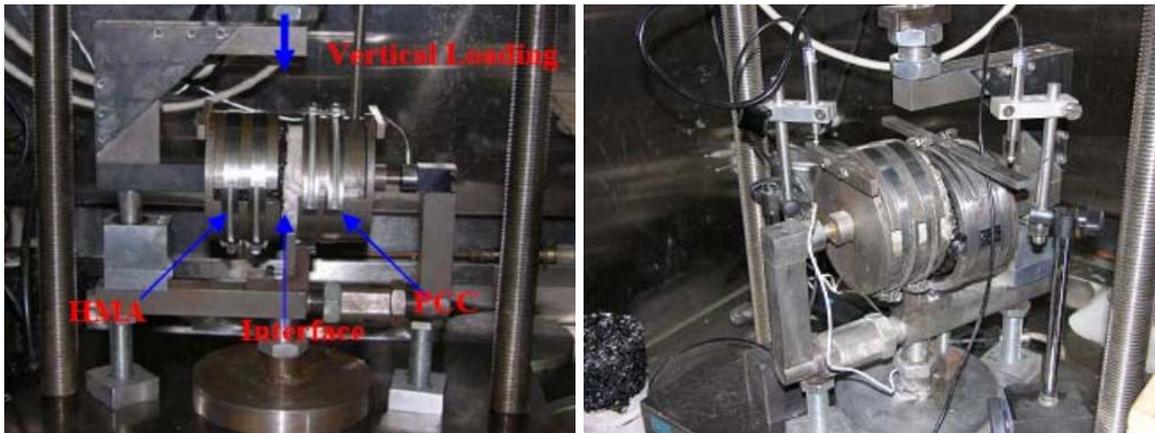


Abbildung 2.15: „Direct Shear Test“ Prüfgerät nach Al-Qadi u.a. (2008)

In Arizona (USA) wurde das GCTS Prüfgerät SDS-150 entwickelt, mit dem Scherlasten und Normlasten bis 50 kN bei Raumtemperatur aufgebracht werden können (Abbildung 2.16). Der horizontal bewegliche untere Abscherbacken ist auf Gleitlager montiert. Die Probekörper sind kubisch (150 mm). Der Abstand zwischen den Scherbacken ist unbekannt. In der Spezifikation berichten die Hersteller, dass Geräte für andere Probekörperformen und -größen (bis 300 mm Seitenlänge oder Durchmesser) vorhanden sind, mit denen Belastungen von bis zu 1000 kN möglich sind.

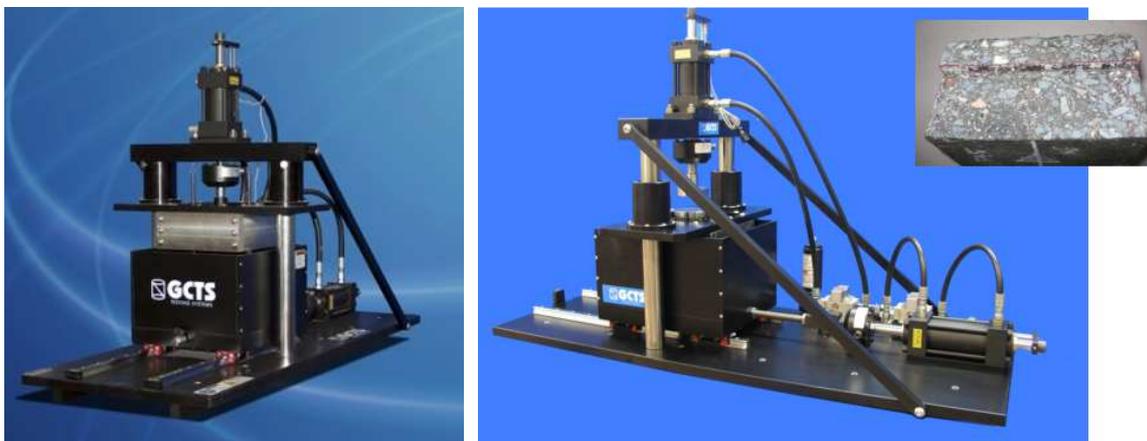


Abbildung 2.16: GCTS-Prüfvorrichtung SDS-150 (Arizona, USA)

Für die Untersuchung des Schichtenverbundes verwendet Romanoschi (1999) in seiner Dissertation die sogenannte SFT (Shear Fatigue Test) Prüfvorrichtung (Abbildung 2.17). Die zweischichtigen Asphaltprobekörper wurden in zwei Stahlschalen, zwischen denen der Abstand 5 mm war, platziert. Die Stahlschalen wurden auf Stahlplatten befestigt, die den Probekörper bei einem Winkel von $25,5^\circ$ von der vertikalen Achse und dementsprechend von der aufgebrachten vertikalen Last ausrichteten. Bei diesem Winkel ist die Scherbeanspruchung an der Schichtengrenzfläche

halb so groß wie die Normalbeanspruchung. Somit ist die Kraft das mittlere Verhältnis zwischen den vertikalen und horizontalen Kräften, die an der Grenze zwischen zwei Asphaltschichten infolge beweglicher Lasten wirken.

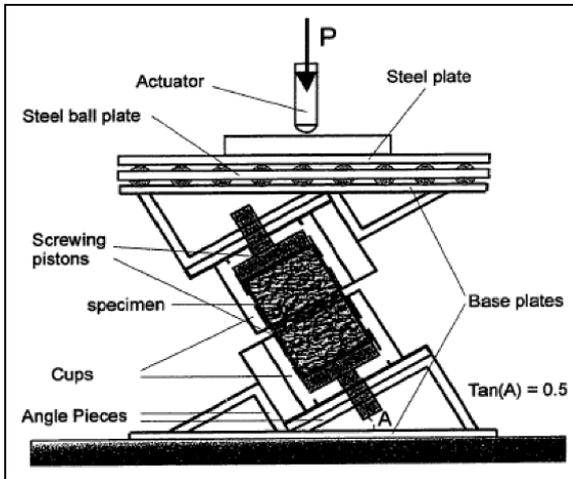


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der SFT Prüfvorrichtung nach Romanoschi (1999)

Wheat (2007) hat mit derselben Prüfvorrichtung Bohrkern mit unterschiedlich rauen Oberflächen der zusammengeklebten Schichten und verschiedenen Mengen an Haftvermittler bei 20° und 30° Winkeln geprüft. Mit statischen Versuche erfolgten Untersuchungen zur Scherfestigkeit in der Schichtengrenzfläche (Interface) und durch zyklische Versuche – zum Schermodul und Phasenwinkel. Die zyklischen Versuche wurden bei 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz und 0,1 Hz und Temperatur von 20°C durchgeführt. Die untersuchten Varianten waren wie folgt festgelegt:

Menge der Bitumenemulsion	Rauheit der Oberfläche		
	Grob auf grob	Fein auf grob	Fein auf fein
Ohne	4	8	12
118 g/m ²	3	7	11
226 g/m ² (richtlinienkonform)	2	6	10
344 g/m ²	1	5	9

Tabelle 2.1: Kombinationen und Anzahl der Probekörper in der Untersuchung von Wheat (2007)

Die normale Verschiebung wurde durch zwei induktive Wegaufnehmer (Abbildung 2.18: UTM Prüfvorrichtung nach Wheat (2007) in der Prüfmaschine (links) und

Platzierung der induktiven Wegaufnehmer (rechts) rechts, gelbe Pfeile) und die radiale durch einen Wegaufnehmer aufgezeichnet.

Als maßgebend definiert Wheat die 10 Hz Frequenz, weil sie die Bewegung von Kraftfahrzeugen bei einer Geschwindigkeit von ca. 40 mph (64,4 km/h) simuliert. Der Autor stellt fest, dass der höchste dynamische Schermodul bei dem Winkel von 30° , $f = 10$ Hz, Kombination „grob-fein“ und richtlinienkonformer Menge an Haftvermittler ermittelt werden kann.



Abbildung 2.18: UTM Prüfvorrichtung nach Wheat (2007) in der Prüfmaschine (links) und Platzierung der induktiven Wegaufnehmer (rechts)

An der Technischen Universität von Delft in den Niederlanden entwickelte de Bondt (1999) einen Vier-Punkt-Schertest, bei dem die Biegeeffekte durch die spezielle Anordnung der Laststellen und der Stützpunkte minimiert wurden (Abbildung 2.19). In der Interface-Ebene ist kein Biegemoment vorhanden. Die Kraft in der Scherebene betrug $11/15$ der aufgetragenen Vertikallast. Die Schergleitung s (relative vertikale Verschiebung) in der Grenzfläche und die Dilatanz w (relative horizontale Bewegung) wurden durch induktive Wegaufnehmer aufgezeichnet (Abbildung 2.20). Die Probekörper hatten folgende Abmessungen: Länge 450 mm, Breite 110 mm und Höhe 125 mm. Die kraftgeregelten zyklischen Versuche führte de Bondt bei einer Temperatur von 20°C , einer Frequenz von 8 Hz, verschiedenen Stufen der Scherkraft und zwei Normalspannungen (0,13 MPa und 0,26 MPa) durch.

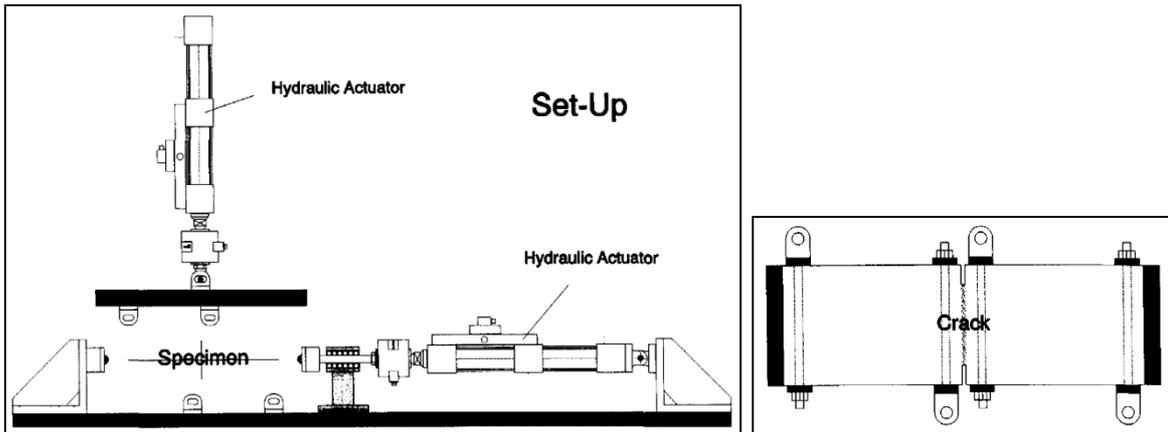


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung des Prüfgerätes (links) und des Probekörpers (rechts) nach de Bondt (1999)

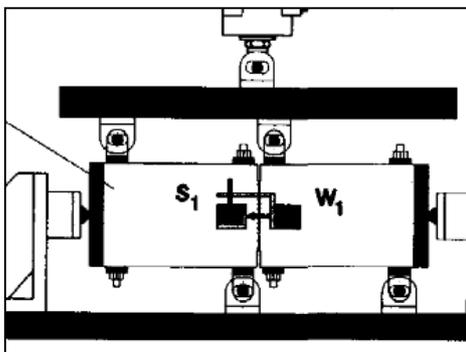


Abbildung 2.20: Position der induktiven Wegaufnehmer, die an dem Probekörper befestigt sind (de Bondt, 1999)

Ein interessantes Ergebnis dieser Untersuchung ist die Abhängigkeit zwischen der Lebensdauer des Probekörpers $N_{f,cr}$ (Abbildung 2.21) und des angewandten relativen Belastungsgrades (Verhältnis zwischen Scherspannungsamplitude $\Delta\tau$ und der Festigkeit τ_f , $\Delta\tau/\tau_f$).

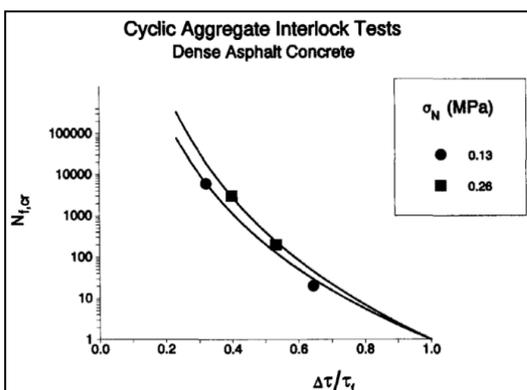


Abbildung 2.21: Effekt des relativen Belastungsgrades auf die Lebensdauer des Probekörpers (de Bondt 1999)

Die Lebensdauer des Probekörpers wurde als die Lastwechselzahl bis zum Erreichen von 2% der Schersteifigkeit bei Erstrissbildung definiert. Es wurde festgestellt, dass die Festigkeit 1,2 MPa bei einer Normalspannung $\sigma_N = 0,13$ MPa und 1,5 MPa bei $\sigma_N = 0,26$ MPa ist.

Die Versuche hat de Bondt auch mit Hilfe eines FEM-Programms (CAPA-2D) nachgerechnet (Abbildung 2.22).

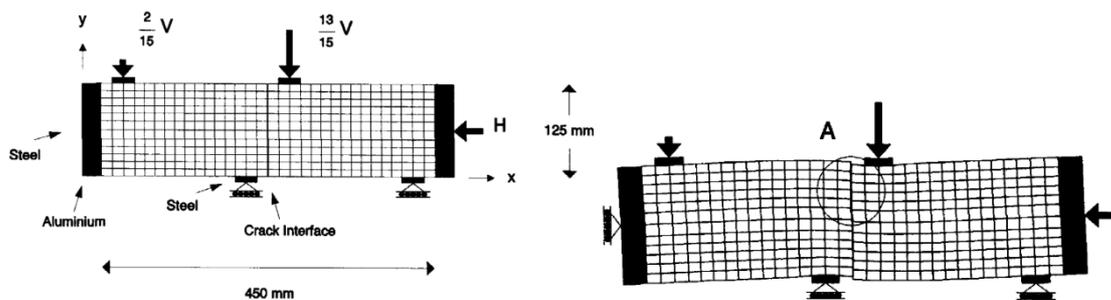


Abbildung 2.22: FEM-Modell des Versuches und verformter Probekörper (überhöht) nach de Bondt (1999)

In einem Forschungsprojekt zur Untersuchung des Schichtenverbundes von Asphaltbefestigungen wurde an der Technischen Universität Dresden eine neuentwickelte Prüfvorrichtung für zyklische Versuche mit Normalspannung verwendet (Wellner / Ascher, 2007). Ziel bei der Entwicklung dieser Prüfvorrichtung war es, die in einer Straßenbefestigung auftretenden Einflussgrößen auf den Schichtenverbund beanspruchungsgerecht prüfen zu können. Die Prüfvorrichtung wurde in der Temperierkammer einer servohydraulischen Prüfmaschine eingesetzt. Es wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von ca. 100 mm geprüft. In der in Abbildung 2.23. dargestellten Prüfvorrichtung wurde der Probekörper mit einem 2-komponentigen Epoxidharzkleber (Sikadur®-30) in vier Halbschalen aus Stahl in einer Probenvorbereitungsvorrichtung eingeklebt (Abbildung 2.24) und eine Woche bei Raumtemperatur zur vollständigen Aushärtung des Klebers gelagert. Die Scherkraft bzw. der Scherweg wurde auf den Probekörper über den vertikal beweglichen Träger aufgebracht. Die Normalkraft und die Einstellung des Abstandes zwischen den Stahlschalen erfolgten durch den auf Linearkugellagern horizontal beweglichen Träger. Die über den Kolbenweg gesteuerte sinusförmige Scherwechselbelastung des Probekörpers erfolgte weggeregelt. Der vertikale Scherweg wurde mit Hilfe von 2 induktiven Wegaufnehmern, die an dem vertikal beweglichen Träger befestigt waren, gemessen. Das unvermeidbare vertikale Spiel des horizontal beweglichen Teils auf der Schiene wurde mit 2 weiteren Wegaufnehmern erfasst. Die Berechnung des Scherweges (ΔU) erfolgte aus der Differenz der aufgezeichneten vertikalen Wege des vertikal beweglichen Teils der Prüfvorrichtung abzüglich des horizontal beweglichen Teils. Die Scherkraft entsprach der mit der Kraftmessdose gemessenen Kraft.

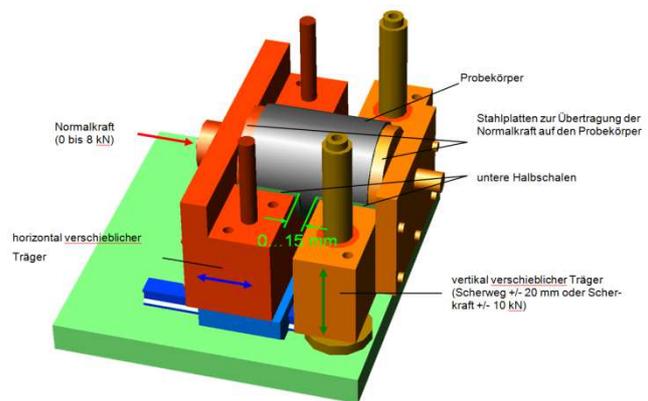


Abbildung 2.23: Prüfvorrichtung nach Wellner / Ascher (2007)



Abbildung 2.24: Vorbereitungsvorrichtung zum Einkleben der Probekörper in den 4 Halbschalen nach Ascher (2007)

Im Rahmen des Versuchprogramms wurden zwei Verbundkombinationen (Deckschicht auf Binderschicht und Binderschicht auf Tragschicht) untersucht, wobei bei jeder Verbundkombination die folgenden Mengen an Haftvermittler verwendet wurden:

- 0 g/m²
- 150 g/m²
- 250 g/m²
- 350 g/m².

Zwei Bitumenemulsionen kamen zur Anwendung:

- unmodifizierte kationische Bitumenemulsion U 60 K
- polymermodifizierte Bitumenemulsion U 60 K Art C2.

Das umfangreiche Prüfprogramm beinhaltete Scherwege von 0,005 mm bis 0,1 mm, Frequenzen von 1 Hz bis 15 Hz, Normalspannungen von 0 bar bis 7,5 bar und Temperaturen von -10°C bis +50°C. Wie aus Abbildung 2.25 ersichtlich wird, begann

und endete das Prüfprogramm immer mit einer Temperatur von -10°C, einer Normalkraft von 0 kN und einer Amplitude von 0,005 mm. Die Durchführung der Teilversuche, bestehend aus 9 Amplituden der Scherwege und 6 Frequenzen bei jeweils Aufzeichnung von 25 Lastwechseln, lief automatisch ab. Die Änderung der Normalkraft durch Umstellung des Kompressordrucks und der Prüftemperatur erfolgte manuell.

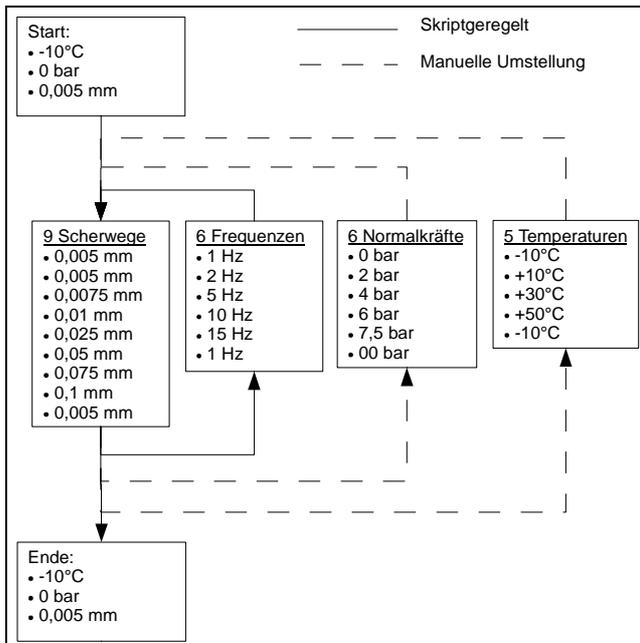


Abbildung 2.25: Ablauf des Prüfprogramms nach Ascher (2007)

Als Faktor zur Beschreibung des Verbundes verwendete Ascher das Verhältnis von Scherweg zu Scherspannung.

$$V_F = K_S = \frac{\Delta U}{\tau}$$

Gleichung 1

mit:

V_F Verbundfaktor [mm^3/N]

ΔU Scherweg [mm]

T Scherspannung [N/mm^2]

Im Ergebnis stellten die Autoren die Zusammenhänge zwischen den Messgrößen Scherkraft, Scherweg und Verbundfaktor und der Lastwechselzahl dar.

Bei den Analysen zur Abhängigkeit der gemessenen Scherspannung vom Scherweg stellen Wellner und Ascher fest, dass die Normalkraft bei einer Prüftemperatur

von -10°C nur einen geringen Einfluss hat, während die Erhöhung der Normalspannung bei hohen Temperaturen einen viel größeren Anstieg der Scherspannung zur Folge hat. Die Autoren schlussfolgern, dass bei tiefen Temperaturen die Verklebung durch das Bindemittel Bitumen der dominante Einflussfaktor ist, während bei hohen Temperaturen der Einfluss von Reibung und Verzahnung an der Schichtengrenzfläche im Vordergrund steht.

Bei einer Temperatur von -10°C ist der Einfluss der Prüffrequenz ebenso wie der der Normalspannung auf den Verbundfaktor nicht erkennbar, während bei hohen Temperaturen mit zunehmender Prüffrequenz der Verbundfaktor geringer wird, d.h. die Verbundwirkung verbessert sich. Wellner und Ascher schlussfolgern, dass die Normalkraft jedoch den wesentlich größeren Einfluss auf den Verbundfaktor hat, als die Frequenz.

Das in Abbildung 2.27 dargestellte Prüfgerät CAST (coaxial shear test) wurde an der Empa Zürich in den achtziger Jahren entwickelt sowie kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert (Sokolov u.a. 2005). Mit dem Gerät CAST konnten die mechanischen Eigenschaften von zylindrischen Asphaltprobekörpern unter zyklischer Belastung bei unterschiedlichen Temperaturen auch von Kim u.a. (2011) ermittelt werden. Dabei war die Konfiguration des Versuches ganz anders als bei den anderen Prüfgeräten für zyklische Tests. Es wurde angenommen, dass ein zwischen zwei parallelen Platten eingeklebter Probekörper nur vertikal bewegt werden kann, was den Fall direkt unter einer vertikalen Verkehrslast darstellen soll. Die inneren und äußeren Seitenflächen des Probekörpers wurden mit Epoxidharz versiegelt und dann auf den inneren Stahlzylinder und äußeren Stahlring geklebt. Danach wurde der Probekörper mit dem Stahlring in die Temperierkammer einer servohydraulischen Prüfmaschine eingebaut und mit sinusförmiger Belastung kraftgesteuert beansprucht. Die vertikale Verschiebung wurde mit einem Wegsensor an der Oberseite des Stahlkerns gemessen. Die komplexen Module und die Phasenwinkel wurden mit Hilfe des Programms ABAQUS (Abbildung 2.28) unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Klebstoffes und der Geometrie des gesamten Versuchsaufbaus ermittelt. Sokolov u.a. haben auch ein FE-Modell im Jahre 2005 für den Versuch mit CAST erstellt.

Die Bohrkerne wiesen einen Durchmesser von 150 mm und eine Höhe von 50 mm auf. Untersucht wurde der Schichtenverbund zwischen Asphaltdeckschicht (SMA 11 mit Trinidadasphalt, Schicht 1) und Asphaltbinderschicht (AC 22 mit PmB, Schicht 2), zwischen Asphaltbinderschicht (AC 22 mit PmB, Schicht 2) und Asphalttragschicht (AC 32 mit PmB, Schicht 3) und zwischen Asphalttragschicht (AC 32 mit PmB, Schicht 3) und Asphalttragschicht (AC S 22 mit PmB, Schicht 4). Die Schichtengrenzflächen wurden mit Trennschicht 12, Trennschicht 23 und Trennschicht 34 bezeichnet. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Temperatur [°C]	-10, -50, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
Frequenz [Hz]	0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16
Lastamplitude [kN]	0,1; 0,3; 1; 3

Tabelle 2.2: Experimentelles Versuchsprogramm mit dem Prüfgerät CAST nach Kim u.a. (2011)

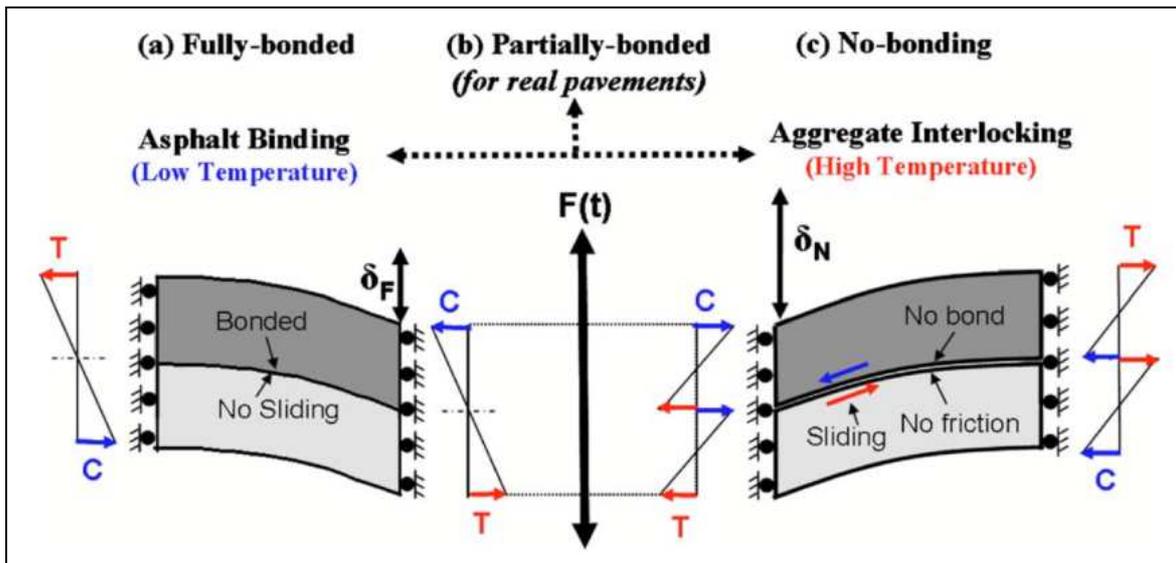


Abbildung 2.26: Schematische Darstellung des Zug-Druck Verhaltens von zweischichtigen Probekörpern für den Fall einer Biegung zwischen zwei parallelen Platten

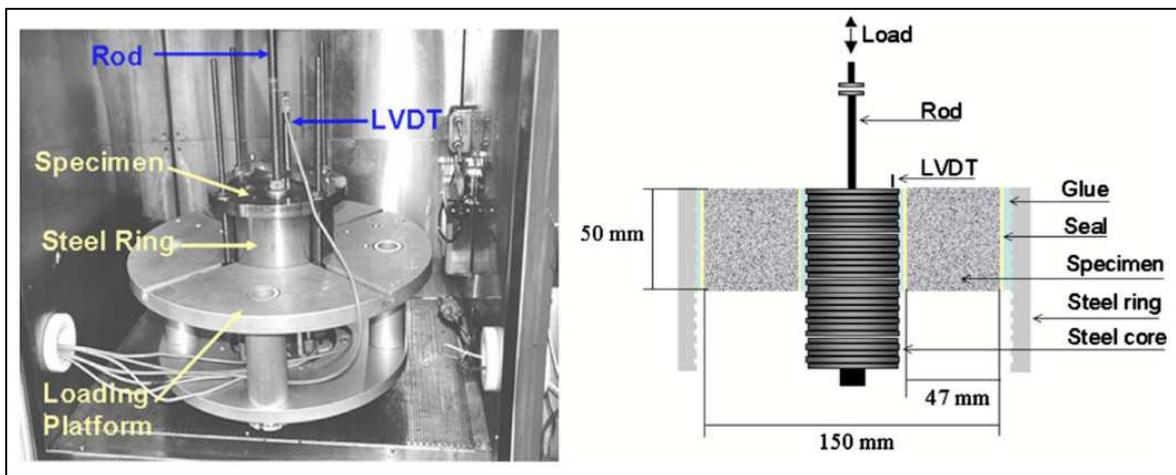


Abbildung 2.27: Prüfgerät CAST (links) und Dimensionen (rechts) nach Sokolov u.a. (2005) und Kim u.a. (2011)

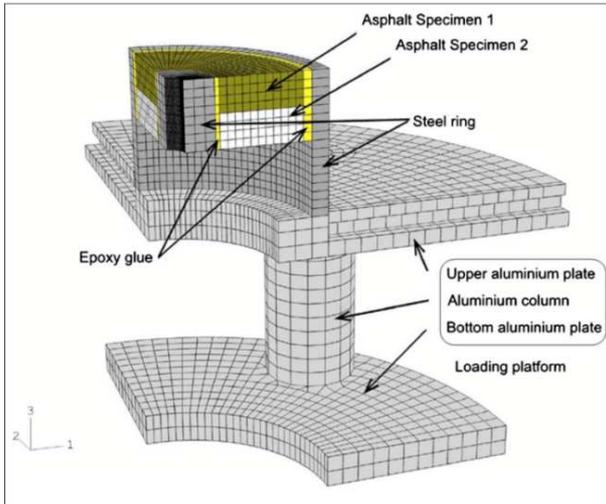


Abbildung 2.28: FE-Modell nach Sokolov u.a. (2005) und Kim u.a. (2011)

Die berechneten Spannungen bei vollem und bei fehlendem Verbund sind in Abbildung 2.29 dargestellt.

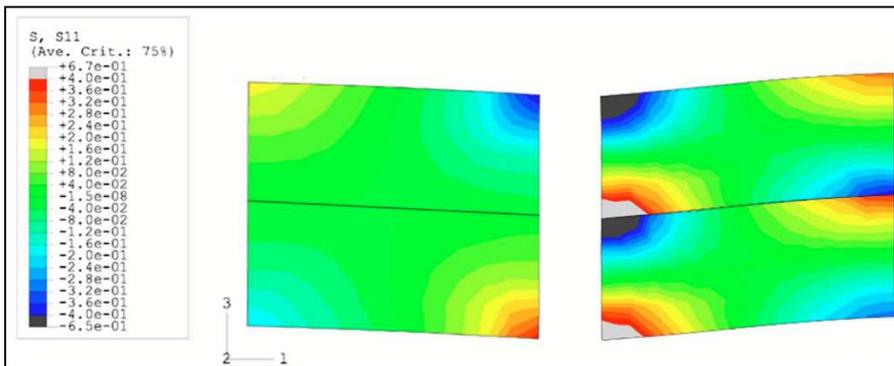


Abbildung 2.29: Spannungen bei vollem Verbund (links) und bei fehlendem Verbund (rechts) nach Kim u.a. (2011)

Im Ergebnis wurden Masterkurven des komplexen Moduls bei einer Referenztemperatur von 25°C erstellt (Abbildung 2.30). Die Autoren stellten fest, dass mit steigender Temperatur der komplexe Modul, die Schersteifigkeit und die Scherfestigkeit abnehmen und die Verschiebungen größer werden. Generell wurden kleinere Biegunen bei den Probekörpern mit vollständigem Verbund berechnet als bei Probekörpern ohne Verbund.

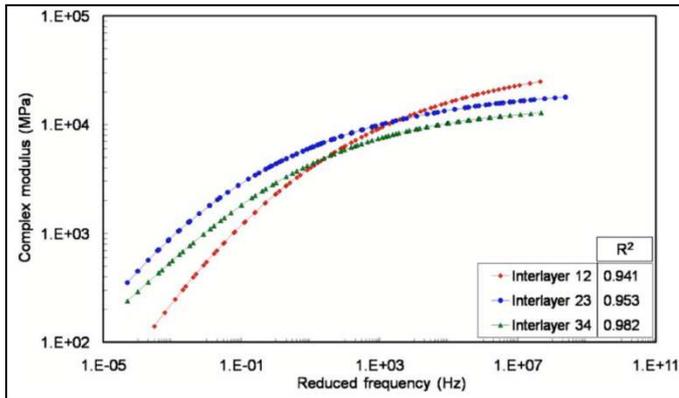


Abbildung 2.30: Vergleich zwischen den Masterkurven von den drei Trennschichten nach Kim u.a. (2011)

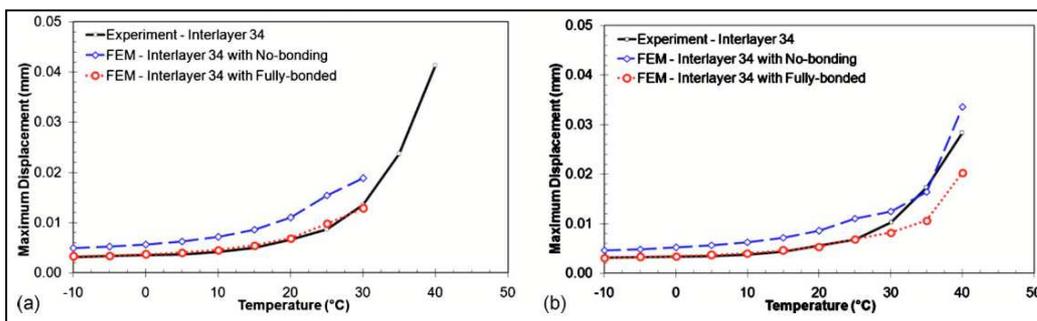


Abbildung 2.31: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Biegung bei 1 Hz (links) und 8 Hz (rechts) nach Kim u.a. (2011)

Eine neue Untersuchung von Coleri u.a. (2011) zeigt einen Vergleich zwischen den Ergebnissen von dem dynamischen SST (Superpave Shear Tester) Versuch und einem mikromechanischen FE-Modell, das mit dem Programm ABAQUS generiert wurde. Das Ziel der Versuche war es, den Schubmodul des Asphaltmischgutes bei unterschiedlichen Temperaturen (10°C, 30°C und 50°C) und Frequenzen (0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, und 10 Hz) vorherzusagen.

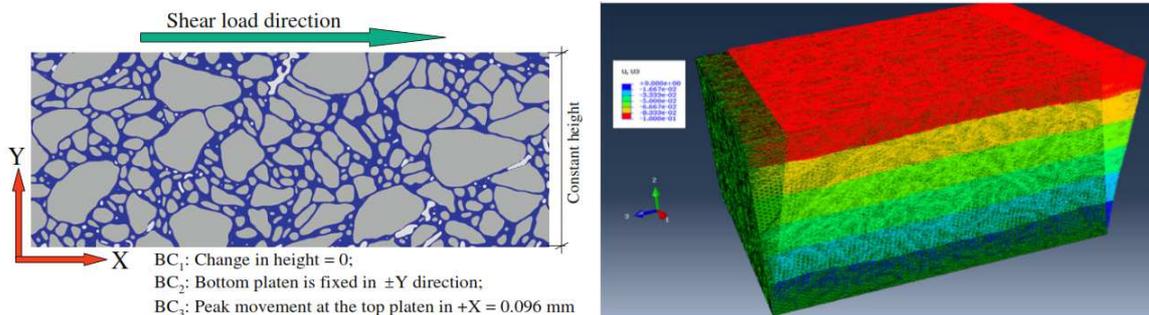


Abbildung 2.32: Schematische Darstellung des Versuches (links) und 3D-Modell in ABAQUS (rechts) nach Coleri u.a. (2011)

Es wurden ein dicht gestuftes polymermodifiziertes Mischgut und ein gummi-modifiziertes Mischgut mit Ausfallkörnung geprüft. Die Autoren haben festgestellt, dass

die höchsten Fehler beim prognostizierten Schermodul bei einer Temperatur von 30°C und den höheren Frequenzen (2 Hz, 5 Hz und 10 Hz) lagen (Abbildung 2.33).

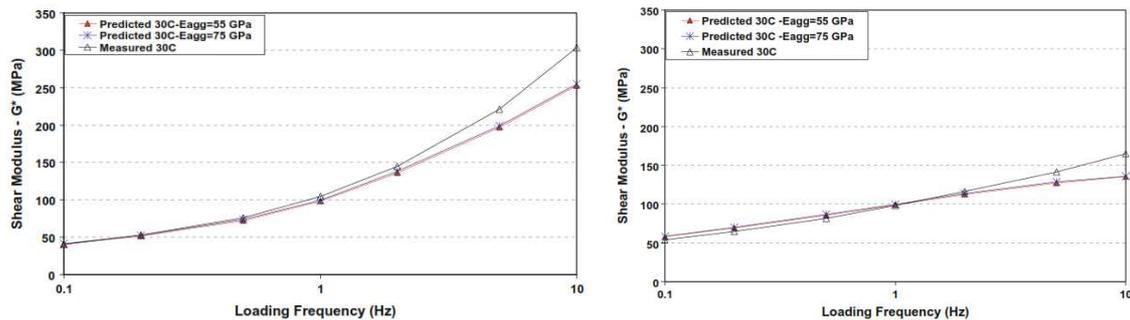


Abbildung 2.33: Vergleich zwischen den labortechnisch gemessenen und mit dem 3D numerischem Modell prognostizierten Werten des Schermoduls (links - dicht gestuftes polymermodifiziertes Mischgut, rechts - gummimodifiziertes Mischgut mit Ausfallkörnung)

Mo u.a. (2006) haben das Bruchverhalten bei statischem und zyklischen Schertest untersucht. Als Prüfgerät verwendeten die Autoren einen dynamischen thermischen mechanischen Analysator (Model: PYRS series 7e DMA TALAB System, PerkinElmer Company, US) mit Temperierkammer. Alle zyklischen Versuche wurden bei 24°C und einer Frequenz 10 Hz kraftgeregelt durchgeführt. Während der Versuche wurden die angewandte Kraft und die Verschiebung automatisch vom System aufgezeichnet.

Abbildung 2.34 zeigt eine schematische Darstellung der Probekonfiguration (manche Abmessungen sind fehlerhaft in der Originaldarstellung). Es wurden drei Asphaltbetonblöcke mit Dicke 30 mm, Breite 60 mm und Höhe 80 mm verwendet, wobei der mittlere Block mit den zwei anderen Blöcken zur Hälfte mit Bitumen eingeklebt wurde.

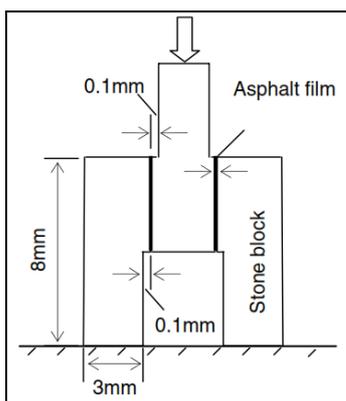


Abbildung 2.34: Darstellung der Probekonfiguration nach Mo u.a. (2006)

Die Autoren gingen davon aus, dass die Schadensakkumulation mit den aufgebrauchten Spannungen exponentiell wachsen würde (Abbildung 2.35) und berechnen die Schadensakkumulation und die Schadensrate wie folgt:

$$\frac{dD}{dt} = \dot{D}(\sigma) = k_0 \sigma^{n_0}$$

mit:

D Schadensakkumulation

\dot{D} Schadensrate

t Zeit

k_0, n_0 Materialkonstanten

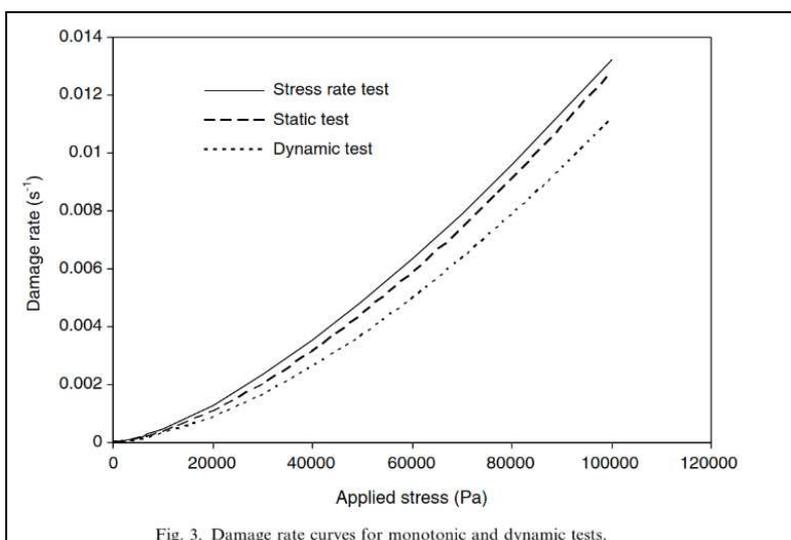


Abbildung 2.35: Zusammenhang zwischen Schadensrate und aufgebrachte Spannung bei statischen und zyklischen Versuchen nach Mo u.a. (2006)

Da die Regressionen sehr gut zusammenpassten, schlussfolgerten Mo u.a. (2006), dass die zeitaufwendigen Ermüdungsversuche nicht notwendig sind, weil die Information von den statischen Tests ohne Verlust an Genauigkeit erhalten werden kann.

Im Jahr 2013, entwickelten D'Andrea u.a. die Prüfvorrichtung Sapienza Horizontal Shear Test Machine (SHSTM) weiter, die sie im Jahr 2005 verwendeten, um den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Festigkeit des Schichtenverbunds statisch mit Normalkraft zu untersuchen. Die neue Prüfvorrichtung nannten sie Sapienza Dynamic Shear Testing Machine (SDSTM). Die Scherbelastung von 100 kN erfolgte mit einer maximalen Frequenz von 5 Hz. Die Probekörper hatten 100 mm Durchmesser. Der Spalt in der Schichtengrenzfläche war 10 mm. Die schematische Darstellung der Vorrichtung ist in Abbildung 2.36 gezeigt.

Die Autoren haben festgestellt, dass der Normaldruck einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbunds hat.

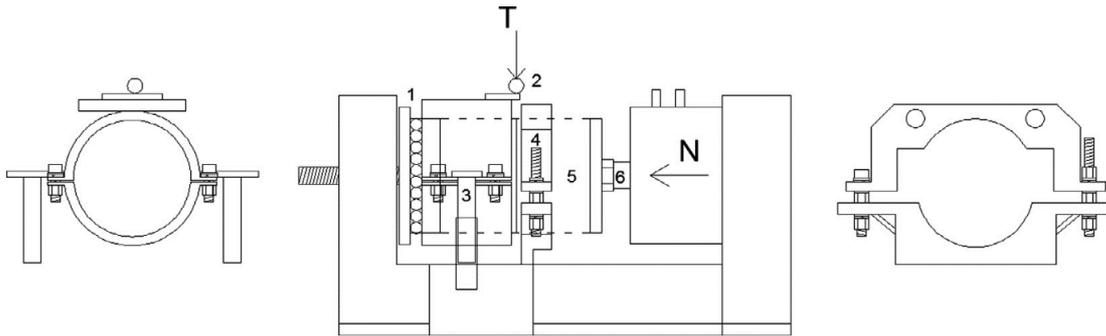


Abbildung 2.36: Prüfvorrichtung Sapienza Dynamic Shear Testing Machine nach D'Andrea u.a. (2014)

2.3 Schlussfolgerungen für die Untersuchung

Aus der Literaturrecherche wird deutlich, dass bisher noch keine systematischen Untersuchungen zum Einfluss der Parameter Temperatur, Belastungsfrequenz und Normalspannung auf der Schersteifigkeit des Schichtenverbundes im relevanten Parameterbereich von Asphaltstraßenbefestigungen durchgeführt worden sind. Mit Ausnahme der Untersuchung von Wellner / Ascher (2007), berücksichtigen die anderen Autoren bei den zyklischen Versuchen nicht den gesamten Umfang dieser Einflussparameter und deren Kombinationen. In dem Forschungsprojekt, welches im vorliegenden Forschungsbericht behandelt wird, werden die realen Beanspruchungsbedingungen aus Temperatur, Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsvorgängen und Radlastdruck nachgebildet. Es werden viele verschiedene Schichtenverbundkombinationen mit unterschiedlichen Bitumenemulsionsarten und -mengen, Rauigkeiten und Verschmutzungsgraden der Oberflächen geprüft, um umfassende qualitative und quantitative Analysen durchführen zu können. Hauptziel ist es zu verstehen, wie die Qualität des auf der Basis der Versuchsergebnisse ermittelten Schichtenverbundes die Nutzungsdauer der gesamten Asphaltbefestigung beeinflusst. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, mit den ermittelten Zusammenhängen aus den Versuchen Masterfunktionen zur Beschreibung des Schichtenverbundes zu entwickeln. Diese sollen in ein FE-Programm implementiert werden um in Anlehnung an das rechnerische Verfahren nach den RDO Asphalt 09 die Auswirkung des erreichten Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung rechnerisch prognostizieren zu können.

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Probekörperherstellung

3.1.1 Beschaffung von Asphaltmischgütern und Bitumenemulsionen (Arbeitspaket 1)

Die Asphaltgemische, die für die Untersuchungen notwendig waren, wurden in einer Asphaltmischanlage in Braunschweig hergestellt. Zur Herstellung der für die Laborprobekörperherstellung erforderlichen Deck-, Binder- und Tragschichtplatten wurden in den Arbeitspaketen die folgenden drei Asphaltgemische verwendet:

- SMA 11 S,
- AC 16 B S,
- AC 22 T S.

Die Anzahl an Eimer mit Asphaltgemischen aus industrieller Produktion ist in Tabelle 1 dargestellt.

Anzahl Eimer	Asphaltmischgut	Masse [kg]
68	Asphaltdeckschicht SMA 11 S	1.020
67	Asphaltbinderschicht AC 16 B S	1.005
180	Asphalttragschicht AC 22 T S	2.700

Tabelle 3.1: Beschaffte Asphaltmischgüter zur Herstellung der Probekörper im Labor

Die Erstprüfungen und Kontrollprüfungen der drei Asphaltgemische sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Zur Herstellung des Schichtenverbundes wurden die in ZTV Asphalt festgelegten Bitumenemulsionen C60BP1-S (polymermodifiziert) und C40BF1-S (lösemittelhaltige Bitumenemulsion, Haftkleber) verwendet.

Die Auswahl der zur Herstellung des Schichtenverbundes notwendigen Bitumenemulsionsmengen erfolgte in Abstimmung mit den Fachbetreuern des Projektbegleitenden Ausschusses. Die festgelegten Bitumenemulsionsmengen, die bei den verschiedenen Verbundvarianten verwendet wurden, betragen 200, 300 und 400 g/m². Die Untersuchungen der Bitumenemulsionen gemäß TL BE-StB 07 wurden im Straßenbaulabor der TU Dresden durchgeführt und sind im Anhang 1.1 aufgelistet.

3.1.2 Untersuchte Verbundkombinationen

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden je nach Zielstellung die folgenden Verbundkombinationen geprüft:

- Deckschicht auf Binderschicht,
- Binderschicht auf Tragschicht,
- Tragschicht auf Tragschicht,
- Deckschicht auf Tragschicht,
- Deckschicht auf Deckschicht.

3.1.3 Herstellung der Asphaltplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät

Die Herstellung der für alle Arbeitspakete erforderlichen Asphaltplatten erfolgte im Walzsektor-Verdichtungsgerät (Abbildung 3.1) nach dem Braunschweiger Verdichtungsprogramm, das eine weggeregelte Vorverdichtung und eine kraftgeregelte Hauptverdichtung beinhaltet. Die Asphaltmischgüter wurden auf die erforderliche Verdichtungstemperatur im Ofen aufgeheizt und anschließend gut homogenisiert. Gemäß TP Asphalt-StB, Teil 30 war die Verdichtungstemperatur des Mischgutes für die Tragschichtplatten 135°C (Straßenbaubitumen 50/70) und für die Binderschicht- und Deckschichtplatten 145°C (PmB 25/55-55). Die Asphaltplatten waren 320 mm lang und 260 mm breit. Die Höhe war in Abhängigkeit von der entsprechenden Schichtenkombination variabel.

Nach Absprache mit den Fachbetreuern des Projektbegleitenden Ausschusses wurden die folgenden Schichtdicken festgelegt:

- Deckschicht – 4 cm,
- Binderschicht – 5 cm,
- Tragschicht – 6 cm.

Da die kalte Asphaltplatte der unteren Schicht in die Stahlform des Walzsektor-Verdichtungsgerätes zur Herstellung des Schichtenverbundes wieder eingebaut werden musste, durfte keine Verformung der Platten zugelassen werden. Jede bereits verdichtete Platte wurde in dem Stahlkasten, welcher im Walzsektor-Verdichtungsgerät verwendet wird, oder in einem speziell angefertigten Holzkasten (260 mm x 320 mm x 100 mm) für mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur gelagert. Dadurch wurde eine Verformung der Asphaltplatte (Kriechen, visko-plastische Verformung) verhindert. Wegen der im Labor verfügbaren Anzahl von 6 Holzkasten und 3 Stahlformen konnten maximal 9 Tragschichtplatten an einem Tag hergestellt werden. Vor Aufbringen der Bitumenemulsion erfolgte die Säuberung der Oberfläche

jeder Platte mit einem Pinsel. Mit Hilfe von Schaumstoffwalzen wurde die Bitumenemulsion in der entsprechenden Menge (Tabelle 3.2) auf die gesäuberte Oberfläche der unteren Platte homogen aufgebracht und bei Raumtemperatur für mindestens drei Stunden bis zum kompletten Brechen der Emulsion und Verdunsten des Wassers gelagert. Nach der Erwärmung des Mischgutes der oberen Schicht auf die erforderliche Einbautemperatur und gründlicher Homogenisierung wurde diese auf die geplante Höhe verdichtet.



Abbildung 3.1: Walzsektor-Verdichtungsgerät zu Herstellung von Asphaltplatten mit Abmessungen 320 x 260 mm an der TU Dresden

Mit Hilfe eines Bohrgerätes wurden aus jeder zweischichtigen Platte vier zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm gebohrt (Abbildung 3.2). Für die ebenfalls durchgeführten Spaltzug-Schwellversuche im Arbeitspaket 10 konnten aus einer Platte zwei Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm gebohrt werden.



Abbildung 3.2: Gebohrte Platte und Asphaltprobekörper

Bitumenemulsionsart	Menge [g/m ²]	Menge pro Platte [g]
1. C60BP1-S (polymermodifizierte kationische Bitumenemulsion)	200	16,64
	300	24,96
2. C40BF1-S (lösemittelhaltige Bitumenemulsion – Haftkleber)	400	33,28

Tabelle 3.2: Bitumenemulsionsarten und -mengen zur Herstellung des Schichtenverbundes

Tabelle 3.3 zeigt eine Gegenüberstellung der Anzahl der geprüften Probekörper zu der laut Antrag erforderlichen Probekörperanzahl in den einzelnen Arbeitspaketen. Wegen unerwarteter Brüche beim Einbau und maschinenbedingten Ausfällen wurden ca. 53% mehr Probekörper als notwendig geprüft. Da bei bestimmten Verbundkombinationen der Probekörpereinbau bei einer Temperatur von -10°C sehr sensibel war, mussten zusätzlich Reserveprobekörper hergestellt werden. Somit ergab sich eine Gesamtanzahl an hergestellten Probekörpern von 492. Es wird daher empfohlen, 50% mehr Asphaltprobekörper als die angeforderte Anzahl an zu prüfenden Probekörpern herzustellen, damit die erforderliche Mindestmenge von drei auswertbaren Versuchen stets gesichert werden kann.

In Tabelle 3.4 ist das gesamte Versuchsprogramm zusammengefasst dargestellt.

Arbeitspaket	Beschreibung	Erforderliche Probekörperanzahl	Geprüfte Probekörper
2	Bewertung der Prüftoleranzen	8	8
3	Untersuchungen zu den Mindestschichtdicken der Probekörper	24	43
4	Ermittlung der Versuchspräzision unter Wiederholbedingungen	24	65
5	Untersuchung von im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Bohrkernen	36	55
7a	Einfluss der Verklebung auf die Scherkräfte	27	44
7b	Einfluss der Verzahnung/Reibung auf die Scherkräfte	15	15
8	Untersuchung des Einflusses von verschmutzten Oberflächen	81	144
10	Erarbeitung des Bewertungshintergrundes für die zyklische Scherprüfung (Spaltzug-Schwellversuch)	84	84
	Summe	299	458

Tabelle 3.3: Anzahl der erforderlichen und der geprüften Probekörper

AP	Anzahl Platten	Anzahl Pk	Anzahl Bk (Baustelle)	Schichtenkombination	Höhe ADS	Höhe ABS	Höhe ATS	Oberfläche	C60BP1-S (Hersteller 1)	C60BP1-S (Hersteller 2)	C60BP1-S (Baustelle)	C40BF1-S	
					cm	cm	cm		g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	
2	1	4	-	AC16BS-AC22TS	-	5	5	WSV	200	-	-	-	
	1	4	-	AC16BS-AC22TS	-	5	5	WSV	400	-	-	-	
3	8	24	-	SMA11S-AC16BS	6	6	-	WSV	200	-	-	-	
4	4a	3	12	AC16BS-AC22TS	-	5	6	geschliffen	200, 300, 400	-	-	-	
	4b	3	12	SMA11S-AC22TS	4	-	6	fein auf grob	200, 300, 400	-	-	-	
5	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
	1	3	3	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	-	-	300	-	
	1	3	3	SMA11S-AC16BS	4	5	-	WSV	-	-	200	-	
7	7a	18	27	SMA11S-AC22TS	4	-	6	geschliffen	200, 300, 400	200, 300, 400	-	200, 300, 400	
	7b	1	3	-	SMA11S-SMA11S	8	-	-	fein	-	-	-	-
		1	3	-	SMA11S-AC22TS	4	-	6	normal	-	-	-	-
		1	3	-	AC22TS-AC22TS	-	-	12	grob	-	-	-	-
		1	3	-	SMA11S-AC16BS	4	5	-	heiß auf kalt	-	-	-	-
1	3	-	SMA11S-AC16BS	4	5	-	heiß auf heiß	-	-	-	-		
8	27	81	-	AC16BS-AC22TS	-	5	6	WSV	200, 300, 400	200, 300, 400	-	200, 300, 400	
10	14	28	-	AC22TS	-	-	6	WSV	-	-	-	-	
	7	28	-	AC16BS	-	4	-	WSV	-	-	-	-	
	7	28	-	SMA11S	4	-	-	WSV	-	-	-	-	

Tabelle 3.4: Erforderliches Versuchsprogramm für FS 1

3.1.4 Vorbereitung der Probekörper für die zyklischen Versuche

Da der kleinste Innendurchmesser der Stahladapter für die zyklischen Schersteifigkeitsversuche 99,75 mm betrug, wurde eine Bohrkronen zum Herausbohren der Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 99 mm angefertigt.

Die Probekörper wurden mit einem 2-komponentigen Epoxidharzkleber (Sikadur®-30) in einer Klebevorrichtung in zwei Stahladapter eingeklebt und mit Schrauben befestigt (Abbildung 3.3). Ein Stahladapter bestand aus zwei Halbschalen und hielt die eine Asphalterschicht des Probekörpers fest. Die andere Hälfte des Probekörpers wurde in dem zweiten Stahladapter befestigt. In der Klebevorrichtung wurde zwischen den zwei Adaptern ein Abstand von 1,0 mm eingestellt und die Schichtgrenze des Probekörpers genau in diesem Abstand extrem präzise angepasst. Jede eingeklebte Probe wurde bei Raumtemperatur mindestens 24 Stunden zur vollständigen Aushärtung des Klebers gelagert.

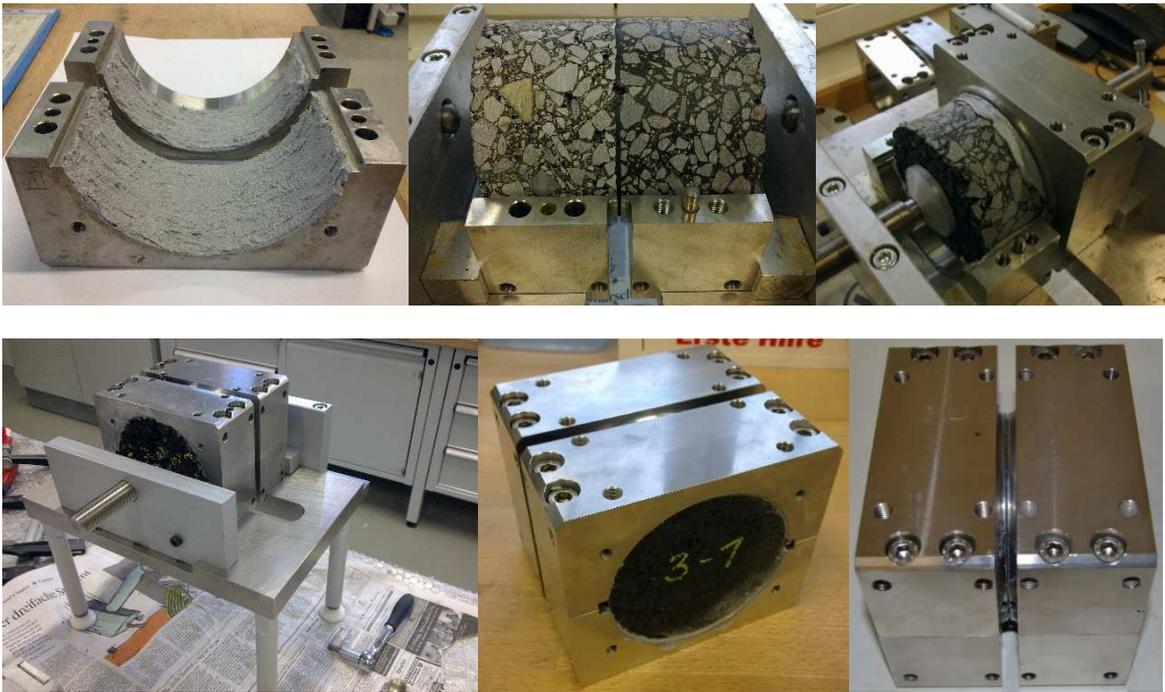


Abbildung 3.3: Einkleben des Asphaltprobekörpers in der Klebevorrichtung

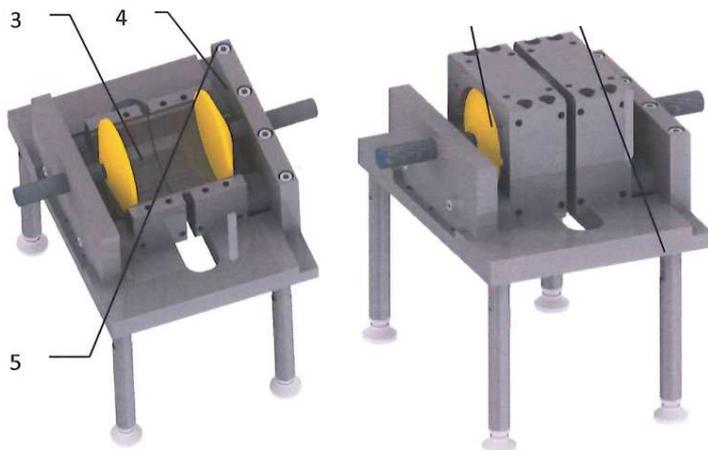


Abbildung 3.4: Modell der Klebevorrichtung (Quelle: Wille)

3.2 Beschreibung der dynamischen Prüfvorrichtung zur Prüfung des Schichtenverbundes

Für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes wurde eine neue Prüfvorrichtung entwickelt, die eine verbesserte Version der von Wellner / Ascher (2007) verwendeten Prüfvorrichtung darstellt. Die Prüfvorrichtung wurde in der Temperierkammer der servohydraulischen Prüfmaschine SHM 63 (Abbildung 3.5) der Professur für Straßenbau an der TU Dresden eingesetzt. Die Temperierung erfolgte durch ein Luftbad mit konstantem Luftstrom von 200 l/min.

In vertikaler Richtung wurde eine zyklische Scherkraft und in horizontaler Richtung – eine statische Normalkraft in unterschiedlicher Größe aufgebracht. Der in den Stahladaptern befestigte Probekörper wurde in die Prüfvorrichtung eingesetzt (Abbildung 3.6) und in den Scherbacken A und B so fixiert, dass die Hälfte der Probe in A lag und die andere Hälfte in B. Der Abstand zwischen den Scherbacken betrug 1,0 mm, wie es durch die Stahladapter der Probe vorgegeben war. Die Stahladapter wurden in den Backen mit Schrauben fixiert, so dass eine Bewegung der Probe in der Prüfvorrichtung weitestgehend ausgeschlossen war. Die Scherkraft wurde auf die eine Hälfte des Probekörpers durch den Hydraulikzylinder der servohydraulischen Prüfmaschine über die vertikal bewegliche Scherbacke B aufgebracht. Der Versuch verlief weggeregelt. Die zweite Hälfte der Probe wurde durch die Scherbacke A festgehalten. Die speziellen Doppel-T-Edelstahllager unter Scherbacke A (5 vorn und 2 hinten, (Abbildung 5.5) lassen keine vertikalen Bewegung zu, ermöglichen aber geringe horizontale Verschiebungen. Der Normaldruck wurde auf die Rückseite der Asphaltprobe (Scherbacken A) über einen Pneumatikzylinder durch eine Stahlplatte aufgebracht. Um dem Normaldruck entgegenzuwirken, musste an die Stirnseite der Probe eine an der Scherbacke B befestigte zweite Stahlplatte mit Hilfe der Gewindespindel angedrückt werden. Der vertikale Scherweg wurde durch zwei an der Backe B befestigte induktive Wegaufnehmer gemessen. Zwei weitere Wegaufnehmer wurden auf die Scherbacke A horizontal angebracht um ihre kleine horizontale Bewegung zu erfassen. Das mechanische Modell der Prüfvorrichtung ist in Abbildung 3.7 gezeigt.



Abbildung 3.5: Prüfmaschine SHM 63 mit Temperierkammer der TU Dresden



Abbildung 3.6: Vorrichtung für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes ohne und mit eingebautem Probekörper

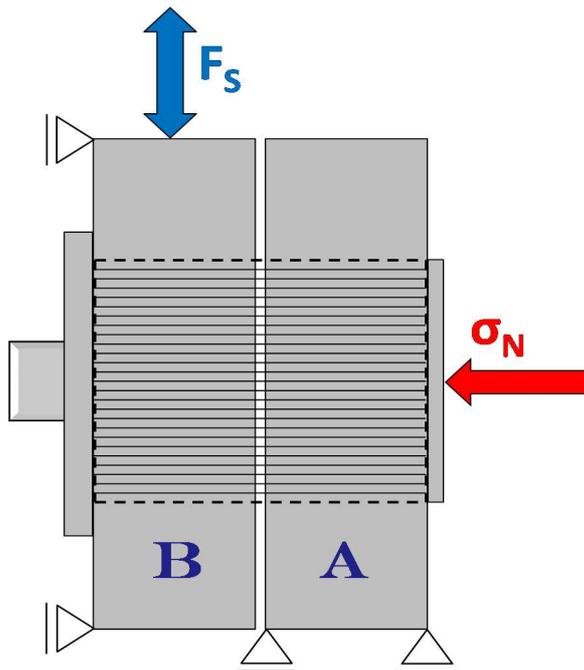


Abbildung 3.7: Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung

3.3 Temperierungsprogramm

Der zeitliche Temperaturverlauf innerhalb eines zweischichtigen Probekörpers, der in Stahladaptoren durch einen Epoxidharzkleber eingeklebt ist, war für die Untersuchung des Schichtenverbundes bisher nicht bekannt. Die in der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung der Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung (AL Sp-Asphalt 09, FGSV 2009) für Asphaltprobekörper angegebene Mindesttemperierzeit von 4 Stunden wurde im Vorgängerprojekt (Wellner / Ascher, 2007) einfach übernommen. Eine Messung der Temperierungsdauer für jede Zieltemperatur wurde jedoch nicht durchgeführt. Um die Temperierzeit von 4 Stunden zu optimieren bzw. zu verringern, wurden Temperaturmessungen an einem Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 100 mm durchgeführt. Der Probekörper bestand aus einer 6 cm hohen Tragschicht AC 22 T S und einer 6 cm hohen Binderschicht AC 16 B S, die mit Bitumenemulsion C60BP1-S (200 g/m²) zusammengeklebt waren.

Um die Temperatur innerhalb des zweischichtigen Asphaltprobekörpers zu messen, wurde in dem Probekörper mittig ein Loch mit einem Durchmesser von 7 mm nach dem Schema in Abbildung 3.8 gebohrt, in dem der 40 mm lange Temperatursensor befestigt wurde. Die Prüfvorrichtung mit dem eingebauten Probekörper wurde in die

Temperierkammer montiert (Abbildung 3.9). Die Messung der tatsächlichen Lufttemperatur in der Temperierkammer erfolgte mit einem zweiten Sensor (Abbildung 3.9). Insgesamt wurden die folgenden drei Temperaturen aufgezeichnet:

- Soll-Temperatur
- Temperatur der Luft
- Temperatur im Probekörper

Das Prüfprogramm beinhaltete 5 Tests mit jeweils 5 Temperaturen:

- **Temperiertest Nr.1:** Versuch ohne Temperaturübersteuerung. Die weitere Temperierzeit mit konstanter Temperatur betrug jeweils 10 Stunden.
- **Temperiertest Nr.2:** Versuch mit Temperaturübersteuerung um $|10^{\circ}\text{C}|$ von einer halben Stunde. Die weitere Temperierzeit mit konstanter Temperatur betrug jeweils 6 Stunden.
- **Temperiertest Nr. 3:** Versuch mit Temperaturübersteuerung um $|10^{\circ}\text{C}|$ von einer Stunde. Die weitere Temperierzeit mit konstanter Temperatur betrug jeweils 6 Stunden.
- **Temperiertest Nr. 4:** Versuch mit Temperaturübersteuerung um $|10^{\circ}\text{C}|$ von 45 Minuten. Die weitere Temperierzeit mit konstanter Temperatur betrug jeweils 60 Minuten.
- **Temperiertest Nr. 5:** Versuch mit variabler Temperaturübersteuerung. Die weitere Temperierzeit mit konstanter Temperatur war auch variabel.

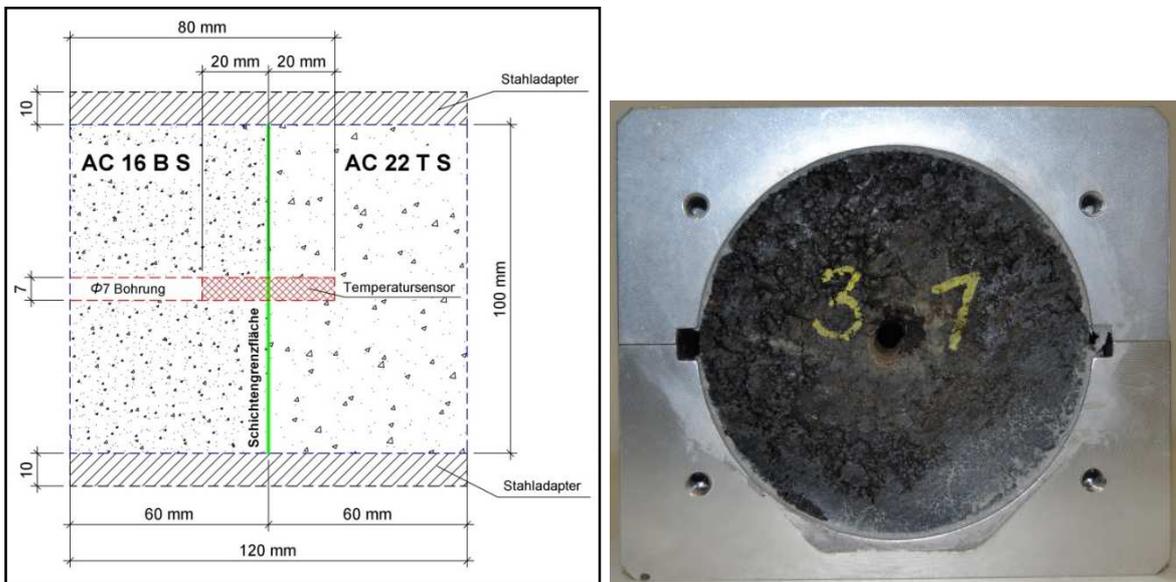


Abbildung 3.8: Schema von dem zweischichtigen Probekörper mit Bohrloch und eingesetzten Temperatursensor (links) und Vorderansicht des Bohrloches (rechts)

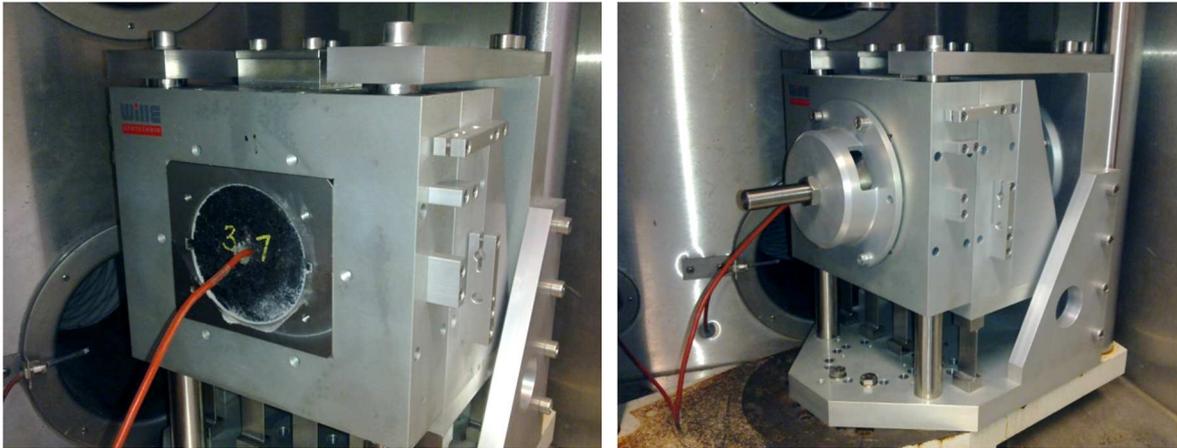


Abbildung 3.9: Temperaturmessung im Probekörper (links – offene Prüfvorrichtung, rechts – geschlossene Prüfvorrichtung)

Durch die Übersteuerung der Temperatur wurde iterativ versucht, die kürzesten Zeiten zum Erreichen jeder Temperaturstufe in einem Versuchszyklus zu bestimmen. Die Übersteuerung betrug stets 10°C über der Zieltemperatur im positiven Temperaturbereich bzw. 10°C unter der Zieltemperatur im negativen Temperaturbereich.

Eine solche Übersteuerung kann im Skript des Prüfprogramms problemlos eingesetzt werden.

Tabelle 3.5 zeigt die Dauer der fünf durchgeführten Temperiertests. Die in Rot dargestellten Werte sind die für die Schersteifigkeitsversuche erforderlichen Temperaturen.

Nr.	Temperaturstufe	Temperatur [°C]	Zeit [min]				
			Temperiertest 1	Temperiertest 2	Temperiertest 3	Temperiertest 4	Temperiertest 5
			Übersteuerungsdauer: 0 min Temperierdauer: 10 h	Übersteuerungsdauer: 30 min Temperierdauer: 6 h	Übersteuerungsdauer: 60 min Temperierdauer: 6 h	Übersteuerungsdauer: 45 min Temperierdauer: var.	Übersteuerungsdauer: var. Temperierdauer: var.
1	1	-20	0	30	60	45	55
2		-10	600	360	360	60	60
3	2	20	0	30	60	45	55
4		10	600	360	360	60	60
5	3	40	0	30	60	45	55
6		30	600	360	360	60	120
7	4	60	0	30	60	45	55
8		50	600	360	360	60	120
9	5	-20	0	30	60	45	90
10		-10	600	360	360	240	240
11	-	20	60	60	60	120	120
Gesamtdauer		[min]	3060	2010	2160	825	1030
		[h]	51,00	33,50	36,00	13,75	17,17

Tabelle 3.5: Zusammenfassung der 5 Temperierungsprogramme

Nach Ende der ersten drei Tests wurde die Temperatur für 60 Minuten auf 20°C umgestellt, lediglich damit die erste Temperierung (-10°C) bei jedem nachfolgenden Versuch ausgehend von der Raumtemperatur erfolgen konnte. Aus den Diagrammen wurde jedoch deutlich, dass die Zeit von 60 min für eine Rücktemperierung auf

ca. 20°C nicht ausreichend ist. Deshalb wurde diese Zeit in den nächsten drei Tests verlängert.

Um die Temperierungszeiten von der Ausgangstemperatur auf -10°C miteinander vergleichen zu können, wurde eine Ausgangstemperatur für alle Temperiertests festgesetzt. Nach jeder Umstellung der Soll-Temperatur erreichte der Asphaltprobekörper die gewünschte Temperatur mit einer deutlichen Verzögerung. Dieses Temperaturverhalten des Asphaltprobekörpers war zusätzlich auch durch die thermische Leitfähigkeit der Stahladapter und des Klebers beeinflusst.

Beim Temperiertest Nr. 2 zeigen die Ergebnisse, dass trotz der Temperaturübersteuerung um |10°C| für 30 min keine deutliche Verringerung der Zeit zum Erreichen jeder Temperatur zu beobachten ist (Abbildung 3.11). Die festgelegte Temperatur innerhalb des Probekörpers wurde erst nach der Hälfte der Zeit der konstant gehaltenen Soll- und Lufttemperatur erreicht. Die roten Pfeile zeigen diese Stellen. Gegenüber der Gesamtdauer des Temperiertests 1 bringt diese Übersteuerung eine Gesamtzeitersparnis von 187 min, was eine Verkürzung der Gesamtdauer von nur 14,2% ist. Es wurde festgestellt, dass sowohl bei dem ersten als auch bei dem zweiten Temperiertest die Temperierung von -10°C auf 10°C am längsten dauert. Die kürzeste Temperierungsdauer bei den beiden Tests war beim Abkühlen von der Ausgangstemperatur auf -10°C.

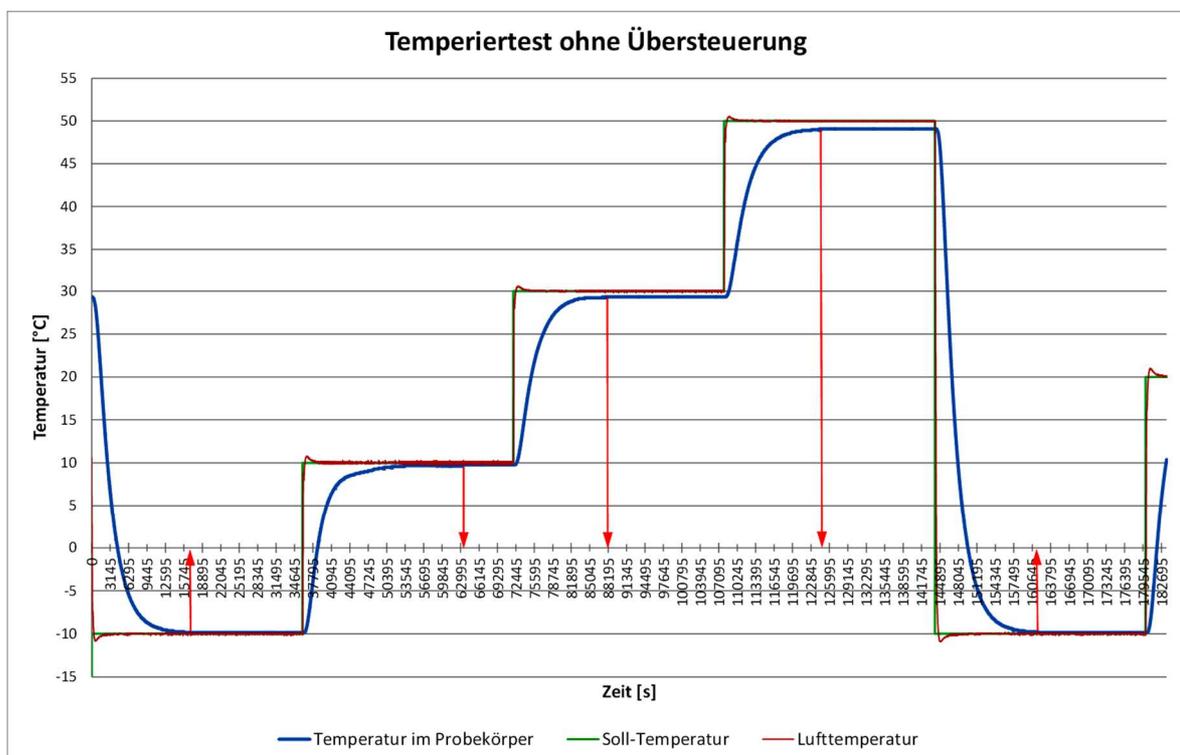


Abbildung 3.10: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch ohne Temperaturübersteuerung (Temperiertest Nr. 1)

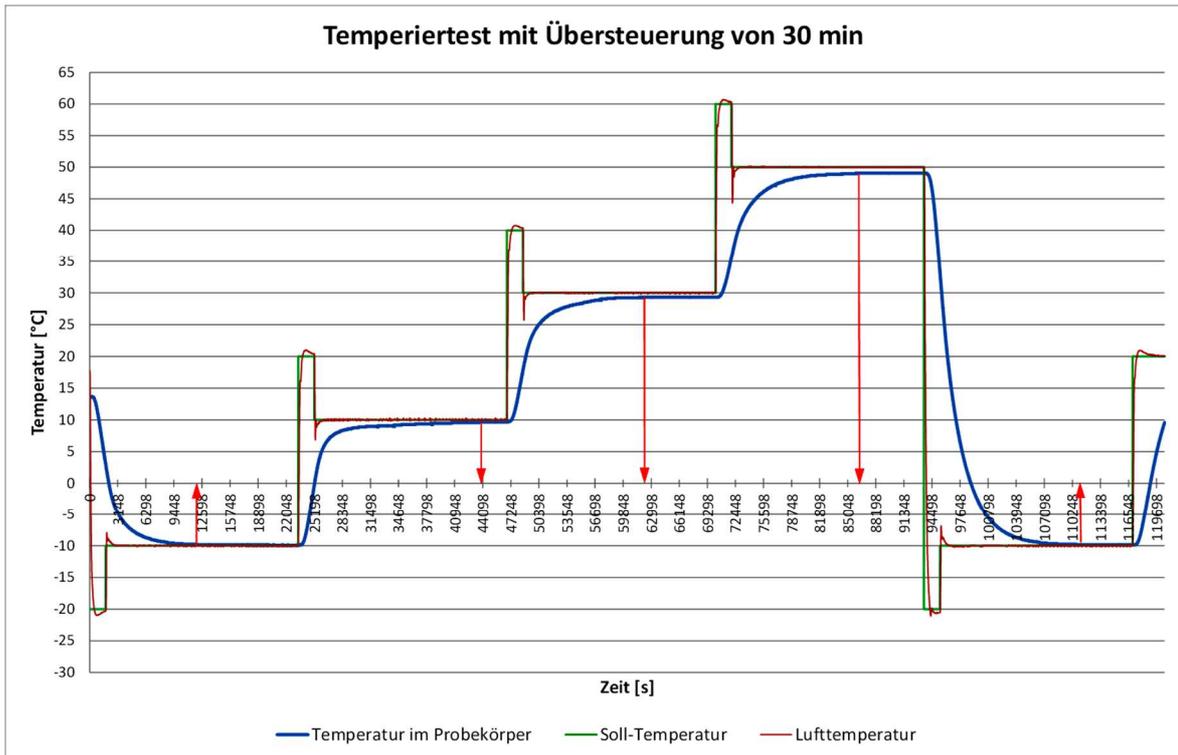


Abbildung 3.11: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 30-minütigen Temperaturübersteuerung um 10°C (Temperiertest Nr. 2)

Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass gewisse Temperaturdifferenzen zwischen den zwei Messsensoren vorhanden sind. Aus den Diagrammen in Abbildung 3.10 bis Abbildung 3.14 wird sichtbar, dass sich diese Differenzen bei den hohen Temperaturen (30°C und 50°C) erhöhen und bei den tiefen Temperaturen (-10°C und 10°C) reduzieren. Sie liegen jedoch immer im zulässigen Bereich von weniger als 1°C .

Die erzielte Wirkung einer beschleunigten Temperierung wurde erst beim Temperiertest Nr. 3 beobachtet. Durch die 60-minütigen Übersteuerung von 10°C konnten die gewünschten Temperaturen deutlich schneller erreicht werden.

Im Vergleich zum Temperiertest Nr. 1 reduziert sich die Gesamtdauer um mehr als 16 Stunden. Wie aus Tabelle 3.5 ersichtlich wird, ist bei jeder Temperaturstufe eine drastische Reduzierung der Temperierungsdauer vorhanden. Ausnahme macht nur die Dauer des Überganges von $+50^{\circ}\text{C}$ auf -10°C , die mit ca. 1 Stunde kleiner als diejenige beim Temperiertest Nr. 1 ist, immerhin aber 3,9 Stunden beträgt.

Nach Ende der 4 Übersteuerungen entstehen Temperaturspitzen, die im Bereich der tieferen Temperaturen (-10°C und 10°C) klar ausgeprägt sind (Abbildung 3.12). Bei 30°C und 50°C sind diese Spitzen deutlich kleiner. Bei dem Übergang von $+50^{\circ}\text{C}$ bis -10°C wird keine Temperaturspitze registriert.

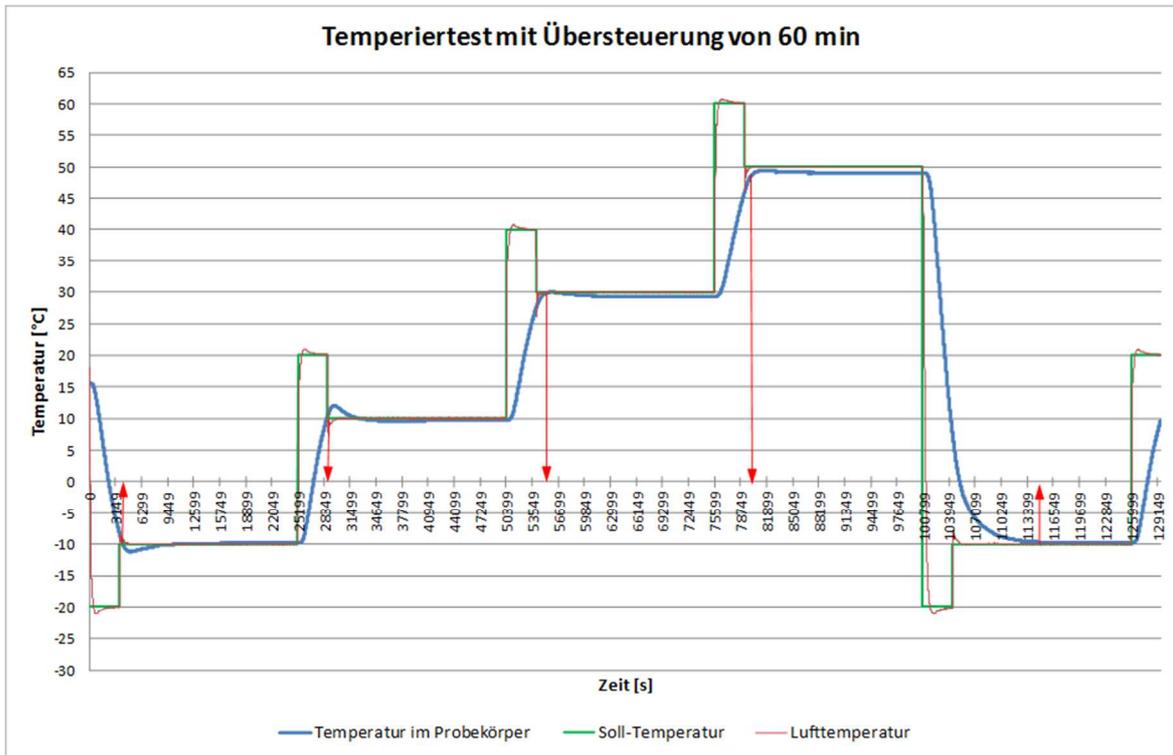


Abbildung 3.12: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 60-minütigen Temperaturübersteuerung um 10°C (Temperiertest Nr. 3)

Aufgrund der Ergebnisse der 3 Versuche wurden noch zwei weitere Iterationen durchgeführt. Das Ziel beim Temperiertest Nr. 4 war es, durch Reduzierung der Übersteuerungszeit auf 45 Minuten die Temperaturspitzen zu reduzieren. Die Temperierungsdauern der Zieltemperaturen wurden auf 60 Minuten festgelegt. Nur für die letzte Abkühlung von 50°C auf -10°C wurde nach der Übersteuerung (45 min) die Temperierungsdauer auf 240 Minuten festgesetzt (Abbildung 3.13). Für alle 5 Temperaturen (-10°C , 10°C , 30°C , 50°C und -10°C) ergab sich eine Gesamtdauer von 705 Minuten (11,75 Stunden). Wegen der offenbar zu kurzen Übersteuerungsdauern, wurde der Probekörper auf die Zieltemperaturen sehr langsam erwärmt bzw. abgekühlt. Aufgrund der darauf folgenden kurzen Temperierungsdauern konnten die Zieltemperaturen -10°C und 10°C nur für kurze Zeit konstant gehalten werden. Anhand der absoluten Temperaturdifferenzen, die außerhalb des zulässigen Bereiches liegen, ist erkennbar, dass die Zieltemperaturen von 30°C und 50°C , bedingt durch die zu kurzen Temperierungszeiten nach Ende der Übersteuerungen, nicht erreicht werden konnten. Besonders auffällig ist der Übergang von $+50^{\circ}\text{C}$ auf -10°C , der trotz der festgesetzten langen Temperierung 4,1 Stunden bis zum Erreichen der Zieltemperatur in Anspruch genommen hat.

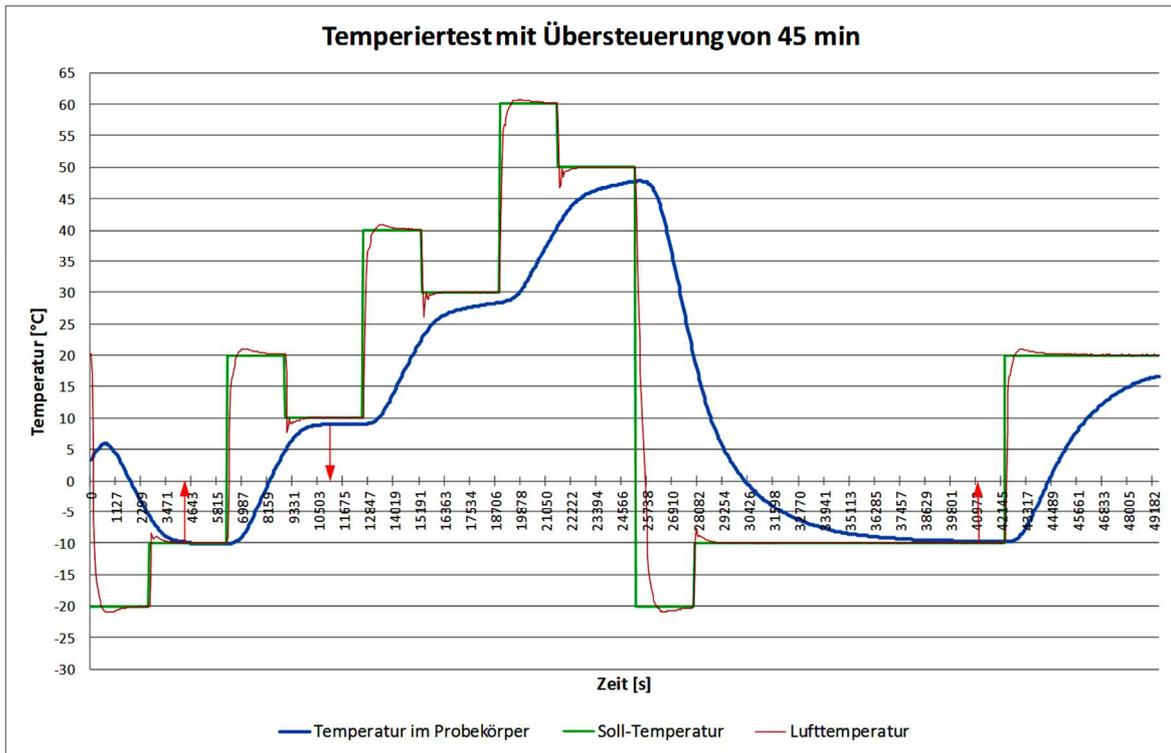


Abbildung 3.13: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit 45-minütigen Temperaturübersteuerung um $|\pm 10^{\circ}\text{C}|$ (Temperiertest Nr. 4)

Zur endgültigen Festlegung der Übersteuerungs- und Temperierungsdauer wurde ein angepasstes Programm zusammengestellt (Temperiertest Nr. 5), das durch variable Temperierungsdauer die Erkenntnisse der vorhergehenden vier Temperiertests für jede Temperaturstufe berücksichtigt. Aus Abbildung 3.14 wird ersichtlich, dass die Übersteuerungsdauer bei $T = -10^{\circ}\text{C}$ am Anfang und am Ende des Programms ausreichend ist, um die Temperatur im Probekörper ohne Temperaturspitzen schnell zu erreichen. Die absoluten Differenzen zwischen Soll-Temperatur und Temperatur im Probekörper sind bei allen Zieltemperaturen sehr klein und liegen stets im zulässigen Bereich. Das Abkühlen von 50°C auf -10°C dauert nur 1,8 Stunden und ist somit die kürzeste erreichte Temperierungsdauer ohne negative Temperaturspitze. Die Übersteuerung bei $T = 10^{\circ}\text{C}$ dauert jedoch länger und bei 30°C und 50°C kürzer als notwendig. Dies musste für das endgültige Temperierungsprogramm noch einmal verfeinert werden.

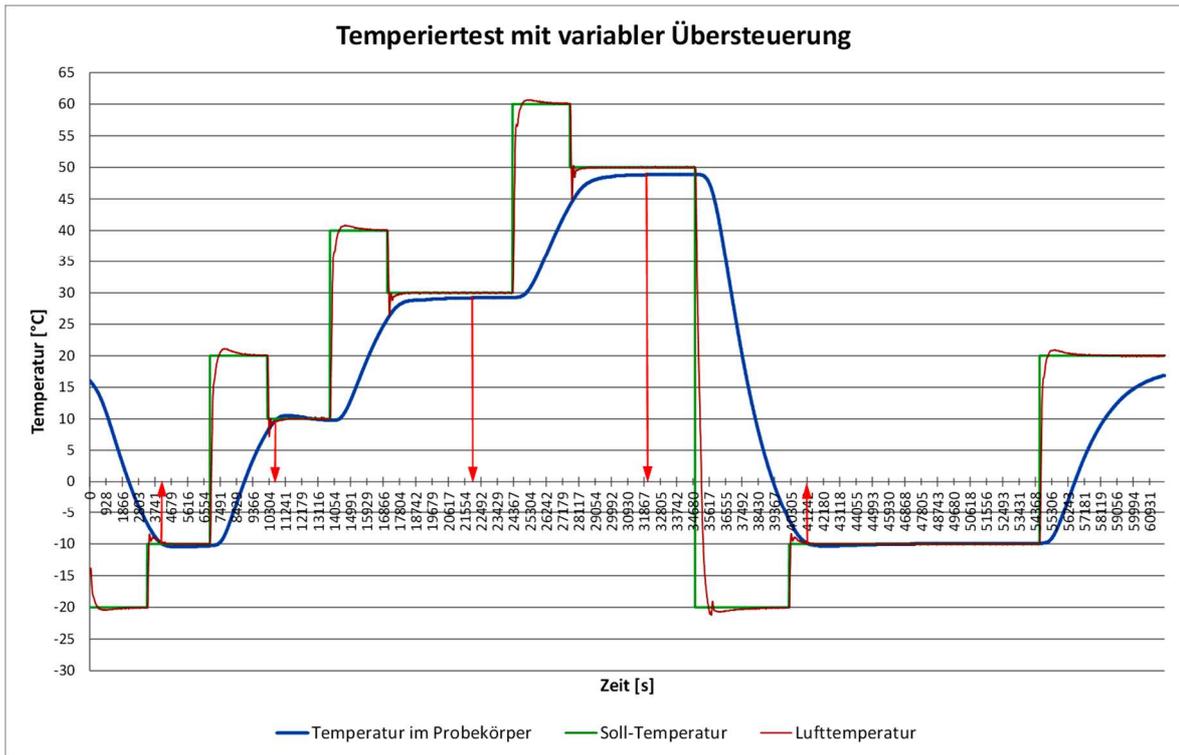


Abbildung 3.14: Verlauf der Temperatur im Asphaltprobekörper, der Soll- und der Lufttemperatur beim Versuch mit variablen Übersteuerungs- und Temperierungsdauer (Temperiertest Nr. 5)

Nr.	Temperaturstufe	Temperatur [°C]	Zeit [min]
1	1	-20	55
2		-10	80
3	2	20	53
4		10	80
5	3	40	58
6		30	120
7	4	60	58
8		50	120
9	5	-20	90
10		-10	120
Gesamtdauer		[min]	834
		[h]	13,90

Tabelle 3.6: Temperierungsprogramm für die Schersteifigkeitsversuche in den Arbeitspakete 2 und 4

Das gesamte Temperierungsprogramm für die Schersteifigkeitsversuche in den Arbeitspaketen 5 bis 8 ist in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Dabei wurde stets eine Sicherheitsreserve von 20 min bei der jeweiligen konstanten Zieltemperatur vorgesehen. Somit ergab sich für die Temperierung jedes Probekörpers eine Gesamtdauer von ca. 14 Stunden.

Wegen der großen Anzahl zu prüfender Probekörper, war es unmöglich, mit nur einem Probekörper pro Tag das geplante Versuchsprogramm vollständig abzuarbeiten. In den Arbeitspaketen 2 und 4 wurden die Differenzen zwischen den

Schersteifigkeiten bei der ersten Temperierstufe (-10 °C) und bei der ursprünglich vorgesehenen letzten Temperierstufe (Wiederholung -10°C) untersucht und es konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Deshalb konnte bei allen anderen Arbeitspaketen die letzte Temperierstufe von -10°C weggelassen (Temperaturstufe 5). Durch die dadurch entstandene Zeitersparnis ergab sich dann die Möglichkeit zwei Probekörper pro Tag zu prüfen.

Mit dieser Überlegung wurden Übersteuerungstemperaturen und die Übersteuerungsdauern endgültig optimiert und in das Prüfprogramm integriert (Tabelle 3.7). Die Gesamtdauer zur Prüfung eines Probekörpers betrug danach 11 Stunden und 43 Minuten. Somit ergaben sich ca. 20 Minuten Zeitpuffer zur Vortemperierung der Prüfvorrichtung auf -10°C und zum Probekörperwechsel für den nächst folgenden Versuch für eine Zeitzielvorgabe von 12 h je Versuch, was gut realisierbar war.

Nr.	Temperaturstufe	Temperatur [°C]	Zeit [min]
1	1	-20	20
2		-10	116
3	2	25	50
4		10	131
5	3	45	70
6		30	136
7	4	60	100
8		50	80
Gesamtdauer		[min]	703
		[h]	11,72

Tabelle 3.7: Temperierungsprogramm für die Schersteifigkeitsversuche in den Arbeitspakete 5 bis 8

3.4 Prüfprogramm

Es wurde ein umfangreiches Prüfprogramm realisiert, um die Auswirkung aller Parameter, die den Schichtenverbund beeinflussen, zu untersuchen. Der Versuchsablauf für die zyklischen Versuche zur Bestimmung der Schersteifigkeit ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

Die Startparameter des Prüfprogramms waren dabei jeweils:

- Temperatur $T = -10^{\circ}\text{C}$,
- Normalspannung $\sigma_N = 0,9 \text{ MPa}$,
- Frequenz $f = 10 \text{ Hz}$ und
- maximaler Scherweg $s_{w,\text{max}} = 0,03 \text{ mm}$.

Der Einbau des Probekörpers in der Prüfvorrichtung erfolgte nach Vortemperierung bei -10°C. Nach Ausbau des geprüften Probekörpers wurde die Temperatur in der

Temperierkammer für 20 Minuten auf -20°C und für 30 Minuten auf -10°C eingestellt, um die Teile der gesamten Prüfvorrichtung möglichst schnell auf -10°C für den folgenden Versuch zu temperieren. Vor dem Versuch musste jeder in den Stahladaptern eingeklebte Probekörper für mindestens vier Stunden auf -10°C vortemperierte werden. Der Versuch endete bei $T = 50^{\circ}\text{C}$, $\sigma_N = 0,9 \text{ MPa}$, $f = 10 \text{ Hz}$ und $s_{w,\text{max}} = 0,15 \text{ mm}$.

Jeder Versuch wurde bei vier verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Bei jeder Temperatur wurde die Probe mit fünf Normalspannungen belastet. In jeder Normalspannungsstufe wurde der Probekörper mit sechs Frequenzen mit vorgegebener Lastwechselanzahl (LW) belastet. Die Software der verwendeten Prüfmaschine ermöglichte die Erstellung eines Skriptes, welches den Prüfablauf voll automatisch durchführte. Während des Durchlaufs des Prüfprogramms waren keine manuellen Eingriffe zur Umstellung notwendig. Das bereits beschriebene Temperierungsprogramm in den Belastungspausen lief ebenfalls automatisch ab. Die Gesamtdauer der Prüfung eines Probekörpers betrug 11 Stunden und 43 Minuten.

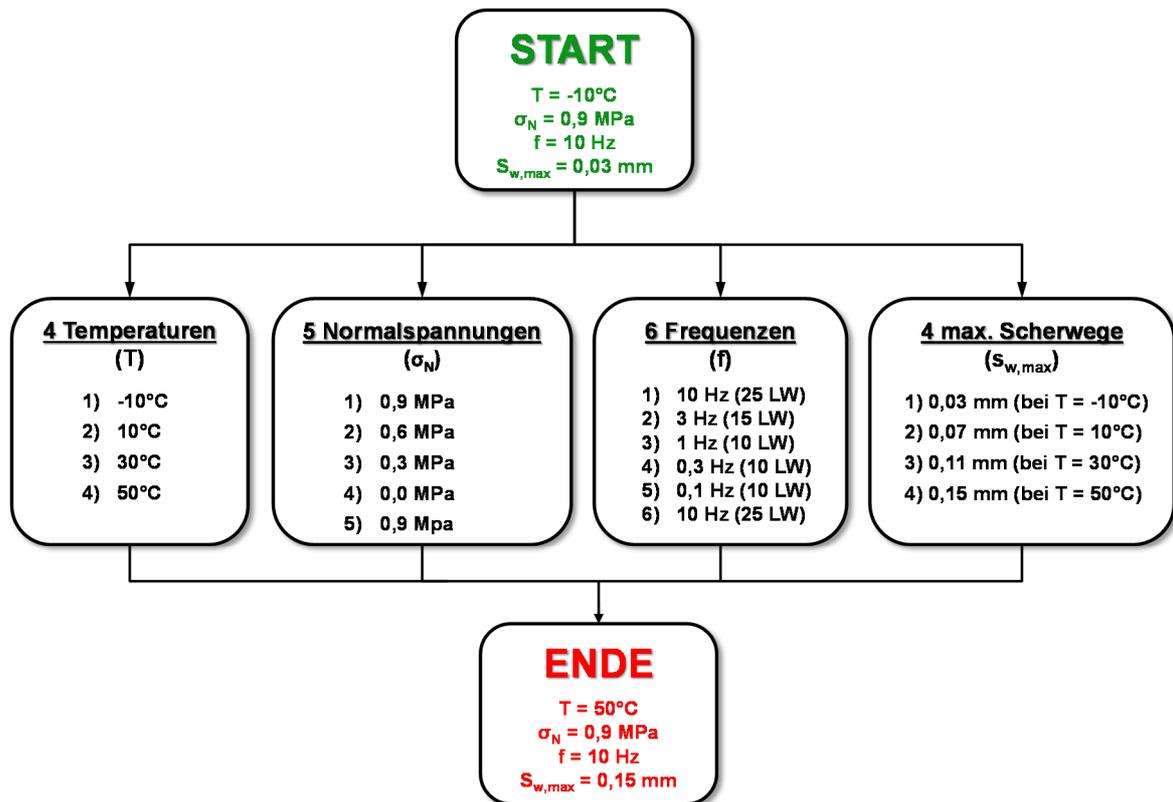


Abbildung 3.15: Prüfprogramm für die zyklischen Schersteifigkeitsversuche

Nr.	Beschreibung	Temperatur [°C]	Dauer [min]	Dauer [h]
1	1. Übersteuerung	-20	20	0,33
2	1. Vortemperierung	-10	81	1,35
3	1. Versuch	-10	35	0,58
4	2. Übersteuerung	25	50	0,83
5	2. Vortemperierung	10	96	1,60
6	2. Versuch	10	35	0,58
7	3. Übersteuerung	45	70	1,17
8	3. Vortemperierung	30	101	1,68
9	3. Versuch	30	35	0,58
10	4. Übersteuerung	60	100	1,67
11	4. Vortemperierung	50	45	0,75
12	4. Versuch	50	35	0,58
Summe Temperierungszeit			703	11,72

Tabelle 3.8: Zeitlicher Ablauf des Prüfprogramms für Arbeitspakete 5 bis 8

3.5 Bestimmung der Materialkenngrößen von den Asphaltmischgütern

3.5.1 Bestimmung des Steifigkeitsmoduls

Um die Steifigkeiten und die Ermüdungsfunktionen der drei verwendeten Asphaltmaterialien zu bestimmen, wurden im Arbeitspaket 10 Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt. Im Spaltzug-Schwellversuch wird der zylindrische Asphaltprobekörper mit einer sinusförmigen Druck-Schwellbelastung zwischen zwei diametral gegenüberliegende Lasteinleitungsstreifen beansprucht, wobei sich im Probekörper in vertikaler und horizontaler Richtung ein inhomogener zweiachsiger Spannungszustand ausbildet.

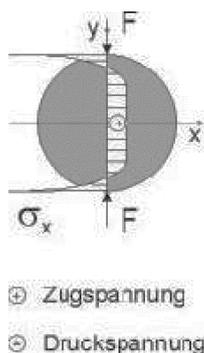


Abbildung 3.16: Horizontaler Spannungsverlauf im zylindrischen Probekörper beim Spaltzug-Schwellversuch nach AL Sp-Asphalt 09

Wellner u.a. 2007 haben festgestellt, dass der Bruch in der Probekörpermitte initiiert wird und sich dann in vertikaler Richtung nach außen hin fortsetzt. Da – wie in Ab-

Abbildung 3.16 erkennbar ist - in diesem Bereich auch die maximalen Zugbeanspruchungen auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass das Versagenskriterium beim Spaltzug-Schwellversuch die Zugbeanspruchung in der Mitte des Probekörpers ist. Die Methodik zur Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion eines Asphaltgemisches ist in der AL Sp-Asphalt 09 ausführlich beschrieben.



Abbildung 3.17: Rissbildung im Asphaltprobekörper nach dem Ermüdungsversuch (Asphaltdeckschicht SMA 11 S)

Die Anforderungen an die Probekörpereigenschaften, die Festlegung der Ober- und Unterspannung und die Durchführung des Spaltzug-Schwellversuches sind in der AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009) geregelt.

In Anlehnung an Tabelle 2 der AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009) betragen der Durchmesser und die Höhe der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtprobekörper entsprechend (100 ± 3) mm und (40 ± 2) mm und der Asphalttragschichtprobekörper entsprechend (150 ± 3) mm und (60 ± 2) mm. Von dem Deckschicht- und Tragschichtmaterial wurden je 28 Probekörper und von dem Binderschichtmaterial – 36 Probekörper hergestellt, deren Raumdichten sowohl durch Ausmessen als auch durch Tauchwägung bestimmt wurden (Anhang 1.5). Für die Spaltzug-Schwellversuche wurden nach der Vorschrift nur diejenigen Probekörper für eine Versuchsreihe verwendet, deren Spannweite der Raumdichte maximal $0,03 \text{ g/cm}^3$ betrug.

Da der absolute E-Modul eines Asphaltgemisches temperatur- und frequenzabhängig ist, kann der Zusammenhang mit Hilfe der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz (Hürtgen, 1982) beschrieben werden. Beim Auftragen des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz ergeben sich Isothermen, die mit Hilfe des so genannten Verschiebungsfaktors $\log a_T$ (Arrhenius) in eine stetige Masterfunktion überführt werden können. Mit Hilfe dieser Funktion ist es möglich, Steifigkeitsmodule für alle Kombinationen aus Temperatur und Belastungsfrequenz zu prognostizieren.

Zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln wurden 3 Probekörper bei vier Prüftemperaturen (-10°C , 0°C , 10°C und 20°C) mit Variation der Prüffrequenz (0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz) geprüft.

Die korrigierte Frequenz lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_{\text{korr}} = f \cdot \alpha_T \quad \text{Gleichung 2}$$

Für die Berechnung des Faktors α_T wurde die folgende Formel angewendet:

$$\alpha_T = e^{m \cdot \left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{T_R+273,15} \right)} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die unabhängige Variable x^* wurde aufgrund der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz nach der folgenden Gleichung berechnet (Dragon / Zeissler, 2013):

$$x^* = \log_{10}(f \cdot \alpha_T) = \log_{10} \left(e^{m \cdot \left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{T_R+273,15} \right)} \cdot f_i \right) \quad \text{Gleichung 4}$$

Die Masterfunktion (Hauptkurve) aus den Messdatenpunkten wurde durch die Sigmoidfunktion nach der folgenden Gleichung angenähert:

$$|E| = |E|_{\min} + \frac{|E|_{\max} - |E|_{\min}}{1 + e^{(b_1 \cdot x^* + b_0)}} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

α_T	Verschiebungsfaktor [-]
f	Belastungsfrequenz [Hz]
f_{korr}	korrigierte Frequenz [Hz]
m	Materialparameter, Verschiebungsfaktor für die Temperaturabhängigkeit [-]
$ E _{\min}$	minimaler Grenzmodul [MPa]
$ E _{\max}$	maximaler Grenzmodul [MPa]
T	Versuchstemperatur [°C]
T_R	Referenztemperatur = 20°C [°C]
b_1	Regressionsparameter [-]
b_0	Regressionsparameter [-]

3.5.2 Bestimmung der Ermüdung

Die Ermüdung von Asphalt wird als die geringfügige Schädigung bei jeder kurzzeitigen Beanspruchung einer Asphaltbefestigung während der Überrollung durch einen Reifen definiert. Dies führt zu dem Verlust der Steifigkeit des Asphaltes, welcher durch die Bildung von Mikrorissen bzw. Mikrorissstrukturen und die Ausbreitung dieser bei wiederholter Belastung verursacht wird (Dragon, 2015). Durch die fortschreitende netzartige Verzweigung der Mikrorisse (Akkumulation der Schädigung) je Lastwechsel entstehen sogenannte Makrorisse, welche das Versagen der Probekörper im Versuch bzw. der Asphaltbefestigung in situ durch Rissbildung bedingen (Di Benedetto u.a., 2004, Weise, 2008).

Zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion ist die Ermittlung der Lastwechselzahl bis zum Makrorisskriterium notwendig. Dafür wurde die in AL Sp 09 beschriebene Methodik verwendet. Basierend auf dem Konzept der dissipierten Energie, wurde die Methode nach Hopman u.a. (1989) zur Bestimmung von N_{Makro} verwendet. Dabei wird bei dem maximalen Wert der Energy ratio die zugehörige Ermüdungslastwechselzahl für das Kriterium „Makroriss“ bestimmt.

$$ER(N) = E(N) \cdot N \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

$ER(N)$ Energy ratio [MPa]

$E(N)$ berechneter Steifigkeitsmodul bei dem betrachteten Lastwechsel [MPa]

N zugehörige Lastwechselzahl [-]

Unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, werden die Ermüdungsfunktionen in der folgenden Form approximiert:

$$N_{\text{Makro}} = C_1 \cdot \varepsilon_{\text{el,anf}}^{C_2} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

N_{Makro} Anzahl der Lastwechsel bis Makroriss [-]

$\varepsilon_{\text{el,anf}}$ anfängliche elastische Horizontaldehnung in Probekörpermitte [‰]

C_1, C_2 materialspezifische Parameter [-]

Die Berechnungen erfolgten mit dem Berechnungsprogramm TISAD (Zeissler, 2014).

Die Steifigkeiten und die Ermüdungsfunktionen werden als Eingangswerte für die rechnerische Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09 benötigt. Die Masterfunktionen für die Steifigkeiten sind auch für die realitätskonformereren Berechnungen mit

Hilfe der Methode der Finiten Elemente (SAFEM nach Oeser u.a., 2014) notwendig. Die Ergebnisse sind Abschnitt 5.10 zu entnehmen.

3.6 Untersuchung der Materialeigenschaften des verwendeten Klebers

Damit die Verklebung zwischen Stahlschalen und Probekörper in dem Finite-Elemente-Programm REFEM mit dem tatsächlichen Materialeigenschaften des verwendeten Klebers modelliert werden konnte, mussten diese exakt eingegeben werden.

Da vom Hersteller des Klebers keine Angaben zur Steifigkeit gemacht wurden, mussten der Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Temperaturen als Grundlage für die FEM-Berechnungen labortechnisch bestimmt werden. Der bei allen Versuchen zum Einkleben der Asphaltprobekörper in den Stahladaptern der Prüfvorrichtung verwendete 2-komponenten-Epoxidharzkleber Sikadur[®]-30 wurde mit dem Spaltzug-Schwellversuch geprüft um die Steifigkeitsmodule bei vier Frequenzen (0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz) und vier Temperaturen (-10°C, 10°C, 30°C und 50°C) zu bestimmen. Im Ergebnis sollten mit einer angenäherten Masterkurve für die Referenztemperatur $T_0 = 20^\circ\text{C}$ die Steifigkeitsmodule in dem beschriebenen Frequenzspektrum abgeschätzt werden. Des Weiteren sollte aus den Messwerten die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion ermittelt werden.

Der Sikadur[®]-30 ist ein lösemittelarmer, thixotroper Armierungskleber auf Epoxidharzbasis, der bei Temperaturen zwischen -40°C und +45°C angewendet werden kann, eine sehr gute Haftung auf Stahl und eine hohe Kriechbeständigkeit unter Dauerlast hat und schwindfrei aushärtet. Er besteht aus zwei Komponenten (A und B), die in einem Verhältnis A : B = 3 : 1 Gewicht- oder Volumenteile vermischt werden. Komponente B wird zu Komponente A gegeben und bei Raumtemperatur mindestens 3 Minuten bis vollständiger Homogenisierung gemischt. Vor dem Eintragen auf die zu verklebenden Flächen muss der Kleber nochmals für 1 Minute gemischt werden.

Der Probekörper wurde nach den Anforderungen zur Probekörperherstellung nach AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009) hergestellt. Da der Größtkorndurchmesser des Klebergemisches sehr viel kleiner als 16 mm ist, konnte die in AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009) festgelegte Höhe von 40 mm auf 35 mm reduziert werden. Für die Herstellung des Probekörpers wurden der Formzylinder und die Formgrundplatte von der Verdichtungsform des Marshall-Verdichtungsgerätes nach TP Asphalt-StB, Teil 30 (FGSV, 2007) verwendet. Da der Formzylinder einen Innendurchmesser von $101,6 \pm 0,1$ mm aufweist (Abbildung 3.18), war auch der Durchmesser des Probekörpers um 1,5 mm größer als der in AL Sp-Asphalt 09 (FGSV, 2009) geforderte Durchmesser von 100 mm.

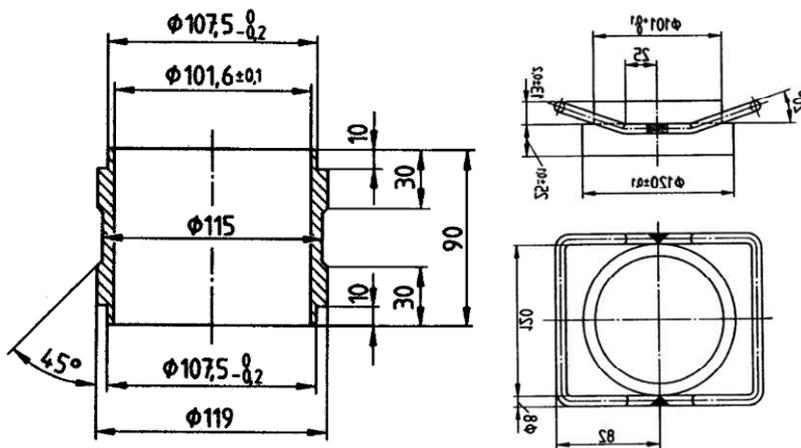


Abbildung 3.18: Formzylinder und Formgrundplatte nach DIN EN 12697-30 (2004)

Das Volumen des Probekörpers berechnet sich wie folgt:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 5,075^2 \cdot 4 = 283,20 \text{ cm}^3 \quad \text{Gleichung 8}$$

Nach Angaben des Herstellers besitzt das Gemisch eine Dichte von $(1,65 \pm 0,1) \text{ g/cm}^3$ bei $+23^\circ\text{C}$. Somit wurde die benötigte Menge zur Herstellung des Probekörpers nach der folgenden Formel berechnet

$$m = \rho_m \cdot V = 1,65 \cdot 323,65 = 467,28 \text{ g} \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

r Radius des Probekörpers [cm]

h Höhe des Probekörpers [cm]

ρ_m Rohdichte der Mischung [g/cm^3]

Komponente A hatte eine Masse von 155,76 g und Komponente B – 311,52 g.

Die innere Wand des Formzylinders und die Oberfläche der Formgrundplatte wurden mit Transparentpapier als Trennmittel überzogen (verkleidet), damit der ausgehärtete Probekörper aus dem Formzylinder ausgepresst werden konnte (Abbildung 3.19). Danach wurde das Epoxidharzklebergemisch mit Hilfe eines langen Löffels bei Raumtemperatur in Portionen in die Form gebracht und gleichmäßig verteilt. Anschließend wurde die Oberfläche der eingefüllten Mischung mit Pergament abgedeckt und mit einem Stempel aus Stahl geebnet und leicht gedrückt. Zum Aus härten wurde der Probekörper für 48 Stunden in dem Formzylinder bei Raumtemperatur auf einer ebenen Unterlage gelagert. Das Ausformen erfolgte mit einer Auspressvorrichtung, die in Abbildung 3.20 gezeigt ist. Der angefertigte Kleberprobekörper ist in Abbildung 3.21 dargestellt.



Abbildung 3.19: Formzylinder mit überzogener Innenwand (links) und geglättete Oberfläche des Epoxidharzklebergemisches (rechts)



Abbildung 3.20: Auspressvorrichtung im Labor der TU Dresden

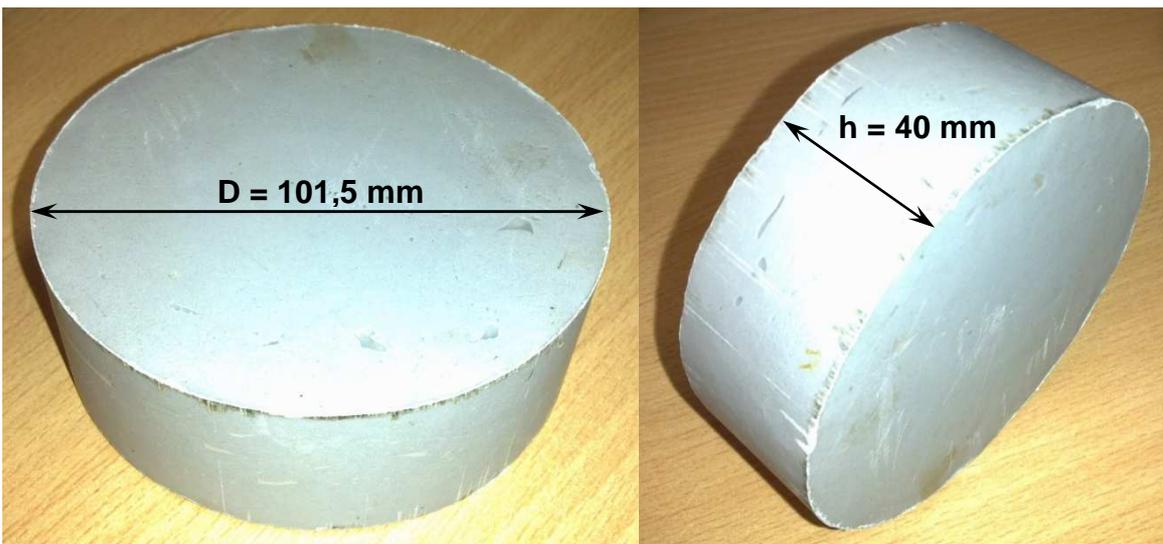


Abbildung 3.21: Fertiger Probekörper aus 2-komponenten-Epoxidharzkleber Sikadur®-30

Der Verlauf der Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Eine für die Versuche sehr wichtige Feststellung ist, dass die Steifigkeiten des Klebers ähnlich sind wie die Steifigkeiten des Asphalts. Diese Tatsache ist besonders wichtig für die Bewertung der Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen bei der Verklebung zwischen den Stahlschalen und dem Asphaltprobekörper sowohl für die Versuche als auch für die Finite-Elemente-Berechnungen.

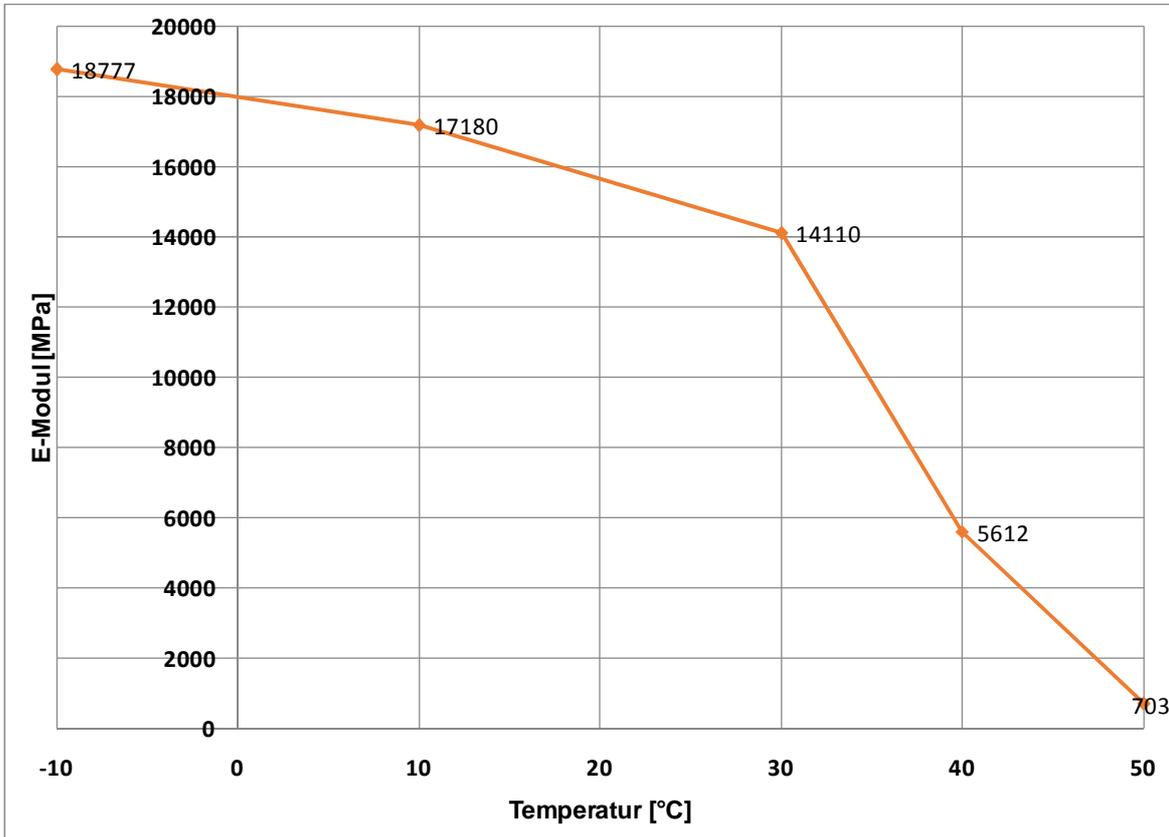


Abbildung 3.22: Steifigkeitsmodul des in den Versuchen verwendeten Epoxidharzklebers Sikadur®-30 in Abhängigkeit von der Temperatur

3.7 Modellierung des Probekörpers mit REFEM

Um die Spannungsverteilungen im Inneren des Asphaltprobekörpers und in der Schichtgrenzfläche abzubilden (und zu beurteilen), wurde ein numerisches Modell auf Basis der Methode der Finiten Elemente angewendet. Ziel war es, durch eine möglichst genaue numerische Nachbildung der labortechnischen Versuche das Verhalten des Schichtverbundes anhand der Spannungs- und Verzerrungsverläufe bei unterschiedlichen Temperaturen und Scherwegen in der Schichtgrenzfläche zu bestimmen. Dafür musste der Probekörper, die Schichtgrenzfläche und die Funktionsweise der Prüfvorrichtung realitätsnah modelliert werden. Im Modell mussten die

genaue Geometrie und alle Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Diese wurden durch die im Arbeitspaket 10 ermittelten Masterfunktionen für die verwendeten Asphaltgemische bestimmt. Zur Erfassung des vollständigen dreidimensionalen Spannungs- und Dehnungsverlaufes musste die Lastausbreitung berücksichtigt werden. Eine solche analytische Lösung kann nur mit einschränkenden Annahmen wie Rotationssymmetrie oder linear elastischem Materialverhalten gelingen. Bei der Verwendung der Finite-Element-Methode wurde die gesamte Konstruktion mit finiten (endlichen) Elementen diskretisiert. Zur Modellierung von Asphaltsschichten konnten dreidimensionale Elemente eingesetzt werden. Es wurden isoparametrische 20-Knoten-Elemente verwendet, die durch sechs doppelt gekrümmte Seitenflächen berandet waren. Jede Seitenfläche hatte acht Elementknoten, an denen die benachbarten Elemente miteinander verbunden waren. Die Verschiebungen wurden innerhalb der 20-Knoten-Elemente mit trikubischen Ansatzfunktionen (vollständiges Polynom 3.Ordnung) approximiert (Oeser, 2010.). Da der Probekörper zylindrisch war, konnte die numerische Analyse mit einem dreidimensionalen rotations-symmetrischen Modell durchgeführt werden. Durch die Rotationssymmetrie wurde der Rechenaufwand und dementsprechend die Rechenzeit deutlich reduziert.

Eine wichtige Entscheidung beim Erstellen des Modells ist die Erzeugung des FE-Netzes. Je feiner die Vernetzung ist, umso genauer sind die Ergebnisse der Berechnung. Wenn man jedoch das Netz stark verfeinert, erhöhen sich die Dimensionen des sich ergebenden Gleichungssystems und demzufolge auch die Rechenzeit beachtlich.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Rechenaufwandes stellt die Anwendung der Rotationssymmetrie dar. Da der zylindrische Probekörper geometrische Symmetrie um die Z-Achse (Rotationsachse) aufweist, wurde nur die Hälfte des Probekörpers modelliert (Abbildung 3.25).

3.8 Erstellung des FE-Modells

Der Asphaltprobekörper bestand aus zwei Asphaltsschichten (z.B. Asphaltbinder-schicht und Asphaltdeckschicht), die miteinander gekoppelt waren. Er hatte einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe, die je nach Anforderungen im jeweiligen Arbeitspaket, unterschiedlich war. Die Stirnflächen des Probekörpers lagen in der X-Y-Ebene und die Mantelfläche – in Z-Richtung.

Es wurde mit der ersten Schicht angefangen, die im Modell die untere Schicht war. Bei der Generierung des dreidimensionalen Modells des Asphaltprobekörpers wurde die „Käseecke“ verwendet, die auf dem Prinzip des Quaders aufbaut (Abbildung 3.23) und ein Viertel des Probekörpers darstellt (a). Um die Hälfte des gesamten Probekörpers zu modellieren, sollte ein zweiter „Käseecke“-Block (b), der um

90° gedreht ist und dieselben Dimensionen wie der erste hat, angeordnet werden. Analog bestand die zweite (obere) Schicht aus den „Käseecke“-Blöcken h und i. In den Laborversuchen wurde der Probekörper mit einem 2-komponenten-Epoxidharzkleber in 4 Halbschalen aus Stahl eingeklebt. Der Abstand zwischen den Stahlschalen wurde - wie im Versuch angestrebt - mit 1,0 mm angenommen. In diesem Fall waren zwei in Wirklichkeit existierende 0,5 mm dünnen Schichten zwischen der Schichtengrenzfläche und den Stahlschalenrändern vorhanden, deren Einfluss auf die untersuchte Verformung in der Schichtengrenzfläche vernachlässigbar klein war. Diese zwei dünnen Schichten wurden nach demselben Prinzip (Typ „Käseecke“) mit den jeweiligen Materialparametern der zwei zu verbindenden Asphalt-schichten modelliert. Die untere dünne Schicht (Abbildung 3.25) bestand aus den Blöcken (c) und (d) und die obere dünne Schicht – aus (j) und (k). Die gesamte untere Asphalt-schicht (A) bestand aus den Blöcken a, b, c und d, die miteinander starr gekoppelt waren. Analog setzte sich die obere Asphalt-schicht (B) aus den Blöcken h, i, j und k zusammen.

Die Stahlschalen (C) und (D), in denen der ganze Asphaltprobekörper fest eingeklebt war, wurden als Blöcke vom Typ Kreisplatte modelliert (Abbildung 3.24). Ihre Dicke betrug 1,0 cm. Die Knoten der Kreisplatte mussten genau mit den Knoten der „Käseecken“ übereinstimmen. In der XY-Ebene wurde die ganze halbe Stahlschale als ein Block konstruiert, der in den Quadranten I und IV im kartesischen Koordinatensystem lag. Der Abstand zwischen den zwei Stahlschalen ist, wie schon vorher beschrieben, 1,0 mm. Da Symmetrie in der X-Achse vorhanden ist, wurde die Verschiebung in Y-Richtung simuliert, die über die untere Stahlschale (C) vorgegeben war. Die Verschiebungen in X und Z-Richtung waren nicht erlaubt. Da die obere Stahlschale (D) die in X und Y-Richtung unbewegliche Schicht des Asphaltprobekörpers in horizontaler Richtung festhalten musste, waren die Verschiebungen auf diesen Achsen gleich Null. Die Verschiebung in Z-Richtung wurde zugelassen.

Auf den Stirnflächen des Probekörpers wurden Stahlscheiben mit einer Dicke von je 1,0 cm aus „Käseecke“-Blöcken, die miteinander starr gekoppelt waren, modelliert. Die untere Stahlscheibe E (f+g) verhinderte die Bewegung des Probekörpers in Z-Richtung. Die Skalierung musste in der X-Y-Ebene mit der Skalierung des Probekörpers übereinstimmen.

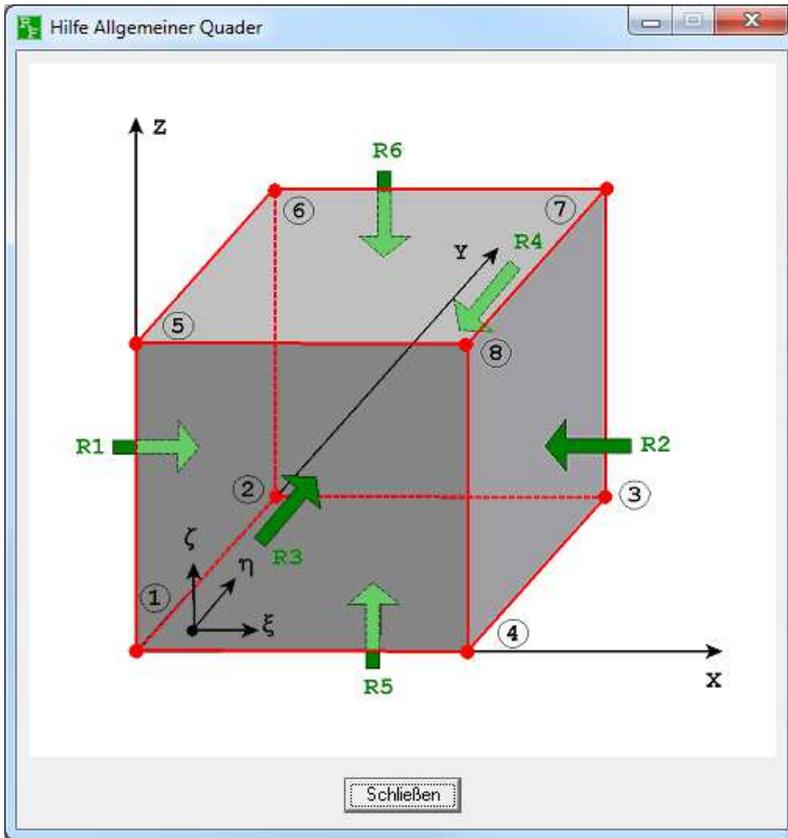


Abbildung 3.23: Für die Käsecke verwendeter Quader

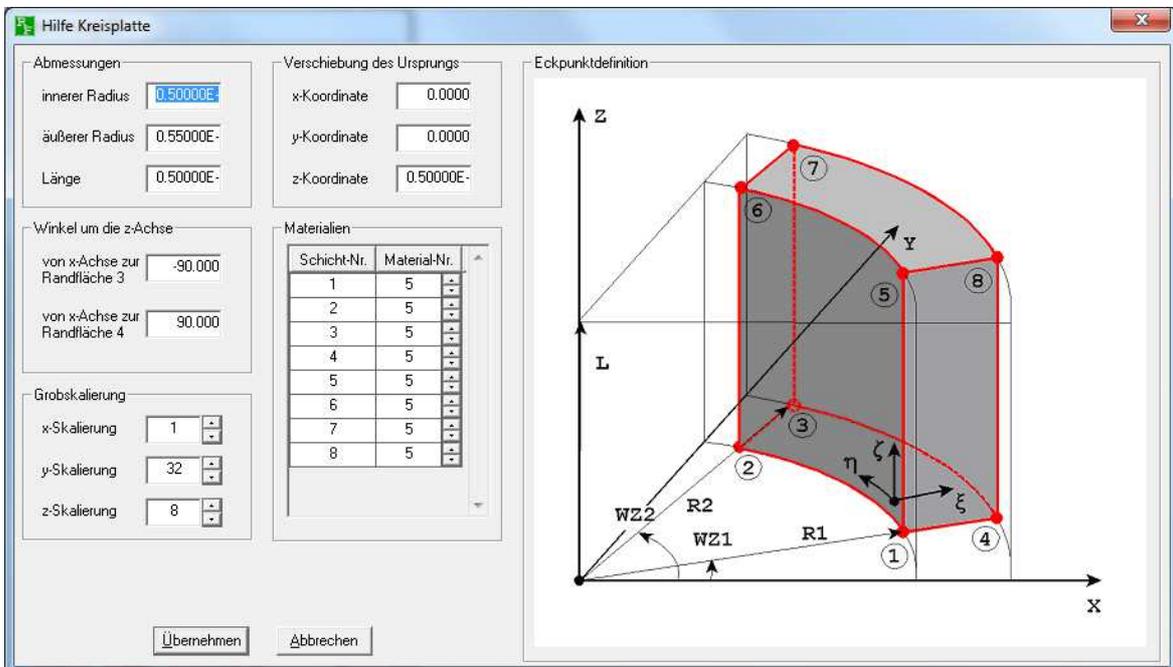


Abbildung 3.24: Element Kreisplatte für die Stahlschalen

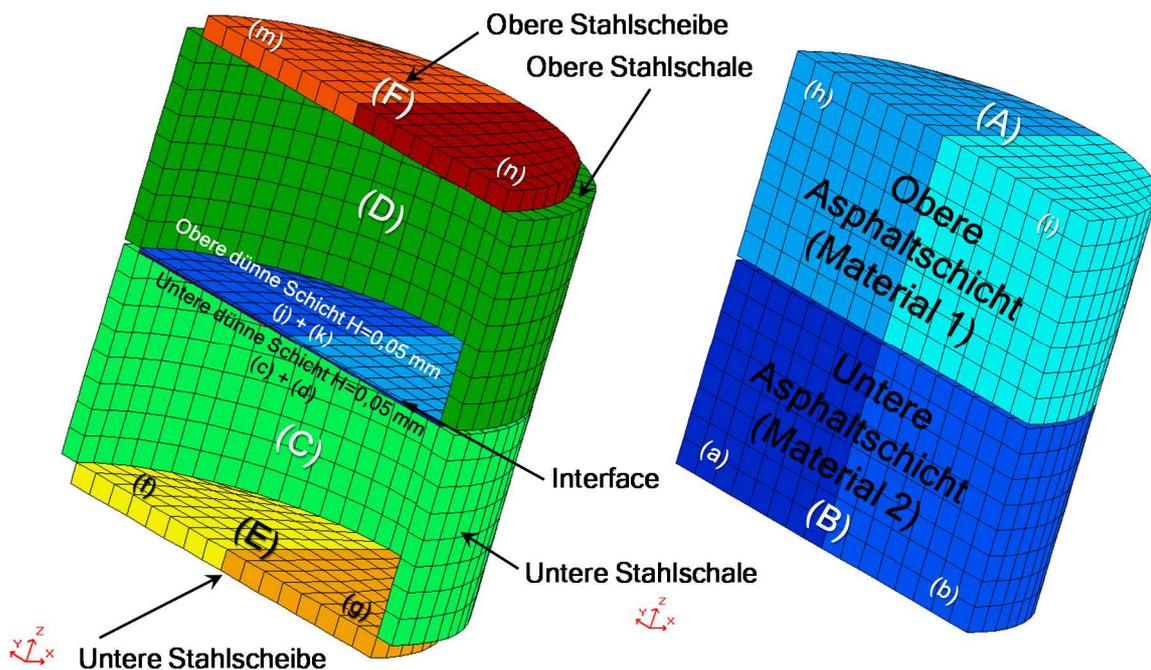


Abbildung 3.25: Blöcke im Modell

Der normale und der tangentielle Schichtenverbund beeinflusst das Tragverhalten der Straßenbefestigung. Um den Schichtenverbund zu untersuchen, mussten die Elemente der beiden Asphalt-schichten kinematisch gekoppelt werden. Die Kopp-lung durfte nicht starr sein, damit die spannungs- und verformungsabhängige Ver-schiebung der Elementknoten berechnet werden konnte. Die Schichten mussten miteinander elastisch gekoppelt werden. Im numerischen Modell wurden die kine-matischen Bindungen mit Hilfe eines Interface-Elementes zwischen den Grenzflä-chen der zwei Asphalt-schichten beschrieben. Ein Interface-Element hat eine Dicke von 0 mm und besitzt keine materielle Ausdehnung. Die obere Grenzfläche der un-teren Asphalt-schicht A sowie die untere Grenzfläche der oberen Asphalt-schicht B und das Interface-Element haben getrennte Knoten mit gleichen Koordinaten. Bei „vollem“ Verbund sind zwischen diesen Grenzflächen keine Relativverschiebungen vorhanden und bei fehlendem Schichtenverbund gleiten die beiden Schichten. Da-bei entstehen Schichtgrenzverschiebungen zwischen gegenüberliegenden Punkten in den Grenzflächen, die zu Scherspannungen in der Ebene des Interfaces führen (AL-B4).

3.8.1 Materialparameter

Für den Asphaltprobekörper sowie auch für die Stahlscheiben und –schalen wurde ein linear elastisches, aber temperatur- und frequenzabhängiges Materialverhalten angenommen. Für jede Asphalt-schicht wurde in Abhängigkeit von der Temperatur der jeweilige E-Modul eingetragen. Die Querdehnzahl ist temperaturabhängig und wurde nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\mu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{\left[3,1849 - 0,04233 \left(\frac{9 \cdot T + 32}{5}\right)\right]}} \quad [-] \quad \text{Gleichung 10}$$

mit:

μ Querdehnzahl [-]

T Temperatur [°C]

Der Elastizitätsmodul der Stahlschalen und der Stahlscheiben beträgt $E = 210\,000$ MPa und ihre Querdehnzahl ist $\mu = 0,28$.

Um die realitätsnahe Verbindung zwischen den Stahlschalen und dem Asphaltprobekörper durch den verwendeten Kleber zu modellieren, mussten im Programm auch seine Materialparameter temperaturabhängig eingegeben werden. Der Kleber wurde als Interface-Element um die Mantelfläche des Probekörpers eingefügt. Der vom Hersteller angegebene E-Modul betrug bei Druck 9600 MPa und beim Zug – 11200 MPa. Um die tatsächlichen Materialeigenschaften dieses Klebers im Programm zu berücksichtigen, wurde jedoch mit Hilfe von Spaltzug-Schwellversuchen der funktionale Zusammenhang zwischen E-Modul und Temperatur ermittelt (siehe Abschnitt 5.10). In REFEM wird die Eingabe des Schubmoduls verlangt. Dieser wurde wie folgt berechnet:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 11}$$

Da in der Realität keine Verklebung zwischen den Stahlscheiben und des Asphaltprobekörpers an seinen Stirnflächen vorhanden war, wurde ein sehr kleiner Schubmodul des eingesetzten Interfaces verwendet.

Damit eine Durchdringung der FE-Elemente der Stahlschalen sowie der Stahlscheiben in die Elemente des Probekörpers verhindert werden konnte, wurden sehr hohe E-Moduln ($E = 210\,000$ MPa) für die Interface-Elemente senkrecht zu den entsprechenden Grenzflächen eingesetzt.

In REFEM wurde die Bitumenemulsion als Interface-Element modelliert, das aus den oben genannten Gründen auch einen sehr hohen E-Modul senkrecht zu der Schichtengrenzfläche besitzen musste. Durch den Schubmodul des Interfaces wurde die Übertragung der Scherspannungen zwischen den Schichten beeinflusst. Dieser Schubmodul wurde von 1 MPa bis 10^8 MPa in Zehnerpotenzen bei unterschiedlichen Temperaturen variiert. Ziel dieser Variation war die Ermittlung der Scherkräfte über die Spannungen in der Schichtengrenzfläche bei unterschiedlichen Scherwegen und Schubmodulen.

Eingabedaten - Linear

Elemente	Knoten / Federn	Lasten/Eigen./Temp.	Verschiebungen	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Material 1	Ma
		E-Modul 1	E-Modul 2	E-Modul 3	Querdehnzahl 1	Querdehnzahl 2	Querdehnzahl 3
1		0.22755E+08	0.22755E+08	0.22755E+08	0.17400	0.17400	0.17400
2		0.19140E+08	0.19140E+08	0.19140E+08	0.17400	0.17400	0.17400
3							
4							
5		0.21000E+09	0.21000E+09	0.21000E+09	0.28000	0.28000	0.28000

Untere Asphaltsschicht
 Obere Asphaltsschicht
 Stahl

Abbildung 3.26: Materialparameter des Asphaltprobekörpers und der Stahlschalen und -scheiben bei T = -10°C

Eingabedaten - Linear

Elemente	Knoten / Federn	Lasten/Eigen./Temp.	Verschiebungen	
		E-Modul 3	Schubmodul 1	Schubmodul 2
1		0.21000E+09	0.10000E+06	0.10000E+06
2		0.21000E+09	0.18777E+08	0.18777E+08
3		0.21000E+09	100.00	100.00

Interface Element
 Kleber (Stahlschalen – Probekörper)
 $G = E/(2*(1+\mu))$
 Stahlscheiben – Probekörper

Abbildung 3.27: Materialparameter der Interface-Elemente bei T = -10°C

3.8.2 Kopplung der einzelnen Blöcke

Zunächst wurden die beiden Schichten A und B miteinander elastisch gekoppelt (Material 2, Zeile 1). Der gesamte Block wurde danach mit den zwei Stahlscheiben mit einem Interface-Element verbunden (Material 2, Zeile 3) und anschließend erfolgte die elastische Kopplung mit den Stahlschalen (Material 2, Zeile 2).

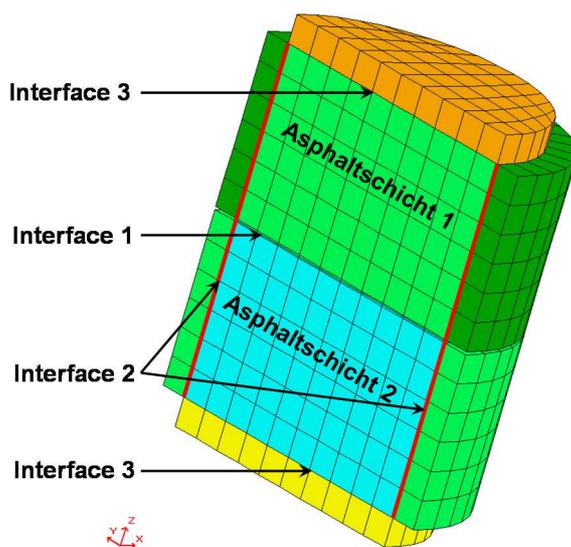


Abbildung 3.28: Interface-Elemente im Modell

Mit Hilfe der FE-Berechnungen konnten die funktionalen Zusammenhänge zwischen Scherkraft, Scherweg und Schersteifigkeitsmodul ermittelt werden. Die Scherkraft, welche die entsprechende Verschiebung verursacht, wurde über die Scherspannung in der Schichtgrenzfläche berechnet. Die Scherwege s_w wurden als Eingangsdaten in REFEM angesetzt. Auf der Schichtgrenzfläche waren 50 (bzw. 128 bei Verfeinerung) Viereckelemente angeordnet. In jedem Knoten dieser Elemente wurde vom Programm die Spannung τ_{zy} berechnet. Die Scherkraft, die auf der Oberfläche eines Elements wirkt, wurde aus dem Mittelwert der Spannungen in den 8 Knoten multipliziert mit der Fläche des Elementes wie folgt berechnet:

$$F_{s,i} = \frac{\sum_{k=1}^8 \tau_{zy}}{8} \cdot A_{s,i}$$

Gleichung 12

mit:

$F_{s,i}$ Scherkraft im Element i [kN]

τ_{zy} Scherspannung [kN/m²]

$A_{s,i}$ Fläche des Elements i [m²]

k Knoten

Die in dem Interface wirkende Scherkraft F_s wurde als die Summe der einzelnen Scherkräfte für jedes Element multipliziert mit zwei, wegen der dreidimensionalen Rotationssymmetrie des Modells, berechnet.

$$F_s = 2 \cdot \sum_{i=n}^m F_{s,i}$$

Gleichung 13

mit:

n Erstes Element in dem Interface

m Letztes Element in dem Interface

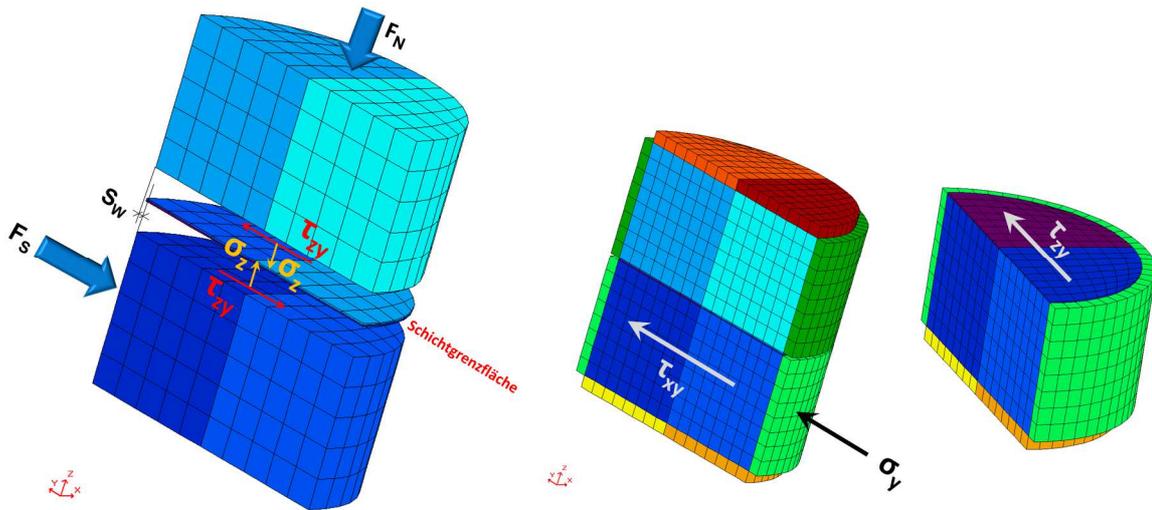


Abbildung 3.29: An der Schichtgrenzfläche wirkende Spannungen

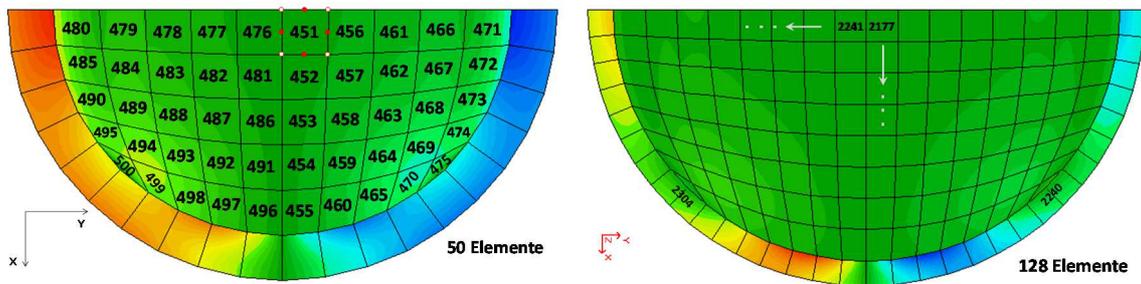


Abbildung 3.30: Zuordnung der Elemente und der Knoten im Interface

4 Auswertung der Versuchsergebnisse

4.1 Vorgehensweise für die Bestimmung der Masterfunktionen

Die gemessenen und die berechneten Werte aus dem gesamten Versuch zur Bestimmung der Schersteifigkeit wurden in Logdateien aufgezeichnet. Um die Anfangsabweichungen zu Beginn jeder Frequenz auszuschließen, wurden die Daten der letzten fünf Zyklen am Ende jeder Frequenz für die Berechnung der Schersteifigkeit verwendet. Wegen der langen Übersteuerungs- und Vortemperierungsdauern zwischen den Versuchen war es nicht sinnvoll, den Schersteifigkeitsverlauf über die Zeit zu zeigen. Daher wurde eine fortlaufende Nummerierung auf der Abszisse ausgewählt, bei der die Werte der Schersteifigkeiten, Normalspannungen, Frequenzen und Temperaturen aus den zyklischen Versuchen angezeigt wurden. Die Amplitude der Scherspannungen und der Scherwege wurden aus ihren Maximal- und Minimalwerten bei den jeweiligen Normalspannungen, Frequenzen und Temperaturen errechnet. Die Scherspannungen wurden wie folgt berechnet:

$$\tan\gamma_s = \frac{\tau_s}{G_s} \quad \text{Gleichung 14}$$

Für kleine Scherwinkel kann $\tan\gamma_s \approx \gamma_s$ angenommen werden. Die Scherbeanspruchung kann als das Verhältnis der Scherverschiebung s_w zu dem Spalt zwischen den Stahladaptern, der 1,0 mm für alle Versuche beträgt, dargestellt werden.

$$\tan\gamma_s = \gamma_s = \frac{s_w}{d_s} \quad \text{Gleichung 15}$$

Die Schersteifigkeit wurde aus den experimentellen Werten wie folgt berechnet:

$$G_s = \frac{\tau_s}{\gamma_s} = \frac{\tau_s}{\left(\frac{s_w}{d_s}\right)} \quad \text{Gleichung 16}$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{A} \quad \text{Gleichung 17}$$

mit:

- G_s Schersteifigkeit [MPa]
- F_s Scherkraftamplitude [N]
- γ_s Scherdehnung [-]
- τ_s Scherspannung [MPa]
- A Fläche des Interface [mm²]

s_w Scherwegamplitude [mm]

d_s Spalt zwischen den Stahladaptoren [mm]

Die Darstellung der experimentell berechneten Schersteifigkeiten erfolgte in Diagrammen nach Ascher (Manuskript zur Promotion, unveröffentlicht). Ein Beispieldiagramm ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die rote Linie zeigt den Verlauf der Schersteifigkeit, die grüne Linie – die Normalspannung in kPa, die blaue Linie – die Prüftemperatur in °C und die schwarze Linie – die Frequenz in Hz. Um die Änderung der Frequenz deutlicher darzustellen, wurde sie bei allen Diagrammen zweimal überhöht aufgezeichnet. Bei allen Versuchen wurde der folgende Trend beobachtet. Die Normalspannung und die Frequenz hatten unterschiedlich große Auswirkung auf die Schersteifigkeit bei verschiedenen Temperaturen. Die Schersteifigkeit des Schichtenverbundes nahm mit zunehmender Temperatur rasch ab und stieg mit Erhöhung der Normalspannung an, wie es unter wechselnder Verkehrsbelastung der Fall ist. Die Auswirkung der Normalspannung auf die Schersteifigkeit war bei niedrigen Temperaturen wesentlich kleiner im Vergleich zu den höheren Temperaturen, unabhängig von der verwendeten Bitumenemulsionsmenge. Aus den Diagrammen war ersichtlich, dass die Belastungsfrequenz eine signifikante Auswirkung auf die Schersteifigkeit hatte. Die Schersteifigkeit erhöhte sich mit zunehmender Frequenz.

Ein charakteristisches Merkmal von Bitumen ist die Temperaturabhängigkeit, was auch die Haftung temperaturabhängig macht. Bei der niedrigsten Temperatur von -10°C ist die Verklebung an der Grenzfläche sehr stark, und da die Verschiebungen zwischen 3 und 11 μm sind, ist die Reibung zwischen den Gesteinskörnern unbedeutend und kann vernachlässigt werden. Bei Temperaturen von 10°C und 30°C treten alle Effekte der Verklebung, Verzahnung und Reibung gleichzeitig auf. Die Verklebung verringert sich progressiv mit zunehmender Temperatur, was zu einer kontinuierlichen Reduktion der Schersteifigkeit und demzufolge zu einer Verschlechterung des Schichtenverbundes führt. Bei 50°C ist überhaupt keine Verklebung vorhanden und die Schersteifigkeit an der Grenzfläche wird nur durch die Verzahnung und die normalspannungsabhängige Reibung zwischen den Oberflächen der beiden Asphaltsschichten erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei dieser Prüftemperatur die Schersteifigkeit nahezu 0 MPa/mm für alle untersuchten Bitumenemulsionsarten und -mengen, bei fehlender Normalspannung und kleinster Belastungsfrequenz, ist. Dies zeigt einen fast vollständigen Reibungsverlust an der Schichtgrenzfläche und demzufolge einen fast nicht wirksamen Verbund an. Die Verzahnung allein ist nicht ausreichend, um den Verbund zu ermöglichen. Sobald eine höhere Normalspannung aufgebracht wird, wird die Reibung wieder aktiviert und die Schersteifigkeit erhöht sich. Der Sprung von der niedrigsten zu der höchsten Frequenz bewirkt auch eine Erhöhung der Schersteifigkeit.

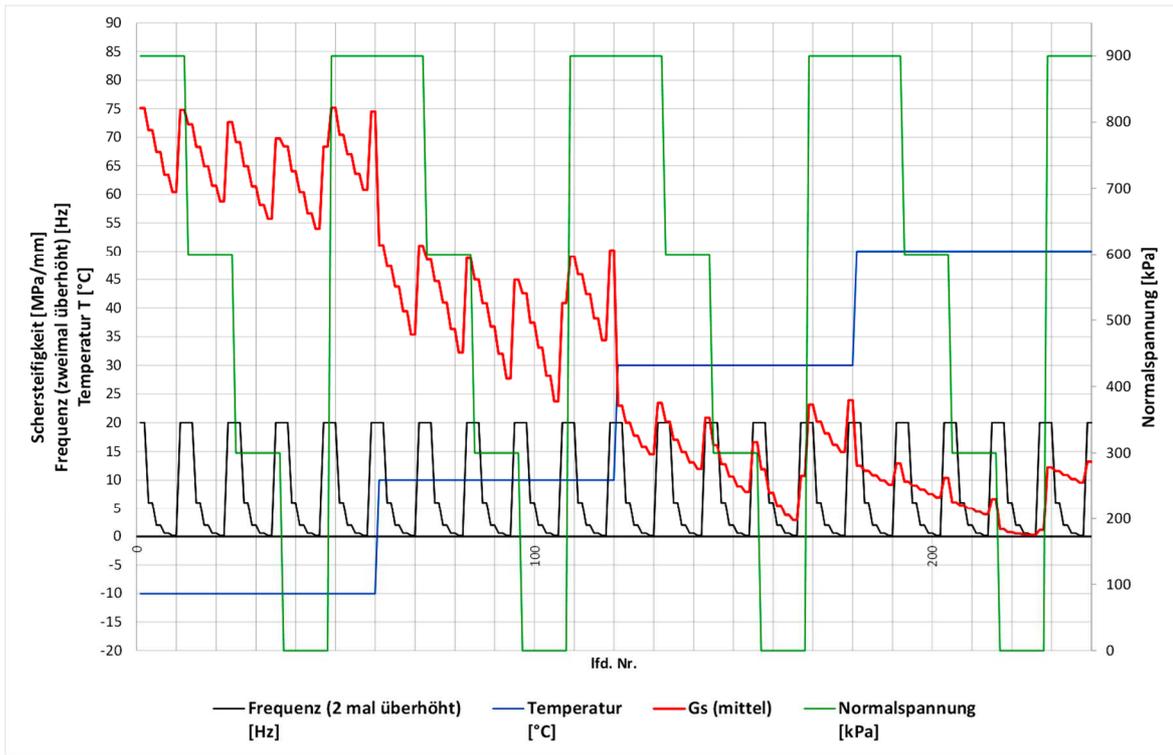


Abbildung 4.1: Verlauf der Schersteifigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung

Die Schersteifigkeitsverläufe der einzelnen Versuche einer Versuchsreihe (3- oder 4-fach Belegung) wurden übereinander dargestellt und in dem ersten Schritt erfolgte die Mittelwertbildung. Zum Ausschließen von Ausreißern mussten bestimmte Kriterien festgelegt werden, bei denen die Schersteifigkeitsverläufe in die Mittelwertbildung nicht mit einbezogen wurden. Diese Kriterien sind wie folgt:

- Die Schersteifigkeiten waren bei einer Temperatur von -10°C auf dem ähnlichen Niveau wie bei 10°C , was auf einen gestörten Schichtenverbund hindeutet (Abbildung 4.2).

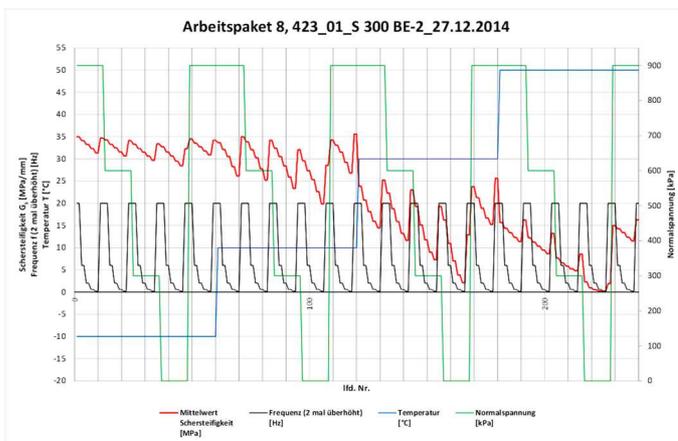


Abbildung 4.2: Beispiele einer konstant bleibenden Schersteifigkeit bei -10°C und 10°C

- Die Schersteifigkeiten blieben bei allen Prüftemperaturen, Frequenzen und Normalspannungen auf einem ähnlichen niedrigen Niveau (Abbildung 4.3). Dies wurde durch ungleichmäßige bzw. ungenügende Befestigung der Stahladaptern in der Prüfvorrichtung verursacht.

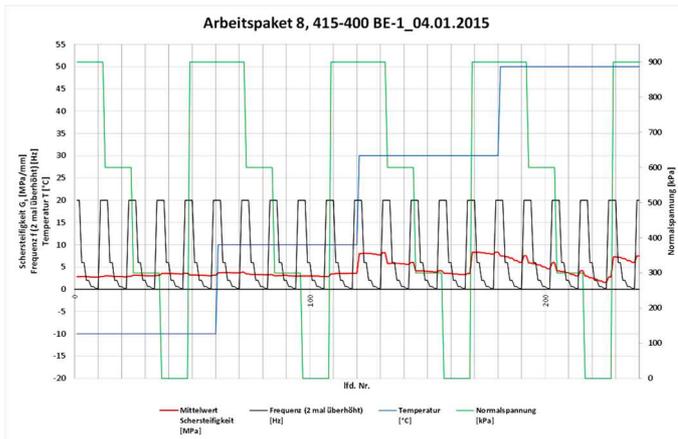


Abbildung 4.3: Beispiel einer konstant bleibenden Schersteifigkeit bei -10°C und 10°C

- Die Schersteifigkeiten blieben mit abnehmender Normalspannung auf dem gleichen Niveau (Abbildung 4.4). In diesem Fall wurde die Normalkraft nicht oder nicht richtig aufgetragen.

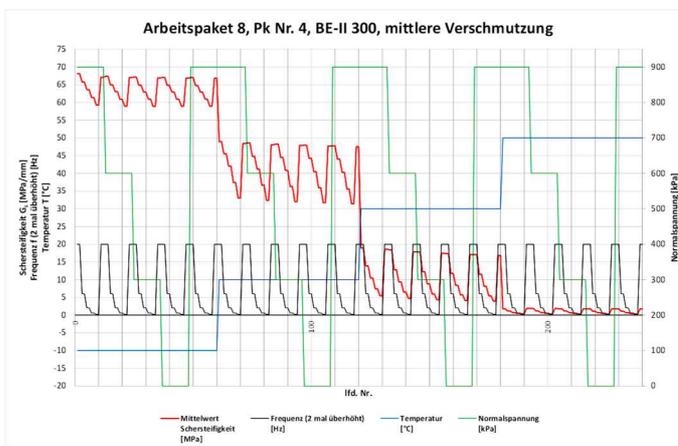


Abbildung 4.4: Beispiel einer Schersteifigkeit, die durch die Normalspannung nicht beeinflusst wird

- Bei fehlender Normalspannung nahm die Schersteifigkeit noch bei -10°C rapide ab (Abbildung 4.5). Dies deutete auf einen gebrochenen Schichtenverbund noch beim Einbau oder während des Versuches hin.

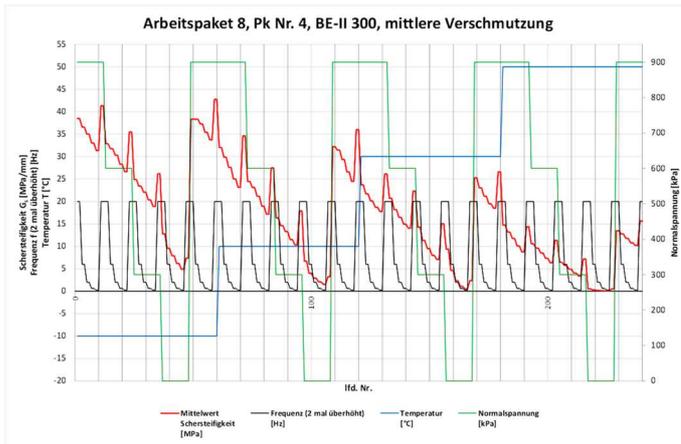


Abbildung 4.5: Beispiel eines gebrochenen Schichtenverbundes

Das vorzeitige Brechen der Probekörper bei -10°C kann in Zukunft durch Vergrößerung der Fläche des Probekörpers, d.h. durch Vergrößerung des Durchmessers, verhindert werden. Es wird vermutet, dass die (ausgenommen die oben beschriebenen Fälle) vorhandene Versuchsstreuung ein Materialproblem ist.

Im zweiten Schritt wurden die Flächenfunktionen für die mittleren Schersteifigkeiten der Verbundvarianten, wie nachfolgend beschrieben, ermittelt.

Für die analytische Berechnung der Schersteifigkeit war es notwendig, eine Masterfunktion zu entwickeln, die den kombinierten Einfluss von Temperatur, Normaldruck und Frequenz berücksichtigt. Es wurde festgestellt, dass die Verteilung der Werte der experimentell bestimmten Schersteifigkeit von jedem einzelnen Versuch am besten mit Hilfe einer Sigmoidfunktion approximiert werden konnten. Diese Funktion hat einen Wendepunkt und nähert sich asymptotisch dem Minimalwert der Schersteifigkeit $G_s = 0 \text{ MPa/mm}$, bei der ein Gleiten in der Schichtgrenzfläche möglich ist, und dem Maximalwert der Schersteifigkeit, der für die entsprechende Messung den stärksten Verbund darstellt. Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Erstellung der Masterfunktionen für alle durchgeführten Versuche beschrieben. Zunächst wurde die Abhängigkeit zwischen der Schersteifigkeit und dem Parameter $\alpha_T \cdot f$ (Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Prinzip) bei den vier Normalspannungen untersucht. Für die Berechnung des Verschiebungsfaktors α_T wurde der Ansatz nach Arrhenius (Gleichung 18) verwendet. Für (E_a/R) wurde der Wert 32 000 angesetzt.

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

Gleichung 18

Auf der Grundlage des Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Prinzips kann die Mastercurve berechnet werden. Die Parameter dafür wurden nach AL Sp-Asphalt 09 bestimmt:

$$m = \log(f \cdot \alpha_T) = \log \left(f \cdot \frac{1}{e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{T_R+273.15} \right)}} \right)$$

Gleichung 19

Die Masterfunktion für die Schersteifigkeit ergibt sich dann zu:

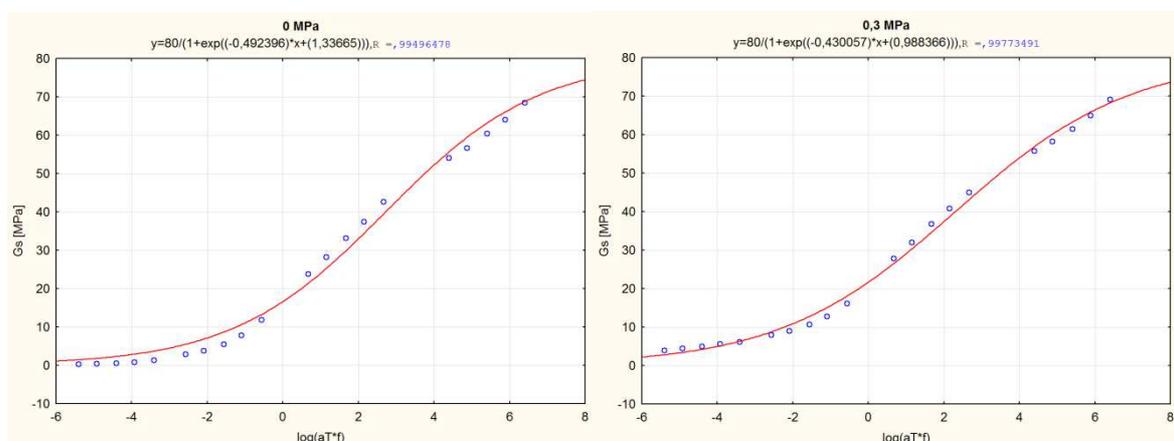
$$G_s = G_{s,\min} + \frac{(G_{s,\max} - G_{s,\min})}{1 + e^{(m \cdot a + b)}}$$

Gleichung 20

mit:

m	Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Parameter [Hz]
$G_{s,\min}$	minimale Schersteifigkeit [MPa/mm]
$G_{s,\max}$	maximale Schersteifigkeit [MPa/mm]
α_t	Verschiebungsfaktor [-]
f	Frequenz [Hz]
T	Temperatur [°C]
$T_R = 20^\circ\text{C}$	Referenztemperatur [°C]
E_a	Aktivierungsenergie [J/mol]
R	universelle Gaskonstante [J/mol·K]
a	Regressionsparameter [-]
b	Regressionsparameter [-]

Zunächst wurde der funktionale Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit und Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Parameter bei den vier untersuchten Normalspannungen bestimmt (Abbildung 4.6).



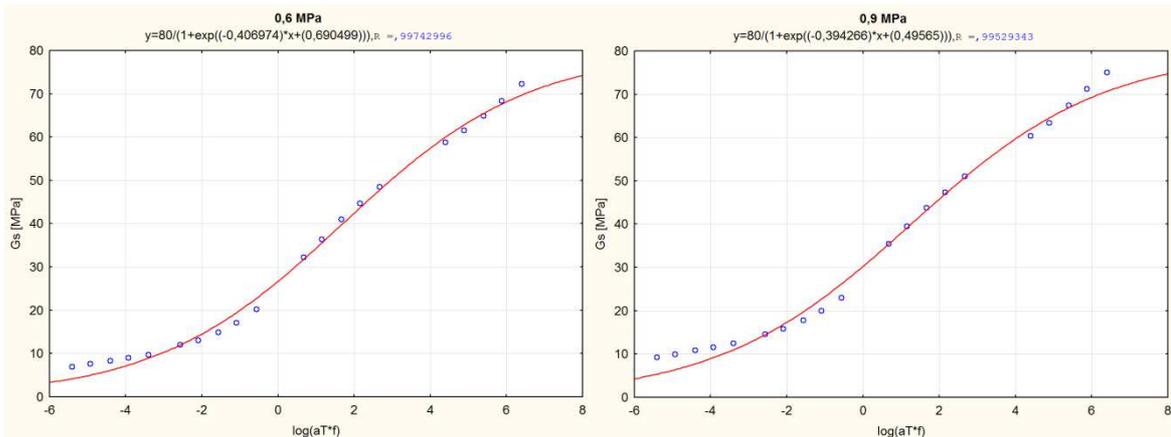


Abbildung 4.6: Funktionale Abhängigkeit zwischen experimentell bestimmter Schersteifigkeit und Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Parameter zur Bestimmung der Parameter a und b (C60BP1-S, 400 g/m²)

Aus der Funktion wurde die Abhängigkeit der Parameter a und b von der Normalspannung untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass zwischen den Verläufen der Parameter a und b der Verbundvariante Asphaltdeckschicht-Asphaltbinderschicht und Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht keine Unterschiede vorhanden sind. Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs der zwei Parameter und der Normalspannung die Grundgesamtheit aller Versuche für alle Verbundkombinationen herangezogen. Ziel war es festzustellen, welche stetigen Funktionen (logarithmisch, exponentiell und linear) die Verläufe von a und b am besten annähern. Für den Parameter a zeigte die logarithmische Funktion die beste Anpassung und für den Parameter b – die lineare Funktion (Abbildung 4.7).

$$\sigma_{N,korr} = 10 \cdot \sigma_N + 2,5 \quad \text{Gleichung 21}$$

Die Funktionen für a und b waren also wie folgt definiert:

$$a = c \cdot \ln(\sigma_{N,korr}) + d \quad \text{Gleichung 22}$$

$$b = j \cdot \sigma_N + k \quad \text{Gleichung 23}$$

Tabelle 4.1 zeigt die Werte der zwei Parameter für die Grundgesamtheit aller Versuche.

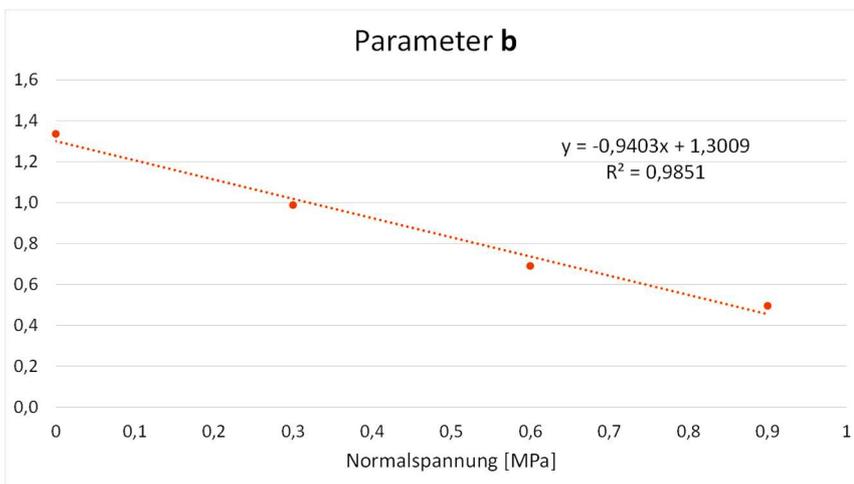
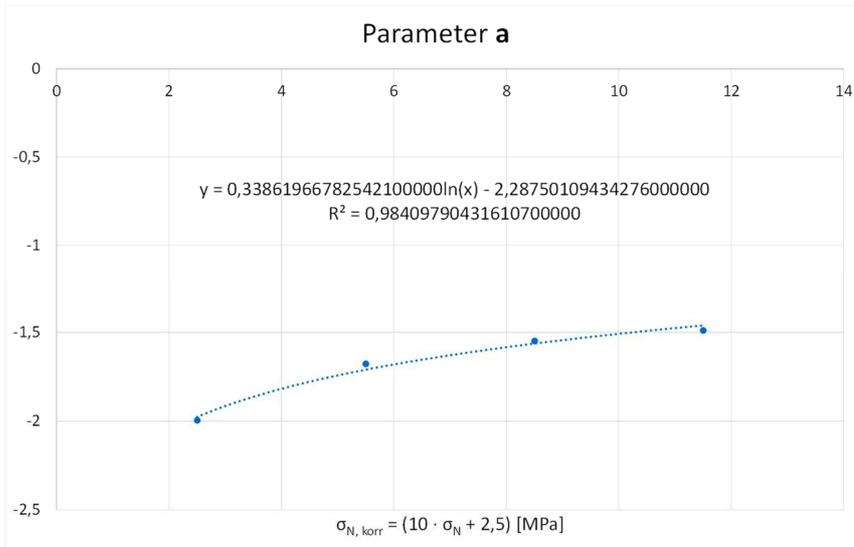


Abbildung 4.7: Funktionale Abhängigkeit der Parameter a und b von der Normalspannung

Normalspannung [MPa]	Parameter a	Korrigierte Normalspannung [MPa]	Korrigierter Parameter a	Parameter b
0	-0,449592718	2,5	-1,995927179	0,598773769
0,3	-0,417743821	5,5	-1,677438205	0,327135138
0,6	-0,404846513	8,5	-1,548465128	0,111605279
0,9	-0,398894333	11,5	-1,488943333	-0,030169128

Tabelle 4.1: Parameter a und b für die Grundgesamtheit aller Versuche

Mit den so bestimmten Funktionen wurden für jeden einzelnen Schersteifigkeitsverlauf aus den Mittelwerten einer Versuchsreihe spezielle Anpassungen mit den Parametern c, d, j und k gemacht.

Somit ergab sich aus Gleichung 20

$$G_s = G_{s,\min} + \frac{(G_{s,\max} - G_{s,\min})}{1 + e^{(m \cdot (c \cdot \ln(\sigma_{N,\text{korrr}}) + d) + (j \cdot \sigma_N + k))}}$$

Gleichung 24

Mit dieser Gleichung konnten die Schersteifigkeiten für jede beliebige Temperatur, Frequenz und Normalspannung berechnet werden. Die Vergleiche der Flächendiagramme der experimentell bestimmten Werte der Schersteifigkeit mit den nach Gleichung 24 berechneten Werten haben immer eine sehr gute Übereinstimmung mit hohem Bestimmtheitsmaß gezeigt (Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9).

Anhand der Ergebnisse der Berechnungen sollten mit Hilfe des FE-Programms SA-FEM und des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen nach den RDO Asphalt (2009) Rückschlüsse auf die Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung und auf die Auswahl der optimalen Bitumenemulsionsart und –menge gezogen werden.

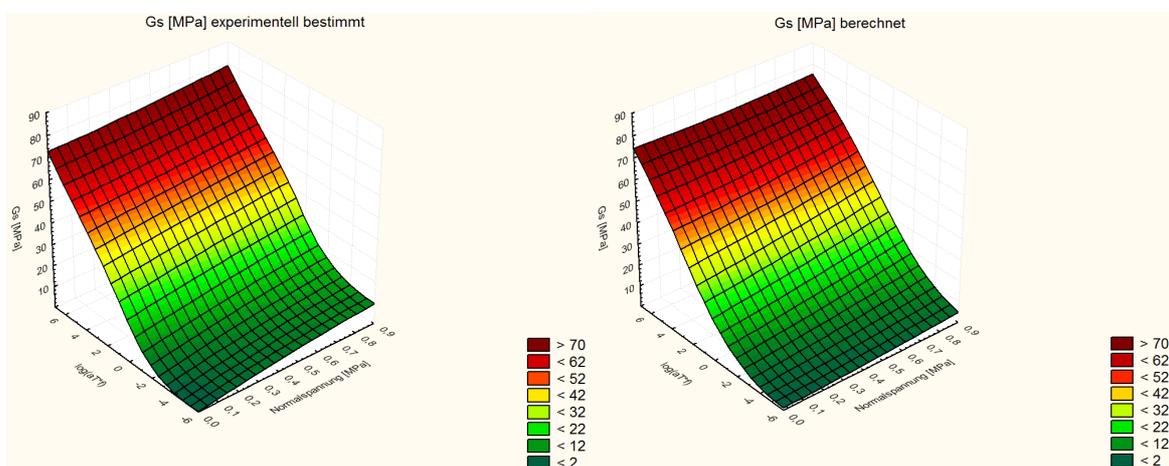


Abbildung 4.8: Flächendiagramm aus den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeitswerten (links) und mit Gleichung 24 bestimmtes Flächendiagramm (rechts)

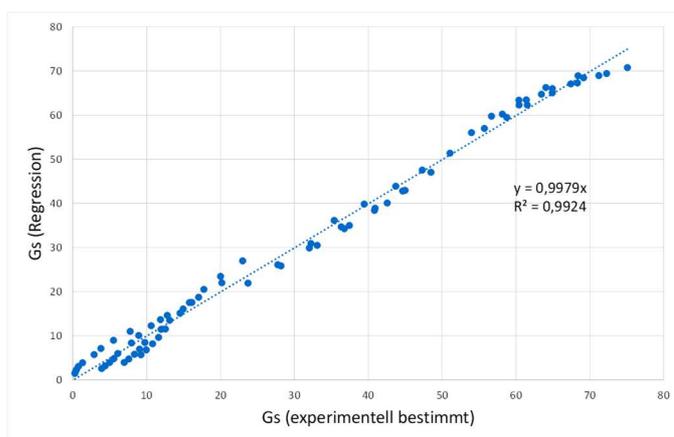


Abbildung 4.9: Vergleich zwischen der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeit und der nach Gleichung 24 berechneten Schersteifigkeit

Die sigmoidalen Masterfunktionen zur Berechnung der Schersteifigkeit an den zwei Schichtgrenzen der Straßenbefestigung (Deckschicht-Binderschicht und Binderschicht-Tragschicht) wurden schließlich in das Finite-Elemente-Programm SAFEM (Semi-Analytical Finite Element Method) eingesetzt (FE 04.0259/2012/NGB, Oeser u.a. 2014), um den Einfluss des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer der gesamten Asphaltbefestigung zu untersuchen. Wegen der Abhängigkeit der Schersteifigkeit von der wirksamen Vertikalspannung zwischen den Schichten, mussten die Berechnungen iterativ erfolgen. Als Abbruchkriterium für die Iteration, das heißt für das Erreichen des aus der Iteration berechneten realitätsnahen Wertes für die Schersteifigkeit, wurde das Erreichen der Konstanz der Dehnung an der Unterseite der Tragschicht definiert.

4.2 Bestimmung des funktionalen Zusammenhanges zwischen Schersteifigkeit und Scherkraft aus den Finite-Elemente-Rechnungen mit REFEM

Mit Hilfe der FE-Simulationen wurden die Scherkräfte für neun Schersteifigkeitswerte zwischen 0,001 MPa/mm und 100 000 MPa/mm bei allen untersuchten Scherwegen und Prüftemperaturen berechnet. Es wurden Regressionen zur analytischen Bestimmung der Schersteifigkeit bei unterschiedlichen Scherkräften und Scherwegen entwickelt und für Arbeitspaket 3 benutzt. Die Regression zur Erstellung der Masterfunktion, welche die berechneten Werte am genauesten angenähert hat, war die Sigmoidfunktion. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Scherkraft F_s , dem Scherweg s_w und der Schersteifigkeit G_s wird nach Gleichung 25 berechnet, in der a , b und c die Regressionsparameter sind.

$$F_s = \frac{a \cdot s_w}{1 + e^{(b \cdot G_s + c)}} \quad \text{Gleichung 25}$$

Um ein vertikales Eindringen der Knoten der benachbarten Elemente in der Schichtengrenzfläche zu verhindern, muss der normal zur Schichtengrenzfläche wirkende E-Modul auf sehr hohem Niveau liegen. Der E-Modul normal zur Grenzfläche muss deshalb bei allen Berechnungen als konstant angesetzt werden.

Das Verhalten des Schichtenverbundes, beschrieben anhand der Schersteifigkeitswerte, kann aus theoretischen Überlegungen heraus (in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. Belastungsfrequenz) im Wesentlichen in drei Abschnitte unterteilt werden (Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11).. Im ersten Abschnitt ist ein vollständig aufgehobener Schichtenverbund ohne Gleitwiderstand vorhanden. Die Scherkraft, die benötigt wird, um die jeweilige relative Verschiebung zwischen den beiden Asphaltsschichten der Probe zu bewirken, tendiert gegen Null. Der zweite Abschnitt zeigt einen teilweisen Schichtenverbund, der mit zunehmender Adhäsion und Reibung steifer wird, was eine höhere Scherkraft erfordert. Dieser Abschnitt der Sigmoidfunktion entspricht dem tatsächlichen Verhalten des Schichtenverbundes unter realen Bedingungen. Der dritte Abschnitt stellt den vollständigen Verbund mit einer sehr hohen Schersteifigkeit dar, bei der beide Asphaltsschichten als Einheit wirken. Aufgrund des hohen Widerstandes an der Schichtgrenze entwickeln sich extrem hohen Spannungen und Verformungen. In Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 sind die Verläufe der Scherkraft in Abhängigkeit von der Schersteifigkeit für die untersuchten Scherwege für die zwei extremen Prüftemperaturen dargestellt.

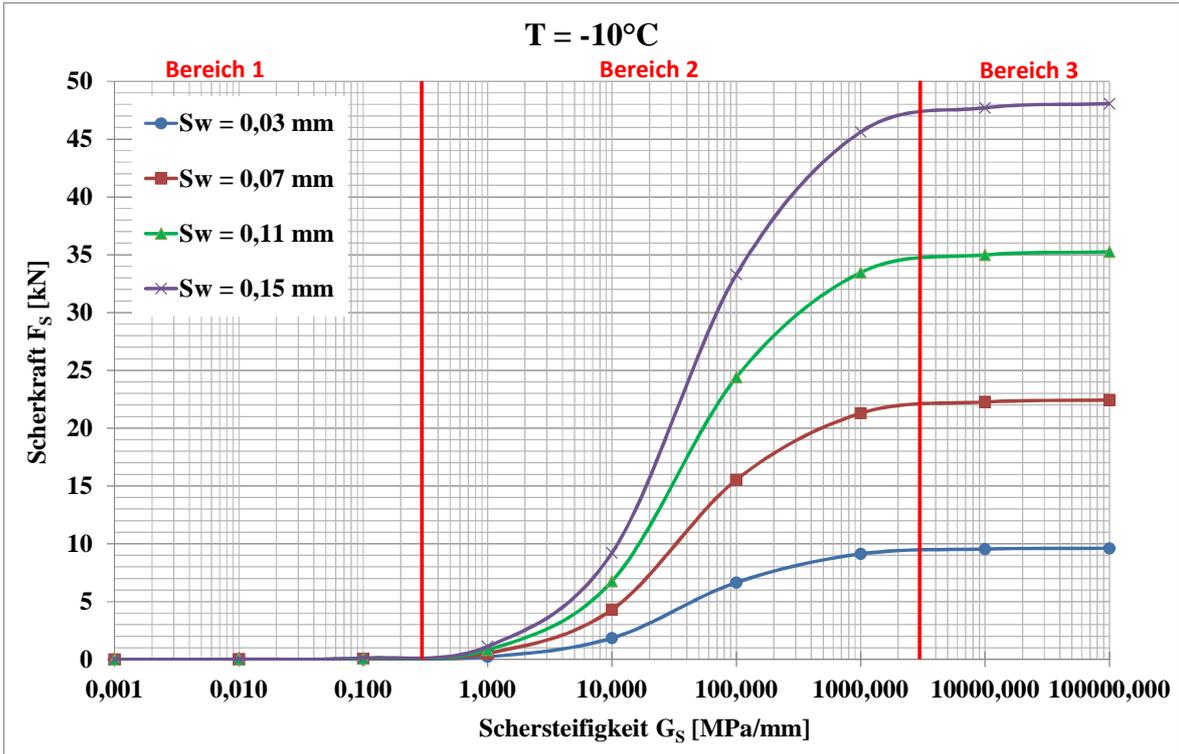


Abbildung 4.10: Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für alle vier untersuchten maximalen Scherwege bei -10°C

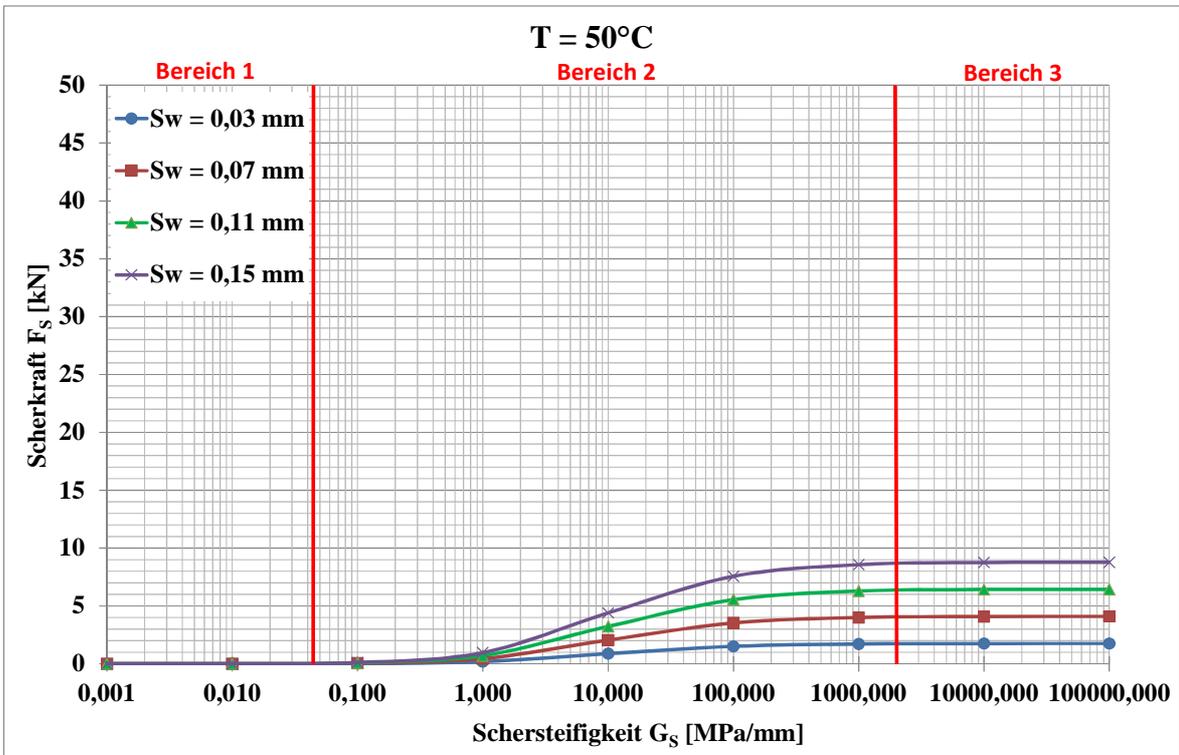


Abbildung 4.11: Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für alle vier untersuchten maximalen Scherwege bei 50°C

In Abbildung 4.12 sind die horizontalen Verschiebungen bei einer Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei fehlendem Verbund (a) und bei vollem Verbund (b) dargestellt.

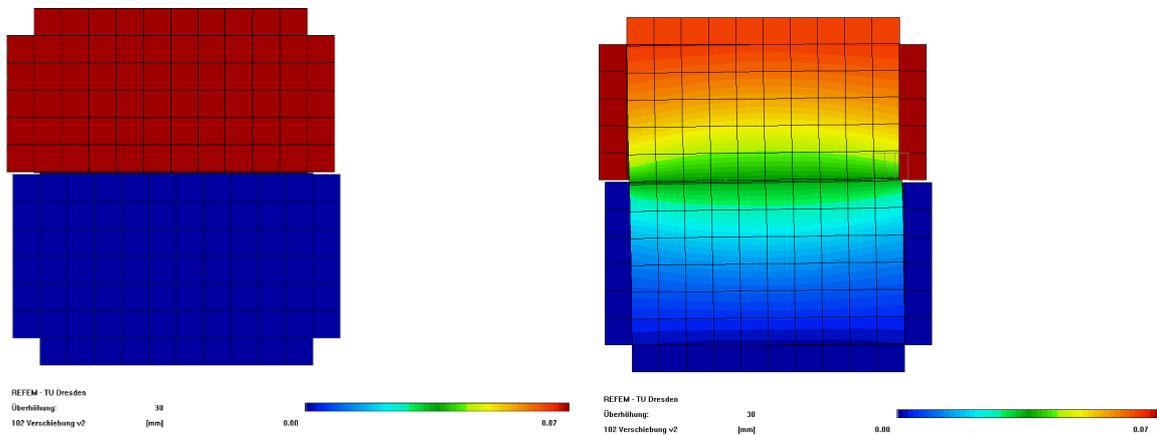


Abbildung 4.12: Horizontale Verschiebungen bei fehlendem (links) und bei vollem Verbund (rechts) bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

In Abbildung 4.13 sind die Spannungen σ_Y und τ_{ZY} an einem Beispiel bei einer Temperatur von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem Scherweg von $0,11\text{ mm}$ gegenübergestellt. Die Unterschiede in der Verteilung und in der Größenordnung der Spannungen zwischen einer Schersteifigkeit von 100 und 100.000 sind ersichtlich.

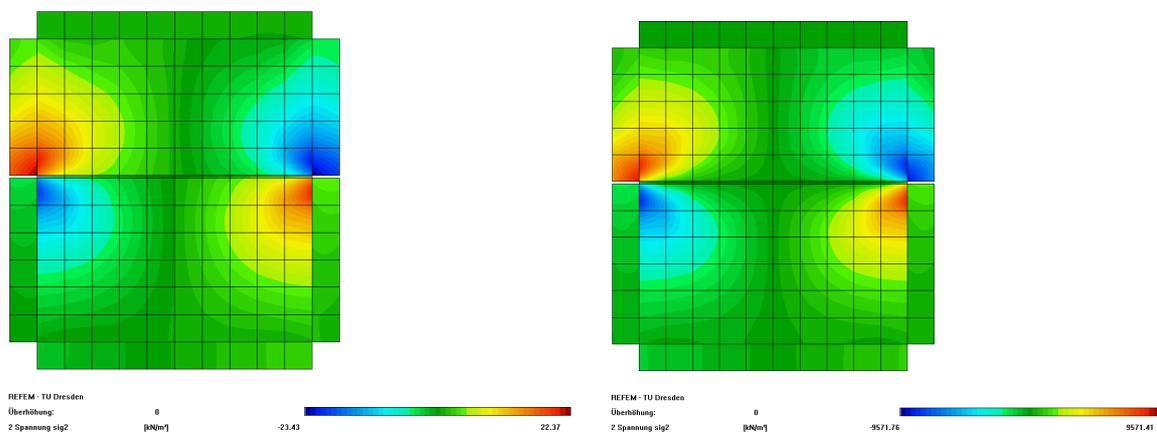


Abbildung 4.13: Verteilung der Spannungen σ_Y bei $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $s_w = 0,11\text{ mm}$, $G_s = 100\text{ MPa/mm}$ (links) und 100000 MPa/mm (rechts)

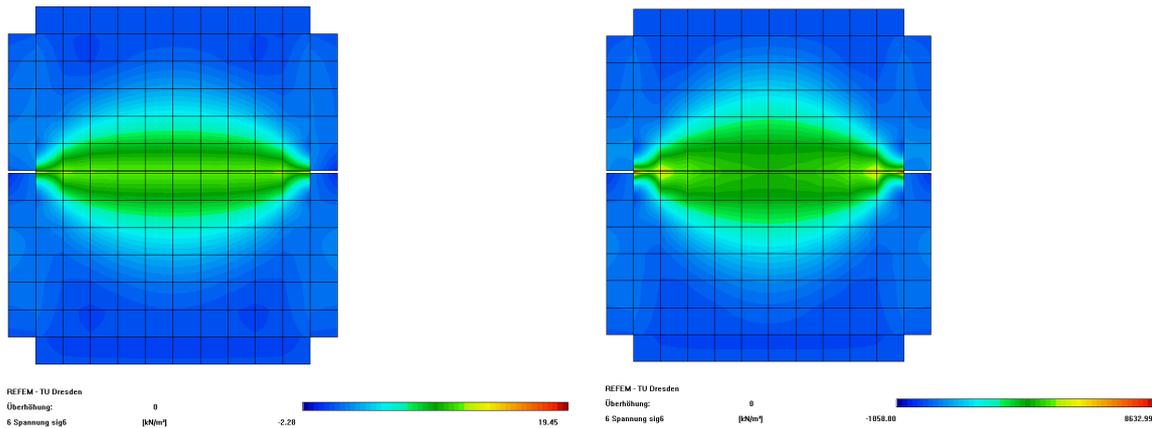


Abbildung 4.14: Verteilung der Scherspannungen τ_{zy} bei $T = -10^\circ\text{C}$, $s_w = 0,11 \text{ mm}$, $G_s = 100 \text{ MPa/mm}$ (links) und 100000 MPa/mm (rechts)

Die Punkte in Abbildung 4.15 zeigen die mit REFEM berechneten Werte der Scherkraft. Die Punkte werden mit Flächendiagrammen mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß approximiert. Mit Hilfe dieser Masterfunktionen ist die genaue Bestimmung der Schersteifigkeit bei der entsprechenden Temperatur und jedem beliebigen Scherweg und jeder beliebigen Scherkraft möglich.

Wie erwartet waren im Vergleich zu den höheren Temperaturen bei tieferen Temperaturen höhere Scherkräfte erforderlich, um die entsprechenden Verschiebungen an der Grenzfläche zu erzeugen.

Aus der entwickelten Masterfunktion kann die Schersteifigkeit aus der Scherkraft und dem Scherweg wie folgt berechnet werden:

$$G_s = \frac{\ln\left(\frac{a \cdot s_w}{F_s} - 1\right) - c}{b} \quad \text{Gleichung 26}$$

Zur Berechnung der Schersteifigkeit bei anderen als die in diesem Projekt untersuchten vier Temperaturen kann interpoliert bzw. extrapoliert werden.

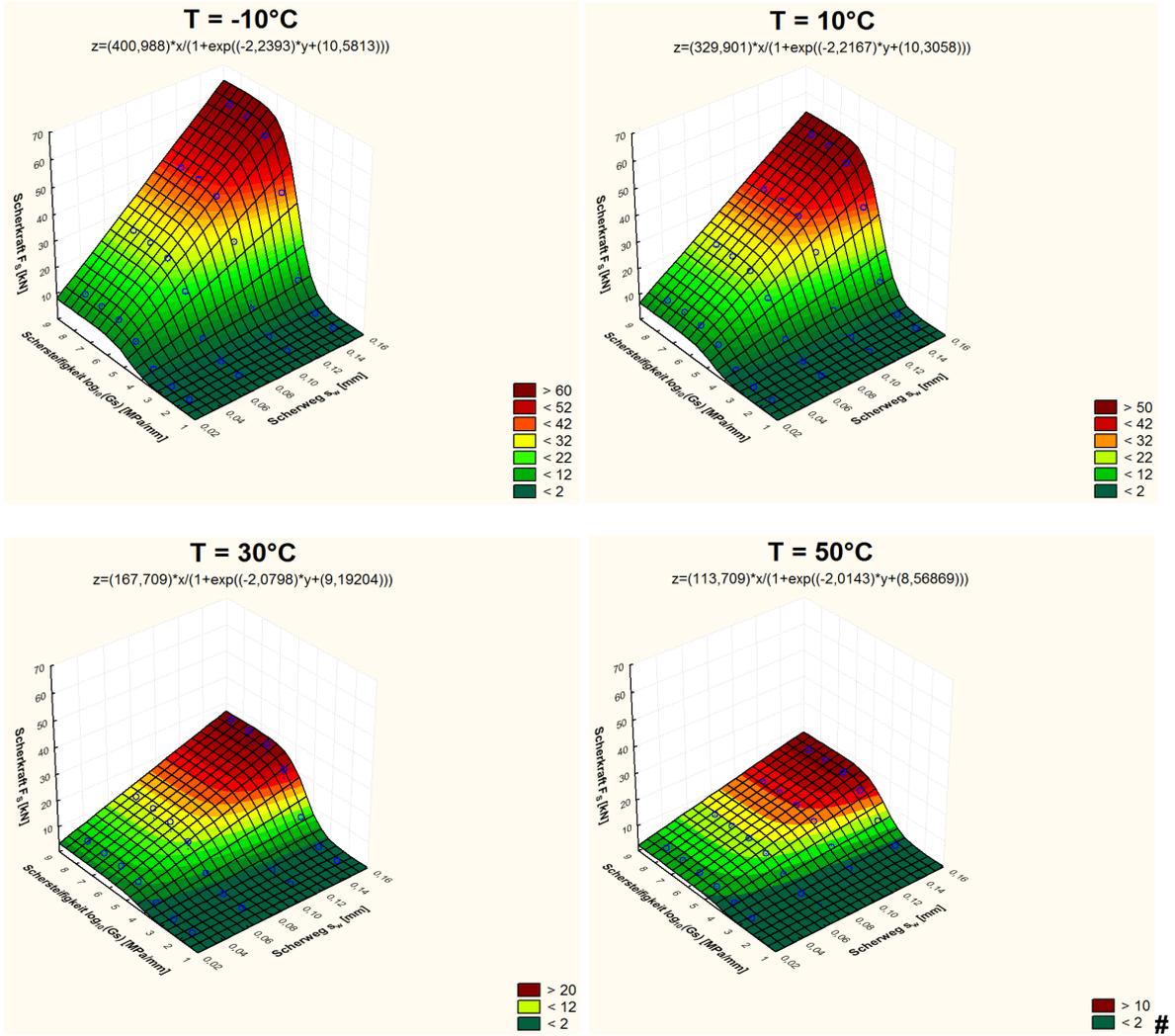


Abbildung 4.15: Flächenfunktionen bei -10°C, 10°C, 30°C und 50°C

5 Versuchsergebnisse

5.1 Bewertung der Prüftoleranzen der Prüfvorrichtung (Arbeitspaket 2)

Hauptziel in diesem Arbeitspaket ist die Überprüfung, die Überarbeitung und ggf. Bearbeitung des Prüfprogrammes zur Regelung der neu entwickelten Prüfvorrichtung, so dass sie hochgenaue Ergebnisse bei den bevorstehenden zyklischen Versuchen liefert. Bei der Einrichtung der Prüfvorrichtung konnte die Präzision der Regelung um den Faktor 12 im Vergleich zu der alten Prüfvorrichtung nach Wellner / Ascher (2007) verbessert werden, indem die Regelung nach der Kolbenposition, deren Messbereich ca. $1,2\ \mu\text{m}$ war, zu einer Regelung nach den vertikalen Wegaufnehmern (sog. Extension) mit einem Messbereich von $0,1\ \mu\text{m}$ umgestellt wurde (Abbildung 5.1).

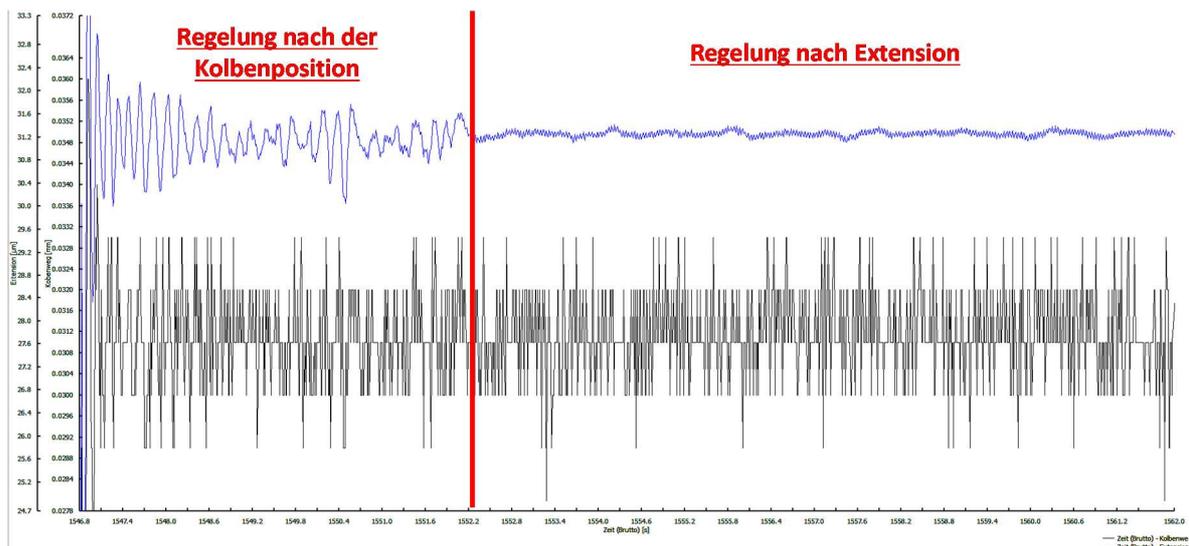


Abbildung 5.1: Verbesserte Präzision der Regelung bei der neu entwickelten Prüfvorrichtung

Es sollte weiterhin geklärt werden, wie groß die Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung tatsächlich sind. Mit Hilfe von zwei Wegsensoren mit einem Nennmessbereich von $2,0\ \text{mm}$ und Genauigkeitsklasse $0,2\%$ wurden die vertikalen Bewegungen der zwei Träger während des Versuchs kontinuierlich aufgezeichnet. Wegsensor 1 erfasste den vertikalen Scherweg des Trägers B. Wegsensor 2 wurde seitlich an dem horizontal beweglichen Träger A vertikal befestigt (Abbildung 5.2) um ihre Abweichungen von der horizontalen Position in Z-Richtung zu bestimmen. Für den Versuch wurde ein zylindrischer monolithischer Probekörper aus Aluminium mit einem Durchmesser von $100\ \text{mm}$ verwendet. Die Durchführung des Versuchs erfolgte kraft geregelt, ohne Normalspannung

bei Raumtemperatur von ca. 20°C. In dem Versuch wurde zunächst mit einer Kolbenzugkraft schrittweise von 0 bis 5 kN eine dem entsprechende Scherkraft erzeugt, welche anschließend in denselben Schrittweiten reduziert wurde. Im weiteren Verlauf erfolgte das Induzieren einer anders gerichteten Scherkraft mit einer Kolbendruckkraft in wiederum gleichen Schrittweiten von 0 kN bis -5 kN, welche und danach ebenfalls in gleicher Weise reduziert wurde (Abbildung 5.4). Die Kraft blieb bei jeder Stufe für 10 s konstant. Im Diagramm in Abbildung 5.3 sind die ausgeführten Belastungszyklen dargestellt. Im unbelasteten Zustand ist keine Abweichung in z-Richtung vorhanden. Mit zunehmender Scherkraft erhöht sich die vertikale Bewegung des Trägers. Aus dem Diagramm für einen Belastungszyklus in Abbildung 5.6 ist ersichtlich, dass die maximale vertikale Abweichung des Trägers A ca. 4 µm bei Verwendung eines extrem starren Probekörpers beträgt. Die Größenordnung der Abweichungen war somit akzeptabel, so dass keine Korrektur der Ergebnisse mittels Korrekturfaktoren notwendig war. Wie erwartet, war der Weg des vertikal beweglichen Trägers B, mit dem die Scherkraft eingeleitet wurde, größer.

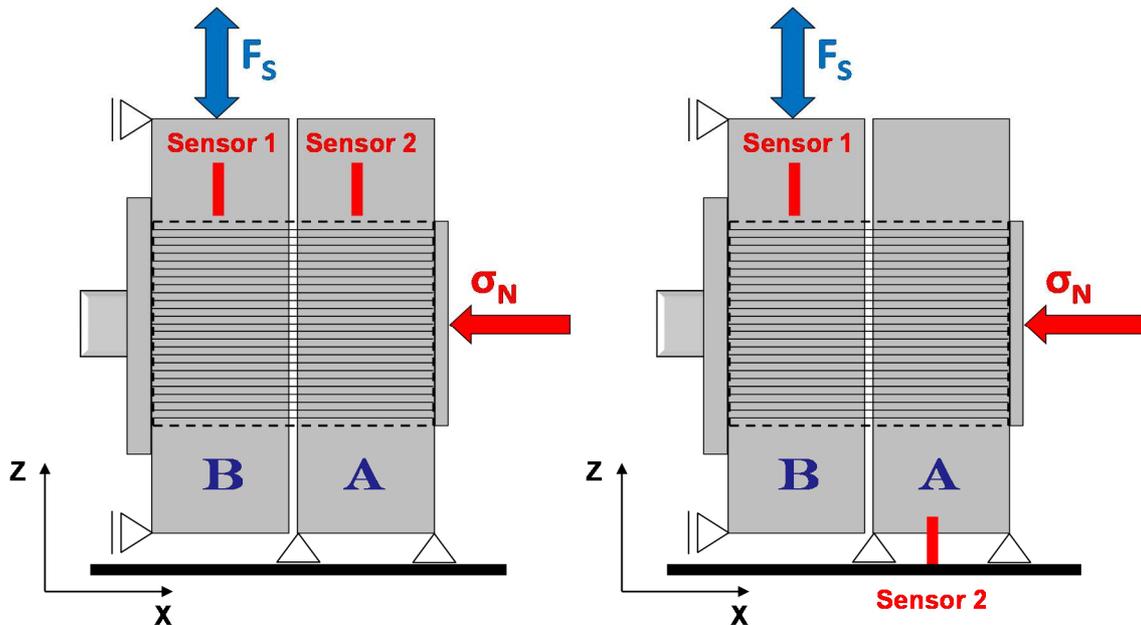


Abbildung 5.2: Anordnung der Wegsensoren zur Überprüfung der Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung

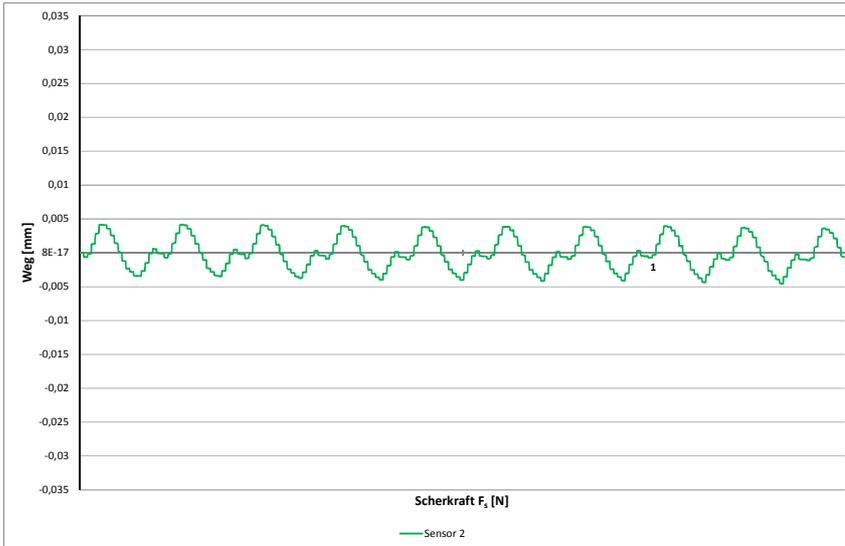


Abbildung 5.3: Wiederholung der statisch aufbrachten Scherlast von 5000 N bis -5000 N zur Bestimmung der Bewegungen der Bauteile der Prüfvorrichtung

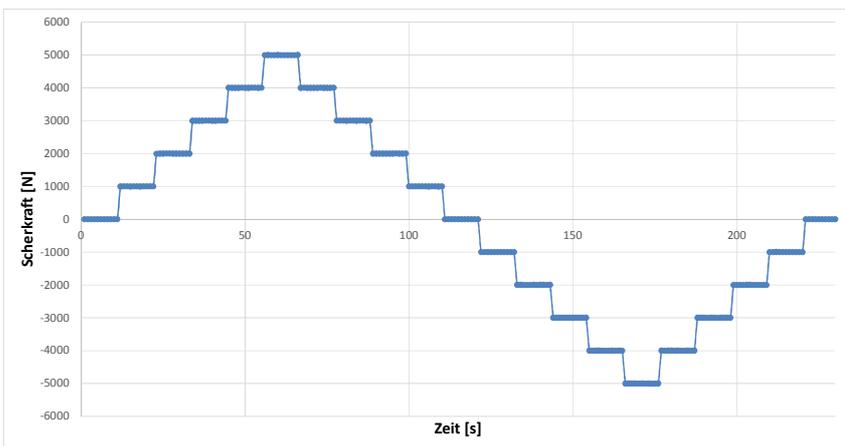


Abbildung 5.4: Verlauf der statisch aufbrachten Scherkraft eines Zyklus

Damit konnte gezeigt werden, dass bei der neuen Prüfvorrichtung, bedingt durch den Einbau der Doppel-T Präzisionslagern aus Edelstahl (Abbildung 5.5), nur vernachlässigbar kleine vertikale Abweichungen auftreten. Aus Abbildung 5.6 wird klar, dass die vertikale Bewegung des horizontal beweglichen Trägers bei der neuen Prüfvorrichtung vernachlässigbar klein ist.



Abbildung 5.5: Präzisionslagern aus Edelstahl zur Vermeidung der vertikalen Bewegung des horizontal beweglichen Trägers

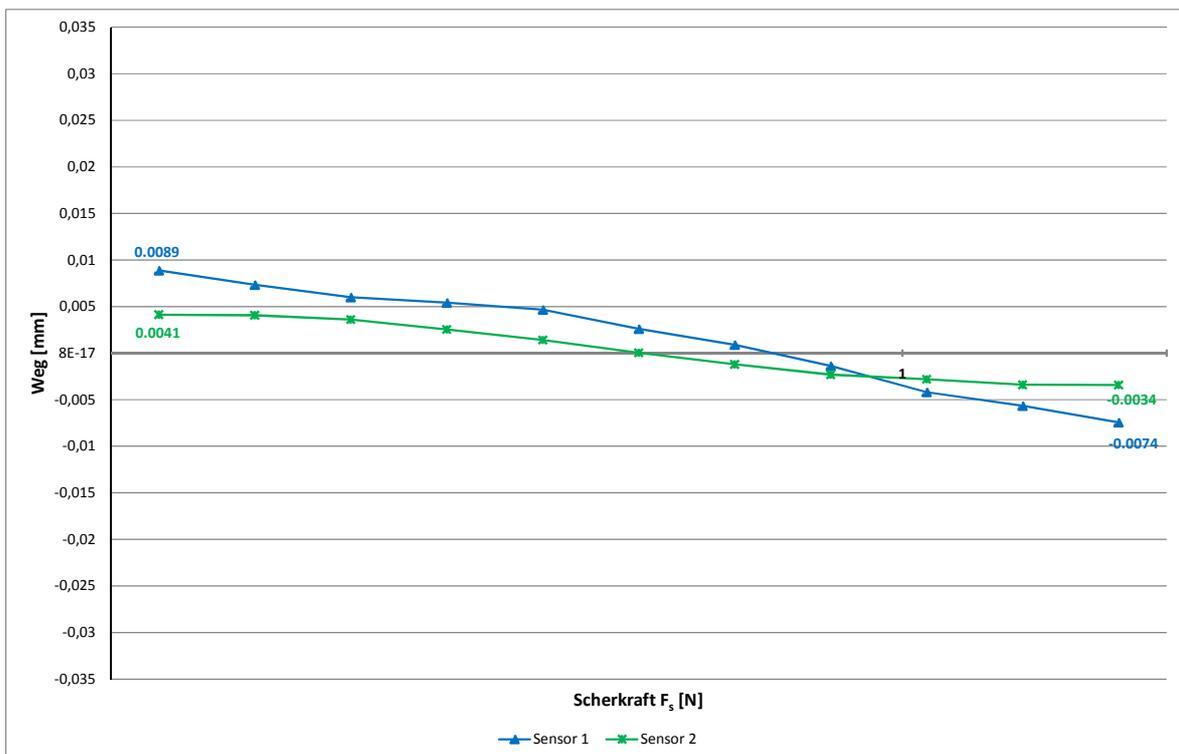


Abbildung 5.6: Vertikale Abweichungen des vertikal beweglichen Trägers B (Sensor 1) und des horizontal beweglichen Trägers A (Sensor 2) beim Wechsel der Scherlast von 5000 N bis -5000 N

Ein zweiter Versuch mit demselben eingeklebten Aluminiumprobekörper wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Bewegung der gesamten Prüfvorrichtung in der Temperierkammer bzw. die Gesamtverformung des Prüfsystems zu erfassen und zu beurteilen. Bei diesem Versuch erfolgte die Belastung zyklisch. Messesensor 1 erfasste

wieder die vertikalen Bewegung des Trägers B. Messsensor 2 wurde an der Grundplatte befestigt, um die vertikalen Schwingungen aufzuzeichnen (Abbildung 5.2, rechts). Bei einem vorgegebenen Scherweg von $15\ \mu\text{m}$ und fehlender Normalspannung zeigen die Messergebnisse, dass nur kaum erkennbare Verformungen auftreten (ca. $1\ \mu\text{m}$ Abweichung) und demzufolge keine Korrektur der Prüfergebnisse notwendig ist (Abbildung 5.7, blaue Linie).

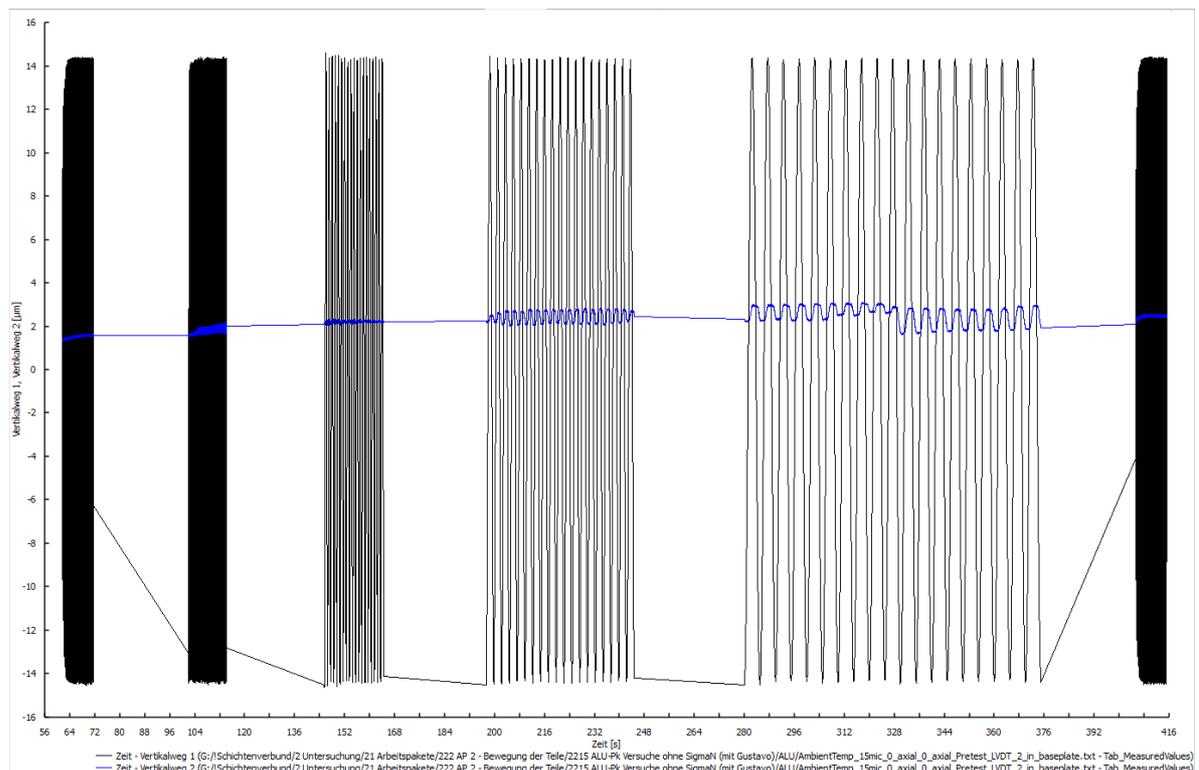


Abbildung 5.7: Aufgezeichnete Schwingung der Grundplatte der Prüfvorrichtung

In diesem Arbeitspaket 2 wurden weiterhin acht Asphaltprobekörper der Kombination Binderschicht-Tragschicht zyklisch geprüft. Der Schichtenverbund an der Schichtengrenzflächen wurde bei der einen Hälfte der Probekörper mit $200\ \text{g}/\text{m}^2$ und bei der anderen Hälfte mit $400\ \text{g}/\text{m}^2$ Bitumenemulsion C60BP1-S hergestellt. Diese Probekörper dienen vorwiegend zur Kalibrierung und Grenzwertbildung sowie auch zur Plausibilitätsprüfung. Die Ergebnisse befinden sich im Anhang 2.

Die später teilweise festgestellten größeren Spannweiten der Versuchsergebnisse sind weniger auf Versuchsstreuungen, sondern mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Streuung der Materialeigenschaften wegen der auf die relativ kleine Fläche bezogenen Unterschiede in der Verzahnung und ggf. auch der Reibung zurückzuführen.

5.2 Untersuchungen zu den Mindestschichtdicken der Probekörper (Arbeitspaket 3)

Im Arbeitspaket 3 soll der praxisrelevanten Fragestellung nachgegangen werden, welche Mindestdicken der zwei Schichten des Probekörpers für die Versuchsdurchführung notwendig sind, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Bei der Verwendung von Bohrkernen wurde bislang immer von einer Mindestschichtdicke von 40 mm ausgegangen.

Bei allen untersuchten Schichtdicken wurde die Verbundkombination Asphaltdeckschicht auf Asphaltbinderschicht mit einer Menge von 200 g/m² Bitumenemulsion C60BP1-S angewendet. Damit die Asphaltsschichten gleich verdichtet waren, mussten alle Platten mit der größten Höhe von 60 mm bei gleichen Bedingungen im Walzsektor-Verdichter hergestellt werden. Nachdem die Bohrkern aus den 120 mm dicken zweischichtigen Platten entnommen wurden, erfolgte das beidseitige Absägen auf die gewünschte Höhe. Zum Befestigen in den Stahladaptern wurden beidseitig Stahldummies angewendet, die an der Stirnfläche jeder Asphaltsschicht und in den Stahladaptern eingeklebt waren (Abbildung 5.8). Die Stahldummies wurden mit demselben Durchmesser wie die Probekörper hergestellt.

Geprüft wurden vier Dickenvarianten (jeweils 15 mm, 30 mm, 40 mm und 60 mm Schichtdicken der Probekörper) bei je zwei Temperaturen (-10°C und 50°C) bei 3-fach-Belegung.

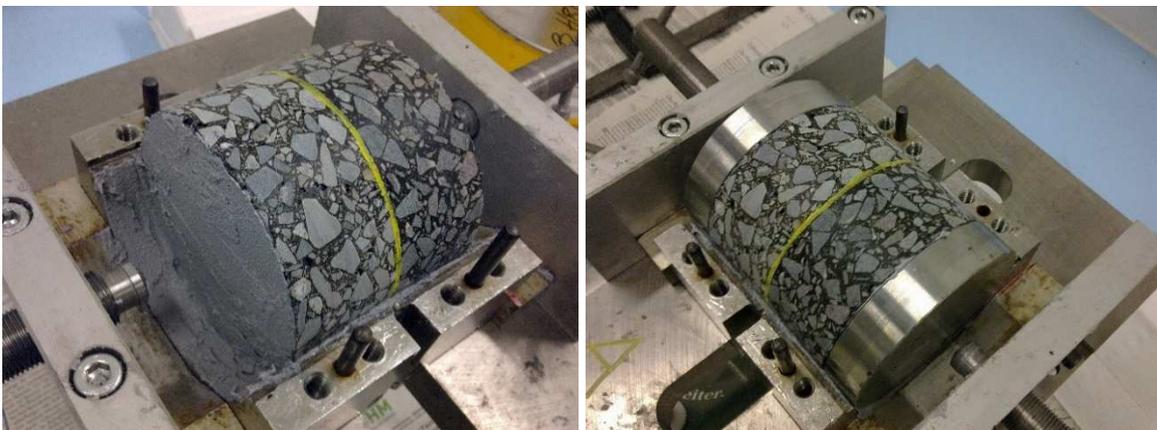




Abbildung 5.8: Einkleben eines 80 mm langen zweischichtigen Asphaltprobekörpers und zwei Stahldummies

Die Versuche erfolgten mit zyklischer Belastung. Die kleinste Schichtdicke von 1,5 cm war gedacht, um die Untersuchung des Schichtenverbundes bei dünnen Schichten im Heißeinbau auf Versiegelung nach M DSH-V (FGSV, 2003) zu ermöglichen (Abbildung 5.9). Die 3 cm Schichtdicken sollen die zyklische Prüfung von nach den ZTV Asphalt dünnsten Asphaltdeckschichten (zum Beispiel SMA 8 S) zulassen, die 4 cm - für konventionelle Dicken von Asphaltdeckschichten und die 6 cm - für Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten.

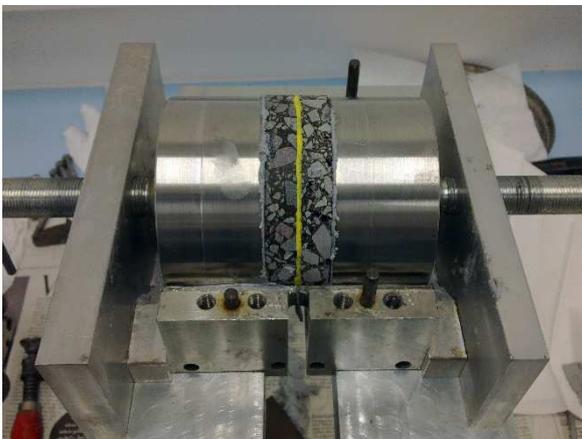


Abbildung 5.9: Einkleben eines 30 mm langen zweischichtigen Asphaltprobekörpers und zwei Stahldummies

Zur Beurteilung der Spannungsverteilungen im Probekörper wurde ein numerisches Modell auf Basis der Methode der Finiten Elemente (REFEM) entwickelt. Im Modell wurden die Stahldummies auch miteinbezogen (Abbildung 5.10). Dadurch war es möglich, die Versuchsergebnisse durch Simulation nachzubilden.

Dabei konnten die funktionalen Zusammenhänge zwischen Scherkraft, Scherweg und Schersteifigkeit ermittelt und die Spannungsverteilungen und Verzerrungen in der Schichtengrenze und im Probekörper bestimmt werden.

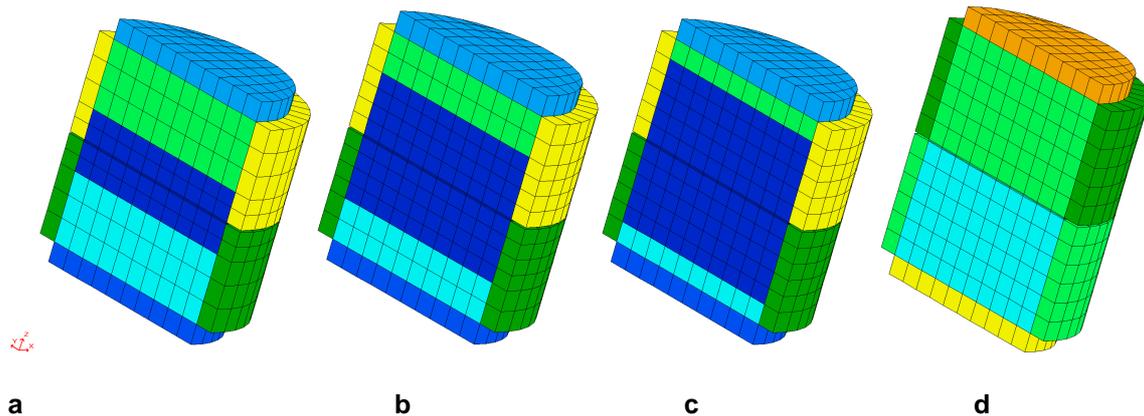


Abbildung 5.10: FE-Modelle der Konfigurationen bei den unterschiedlichen Schichtdicken mit Stahldummies

In Abbildung 5.11 sind alle Masterfunktionen der Scherwege von 0,03 mm bei -10°C und 0,15 mm bei 50°C gegenübergestellt. Aus den berechneten Masterfunktionen geht eindeutig hervor, dass sich die Werte der Scherkräfte bei den Schichtdicken von 1,5 cm von den anderen drei Schichtdicken für die jeweilige Temperatur deutlich unterscheiden. Um denselben Scherweg zu erzeugen wird eine kleinere Scherkraft benötigt (Abbildung). Aus Abbildung 5.13 bis 5.18 wird qualitativ ersichtlich, dass die Stahldummies eine Auswirkung auf die Spannungsverteilung in den Schichten und an der Schichtgrenze haben und die gemessenen (bzw. auch gerechneten) Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes beeinflussen. In Abhängigkeit von der Schichtdicke sind andere Spannungsverhältnisse vorhanden, so dass bei den dünnsten Schichten die Gefahr der fehlerhaften Bewertung besteht.

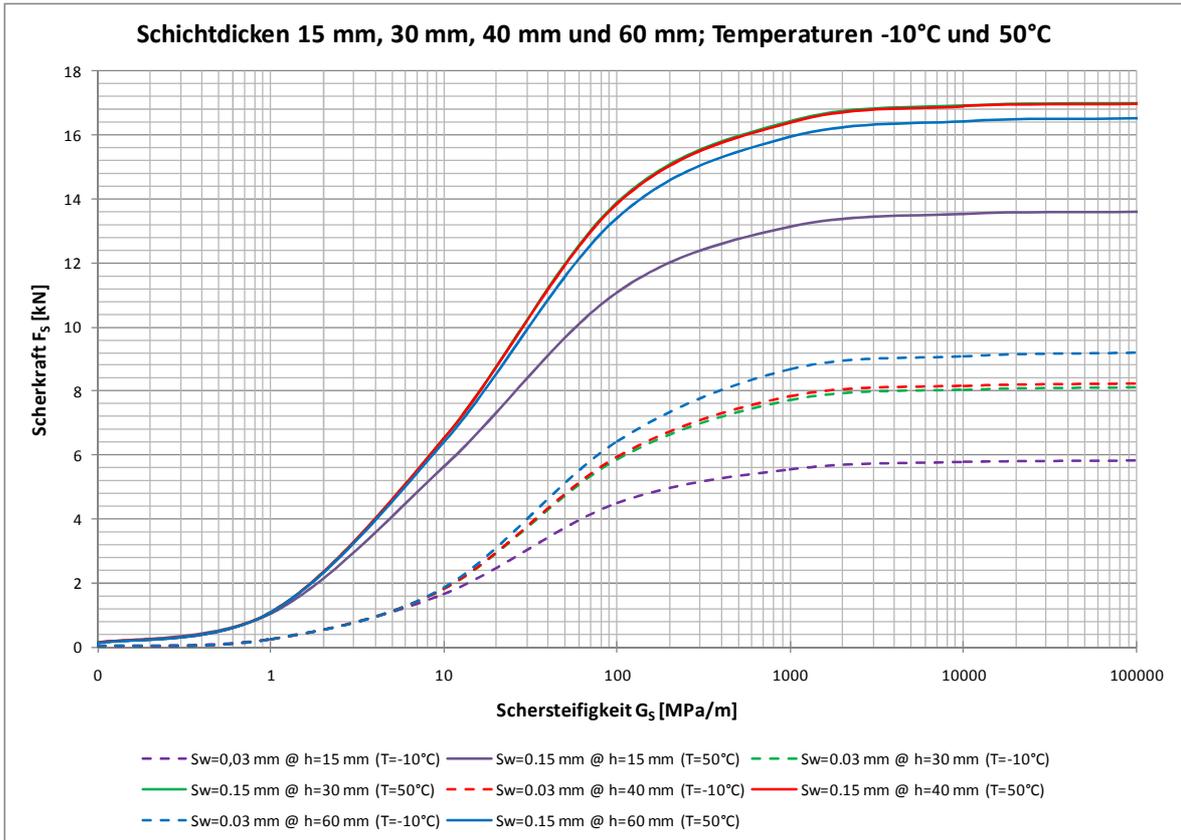
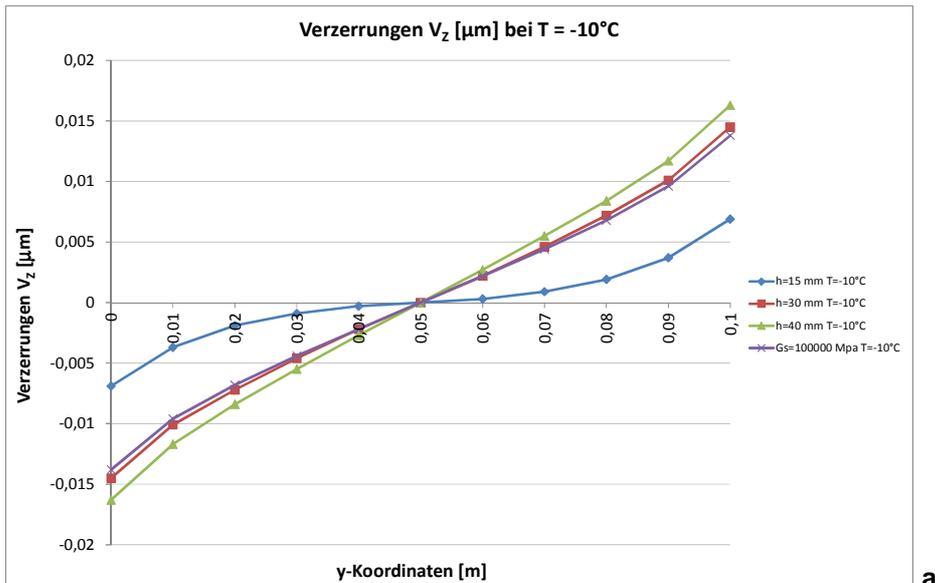
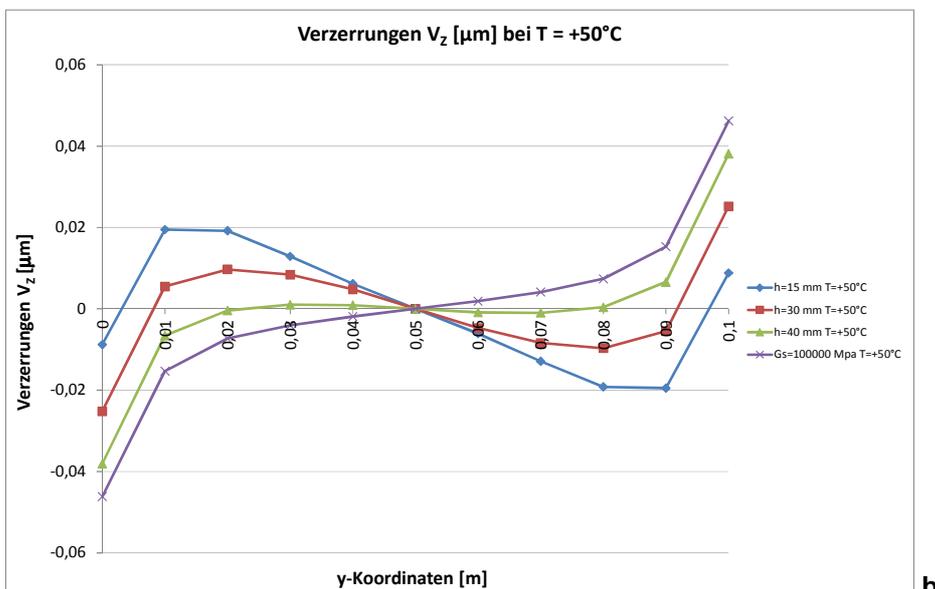


Abbildung 5.11: Funktionaler Zusammenhang zwischen Scherkraft und Schersteifigkeit für der vier Schichtdicken bei -10°C und 50°C

Aus Abbildung 5.12 geht hervor, dass bei vollem Verbund die dünnen Schichten die größten Verzerrungen in vertikaler Richtung bei 50°C und die kleinsten Verzerrungen bei -10°C aufweisen. Bei Betrachtung der Dehnungen ϵ_{zy} ist ersichtlich, dass diese über die gesamte Grenzfläche bei vollem Verbund und bei -10°C auf einem niedrigeren Niveau liegen, verglichen mit den Dehnungen bei 50°C (Abbildung 5.19). Bei fehlendem Schichtenverbund sind die Verläufe der Dehnungen an der Schichtgrenzfläche bei tiefen Temperaturen bis auf den letzten 1 cm Abstand vom Rand bei allen Schichtdicken gleich. An der Grenzfläche zwischen Probekörper und Stahldaptern sind die größten Dehnungen bei den dünnen Schichten festzustellen. Bei 50°C und vollem Verbund sind die Dehnungen in der Mitte der Grenzfläche am kleinsten, nehmen in Richtung Rand zu und ab etwa 1 cm vom Rand des Probekörpers steigen sie rapide an (Abbildung 5.20). Bei der tiefsten Temperatur ist dieser Anstieg der Dehnungen bei den 4 cm und 6 cm Schichtdicken ab Mitte des Probekörpers auch gut sichtbar. Bei den Schichtdicken von 1,5 cm und 3 cm ist ein konstanter Dehnungs- bzw. Spannungsverlauf innerhalb des Probekörpers feststellbar, wobei dieser Bereich bei der dünnsten Schicht von 1,5 cm am größten ist und die Werte bei beiden Temperaturen am niedrigsten sind. Die Dehnungen verlaufen bei vollem Verbund wie in Abbildung 5.20 dargestellt und bei fehlendem Verbund sind sie bei allen Schichtdicken nahezu null.



a



b

Abbildung 5.12: Verzerrungen V_z [μm] bei $G_s = 100\,000$ MPa/mm bei -10°C (a) und 50°C (b)

Die Verteilung der vertikalen Verschiebungen V_z sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Verschiebungen sind bei -10°C in den Asphaltsschichten und im Interface gleichmäßig verteilt, während bei 50°C eine Reduktion von der Asphaltsschicht zu dem Interface beobachtet werden kann (bei 4 cm und 6 cm Schichtdicken) oder eine Richtungsänderung bei den 1,5 cm und 3 cm Schichtdicken wegen der Beschränkung durch die Stahldummies stattfindet.

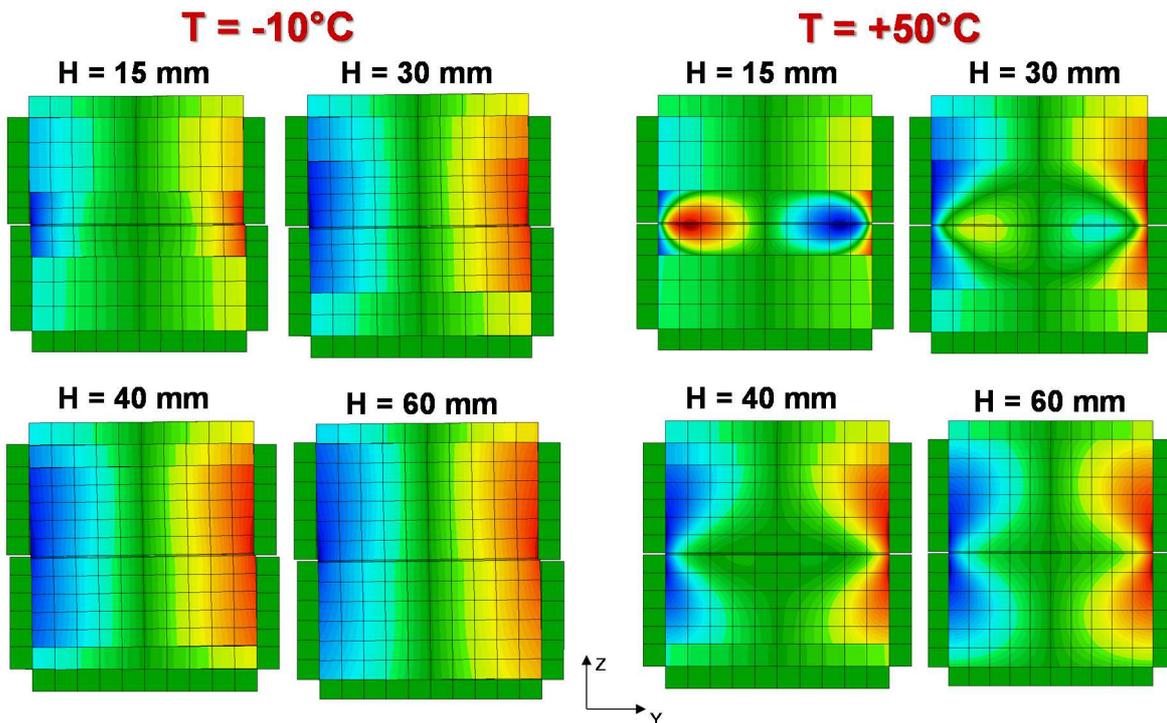


Abbildung 5.13: Verlauf der Verzerrungen V_z bei -10°C (links) und 50°C (rechts) für alle vier Schichtdicken

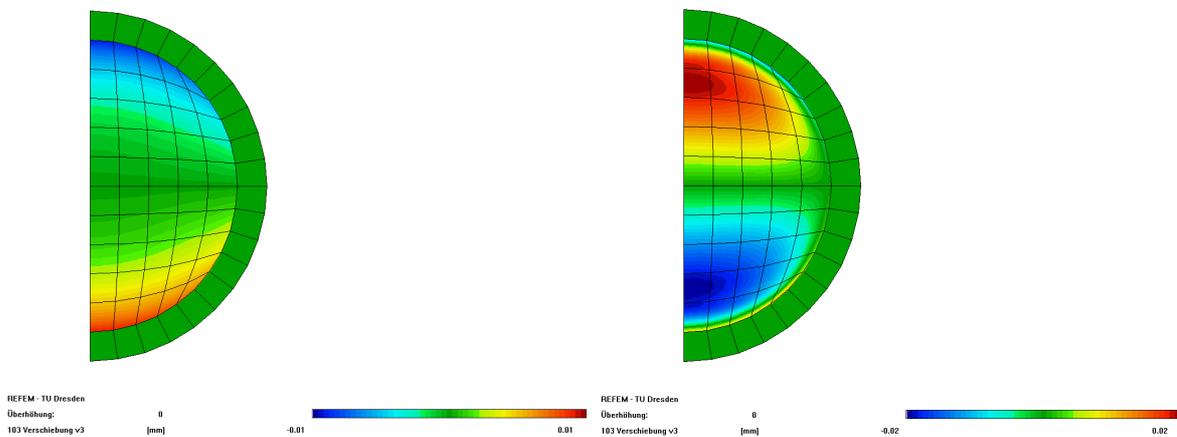


Abbildung 5.14: Verlauf der Verzerrungen bei einer Schichtdicke von 15 mm, $GS = 100\,000$ MPa/mm, $sw = 0,03$ mm bei -10°C (links) und 50°C (rechts) -10 0,03 100 000

Aus den Vergleichen in Abbildungen 5.15 bis 5.18 ist gut sichtbar, wie sich die Schichtdicke auf den Dehnungsverlauf bzw. auf die vertikalen Verschiebungen (Verzerrungen) auswirkt. Bei fehlendem Schichtenverbund und einer Temperatur von -10°C sind die Dehnungen sehr viel kleiner als bei 50°C . Gegenüber der gleichmäßigen Verteilung sowohl an der Schichtgrenzfläche, als auch in den zwei Schichten

bei 50°C, sind bei -10°C Extremwerte der Dehnungen am Rand des Probekörpers zu beobachten (Abbildung 5.19).

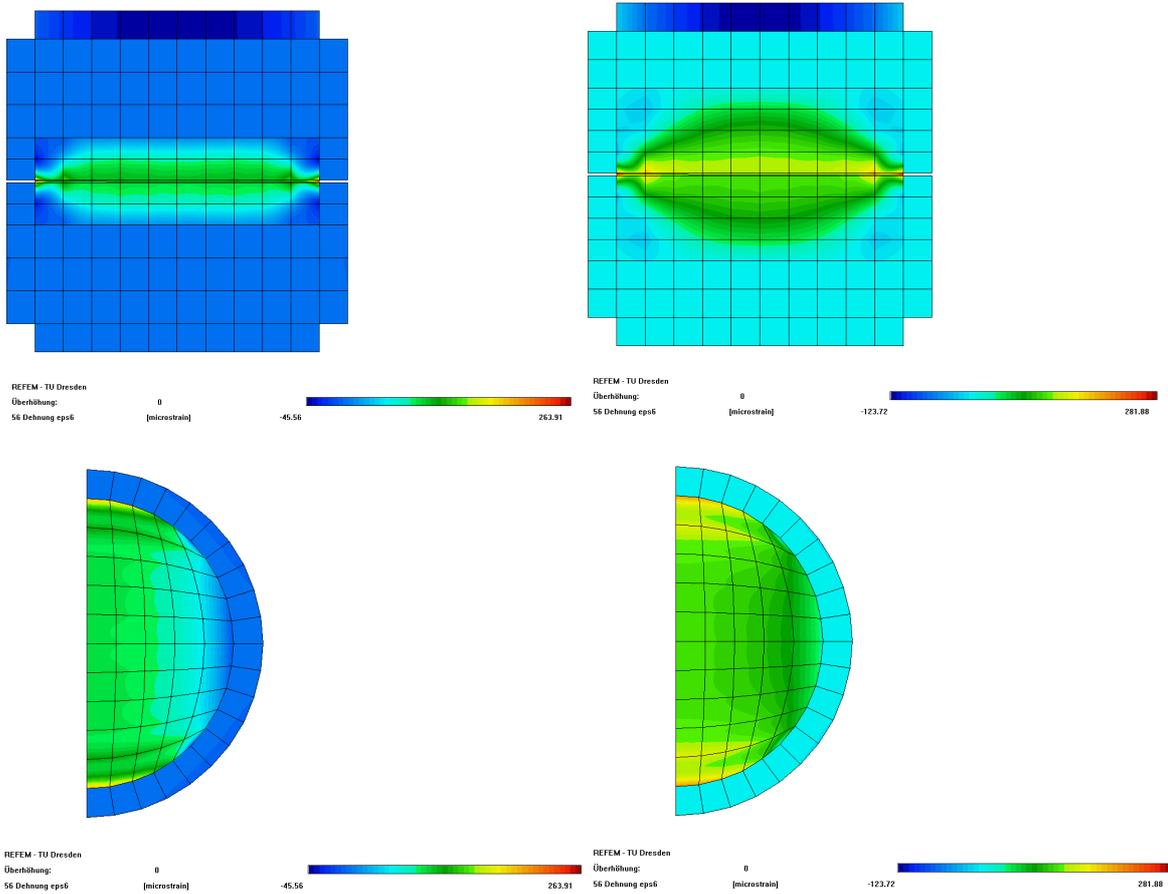
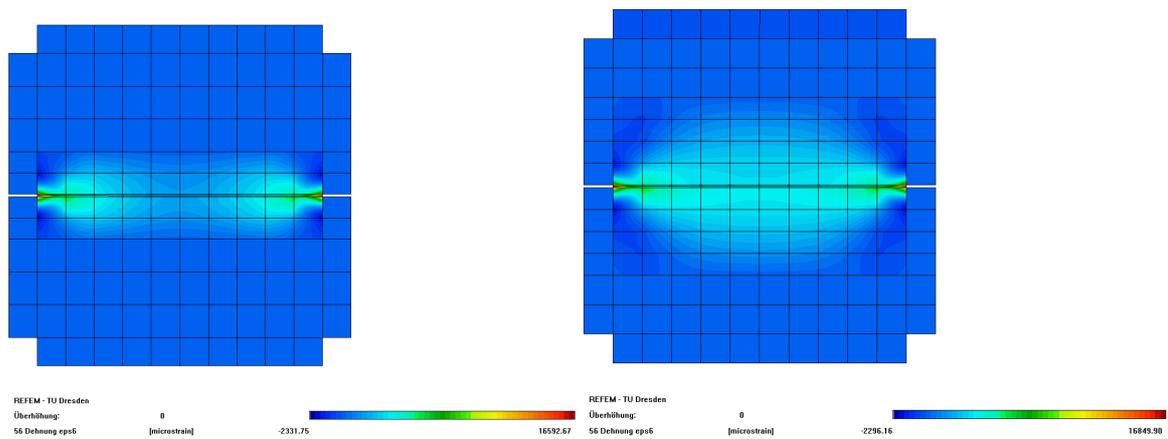


Abbildung 5.15: Dehnungen ε_{ZY} bei $G_S = 100\,000\text{ MPa/mm}$, $T = -10^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm (links) und 30 mm (rechts)



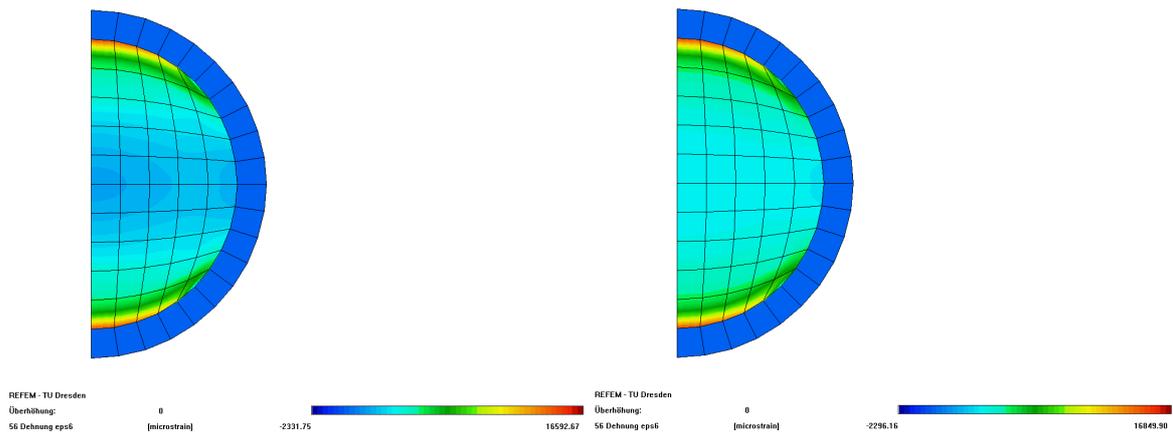


Abbildung 5.16: Dehnungen ϵ_{ZY} bei $G_s = 100\ 000\ \text{MPa/mm}$, $T = 50^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm (links) und 30 mm (rechts)

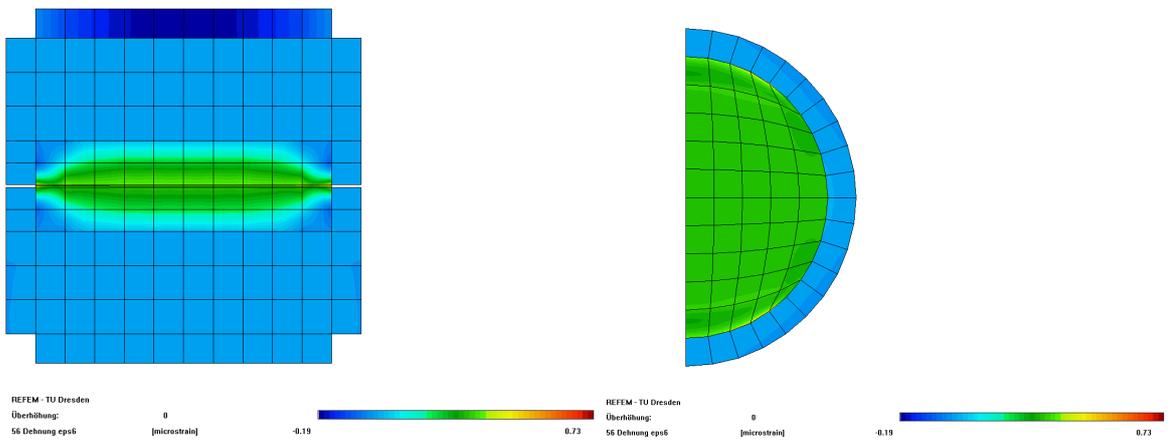


Abbildung 5.17: Dehnungen ϵ_{ZY} bei $G_s = 100\ \text{MPa/mm}$, $T = -10^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm

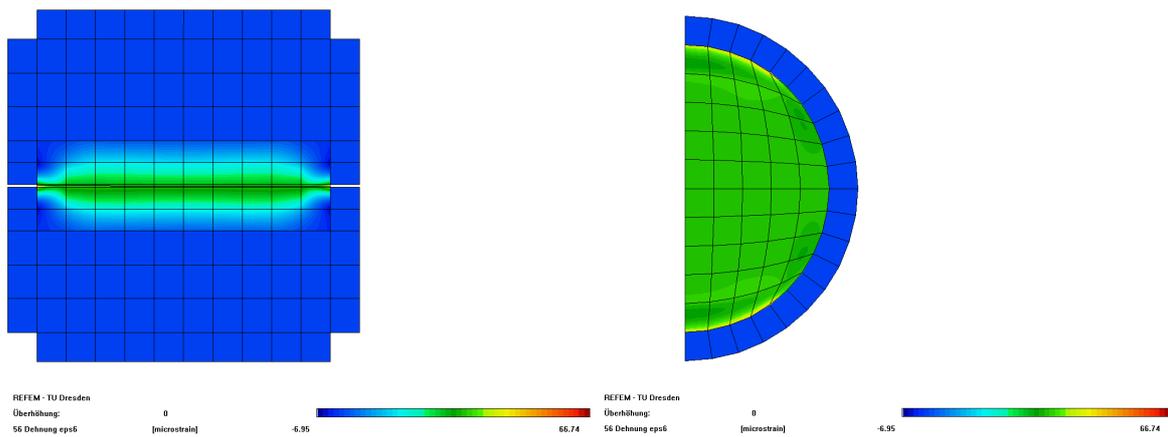


Abbildung 5.18: Dehnungen ϵ_{ZY} bei $G_s = 100\ \text{MPa/mm}$, $T = 50^\circ\text{C}$ bei einer Schichtdicke von 15 mm

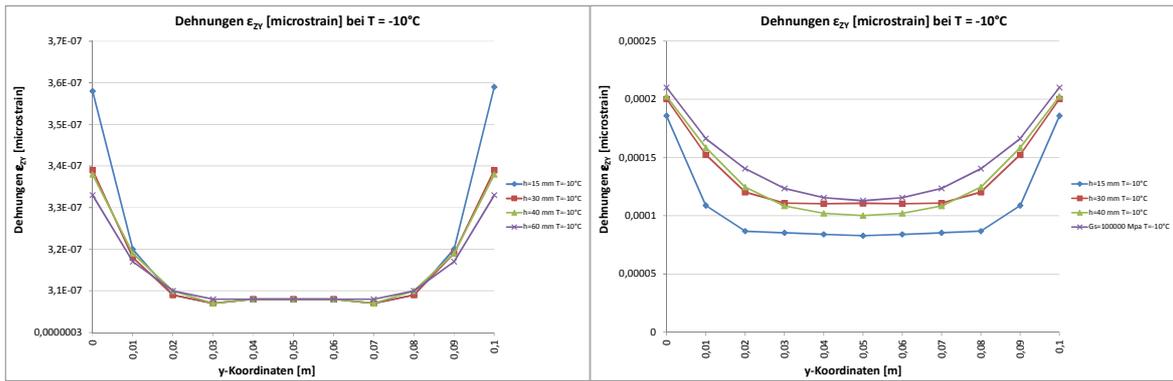


Abbildung 5.19: Dehnungen ϵ_{zy} bei fehlendem (links) und vollem (rechts) Verbund, T = -10°C

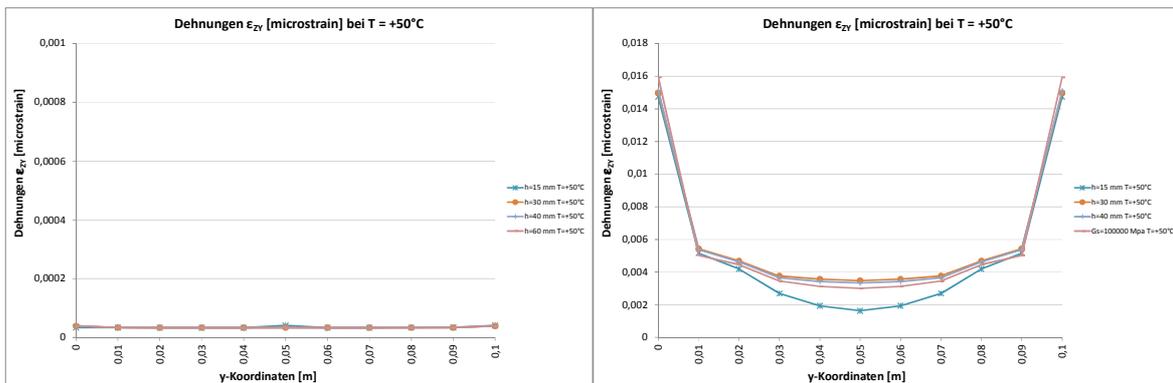


Abbildung 5.20: Dehnungen ϵ_{zy} bei fehlendem (links) und vollem (rechts) Verbund, T = 50°C

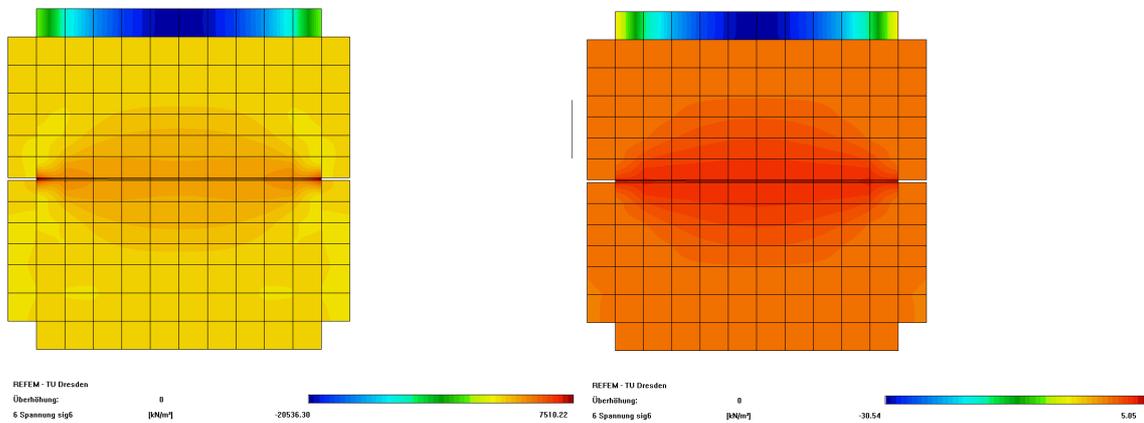


Abbildung 5.21: Scherspannungen τ_{zy} bei vollem (links) und bei fehlendem Verbund (rechts)

Aus den beschriebenen Feststellungen bei den Berechnungen kann geschlossen werden, dass der Schichtenverbund zwischen 1,5 cm dünnen Asphaltsschichten nicht eindeutig zu bewerten und deshalb aus rechnerischer Sicht zunächst keine Empfehlung für eine Prüfung ausgesprochen werden kann.

Ein solch abweichender Trend der Ergebnisse bei den dünnen Schichten kann aus den Versuchsergebnissen jedoch nicht erkannt werden. Die Verläufe der gemessenen Schersteifigkeiten aller Schichtdicken, bei denen Stahldummies verwendet wurden (1,5 cm, 3,0 cm, 4,0 cm) liegen nah beieinander, sowohl bei -10 °C als auch bei 50 °C (Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23). Gegenüber den Probekörpern, die mit Stahldummies verklebt sind, zeigen aber die 6 cm Probekörper ohne Stahldummies abweichende Verläufe der Schersteifigkeiten bei beiden Temperaturen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die Stahldummies (eingeklebt oder nicht eingeklebt) die gemessenen Schersteifigkeiten unterschiedlich beeinflussen. Entsprechend der Ergebnisse aus den Laborversuchen kann die Prüfung des Schichtenverbundes mit Probekörpern aus dünnen Schichten bei Anwendung von Stahldummies (eingeklebt) empfohlen werden. Bei der Auswertung kann allerdings erst auf der Basis von FE-Rechnungen eine sichere Bewertung diesbezüglich gemacht werden. Bevor jedoch endgültig abgesicherte Aussagen zur Prüfung dünner Schichten mit und ohne Stahldummies gemacht werden können, müssten noch weitere labortechnische Untersuchungen zur Auswirkung der Dummies auf die Messergebnisse durchgeführt werden.

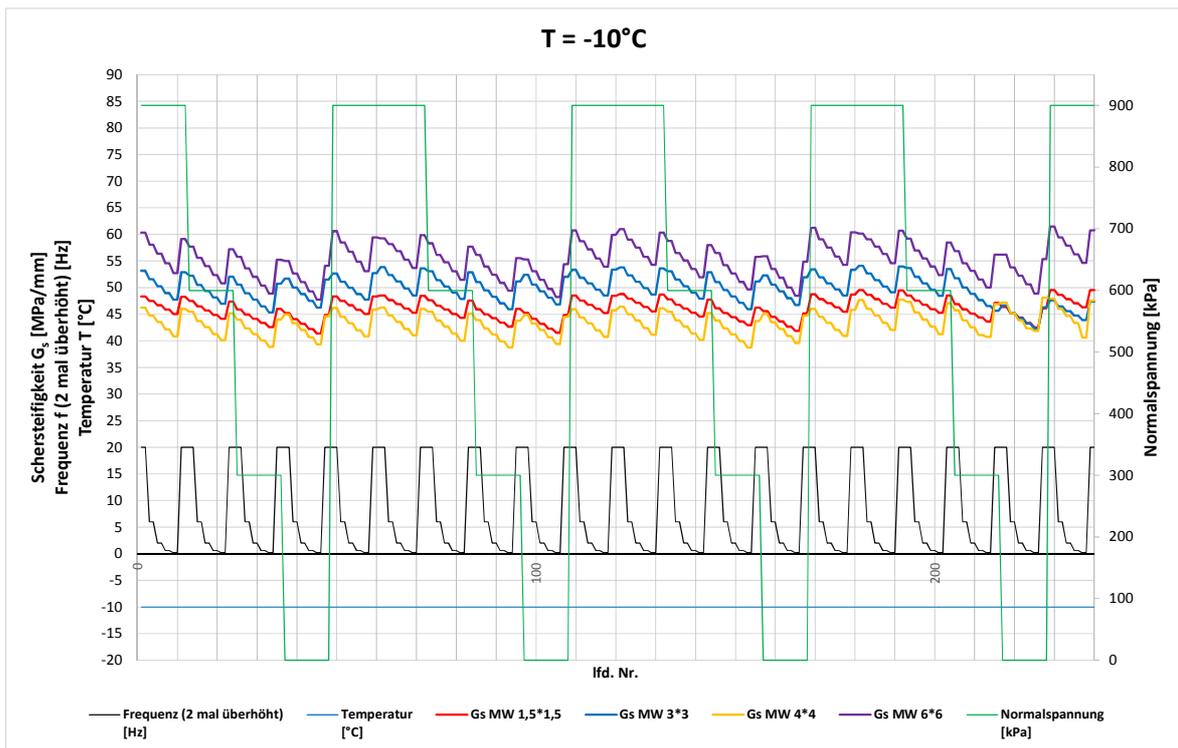


Abbildung 5.22: Schersteifigkeitsverläufe für die vier untersuchten Schichtdicken bei -10°C

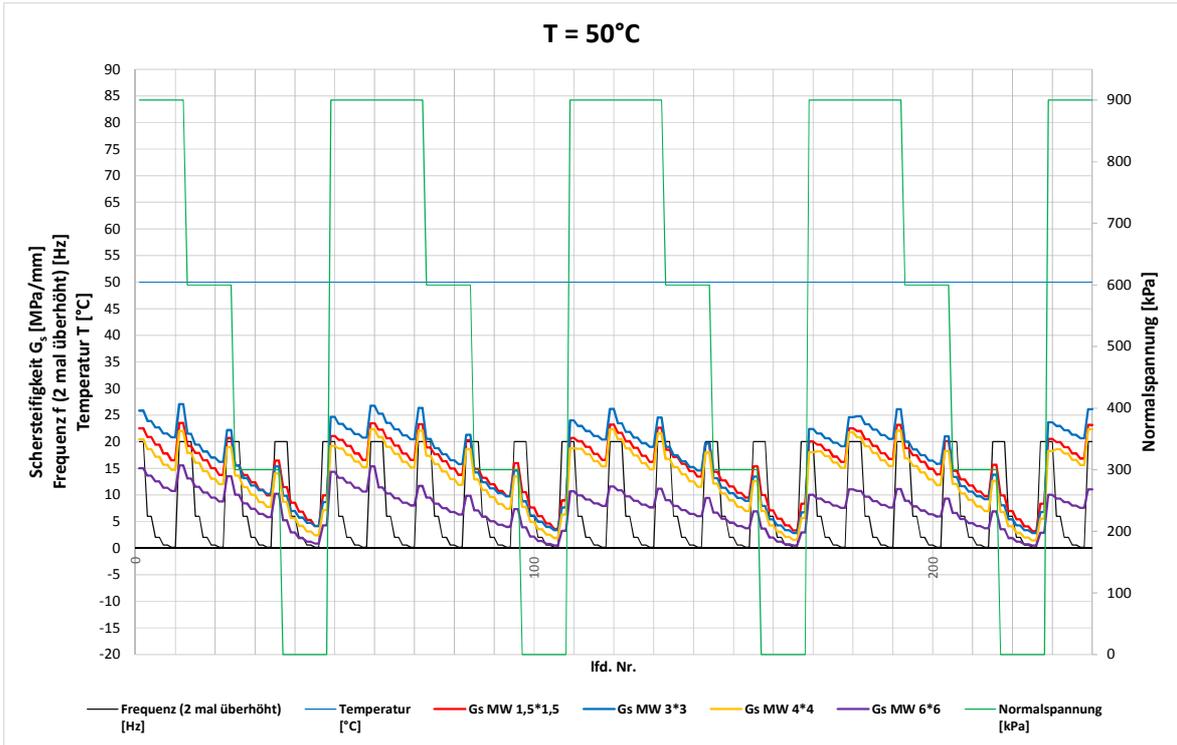


Abbildung 5.23: Schersteifigkeitsverläufe für die vier untersuchten Schichtdicken bei 50°C

5.3 Ermittlung der Versuchspräzision unter Wiederholbedingungen (Arbeitspaket 4)

5.3.1 Verklebung von fein geschliffenen Oberflächen (4a)

Zur Ermittlung der Versuchspräzision bei reiner Verklebung wurden 12 Probekörper (SMA 11 S auf AC 22 T S) geprüft. Um den Effekt der Verklebung zu untersuchen, mussten die Oberflächen der beiden zu verklebenden Bohrkernscheiben fein geschliffen werden, so dass keine Verzahnung stattfinden konnte. Auf die glatten Oberflächen der Asphalttragschicht wurde die Bitumenemulsion C60 BP1-S in den drei geforderten Mengen von 200, 300 und 400 g/m² aufgetragen (Abbildung 5.24). Nach einer vierstündigen Erwärmung der Deckschicht-Bohrkernscheiben bei 55°C (Temperatur R-K) wurden diese auf den Tragschicht-Bohrkernscheiben in der speziell dafür angefertigten Vorrichtung (Abbildung 5.25) mit Innendurchmesser von 100 mm mit Hilfe einer statischen Presse aufgepresst. Dabei wurde die Druckkraft mit einer Geschwindigkeit von 0,5 KN/s aufgebracht bis eine Maximalkraft von 19,5 KN erreicht wurde. Das Auspressen des fertigen zweischichtigen Probekörpers erfolgte mit der Auspressvorrichtung in Abbildung 3.20.

In Anlehnung an Johannsen (2012) wurden die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen. Der Effekt der Verklebung bei dem Schichtenverbund resultiert aus der selbstklebenden Wirkung der Bitumenemulsion. Wie schon beschrieben zeigt Bitumen eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Im Gebrauchstemperaturzustand wird die Wirksamkeit der Schichtenverbundes durch die Verklebung, die Verzahnung und durch Reibung bestimmt, bei unterschiedlichen Temperaturen wirken diese Komponenten jedoch in unterschiedlichen Anteilsgrößen. Da die Scherwege bei tiefen Temperaturen bedingt durch die hohe Viskosität des Bitumens sehr klein sind, wurde angenommen, dass die Effekte der Verzahnung und der Reibung vernachlässigbar sind und deshalb nur die Verklebung den Schichtenverbund bestimmt. Mit steigender Temperatur wird die Verklebung viskositätsbedingt generell schwächer. Der prozentuale Anteil der Verzahnung – diese entsteht durch das Ineinandergreifen der Gesteinskörner bei Einbau und Verdichtung, ist nicht temperaturabhängig und wirkt ohne jegliche Normalspannung - am Verbund steigt ebenso wie der Reibungsanteil, welcher normalspannungsabhängig und temperaturabhängig ist. Bei sehr hohen Temperaturen, wenn die verklebende Wirkung des Bindemittels gegen Null tendiert, und bei gleichzeitig fehlender Normalspannung, wenn keine Reibungskräfte mehr auftreten, wird der Schichtenverbund nur durch die Verzahnung ermöglicht. In diesem Falle konnte bei den Versuchen kaum noch eine Schersteifigkeit nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse in diesem Arbeitspaket zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verläufen aus den Versuchen bestimmten Flächenfunktionen für die drei unterschiedlichen Bitumenemulsionsmengen gibt, wobei die höchste

Schersteifigkeit bei 30°C und 50°C bei der kleinsten Bitumenemulsionsmenge von 200 g/m² ermittelt wurde (Abbildung 5.26 und Abbildung 5.27). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei in diesem Fall weniger Bitumen, welches bei diesen Temperaturen als Gleitmittel wirkt, zwischen den Schichten vorliegt. Bei tiefen Temperaturen ist eine gleich starke Verklebung mit den drei Mengen vorhanden. Die optimale Menge der Bitumenemulsion für die Verklebung bei allen Temperaturen ist demzufolge 200 g/m².

Da die Ergebnisse aus diesen Versuchen sehr eng beieinander liegen ist abzuleiten, dass die Versuchspräzision sehr gut ist. Die Unterschiede in den Temperaturbereichen, welche eine viskositätsbedingte Verklebung erwarten lassen (-10 °C, +10 °C), belaufen sich auf weniger als 20 %. Nur bei Temperaturen ≤ 30 °C zeigen sich größere Unterschiede, welche jedoch – wie oben bereits beschrieben – physikalisch begründbar sind. Insofern sind die später teilweise festgestellten größeren Spannweiten der Versuchsergebnisse weniger auf Versuchsstreuungen, sondern mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Streuung der Materialeigenschaften wegen der auf die relativ kleine Fläche bezogenen Unterschiede in der Verzahnung und ggf. auch der Reibung zurückzuführen.



Abbildung 5.24: Geschliffene Oberfläche der unteren Asphalterschicht mit aufgetragener Bitumenemulsion



Abbildung 5.25: Speziell angefertigte Form zur Herstellung des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen. Links – Teile, rechts – geschlossene Form

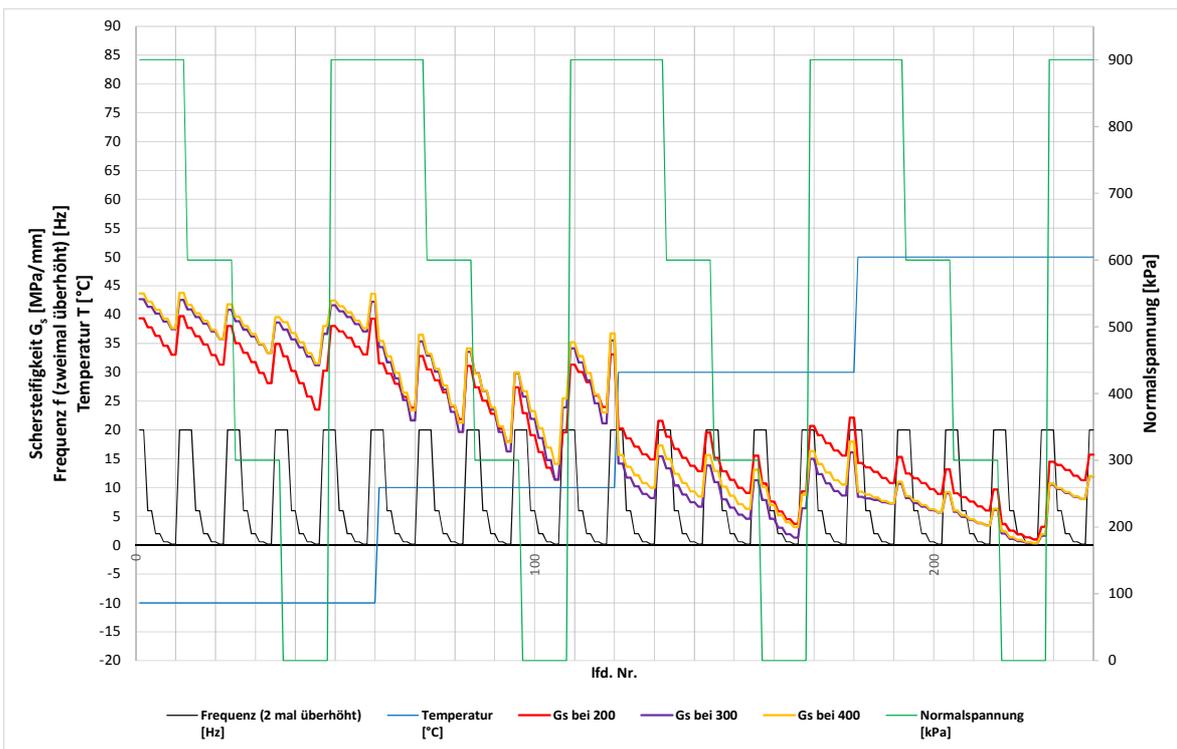


Abbildung 5.26: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen bei 200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²

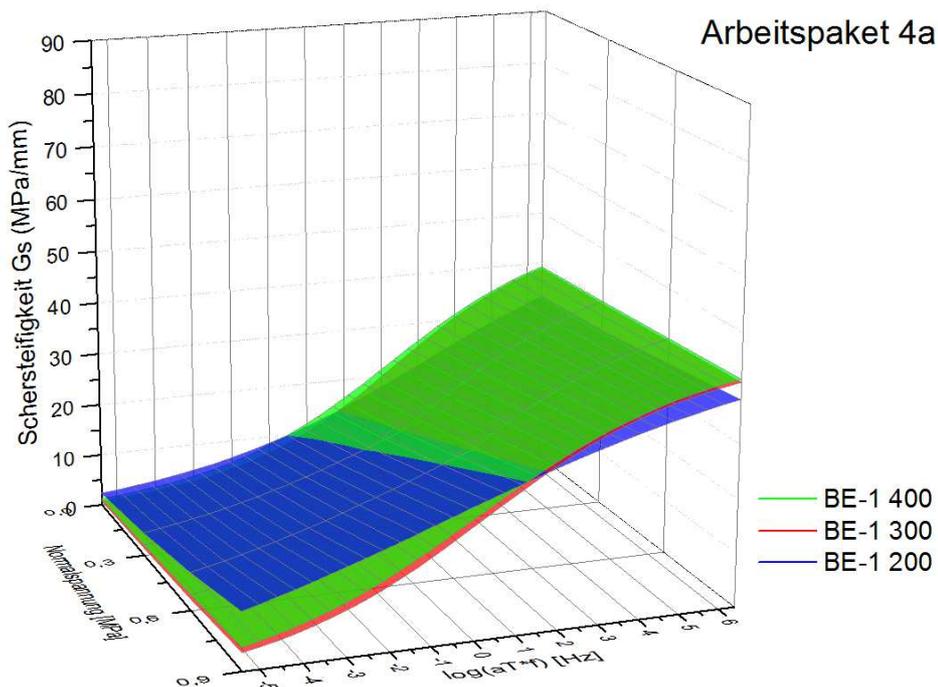


Abbildung 5.27: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes zwischen geschliffenen Oberflächen bei 200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²

5.3.2 Normal hergestellter Schichtenverbund (4b)

Um die Versuchspräzision bei Vorhandensein der Effekte aus Verklebung, Verzahnung und Reibung zu untersuchen, wurden weitere 12 Probekörper mit normal hergestellten Oberflächen im Walzsektor-Verdichter (SMA 11 S auf AC 22 T S, normale Oberflächen) mit den gleichen Mengen an Bitumenemulsion C60 BP1-S bei 4-facher Belegung geprüft. Generell kann festgestellt werden, dass der Verbund stärker ist, wenn die Verklebung, die Reibung und die Verzahnung gemeinsam wirken (Abbildung 5.28 und Abbildung 5.29).

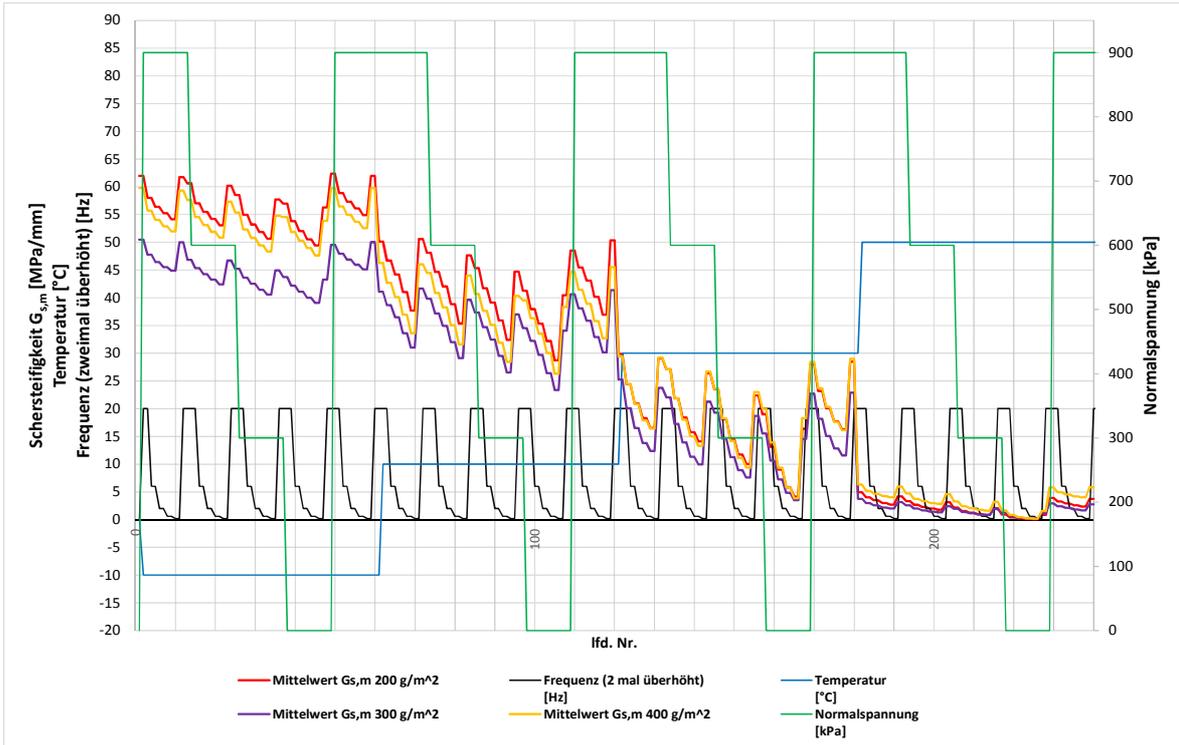


Abbildung 5.28: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei 200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²

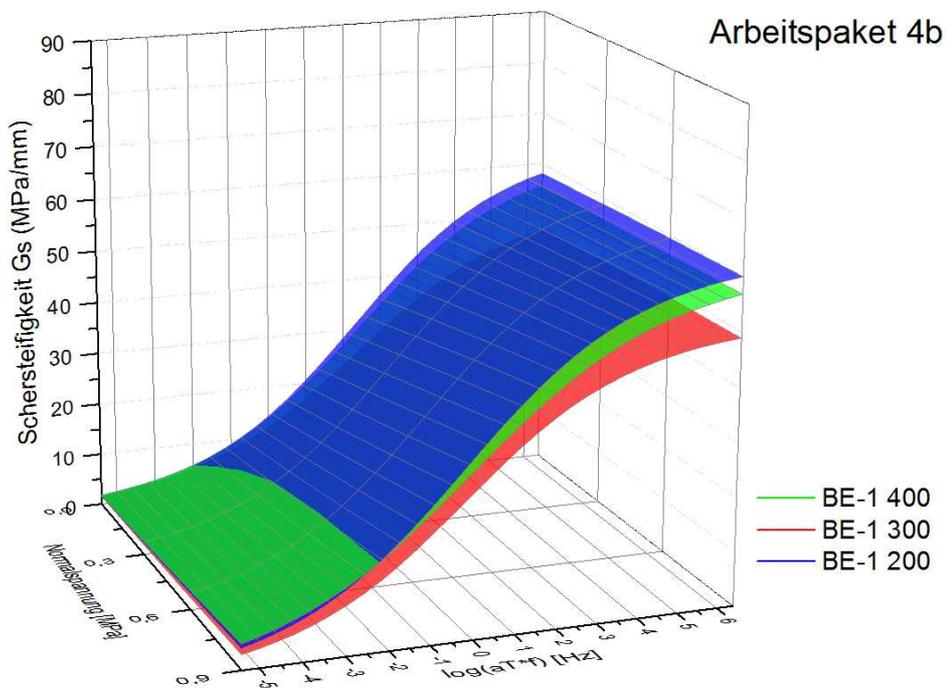


Abbildung 5.29: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei 200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²

Hier wurde die höchste Schersteifigkeit bei Verwendung der kleinsten Bitumenemulsionsmenge von 200 g/m^2 ermittelt. Obwohl alle drei Flächendiagramme nahezu die gleichen Verläufe zeigen, kann festgestellt werden, dass der Schichtenverbund am schwächsten bei 300 g/m^2 ist. Bei allen untersuchten Temperaturen ist 200 g/m^2 Bitumenemulsion die optimale Menge.

Der Vergleich der beiden Flächenfunktionen erlaubt die quantitative Trennung der Effekte von Verklebung und Verzahnung / Reibung zwischen den Asphaltsschichten. Wie erwartet, ist wegen der gemeinsamen Wirkung von Verklebung, Verzahnung und Reibung die Schersteifigkeit bei dem normal hergestellten Schichtenverbund generell deutlich höher als bei dem Verbund durch reine Verklebung. Bei der höchsten Normalspannung von $0,9 \text{ MPa}$ beträgt die Schersteifigkeit bei reiner Verklebung 63% von der Schersteifigkeit des normalen Verbundes mit Reibung und Verzahnung. Die verbleibenden 37% sind bedingt durch Verzahnung und Reibung (Abbildung 5.31). Wenn keine Normalspannung vorhanden ist, liegt die Schersteifigkeit der verklebten glatten Oberflächen bei -10 , 10 und 30°C nahezu bei der Hälfte der Schersteifigkeit des normalen Verbundes (Abbildung 5.32). Die Erhöhung der Normalspannung führt zu einem Anstieg der Schersteifigkeit der verklebten glatten Oberflächen und diese erreichen ca. $2/3$ der Schersteifigkeitswerte des normal hergestellten Schichtenverbundes. Die Erhöhung der Normalspannung begünstigt also nicht nur die Reibung, sondern auch die reine Verklebung der Asphaltsschichten.

Die Versuche in diesem Arbeitspaket wurden mit einer Wiederholung der tiefsten Prüftemperatur am Ende des Versuchsprogramms durchgeführt. Die Dauer jedes einzelnen Versuches betrug ca. 19 Stunden. Ziel dieser Wiederholung der tiefsten Temperatur war es zu untersuchen, ob eine Veränderung des Schichtenverbundes nach den vorhergehenden Belastungszyklen des Versuchsprogrammes auftritt. Bei allen Diagrammen ist der folgende Verlauf der Schersteifigkeiten zu beobachten. Bei der höchsten Prüftemperatur von 50°C existiert keine Verklebung mehr und bei fehlender Normalspannung und niedrigster Frequenz fehlt auch die Reibung. Die Verzahnung ist offenbar ungenügend, um den Verbund herzustellen. Der Schichtenverbund ist demzufolge praktisch nicht vorhanden. Sobald die Normalspannung und die Frequenz erhöht werden, reaktivieren sich die Reibungskräfte und die Schersteifigkeit vergrößert sich (Abbildung 5.33). Bei der drastischen Absenkung der Temperatur von 50°C auf -10°C , reaktivieren sich auch die Klebkkräfte.

Der Vergleich der Mittelwerte aus den Versuchen zeigen, dass die gemessene Schersteifigkeit bei Wiederholung der Belastungszyklen bei -10°C für 200 g/m^2 und 300 g/m^2 nahezu die gleiche Größenordnung wie bei den Belastungszyklen bei gleicher Temperatur zu Beginn des Versuchsprogrammes hat, wobei bei 200 g/m^2 eine leichte Absenkung der Schersteifigkeiten festzustellen ist. Eine leichte Verbesserung des Verbundes ist bei der Bitumenemulsionsmenge von 400 g/m^2 feststellbar.

Der Grund für diese Verbesserung ist wahrscheinlich der Verdichtungseffekt der vorangegangenen zyklischen Versuchsabläufe, insbesondere bei hohen Temperaturen. Dagegen ist die geringe Menge von 200 g/m² Bitumenemulsion vermutlich nicht ausreichend, um die Verklebung durch die vorangegangenen Belastungszyklen zu verbessern (Abbildung 5.30).

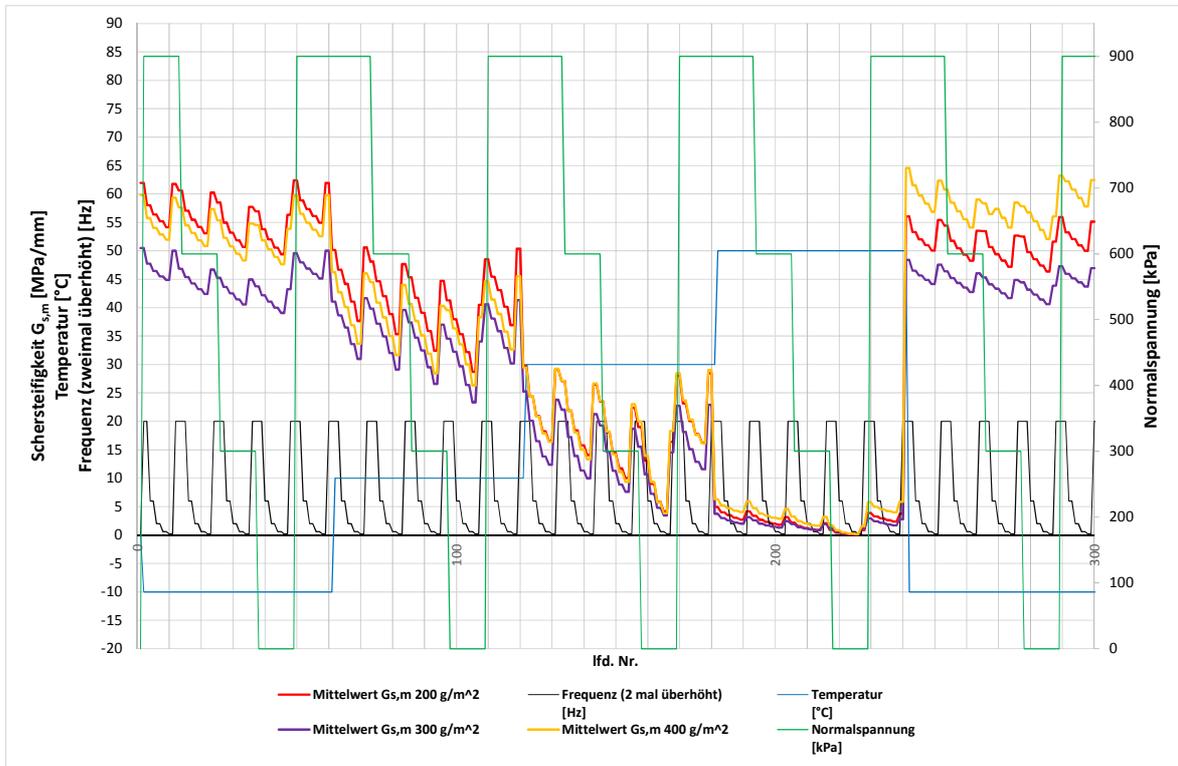


Abbildung 5.30: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten des normal hergestellten Schichtenverbundes bei 200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m² bei Wiederholung der tiefsten Temperatur

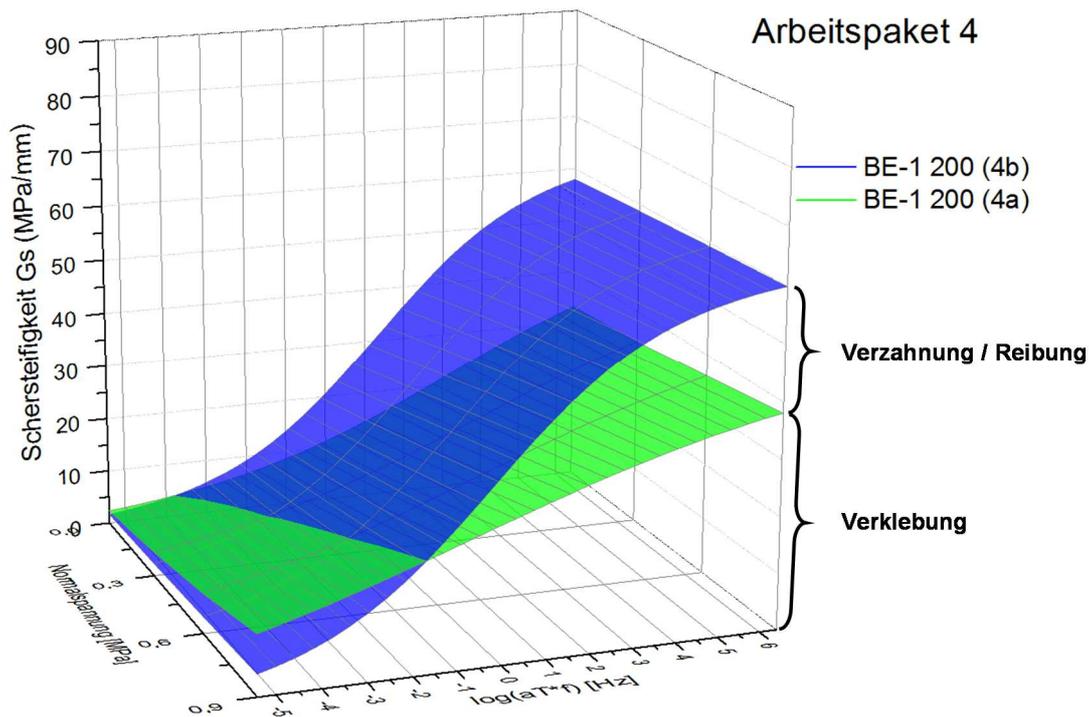


Abbildung 5.31: Vergleich der zwei optimalen Bitumenemulsionsmengen von 200 g/m² bei reiner Verklebung zwischen den Asphaltsschichten und bei normal hergestelltem Schichtenverbund

Der direkte Vergleich zwischen den Mittelwerten der Schersteifigkeiten zeigt, dass der kombinierten Effekt aus Verklebung und Verzahnung/Reibung bei den ersten drei Prüftemperaturen einen deutlich stärkeren Schichtenverbund ermöglicht. Bei fehlender Normalspannung sind die Unterschiede in den Schersteifigkeiten erwartungsgemäß größer als bei der Wirkung der höchsten Normalspannung von 0,9 MPa (Abbildung 5.32 und Abbildung 5.33). Bei 50°C ist die Schersteifigkeit des Schichtenverbundes bei der reinen Verklebung bei allen Normalspannungen höher als bei kombinierter Wirkung von Verklebung, Verzahnung und Reibung. Diese Aussage ist jedoch nicht über zu bewerten, da bei dieser Temperatur der Absolutwert der Steifigkeit so gering ist, dass der Unterschied praktisch bedeutungslos ist.

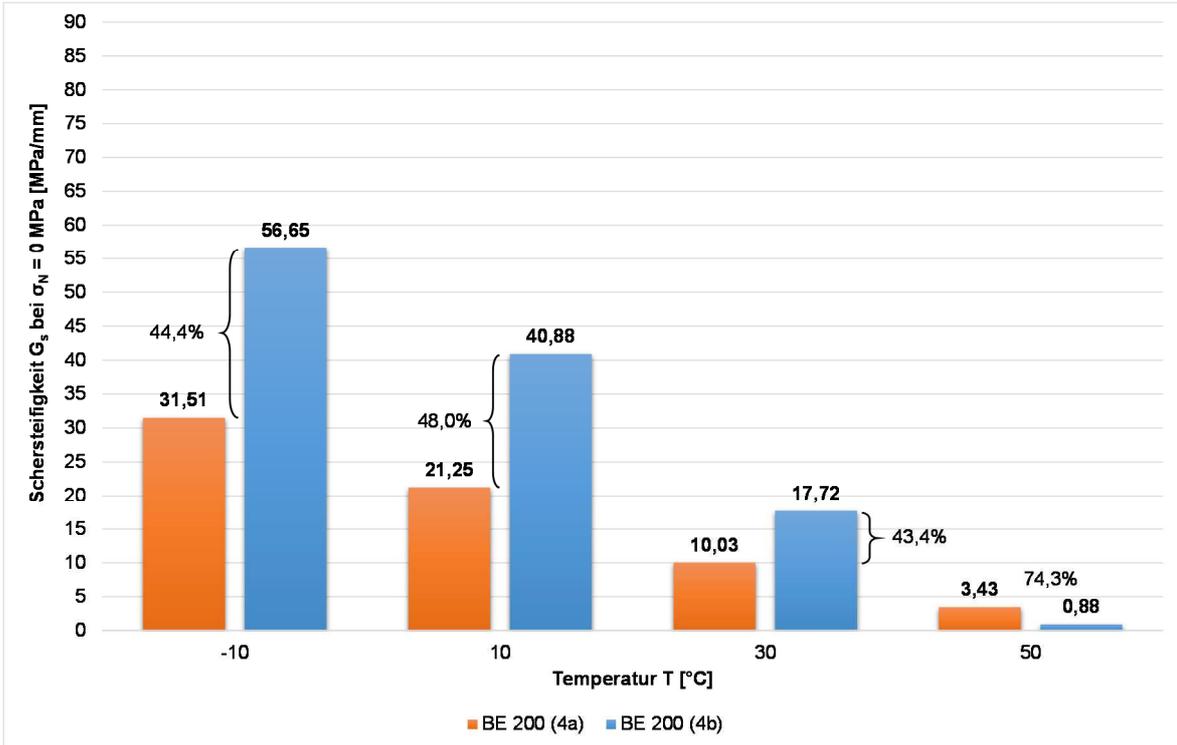


Abbildung 5.32: Vergleich der optimalen Schersteifigkeiten bei reiner Verklebung und bei dem kombinierten Effekt aus Verklebung, Verzahnung und Reibung (200 g/m² C60 BP1-S, $\sigma_N = 0$ MPa und $f = 10$ Hz)

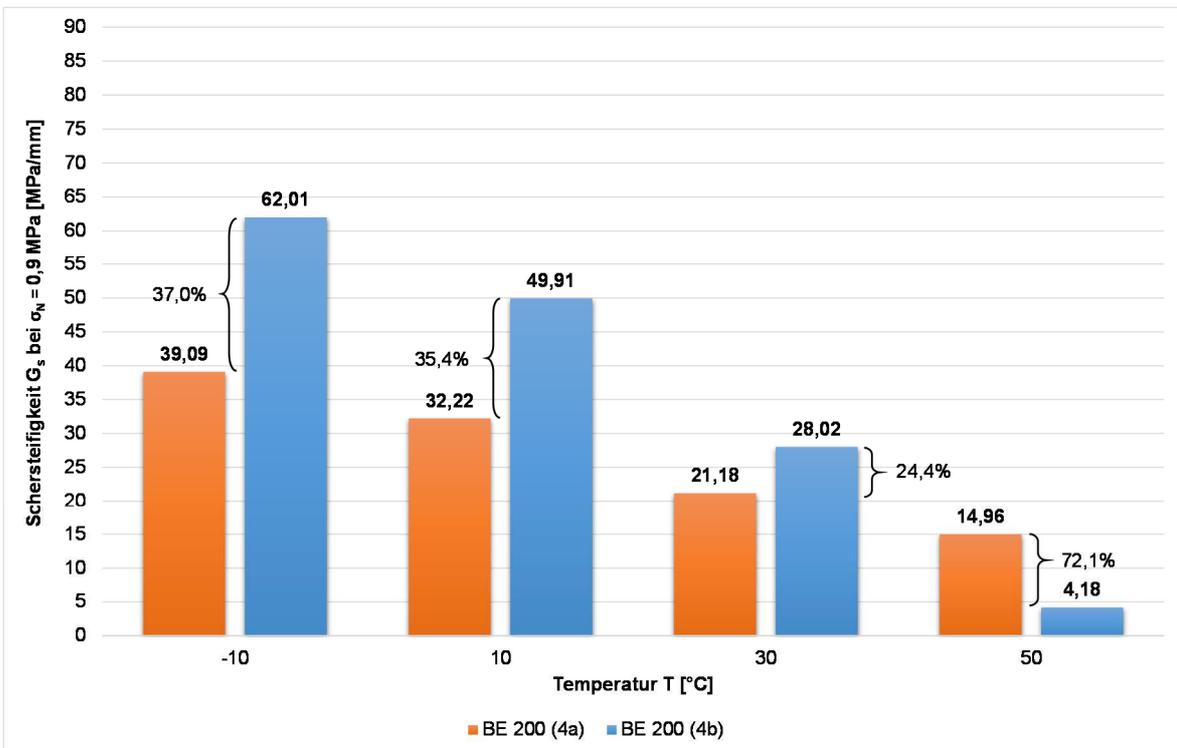


Abbildung 5.33: Vergleich der optimalen Schersteifigkeiten bei reiner Verklebung und bei dem kombinierten Effekt aus Verklebung, Verzahnung und Reibung (200 g/m² C60 BP1-S, $\sigma_N = 0,9$ MPa und $f = 10$ Hz)

5.4 Untersuchung von im Labor hergestellten und aus Asphaltbefestigungen entnommenen Bohrkernen (Arbeitspakt 5)

In diesem Arbeitspaket sollen Kenntnisse über die Vergleichbarkeit der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltstraßenbefestigungen entnommenen Probekörpern erlangt werden. Dafür wurden 3 Baustellen ausgewählt, die einen weitgehend identischen Aufbau hatten. Mit den Asphaltgemischen von jeder der drei Baustellen wurden im Labor Platten hergestellt, aus denen die Probekörper herausgebohrt wurden. Anschließend erfolgte die Herstellung des Schichtenverbundes mit dem von der jeweiligen Baustelle entnommenen Haftvermittler in der entsprechenden Menge. Es wurden insgesamt 18 zweischichtige Probekörper hergestellt. Die Prüfung aller im Labor hergestellten 18 Probekörper und der aus der Baustelle entnommenen 18 Bohrkern erfolgte mit zyklischer Belastung. Es wurde angestrebt, möglichst die gleichen Schichtenverbundeigenschaften an den Laborprobekörpern zu schaffen, wie bei den Bohrkernen aus den 3 Baustellen.



Abbildung 5.34: Bohrlöcher

Ziel war es, die Unterschiede in der erreichten Verbundwirkung zwischen im Labor hergestellten und aus Asphaltstraßenbefestigungen entnommenen Probekörpern zu beurteilen.

Wie aus den Flächenfunktionen im Anhang 5 ersichtlich wird, ist der Schichtenverbund bei der Kombination Deckschicht – Binderschicht (Verbundvariante 1) bei allen drei Baustellen um etwa 20% besser als der Verbund bei der Kombination Binderschicht – Tragschicht (Verbundvariante 2). Das ist wahrscheinlich auf den höheren Bindemittelgehalt in der Deckschicht (SMA 11 S), den kleinen Durchmesser des Größtkorns und die Verwendung von polymermodifiziertem Bitumen in den beiden Asphaltsschichten zurückzuführen. Bedingt durch den höheren Hohlraumgehalt, den geringeren Bindemittelgehalt und die Verwendung von nicht polymermodifiziertem Bitumen 50/70 in der Asphalttragschicht ist der Verbund mit der Binderschicht schwächer.

Der im Laboratorium hergestellte Schichtenverbund aus den Mischgütern der drei Baustellen zeigt ähnliche Ergebnisse, jedoch ist die Schersteifigkeit der Verbundvariante 2 bei zwei Fällen im gesamten Normalspannungsbereich höher als diejenige der Verbundvariante 1 (Anhang 5).

Der Vergleich der berechneten Schersteifigkeits-Flächenfunktionen Labor – Baustelle zeigt eine gute Übereinstimmung im gesamten untersuchten Temperatur-, Frequenz- und Normalspannungsbereich bei beiden Verbundvarianten (Abbildung 5.35 und Abbildung 5.36). Die Flächenplots aus den Mittelwerten von den drei Baustellen zeigen, dass die Schersteifigkeiten aus den Baustellenprobekörpern bei beiden Verbundvarianten im Allgemeinen höher sind, was mit der besseren Verdichtung durch die Walzen im Vergleich zu der Verdichtung im Laboratorium erklärt werden kann. Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 der experimentell bestimmten Schersteifigkeiten belegen auch, dass die Unterschiede nicht signifikant sind.

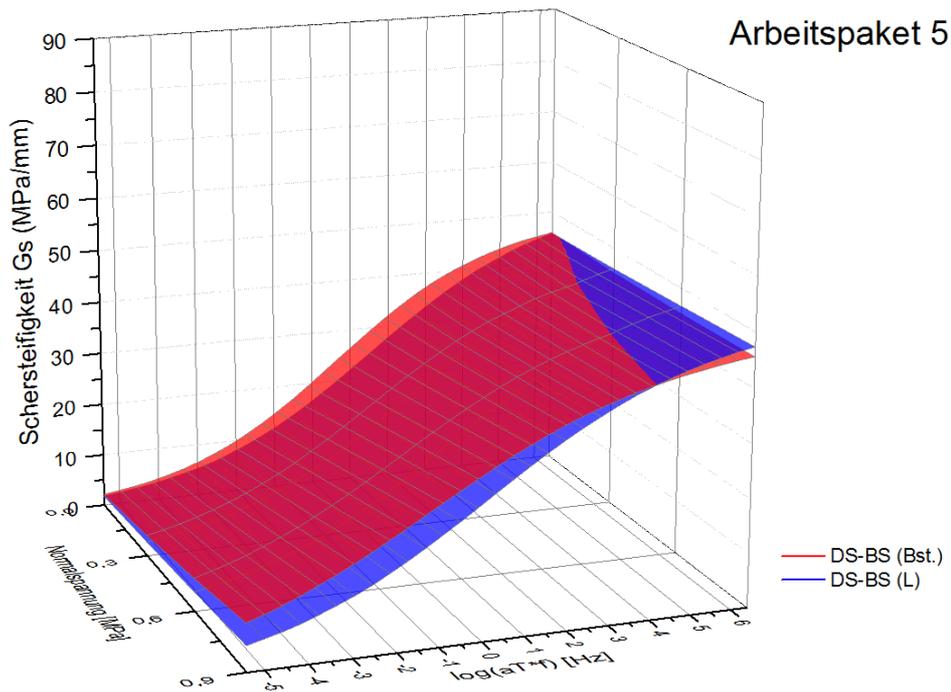


Abbildung 5.35: Vergleich zwischen den Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten für die Kombination ADS-ABS zwischen Baustelle und Laboratorium

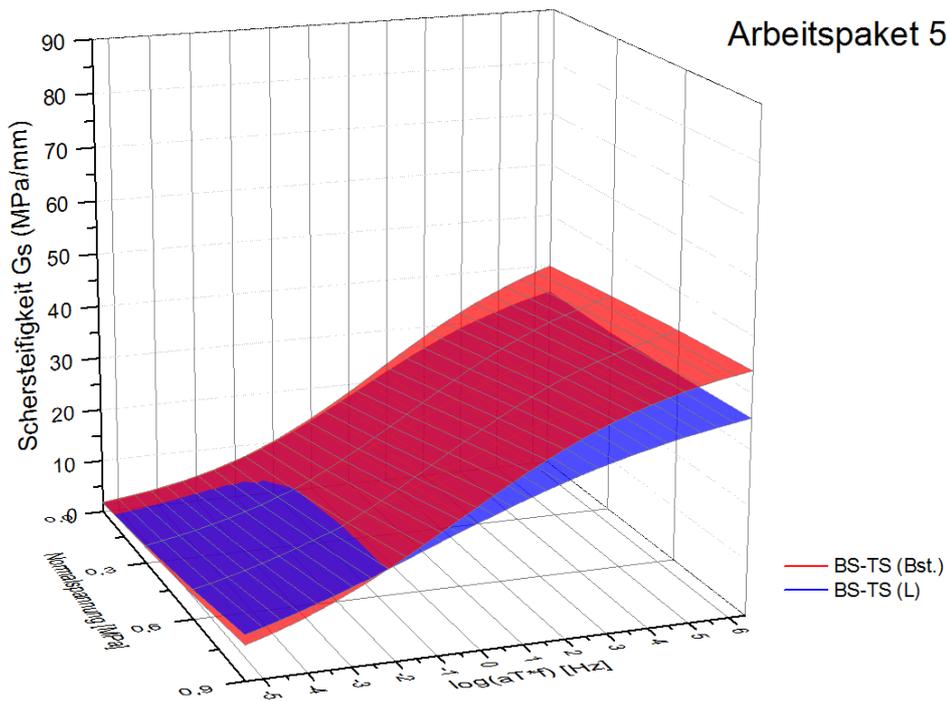


Abbildung 5.36: Vergleich zwischen den Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten für die Kombination ABS-ATS zwischen Baustelle und Laborium

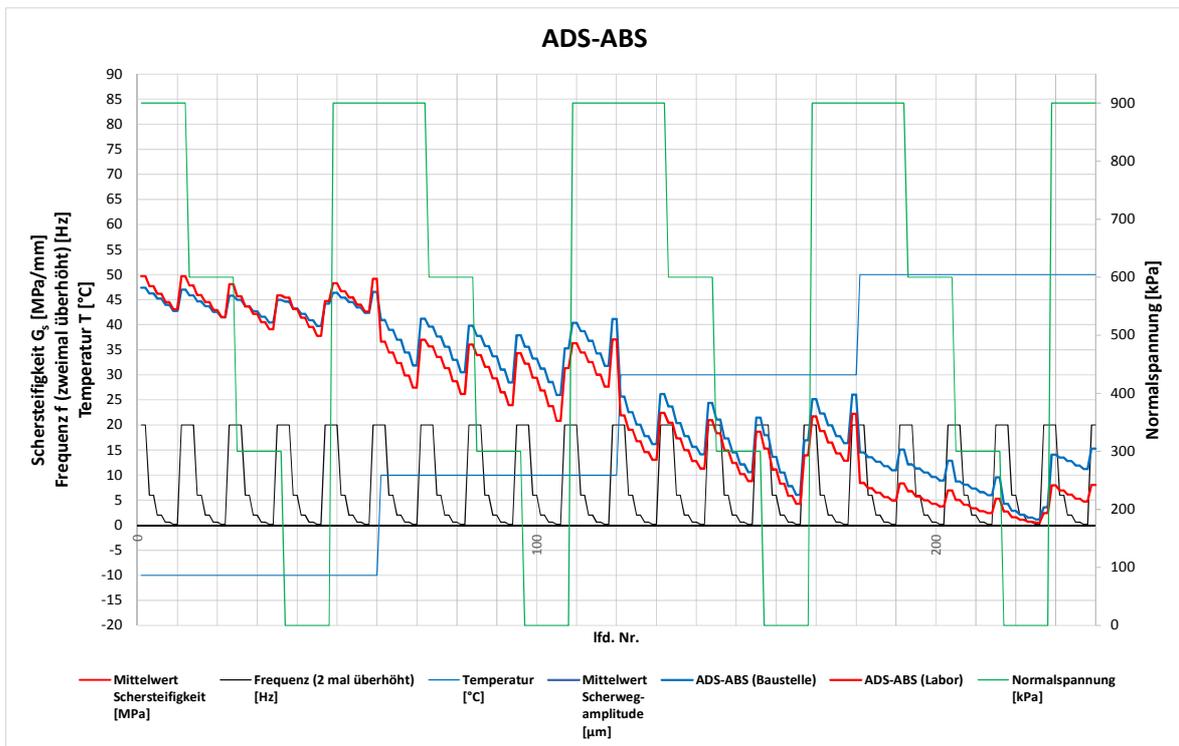


Abbildung 5.37: Vergleich zwischen den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für die Kombination ADS-ABS zwischen Baustelle und Laborium

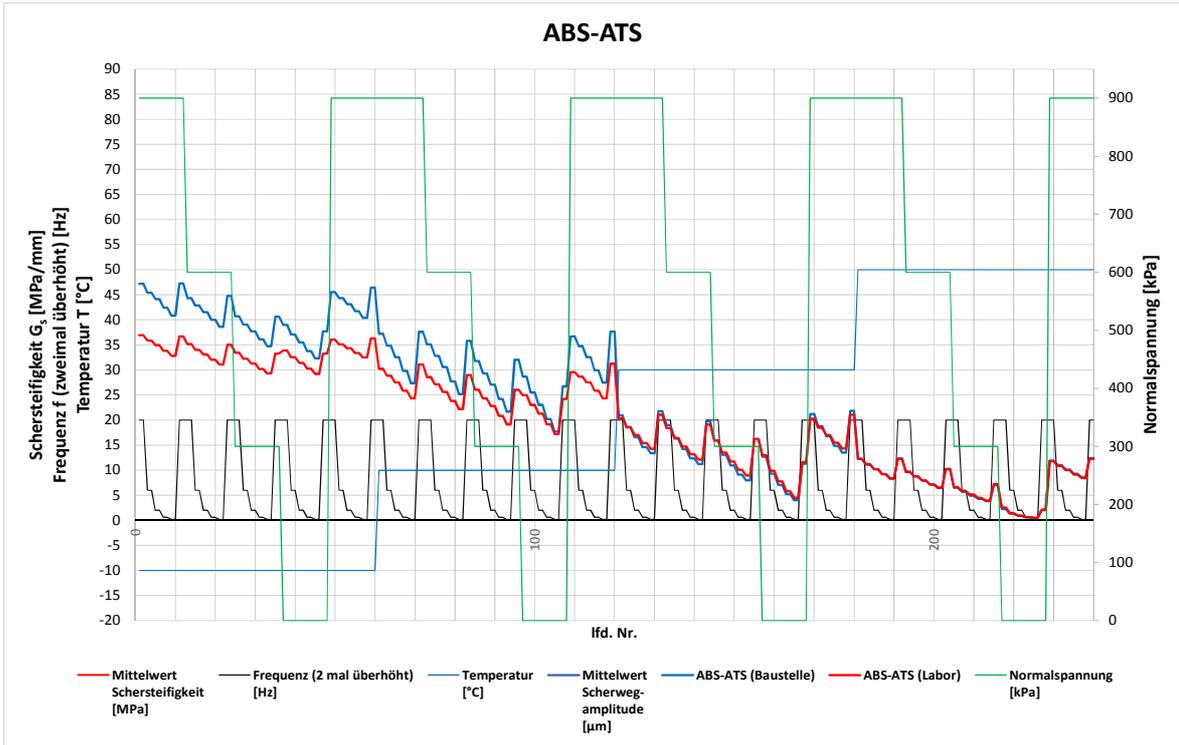


Abbildung 5.38: Vergleich zwischen den versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für die Kombination ABS-ATS zwischen Baustelle und Laborium

5.5 Untersuchung des Einflusses der Verzahnung, Reibung und Verklebung auf die Scherkräfte (Arbeitspaket 7)

Um die Effekte von Verklebung mit Bitumenemulsion und Verzahnung / Reibung auf eine größere statistische Basis zu stellen und voneinander quantitativ zu trennen, musste der Schichtenverbund unterschiedlich hergestellt werden. Für die Untersuchung der Verklebung wurden die angeforderten 27 Probekörper aus zwei Mischgutzusammensetzungen (SMA 11 S auf AC 22 T S) zyklisch getestet. Ihre Herstellung erfolgte wie diese im Arbeitspaket 4a (geschliffene, glatte Asphaltoberfläche in der Schichtenverbundebene), damit keine Verzahnung stattfinden konnte. Dabei wurden die polymermodifizierte Bitumenemulsion C60 BP1-S von zwei Herstellern und die lösemittelhaltige Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) in den Mengen von 200, 300 und 400 g/m² verwendet.

Um lediglich die Einflüsse von Verzahnung und Reibung zu untersuchen, sollte der Verbund ohne Anwendung von Bitumenemulsionen hergestellt werden. Nach Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden drei Oberflächenrauigkeiten und zwei unterschiedliche Varianten der Verbundherstellung festgelegt:

- (1) Feine Oberflächen (SMA 11 S auf SMA 11 S)
- (2) Normale Oberflächen (SMA 11 S auf AC 22 T S)
- (3) Grobe Oberflächen (AC 22 T S auf AC 22 T S)
- (4) Heiß auf heiß (SMA 11 S auf AC 16 B S)
- (5) Heiß auf kalt (SMA 11 S auf AC 16 B S)

Bei 3-facher Belegung wurden insgesamt 42 Probekörper geprüft.

5.5.1 Fein geschliffene Oberflächen (7a)

Der Vergleich der Verläufe der experimentell bestimmten Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes zwischen glatten Oberflächen zeigt, dass die optimale Bitumenemulsionsmenge bei allen Temperaturen 200 g/m² ist und bestätigt die Ergebnisse aus Arbeitspaket 4a bei Verwendung der selben Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr.1. Bei Betrachtung der Flächenfunktionen aus den berechneten Werten in Abbildung 5.40 ist die höhere Schersteifigkeit bei Verklebung mit der kleinsten Bitumenemulsionsmenge gut sichtbar.

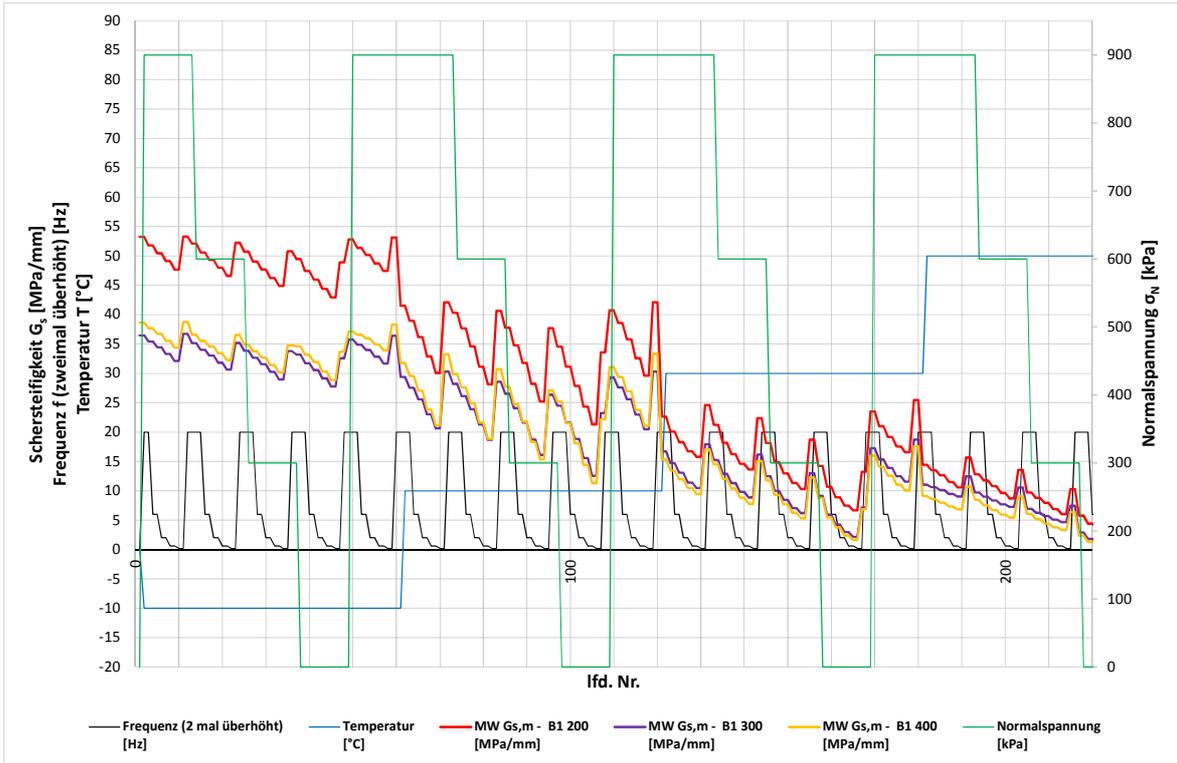


Abbildung 5.39: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 1 auf fein geschliffenen Oberflächen

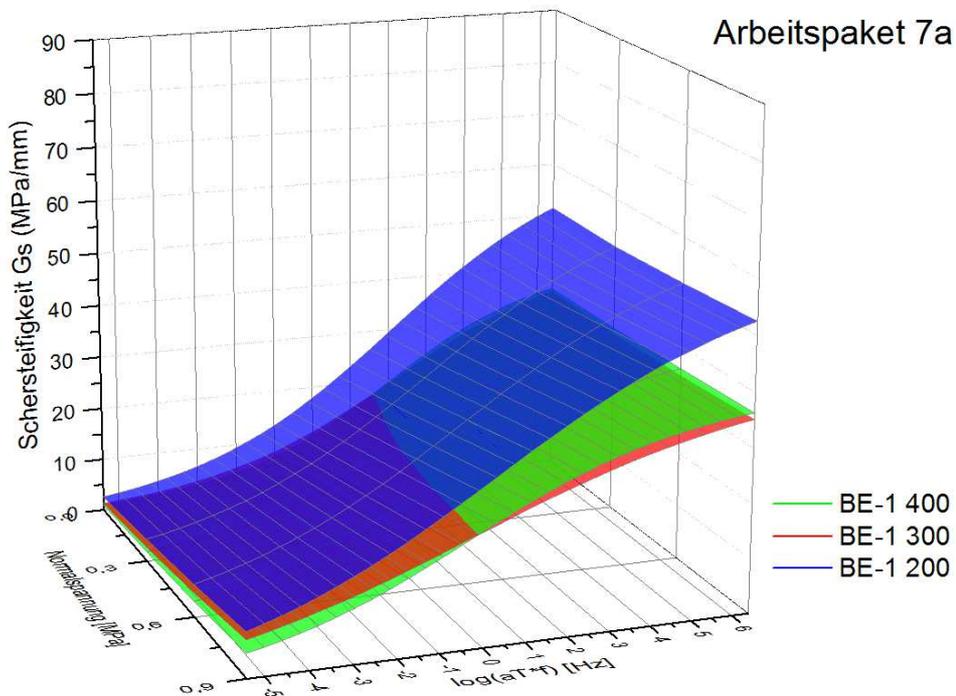


Abbildung 5.40: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 1 auf fein geschliffenen Oberflächen

Bei Anwendung der Bitumenemulsion C60BP1-S von dem Hersteller Nr. 2 sind die Werte der Schersteifigkeiten ab einer Temperatur von 10°C nahezu gleich. Bei -10°C ist die Verklebung mit der größten Menge von 400 g/m² am besten.

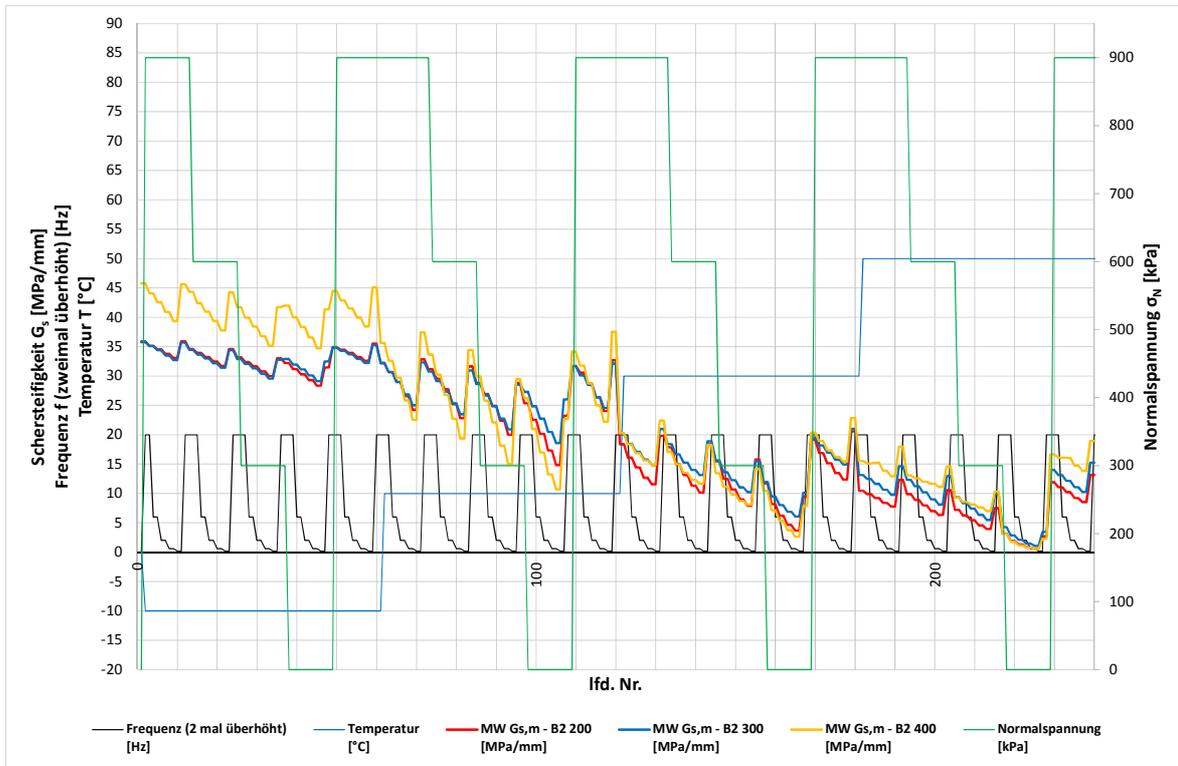


Abbildung 5.41: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 2 auf fein geschliffenen Oberflächen

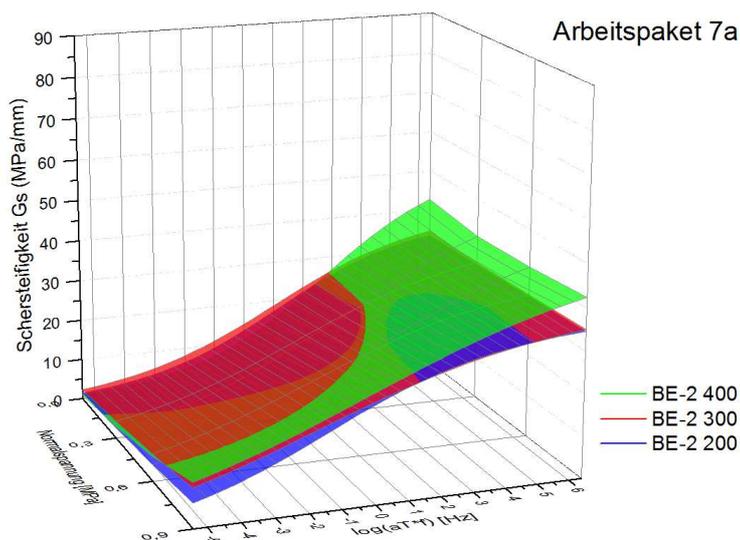


Abbildung 5.42: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C60 BP1-S von dem Hersteller Nr. 2 auf fein geschliffenen Oberflächen

Eindeutige Ergebnisse zeigen die Flächenplots der Schersteifigkeiten mit der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber). Der stärkste Schichtenverbund kann mit der größten Menge von 400 g/m² im Temperaturbereich von -10°C bis einschließlich 10°C erreicht werden. Die Verklebung mit dem Haftkleber war so schwach, dass der Verbund bei allen geprüften Probekörpern gleich beim Einbau (-10°C) gebrochen war (Abbildung 5.43), was bei keinen der zwei anderen Bitumenemulsionen C60 BP1-S der Fall war. Wenn ein Haftkleber zur Verklebung von feinen Oberflächen verwendet wird, dann ist die größte Menge aufzutragen.

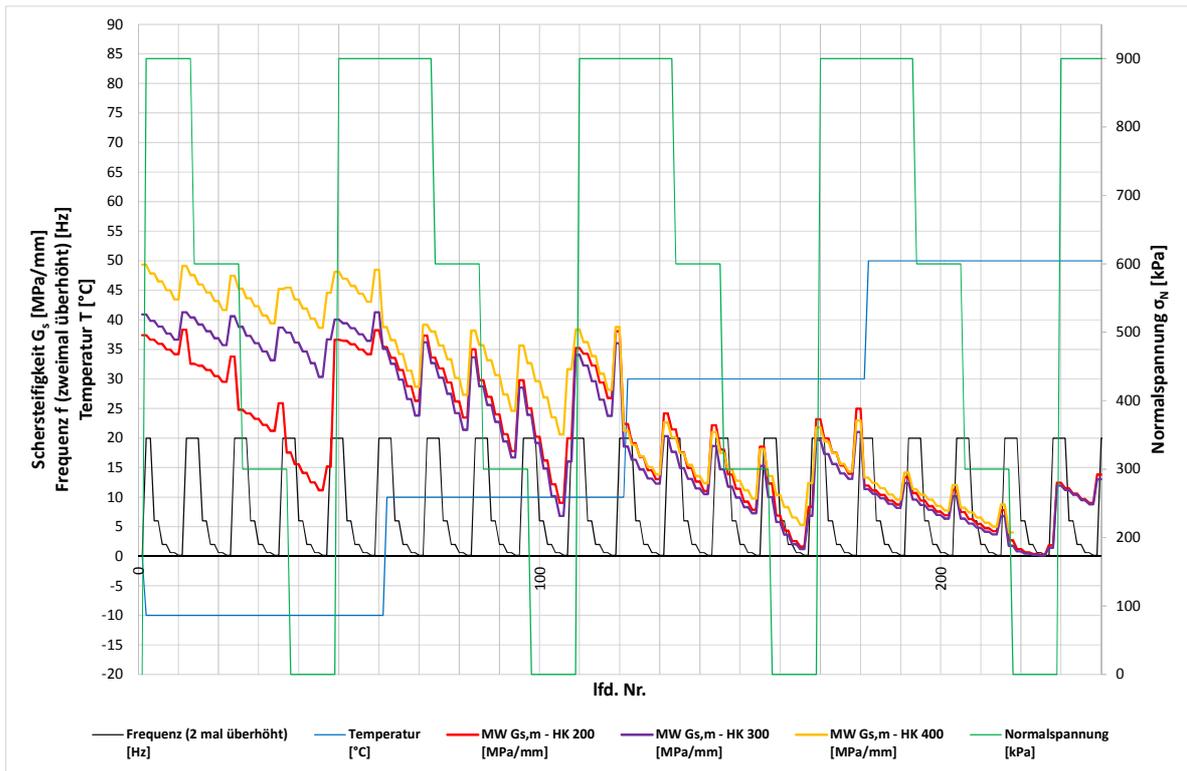


Abbildung 5.43: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) auf fein geschliffenen Oberflächen

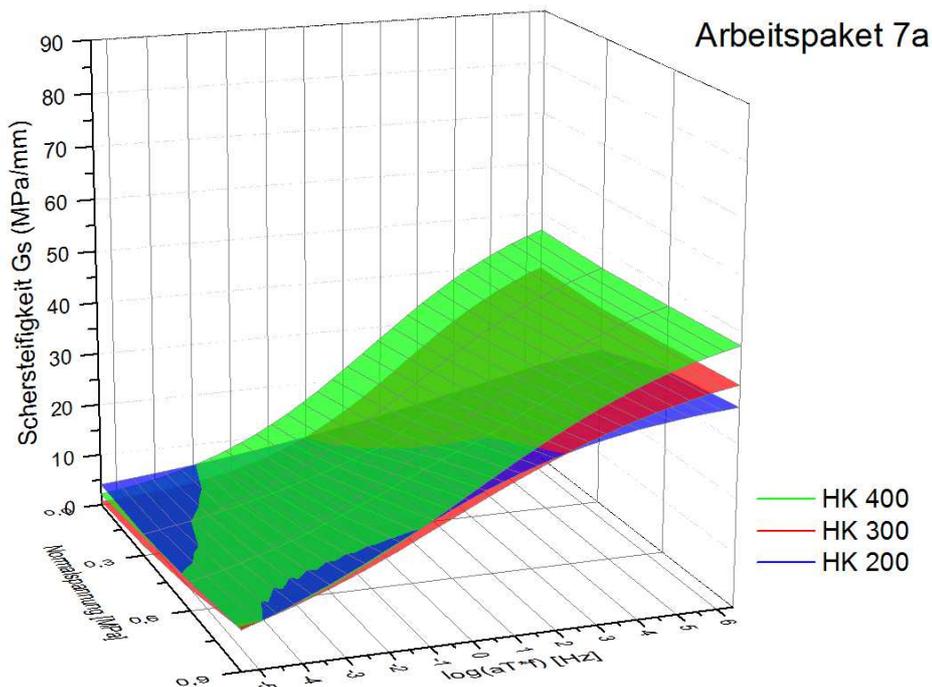


Abbildung 5.44: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Anwendung der Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) auf fein geschliffenen Oberflächen

5.5.2 Schichtenverbund ohne Bitumenemulsion (7b)

Anhand der Ergebnisse bei der Untersuchung des ohne Anwendung von Bitumenemulsionen hergestellten Schichtenverbundes wurde festgestellt, dass die Verklebung von der Reibung und der Verzahnung versuchstechnisch nicht getrennt werden kann. Allein der Bindemittelgehalt der zwei Asphaltsschichten reicht zwar aus, um eine Verklebung zu erzeugen, deshalb konnte die Reibung nicht exakt abgeleitet werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie dauerhaft der Verbund bei einer Verklebung der Schichten ohne Bitumenemulsion sein kann. Dafür sind Ermüdungsversuche notwendig.

Mit den bereits beschriebenen theoretischen Annahmen wurde eine rechnerische Trennung der drei Effekte ausgeführt. Die Ergebnisse der Kombination Tragschicht auf Tragschicht sind in Abbildung 5.45 dargestellt. Es ist sichtbar, dass der Anteil der Verzahnung bei allen Temperaturen gleich ist. Der Anteil der Verklebung wird mit zunehmender Temperatur kleiner und bei 50°C ist bei allen Normalspannungen keine Verklebung mehr da. Reibung ist bei fehlender Normalspannung bei allen Temperaturen nicht vorhanden und nimmt mit steigender Normalspannung zu. Bei dieser Verbundkombination (3) werden die kleinsten Anteile an Verzahnung und Verklebung, aber die größten Anteile an Reibung berechnet. Die schwächere Ver-

klebung kann mit dem niedrigeren Bindemittelgehalt und mit dem nicht polymermodifizierten Bitumen 50/70 der beiden Asphaltsschichten erklärt werden. Die schwache Verzahnung ist auf die Textur mit vielen Hohlräumen und die bessere Reibung ist auf die Korngrößen zurückzuführen. Die höchste Klebwirkung des Bindemittels wird bei Verbundkombination (1), wegen des hohen Bindemittelgehaltes der Schichten festgestellt. Varianten 5 und 2 weisen auch eine gute Verklebung auf. Verbundvariante (4) zeigt die beste Verzahnung von ca. 30% im gesamten untersuchten Temperaturbereich (Abbildung 5.46), was mit der Einbautechnologie erklärt werden kann. Durch die Verdichtung der oberen heißen Asphaltsschicht auf der heißen unteren Schicht werden die Körner in die Unterlage besser eingedrückt, was die Verzahnung begünstigt. Der starke Effekt der Verzahnung erklärt den deutlich besseren Schichtenverbund im positiven Temperaturbereich bei allen Normalspannungen verglichen mit allen anderen Verbundkombinationen (Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50). Die Verklebung ist hier jedoch am schwächsten. Eine gute Verzahnung zeigen auch die Verbundkombinationen (2) und (5). Der höchste Reibungseffekt wird bei der Verbundkombination (3) ermittelt, gefolgt von den Verbundkombinationen (2), (1), (4) und (5).

Verbundkombinationen (1) und (2) unterscheiden sich in ihrer Größenordnung kaum voneinander (Abbildung 5.48).

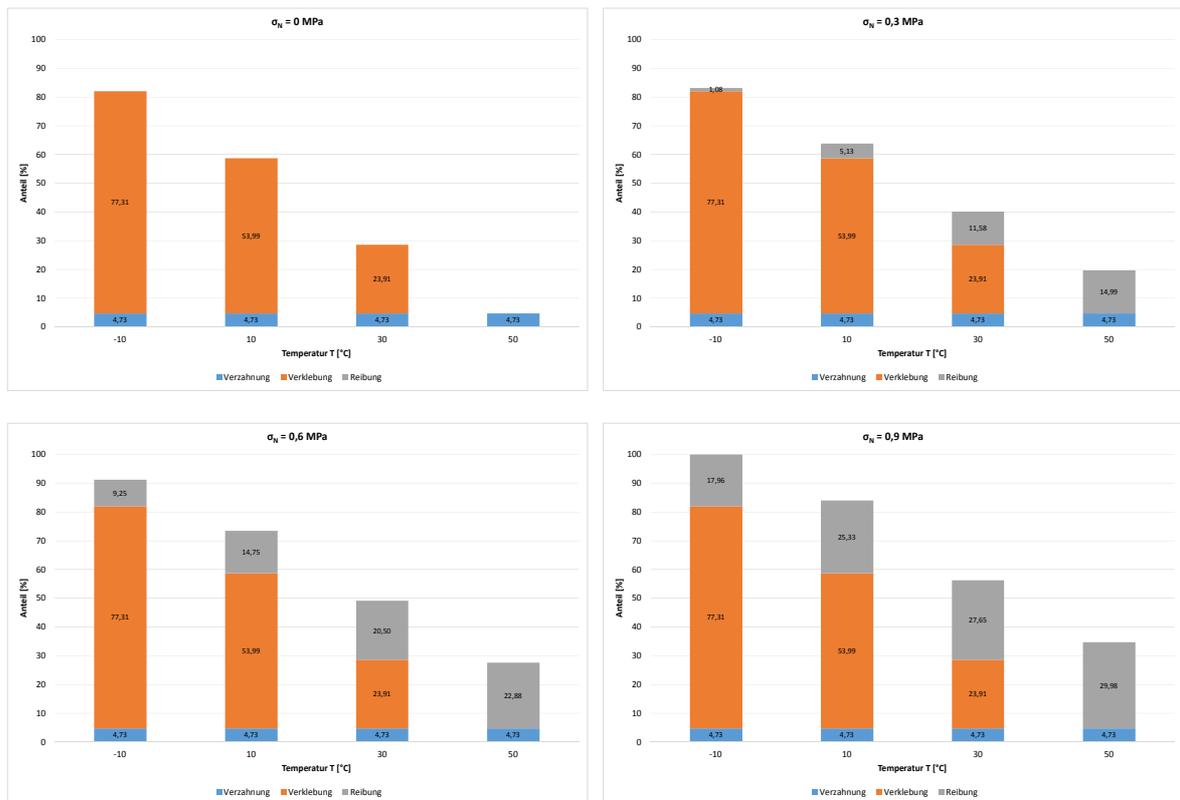


Abbildung 5.45: Anteile von Verklebung (orange), Verzahnung (blau) und Reibung (grau) für Verbundvariante (3) bei den vier Normalspannungen

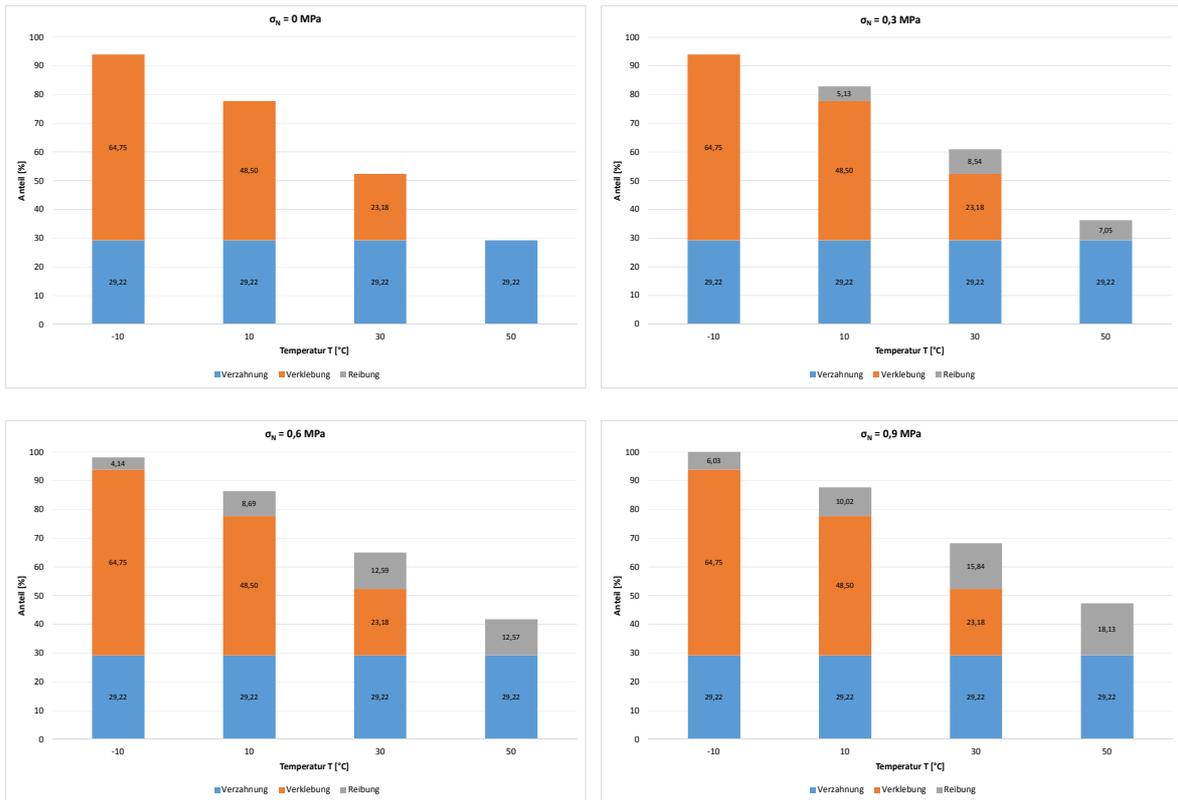


Abbildung 5.46: Anteile von Verklebung (orange), Verzahnung (blau) und Reibung (grau) für Verbundvariante (4) bei den vier Normalspannungen

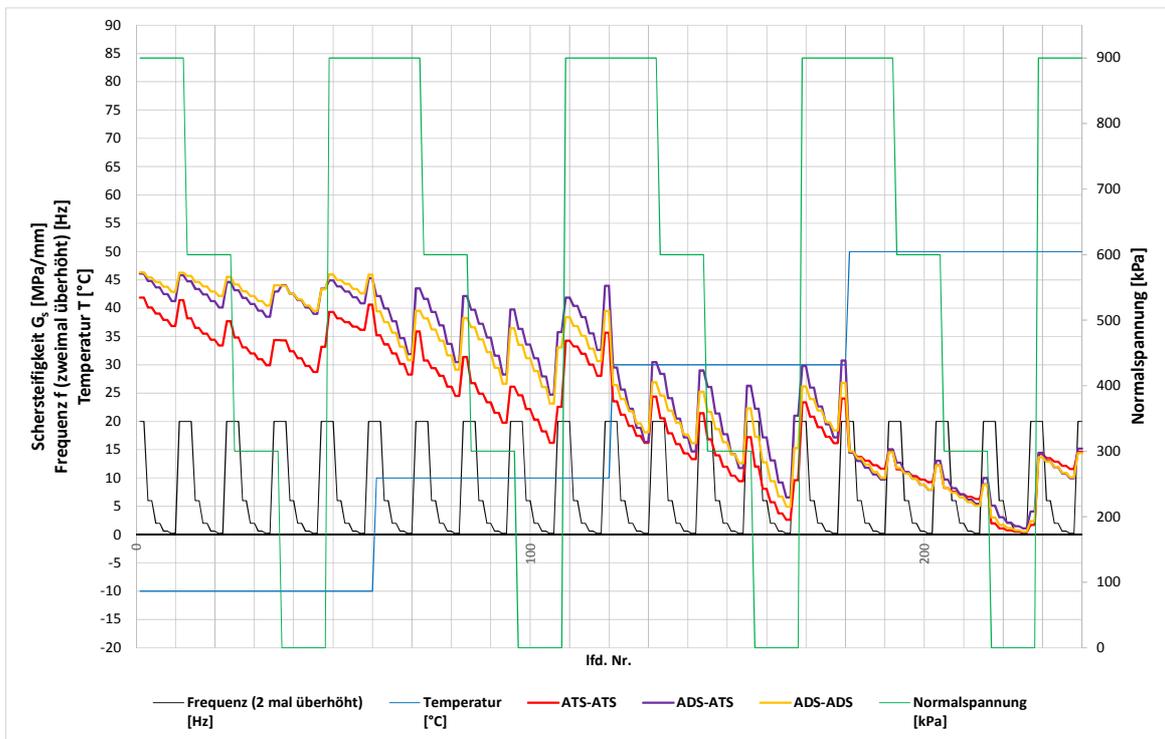


Abbildung 5.47: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (1), (2) und (3) ohne Anwendung von Bitumenemulsion

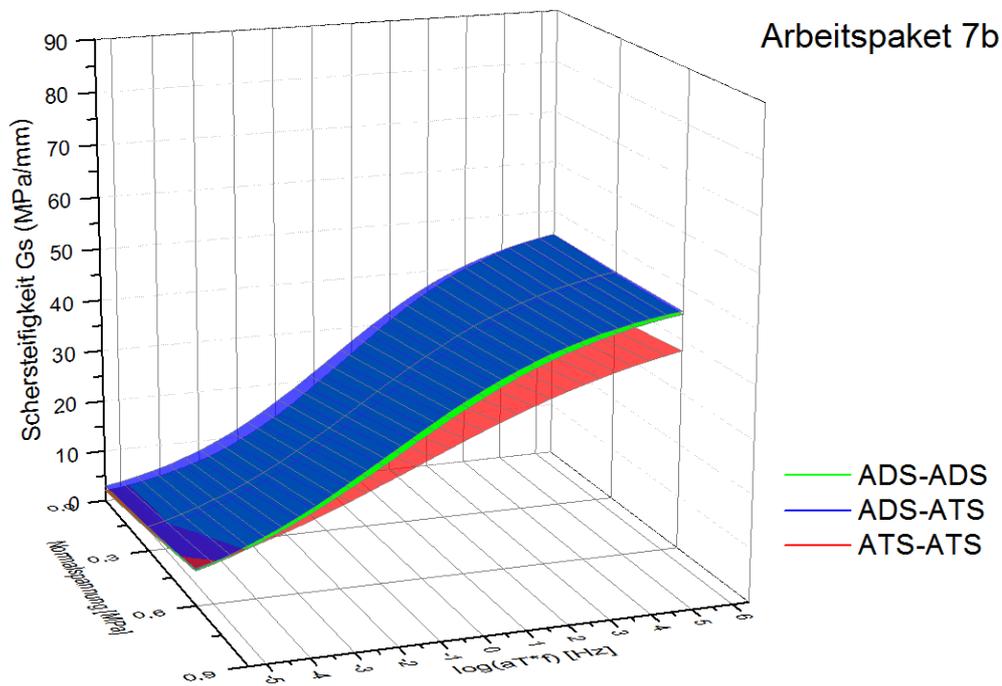


Abbildung 5.48: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (1), (2) und (3) ohne Anwendung von Bitumenemulsion

Die größte Bedeutung für den Schichtenverbund haben das Bindemittel, die Korngrößenverteilung und die Einbautechnologie, wenn keine Bitumenemulsion zwischen den Schichten angewendet wird.

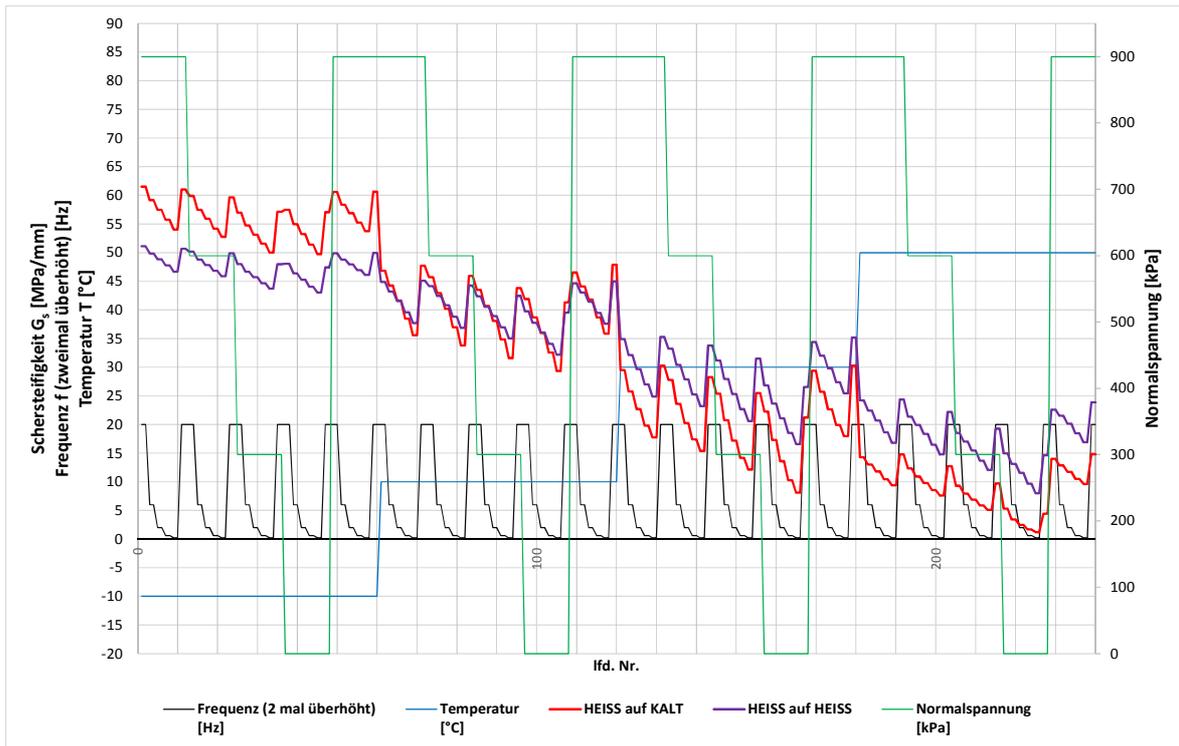


Abbildung 5.49: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (4) und (5) ohne Anwendung von Bitumenemulsion

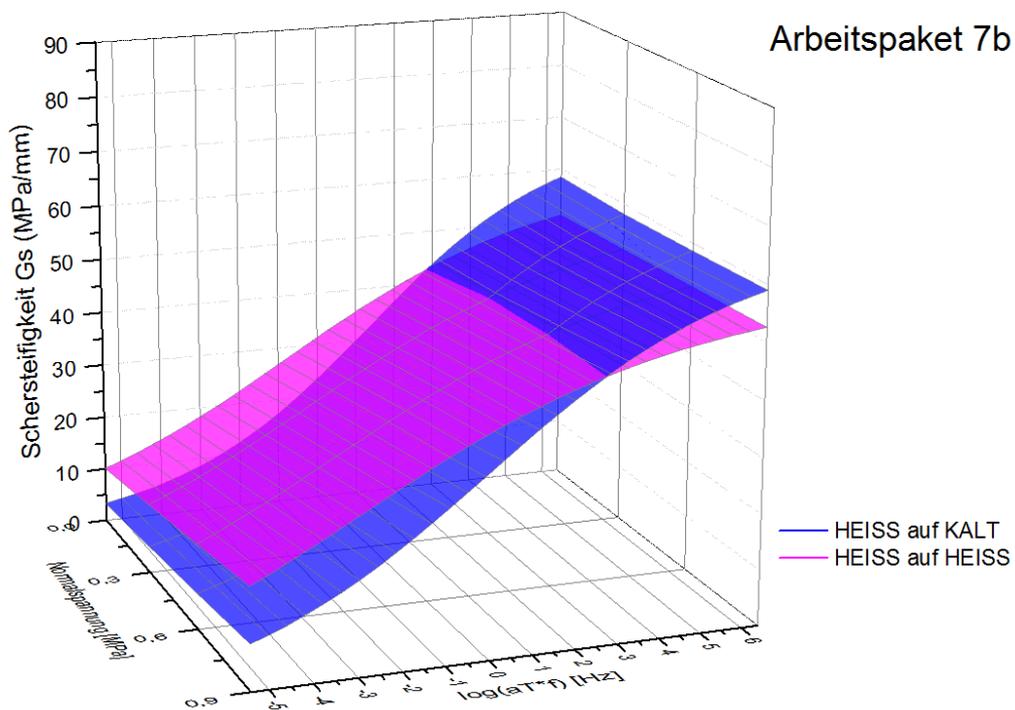


Abbildung 5.50: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei Verbundkombinationen (4) und (5) ohne Anwendung von Bitumenemulsion

5.6 Untersuchung des Einflusses von verschmutzten Oberflächen (Arbeitspaket 8)

In diesem Arbeitspaket soll die Qualität des Schichtenverbundes beim Auftragen von Bitumenemulsionen von zwei verschiedenen Herstellern (zwei unterschiedlichen R-K-Werten) und einem Haftkleber in drei Mengen auf unterschiedlich verschmutzten Oberflächen der unteren Asphaltenschicht untersucht werden. Auf diese Weise sollen Kenntnisse über die Wirksamkeit von verschiedenen Bitumenemulsionsarten und den benötigten Mengen zur Herstellung eines ausreichenden Schichtenverbundes gewonnen werden. In vielen bisherigen Veröffentlichungen wird berichtet, dass die Unterlage sauber sein muss, um eine gute Verklebung der Schichten zu erreichen. In der Praxis wird eine möglichst hohe Sauberkeit der Oberfläche der zu überbauende Schicht angestrebt, jedoch ist in vielen Fällen eine nicht entfernbare Verschmutzung der Oberfläche vorhanden (z.B. durch bindigen Boden), deren Auswirkung auf den Schichtenverbund bisher unbekannt ist. In der Regel wird ein Haftkleber (Bitumenemulsion mit Fluxöl) aufgesprüht, der diese Schmutzschicht durchdringen soll.

Im Projekt erfolgte die Untersuchung der Verbundkombination Asphaltbinderschicht-Asphalttragschicht für unterschiedliche Verschmutzungsgrade. Die Verschmutzung erfolgte unter Verwendung von feinem Schluff. Um die Menge des bindigen Bodens plausibel zu bestimmen, wurde die Angabe von $0,34 \text{ kg/m}^2$ ($28,29 \text{ g/Platte}$) Schmutz nach Mohammad u.a. (2002) überprüft. Dieser Wert erwies sich als sinnvoll und realitätsnah für eine hohe Verschmutzung und wurde aufgerundet auf $0,36 \text{ kg/m}^2$ (30 g/Platte) als höchster Wert in der Untersuchung angesetzt.

Es sind die folgenden Verschmutzungsgrade festgelegt worden:

- sauber 0 g/m^2 bindiger Boden
- mittel verschmutzt 180 g/m^2 Schluff (15 g pro Platte)
- stark verschmutzt 360 g/m^2 Schluff (30 g pro Platte)

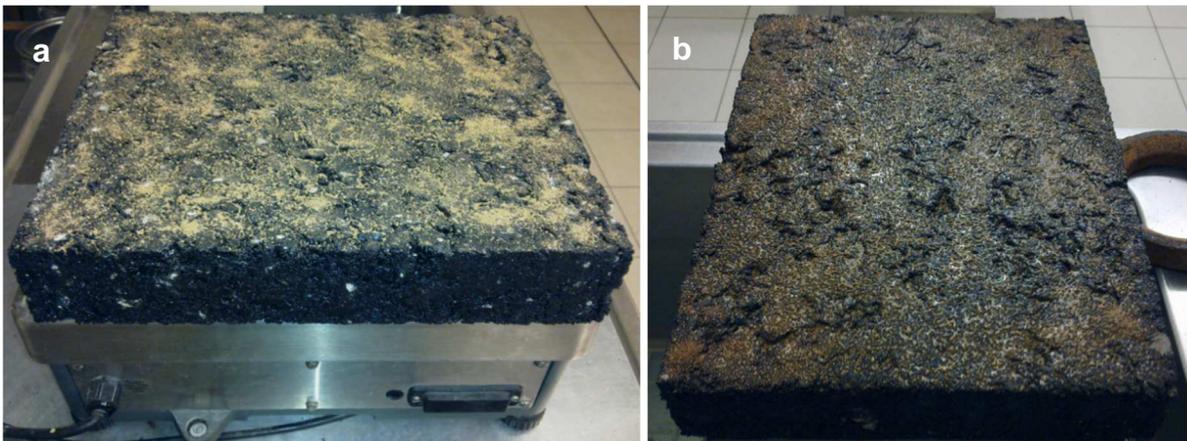
Nach den ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2007) ist für die Belastungsklassen 100 bis 3,2 eine polymermodifizierte Bitumenemulsion C60BP1-S und für die Belastungsklassen 1,8 bis 0,3 eine lösemittelhaltige Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) zu verwenden. Um zu untersuchen, ob Unterschiede im Schichtenverbund bei Verwendung von zwei gleichen polymermodifizierten Bitumenemulsionsarten vorhanden sind, erfolgte, wie bereits beschrieben die Anwendung von Bitumenemulsionen C60BP1-S von zwei unterschiedlichen Herstellern. Der Verbund zwischen den Schichten wurde mit den drei bereits benannten Bitumenemulsionsmengen hergestellt. Die erforderliche Anzahl an geprüften Probekörper war 81.

5.6.1 Saubere (unverschmutzte) Oberfläche

Die zwei Bitumenemulsionen und der Haftkleber wurden in den drei festgelegten Mengen (200, 300, 400 g/m²) auf die kalten gesäuberten Oberflächen von insgesamt 9 Platten aufgetragen. Für jeden der drei Haftvermittler ist eine neue Schaumstoffwalze verwendet worden. Nach der bereits beschriebenen Lagerung erfolgte das Aufbringen auf die 135°C aufgeheizte Asphaltbinderschicht und die Verdichtung mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät. Somit war die Herstellung des Schichtenverbundes bei sauberer Oberfläche abgeschlossen.

5.6.2 Mittelverschmutzte Oberfläche

Um eine mittlere Verschmutzung der Oberfläche der Asphalttragschichtplatte zu erreichen, wurde eine Menge von 15 g je Platte feiner trockener Schluff gleichmäßig (homogen) aufgestreut (Abbildung 5.51). Vor dem Eintragen der Bitumenemulsion bzw. des Haftklebers erfolgte das Aufsprühen des trockenen Schluffs mit Hilfe einer Sprühflasche mit ca. 10 g Wasser. Danach wurde die Bitumenemulsion auf die bereits verschmutzte Oberfläche aufgebracht. Jede beschichtete Platte ist bei Raumtemperatur bis zum vollständigen Brechen der Emulsion und Verdunsten des Wassers mindestens 3 Stunden mit anschließendem Aufbringen und Verdichten der heißen 50 mm dicken Asphaltbinderschicht gelagert worden.



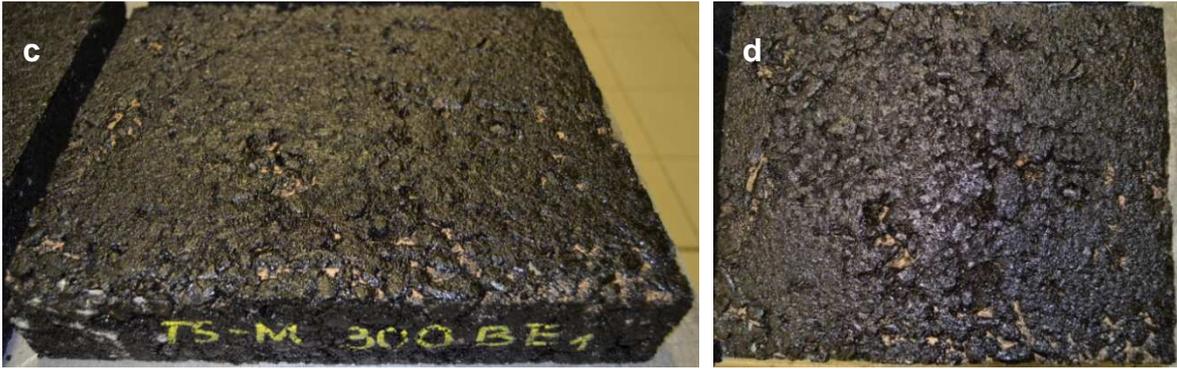
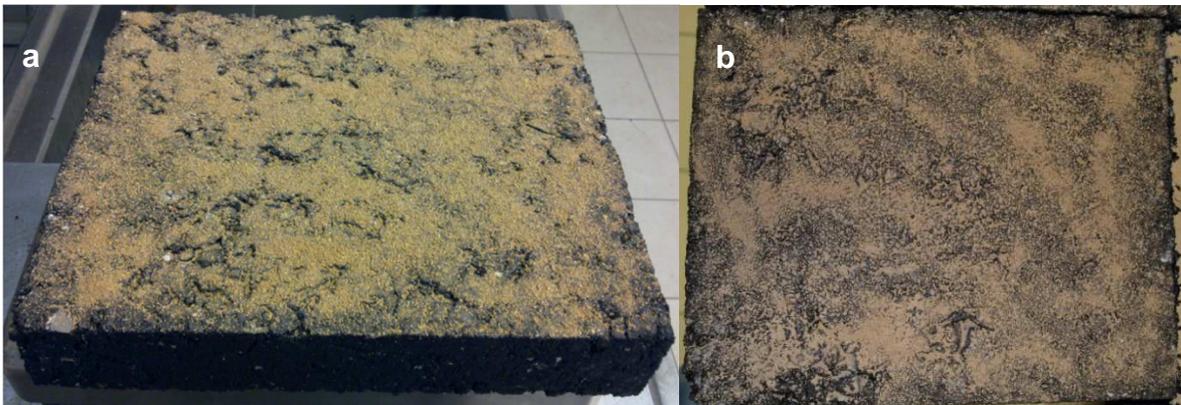


Abbildung 5.51: Beispiel einer mittel verschmutzten Oberfläche. a – 15 g/Platte aufgestreuter Schluff, b – mit 10 g Wasser angefeuchtete Oberfläche, c und d – mittelverschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (300 g/m²)

5.6.3 Stark verschmutzte Oberfläche

Zum Schaffen einer stark verschmutzten Oberfläche, wurde eine Menge von 30 g je Platte feiner trockener Schluff homogen aufgestreut (Abbildung 5.52). Die darauf folgende Vorgehensweise ist dieselbe wie im Punkt 2 beschrieben.



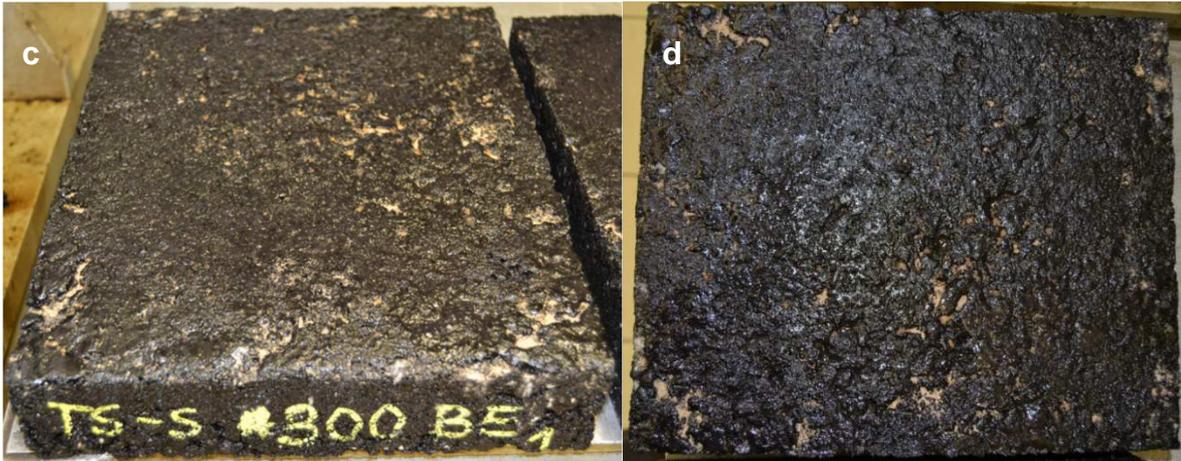


Abbildung 5.52: Beispiel einer stark verschmutzten Oberfläche. a – 15 g/Platte aufgestreuter Schluff, b – mit 10 g Wasser angefeuchtete Oberfläche, c und d – mittelverschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (300 g/m²)

Wie aus Abbildung 5.53a ersichtlich ist, wurde die Verschmutzung in den Hohlräumen der Oberfläche mit der Bitumenemulsionsmenge (200 g/m²) nicht bedeckt. Bei Anwendung von 300 g/m² ist ein deutlich größerer Prozentanteil der Hohlräume an der Oberfläche mit Bitumenemulsion gefüllt worden (Abbildung 5.53b). Bei 400 g/m² wurde der Schmutz nahezu vollständig von der Bitumenemulsion bedeckt (Abbildung 5.53c). Das selbe Bild ergab sich beim Auftragen des Haftklebers. Aus diesem Grund wurde ein deutlich schlechterer Schichtenverbund bei der Verwendung von 200 g/m² Bitumenemulsionsmenge als bei 300 g/m² und 400 g/m² erwartet, da in den verschmutzten Hohlräumen keine Verklebung zwischen dem Bindemittelfilm der heißen oberen Asphaltbinderschicht und des Haftvermittlers stattfinden konnte.

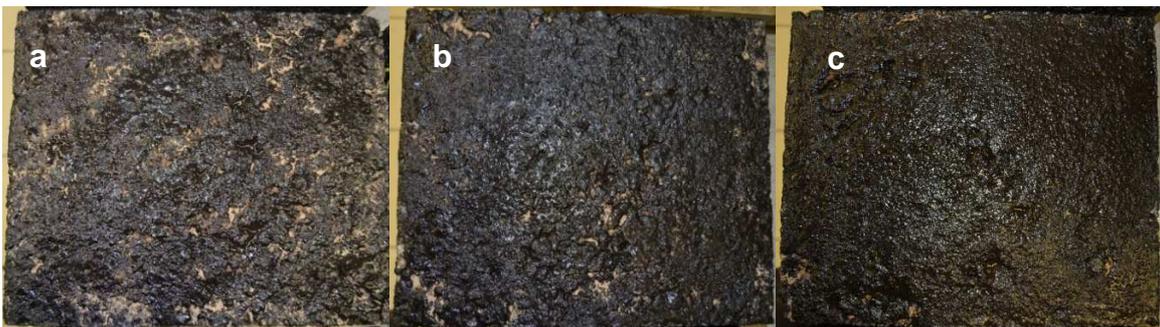


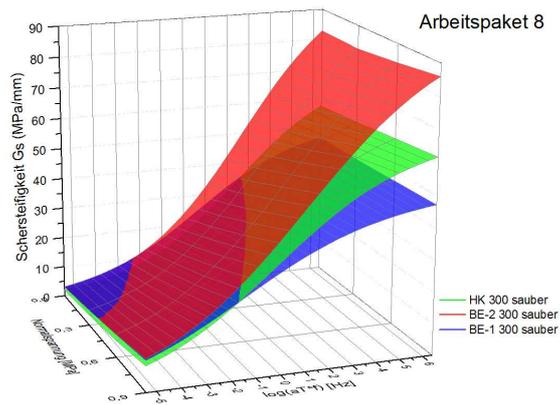
Abbildung 5.53: Stark verschmutzte Oberfläche mit aufgetragener Bitumenemulsion (a - 200 g/m², b - 300 g/m², c - 400 g/m²)

5.6.4 Ergebnisse

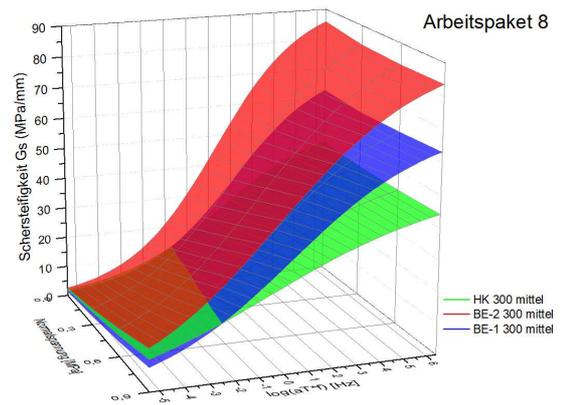
Aus den berechneten Flächenfunktionen ist ersichtlich, dass bei unterschiedlicher Verschmutzung der Oberfläche, auf welche die Bitumenemulsion aufgetragen werden muss, die Bitumenemulsionsmenge eine wesentliche Rolle für die Qualität des Schichtenverbundes spielt. Bei 200 g/m^2 wird bei sauberer Oberfläche ein schwächerer Schichtenverbund im Vergleich zu der mittel und stark verschmutzten Oberfläche hergestellt. Überall ermöglicht hier die Bitumenemulsion C60BP1-S von dem ersten Hersteller den besten Schichtenverbund. Der Verbund mit dem Haftkleber C40BF1-S liegt im unteren und mittleren Bereich der Schersteifigkeiten. Alle Flächenfunktionen sind im Anhang enthalten.

Bei Anwendung von 300 g/m^2 Bitumenemulsion C60BP1-S von dem zweiten Hersteller wird bei allen Temperaturen, Normalspannungen und Frequenzen der stärkste Schichtenverbund bei sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche hergestellt (Abbildung 5.54 a und b). Die Schersteifigkeiten mit dieser Bitumenemulsion liegen in demselben Bereich. Bei stark verschmutzten Oberflächen sinken die Werte der Schersteifigkeiten dramatisch ab. Die höchsten Werte liegen um die 40 MPa/mm und ordnen sich im Bereich der Schersteifigkeiten, die mit dem Haftkleber erreicht werden. Die besten Ergebnisse bei 300 g/m^2 und stark verschmutzter Oberfläche zeigt die Bitumenemulsion von dem ersten Hersteller (Abbildung 5.54c). Bei Verwendung der größten untersuchten Bitumenemulsionsmenge von 400 g/m^2 wird anhand der Schersteifigkeitswerte deutlich, dass der Verbund geschwächt wird (Abbildung 5.55). Ein interessanter Befund hier ist, dass bei dieser Menge der beste Schichtenverbund mit dem Haftkleber bei starker Verschmutzung erreicht werden kann. Dies kann dadurch erklärt werden, dass durch die Vermischung des Schluffs mit dem Haftkleber eine Art Mörtel entsteht, der nahezu im gesamten Bereich eine bessere Steifigkeit ermöglicht. Nur bei der höchsten Temperatur ist die Steifigkeit mit dem Haftkleber schlechter als mit der Bitumenemulsion C60BP1-S. Im Fall einer stark verschmutzten Oberfläche kann die Anwendung der größten Menge vom Haftkleber C40BF1-S oder der kleinsten Menge Bitumenemulsion C60BP1-S als günstig angesehen werden. Bei sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche zeigen die Bitumenemulsionen von dem ersten und dem zweiten Hersteller bei 400 g/m^2 bessere Ergebnisse als bei der Anwendung von Haftkleber.

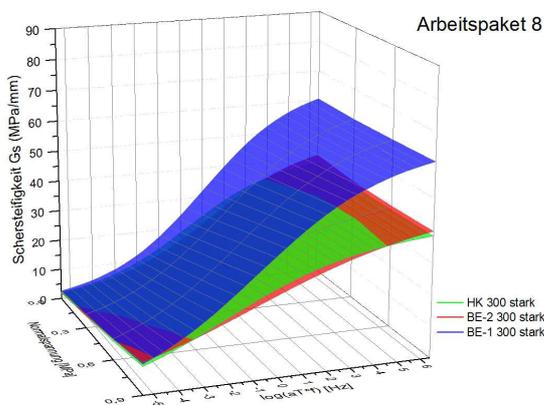
Generell kann festgestellt werden, dass die Bitumenemulsion C60BP1-S zur Herstellung eines besseren Schichtenverbundes bei allen Verschmutzungsgraden und Auftragungsmengen geeignet ist, mit Ausnahme von 400 g/m^2 C40BF1-S, mit der bei starker Verschmutzung die besten Schersteifigkeiten ermittelt wurden. Der Bereich zwischen sauberer und mittlerer Verschmutzung zeigt sich als unkritisch für die Herstellung eines guten Schichtenverbundes. Dabei ist die 300 g/m^2 Bitumenemulsionsmenge definitiv die optimale und kann empfohlen werden (Abbildung 5.56).



a



b



c

Abbildung 5.54: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei sauberer (a), mittelverschmutzter (b) und stark verschmutzter Oberfläche (c) mit 300 g/m^2 Bitumenemulsionsmenge

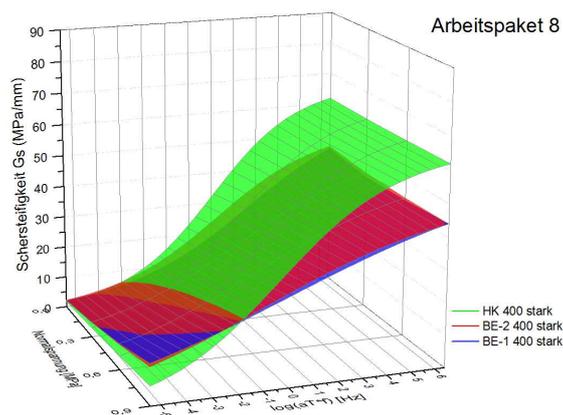


Abbildung 5.55: Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten bei stark verschmutzter Oberfläche und 400 g/m^2 Bitumenemulsionsmenge

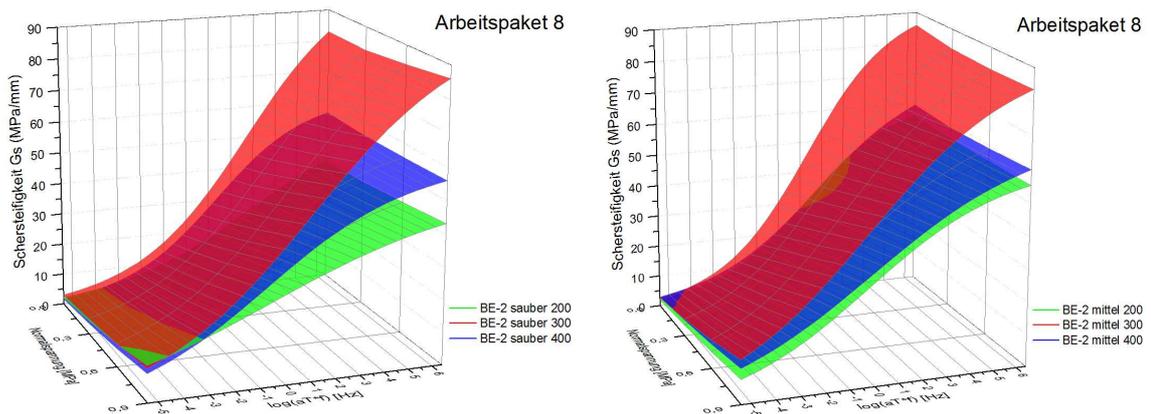


Abbildung 5.56: Vergleich der Flächenfunktionen der berechneten Schersteifigkeiten zwischen den drei Bitumenemulsionsmengen bei sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche

Eine Erhöhung der Bitumenemulsionsmenge führt nicht zu einem besseren Schichtenverbund. Stark verschmutzte Oberflächen haben, wie erwartet, eine negative Auswirkung auf die Qualität des Schichtenverbundes. Die Schlussfolgerungen werden auch durch die experimentell bestimmten Schersteifigkeitsverläufe bestätigt (Abbildung 5.57, Abbildung 5.58 und Anhang 8).

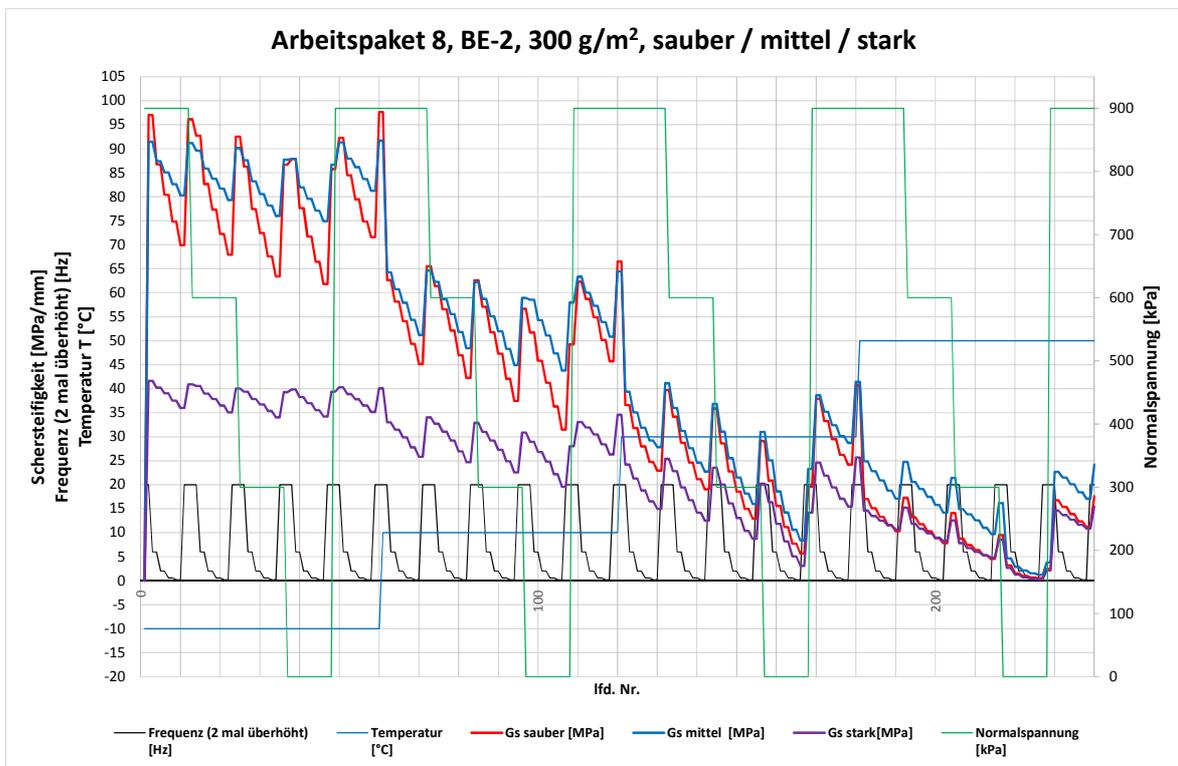


Abbildung 5.57: Vergleich der experimentell ermittelten Schersteifigkeiten bei sauberer, mittel und stark verschmutzter Oberfläche und 300 g/m² Bitumenemulsionsmenge

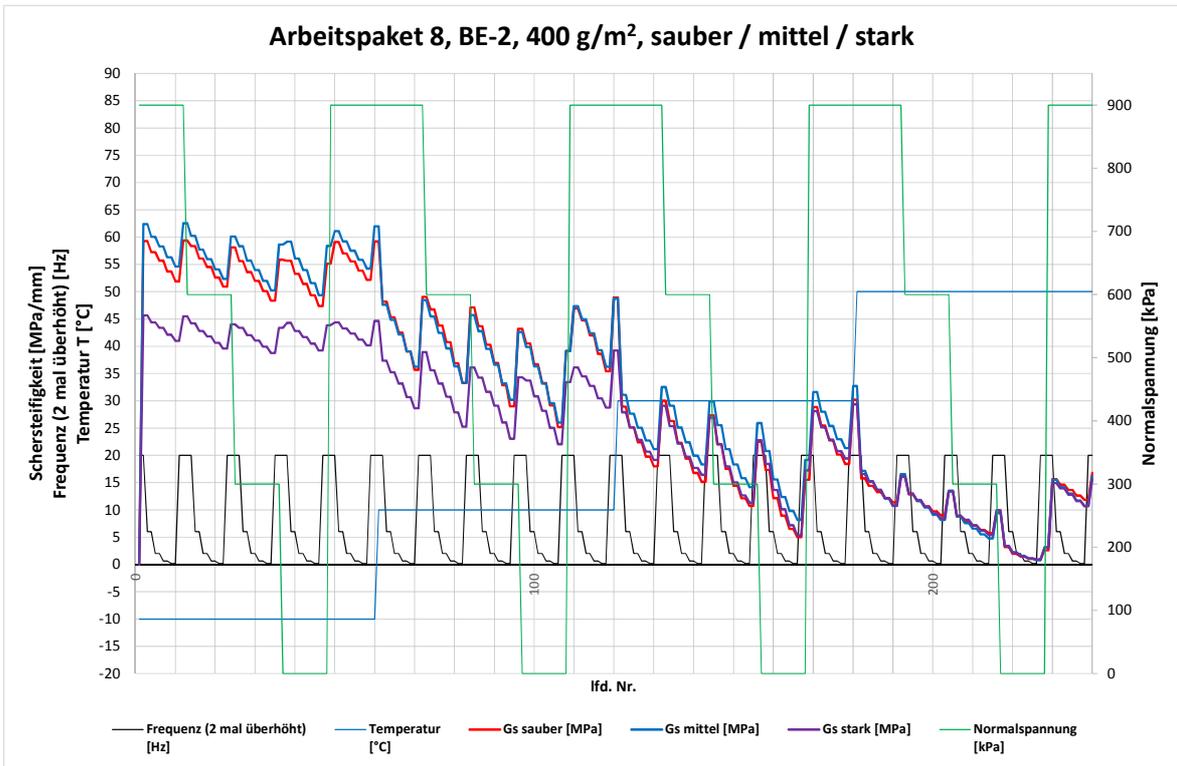


Abbildung 5.58: Vergleich der experimentell ermittelten Schersteifigkeiten bei sauberer, mittel und stark verschmutzter Oberfläche und 400 g/m² Bitumenemulsionsmenge

5.7 Berechnungen zur Auswirkung der untersuchten Einflussgrößen auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen (Arbeitspaket 9)

Mit Hilfe des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen nach den RDO Asphalt (2009) sollen die Auswirkungen der Verbundwirkung unter Verwendung der in den Arbeitspaketen 3 bis 8 ermittelten Versuchsergebnisse auf das Ermüdungsverhalten und das Risiko der Spurrinnenbildung der gesamten Asphaltbefestigung untersucht werden. Anhand der Ergebnisse der Berechnungen sollen Rückschlüsse auf die erforderliche Qualität des Verbundes und die bei der Auswahl der Bitumenemulsion optimalen Bitumenemulsionsarten und –mengen gezogen werden.

Die Ermüdungsfunktionen, die in Braunschweig für die Kombination Binderschicht-Tragschicht aufgestellt wurden, sind in Abbildung 5.60 bis Abbildung 5.62 dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass es bei der höchsten Temperatur von 30 °C ohne Normalspannung möglich war, die Ermüdungsfunktionen zu erstellen. Die Normalspannung von 0,25 MPa erwies sich als kritisch und bei 0,50 MPa war die Durchführung der Ermüdungsversuche unmöglich. Nach Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde auf diese Ermüdungsversuche bei einer Temperatur von 30°C und einer Normalspannung von 0,50 MPa verzichtet. Gleichung 27 zeigt die Exponentialfunktion.

$$G_s = a_0 + a_1 \cdot e^{\frac{x-a_2}{a_3}} \quad \text{Gleichung 27}$$

mit:

- a_0 Asymptotischer Grenzwert der verbleibenden Schersteifigkeit infolge Verzahnung und Reibung [MPa/mm]
- a_1 Skalierungsfaktor
- a_2 Verschiebungsfaktor
- a_3 Steigungsfaktor
- x Lastwechselzahl

Die Ermittelten Masterfunktionen können Abbildung 5.59 entnommen werden.

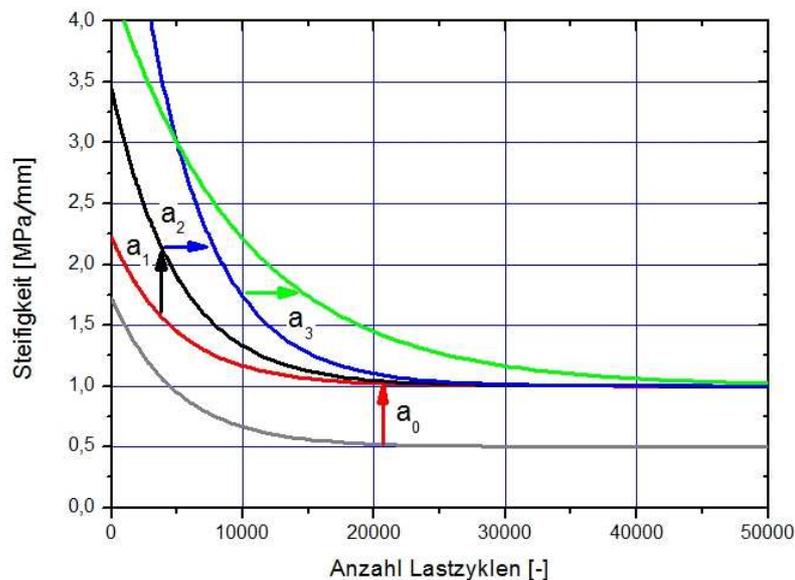


Abbildung 5.59: Ermüdungsfunktionen für den Schichtenverbund

Aus den Ermüdungsfunktionen kann abgeleitet werden, dass das viskose Bitumen bei fehlender Normalspannung schneller als das steife Bitumen ermüdet. Wenn eine Normalspannung vorhanden ist, werden die Schichten zusammengedrückt und der Verbund ermüdet bei höheren Temperaturen langsamer.

Bei fehlender Normalspannung ist der Schichtenverbund bei 10°C und 20°C nach ca. 15000 Lastwechsel vollständig ermüdet, während bei 30°C lediglich 5600 Lastwechsel ertragen werden können. Dies deutet darauf hin, dass die Temperatur in diesem Fall eine wichtige Rolle spielt. Der Mittelwert der infolge der Verzahnung verbleibenden Schersteifigkeit des ermüdeten Schichtenverbunds beträgt nach 500.000 Lastwechsel 4,0 MPa/mm.

Die Erhöhung der Normalspannung bewirkt eine generelle Erhöhung der Grenzwerte der Schersteifigkeit über die gesamte Nutzungsdauer der Straßenbefestigung und eine größere Lastwechselzahl bis zur vollständigen Ermüdung. Bei einer Normalspannung von 0,25 MPa und einer Temperatur von 10°C ermüdet der Schichtenverbund vollständig bei etwa 500.000 Lastwechseln. Je höher die Temperatur wird, umso schneller findet die vollständige Ermüdung statt. Bei 20°C und 30°C ist die Anzahl an der ertragbaren Lastwechsel ca. 120.000. Der Mittelwert der Schersteifigkeit des ermüdeten Schichtenverbunds nach 500.000 Lastwechsel beträgt 14,7 MPa/mm für alle drei untersuchten Temperaturen. Bei einer Normalspannung von 0,25 MPa ist der Schichtenverbund bei einer Lastwechselzahl von 110.000 ermüdet und bei 30°C wird eine größere Anzahl an ertragbaren Lastwechseln von ca. 180.000 berechnet. Der Mittelwert der Schersteifigkeit des ermüdeten Schichtenverbunds liegt hier bei 14,7 MPa/mm.

Die höhere Normalspannung bewirkt eine Erhöhung der verbleibenden Schersteifigkeit. Die Werte bei 10°C und 20°C und 0,50 MPa Normalspannung unterscheiden sich leicht voneinander und liegen entsprechend bei 28,1 MPa/mm und 22,8 MPa/mm. Der Mittelwert der Schersteifigkeit des ermüdeten Schichtenverbunds beträgt 25,45 MPa/mm.

Während bei fehlender Normalspannung nur die Verzahnung in der Schichtengrenzfläche wirkt, aktiviert sich die Reibung beim Einleiten einer Normalspannung (Johannsen, 2012). Die Normalspannung beeinflusst also das Niveau der Schersteifigkeiten, was eindeutig an der Reihung zu erkennen ist. Die Funktionen nähern sich scheinbar einem Wert für jede Normalspannung. Je größer die Normalspannung ist, umso höher sind die Grenzwerte der Schersteifigkeit bei vollständiger Ermüdung des Schichtenverbunds.

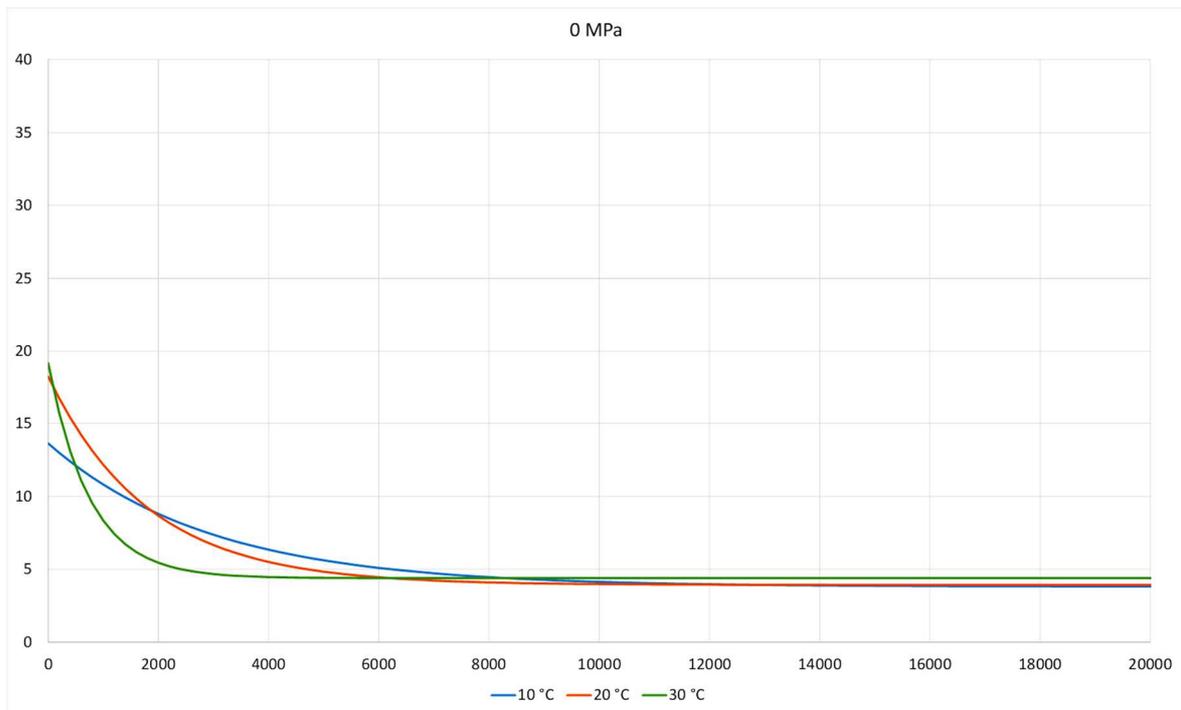


Abbildung 5.60: Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C, 20°C und 30°C bei fehlender Normalspannung

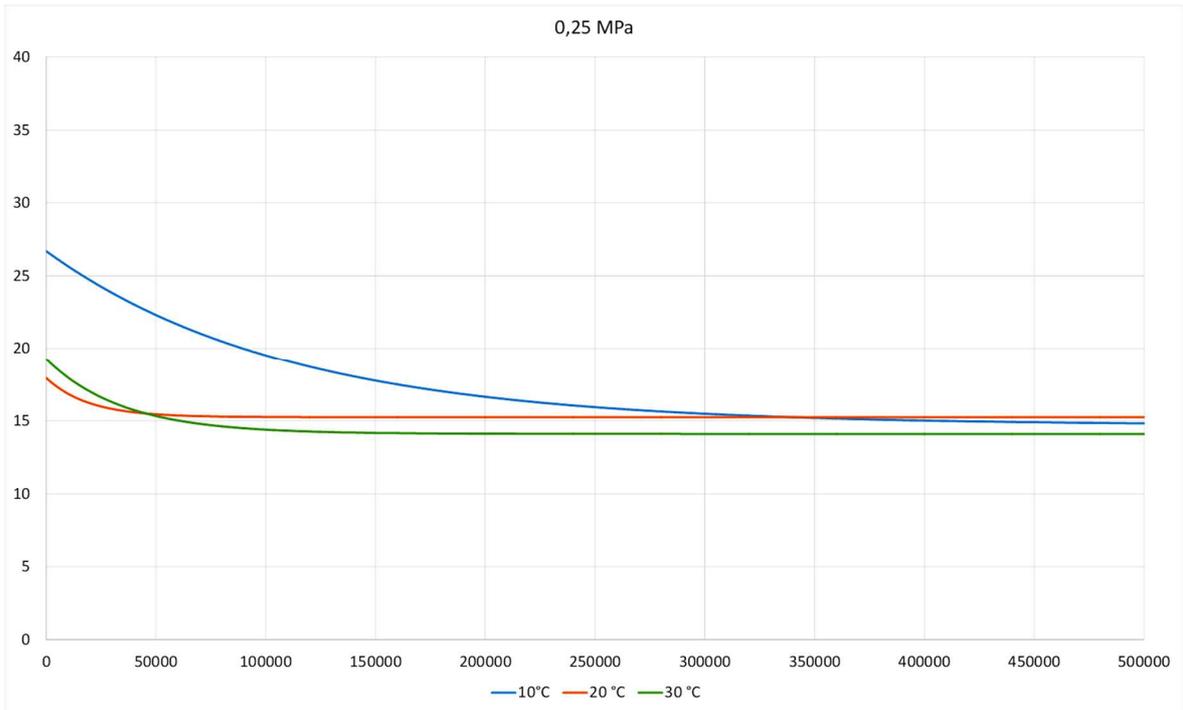


Abbildung 5.61: Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C, 20°C und 30°C bei einer Normalspannung von 0,25 MPa

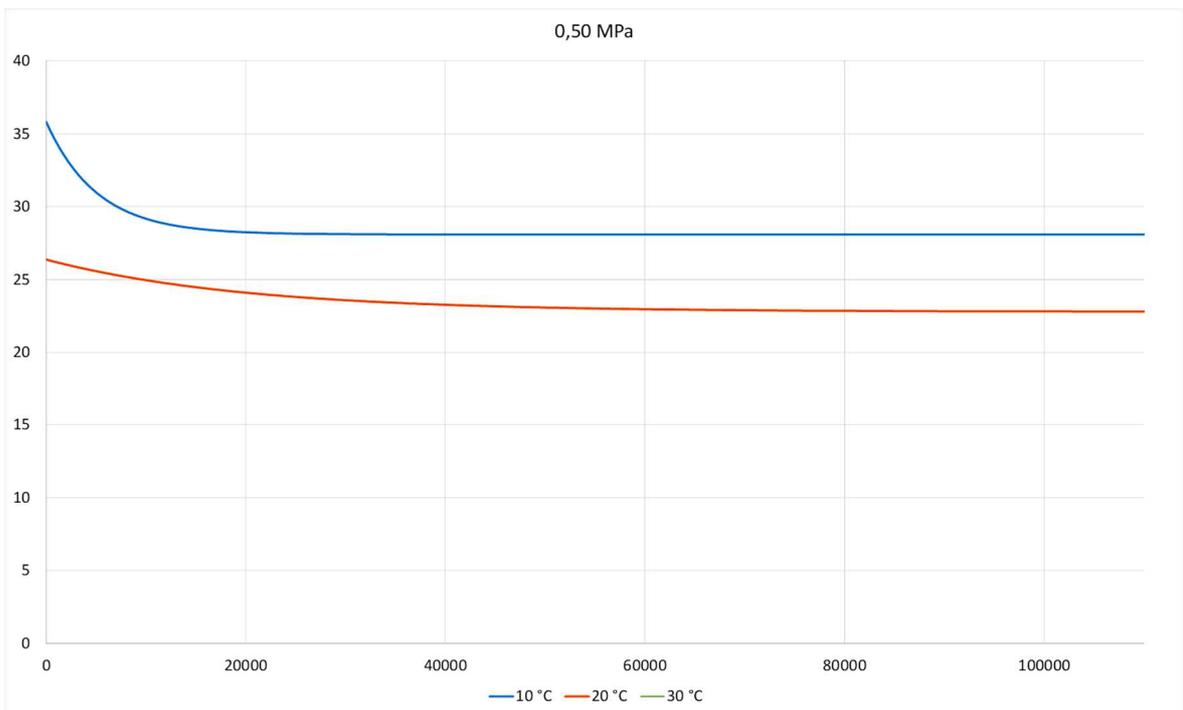


Abbildung 5.62: Ermüdungsfunktionen des Schichtenverbundes für die Temperaturen 10°C und 20°C bei einer Normalspannung von 0,50 MPa

Anhand der berechneten Daten wird vermutet, dass durch die Annäherung aller Ermüdungsfunktionen bei allen Temperaturen auf demselben Wertebereich, die Funktionen bei vollständig ermüdetem Schichtenverbund temperaturunabhängig sind.

Unter der Voraussetzung, dass die Ermüdung normalspannungsabhängig ist, wurde anhand der drei Grenzwerte (bei drei Temperaturen) der Schersteifigkeiten bei den verschiedenen Normalspannungen eine lineare Abhängigkeit festgestellt (Abbildung 5.63), mit welcher der Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit und Normalspannung beschrieben wurde. Mit dieser so bestimmten Funktion wurde mit SAFEM die Nutzungsdauer von Befestigungen mit vollständig ermüdetem Schichtenverbund berechnet.

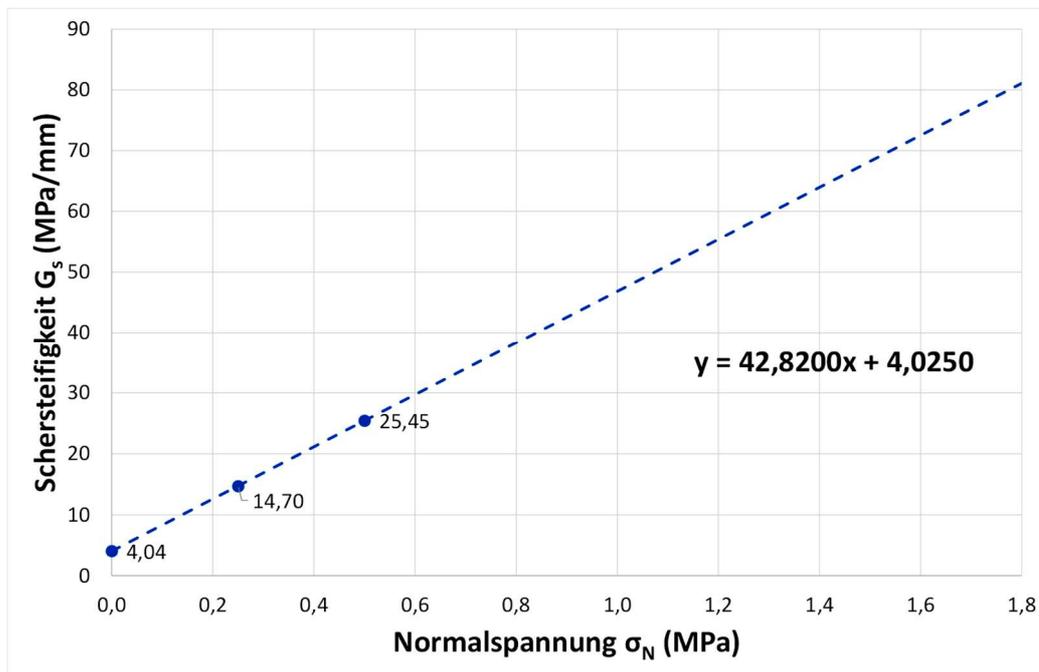


Abbildung 5.63: Zusammenhang zwischen verbleibender Schersteifigkeit bei vollständig ermüdetem Schichtenverbund und Normalspannung

Für die Berechnung der Verbundwirkung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung zur Bestimmung der Auswirkung des Schichtenverbundes auf die Straßenbefestigung wurden zunächst die schlechtesten und die besten Funktionen zur Beschreibung des Schichtenverbundes für die Kombinationen Deckschicht-Binderschicht und Binderschicht-Tragschicht aus allen Versuchen ausgesucht. Mit den so ausgewählten vier Varianten wurden die Berechnungen mit dem Finite-Elemente-Programm SAFEM zur Bestimmung der Grenzwerte für den schlechtesten Fall (Bad Case) und für den besten Fall (Good Case) durchgeführt.

Der Ermüdungsstatus des Schichtenverbundes wurde mit SAFEM nach der Methodik der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09) für zwei Belastungsklassen

nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) berechnet.

In Abbildung 5.65 und Abbildung 5.66 ist der Ermüdungsstatus für Oberbauten der Belastungsklassen Bk100 und Bk32 nach den RStO 12 für die Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (Zeile 1) unter Annahme der verschiedenen Schichtenverbundvarianten während des Nutzungszeitraumes dargestellt (Abbildung 5.64). Bei der Belastungsklasse Bk100 wurde mit B-Zahlen bis zu 80 Millionen und bei Bk32 mit B bis zu 3,2 Millionen gerechnet.

Zur Einordnung der auf der Grundlage der Messung bestimmten Funktionen für den Schichtenverbund wurde zunächst der Verlauf des Ermüdungsstatus für den vollständigen und für den vollständig fehlenden Verbund (theoretische Annahme, in den Versuchen nicht festgestellt!) wird durch die oberste und die unterste grüne und rote Linie dargestellt (Abbildung 5.65 und Abbildung 5.66). Als praktisch realisierbar bestmöglichen Schichtenverbund wurde die aus den Versuchen bestimmte Funktion für den „Good Case“ zwischen Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht als auch zwischen Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht angesetzt (lila Linie). Mit der orangen Linie ist der Verlauf des Ermüdungsstatus bei Annahme aus den Versuchen bestimmten schlechtesten Verbundes („Bad Case“) gezeigt.

Der mit der blauen Linie dargestellte Verlauf des Ermüdungsstatus „Mixed Case“ wurde unter Annahme der Funktionen für den „Good Case“ für den Schichtenverbund zwischen Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht und dem "Bad Case“ für den Schichtenverbund zwischen Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht berechnet.

Mit der schwarzen Linie wird hier der Verlauf des Ermüdungsstatus bei Annahme der aus den Versuchen ermittelten Funktion für den Schichtenverbund bei vollständiger Ermüdung und normaler Beschaffenheit (Rauheit) der Oberflächen an der Schichtengrenzfläche dargestellt. Da keine Transferfunktion zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen dem im Labor durchgeführten Ermüdungsversuch und der Realität zur Verfügung stand, wurde hier die Funktion zur Beschreibung des Verbundes ab vollständiger Ermüdung über die gesamte Nutzungsdauer als wirksam angenommen.

Die nachfolgenden Berechnungen wurden für die in Abbildung 5.64 dargestellten Befestigungen durchgeführt. Für den Asphalt wurden die Steifigkeits-Temperaturfunktionen angesetzt. Für die Verkehrsbelastung wurde die Häufigkeitsverteilung Fernverkehr gemäß RDO Asphalt angesetzt. Diese wurde so festgelegt, dass sich eine bemessungsrelevante Beanspruchung von $B = 80$ Mio. (BK100) bzw. $B = 32$ Mio. (Bk32) ergab.

Zeile	Belastungsklasse	Bk100				Bk32			
	B [Mio.]	> 32				> 10 - 32			
	Dicke des frostsich. Oberbaus ¹⁾	55	65	75	85	55	65	75	85
1	Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht								
	Asphaltdecke	12				12			
	Asphalttragschicht	22				18			
	Frostschutzschicht	Σ34				Σ30			
	Dicke der Frostschutzschicht	-	31 ²⁾	41	51	25 ³⁾	35	45	55

Abbildung 5.64: Straßenbefestigungsaufbau für die Belastungsklassen Bk100 und Bk32 nach RStO 12

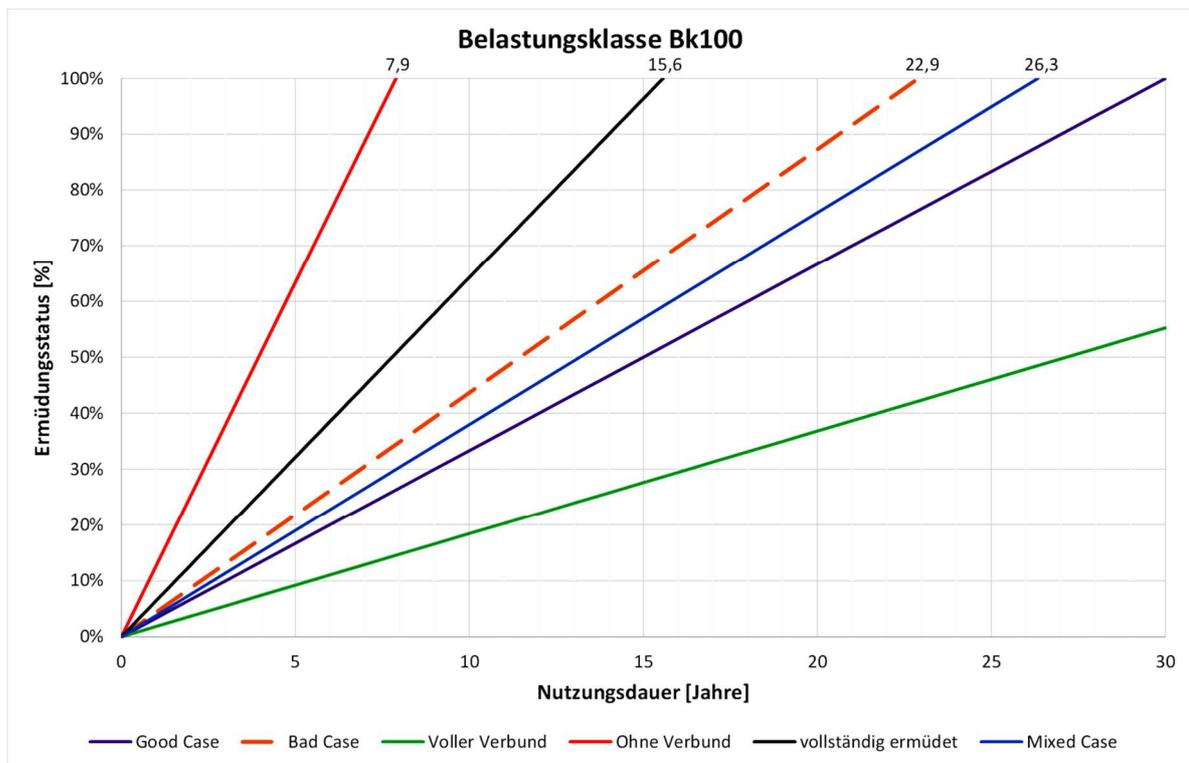


Abbildung 5.65: Verlauf des Ermüdungsstatus bei unterschiedlichen Schichtenverbundfunktionen über die gesamte Nutzungsdauer bei Bk100

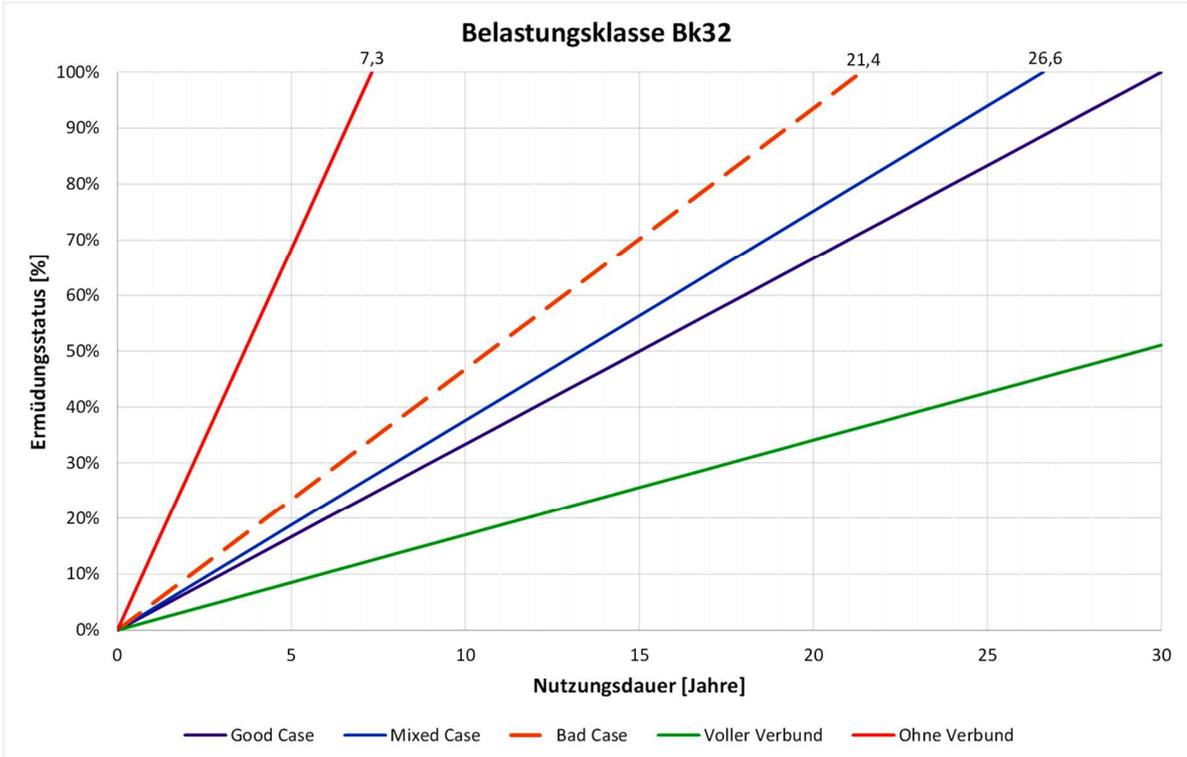


Abbildung 5.66: Verlauf des Ermüdungsstatus bei unterschiedlichen Schichtenverbundfunktionen über die gesamte Nutzungsdauer bei Bk32

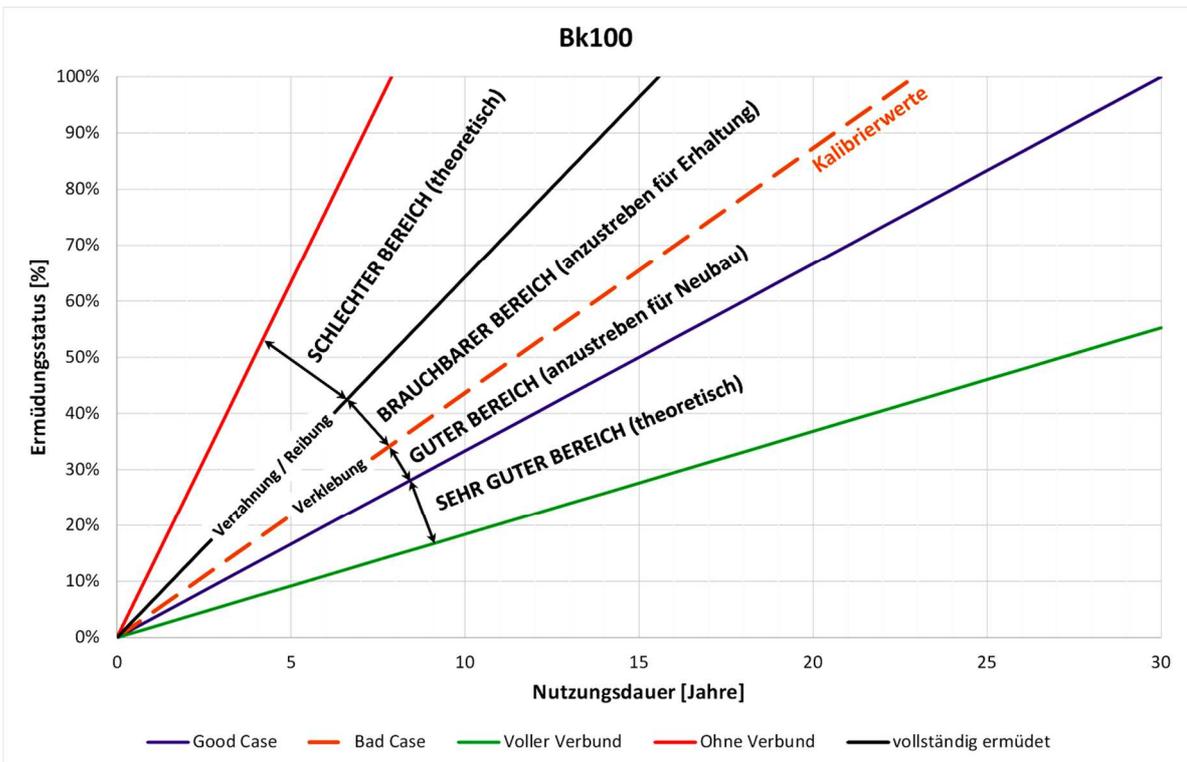


Abbildung 5.67: Qualitätsbereiche des Schichtenverbundes für Neubau und Erhaltung (Bk100)

Aus den Ergebnissen der Versuche und den Berechnungen mit den verschiedenen Varianten der Funktionen für den Schichtenverbund können zusammenfassend die folgenden Überlegung abgeleitet werden:

1. Abbildung 5.67 zeigt eine Einteilung in verschiedenen Wirksamkeitsbereiche der in den Versuchen ermittelten Funktionen für den Schichtenverbund bezogen auf die berechnete Nutzungsdauer in Abhängigkeit von den Ursachen (Verzahnung, Reibung, Verklebung). Es sollte prinzipiell der gute Bereich angestrebt werden. Auch wenn der sehr gute Bereich mit den derzeit angewandten Bitumenemulsionen nicht erreicht werden kann, sollte das Erreichen dieser zukünftigen Forschungsarbeiten vornehalten sein.
2. Es wird angenommen, dass die Funktion für den „Bad Case“ in der Regel mindestens erreicht wird und vorausgesetzt werden kann, wenn eine Verklebung der Schichten z.B. am Bohrkern augenscheinlich zwischen den Schichten vorhanden ist und mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien der ZTV Asphalt Schichtenverbund als ausreichend nachgewiesen wurde. Mit dieser Funktion kann ohne zusätzliche Durchführung eines zyklischen Versuches zu Bestimmung der Schersteifigkeit gerechnet werden. Weiterhin könnte diese Funktion für zukünftige Kalibrierrechnungen bei Weiterentwicklungen von RDO Asphalt und RSO Asphalt angesetzt werden.
3. Wird jedoch am Bohrkern augenscheinlich kein Schichtenverbund festgestellt, oder mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien nach ZTV Asphalt ermittelt, dass kein ausreichender Schichtenverbund vorhanden ist, dann sollte mit der Funktion der Schersteifigkeit des vollständig ermüdeten Schichtenverbundes gerechnet werden.

Ein zyklischer Versuch zur Bestimmung der Funktion für die Schersteifigkeit nach der im vorliegenden Bericht vorgestellten Methode (wird derzeit im Entwurf für eine TP zur Ermittlung und Bewertung der Schersteifigkeit mit zyklischer Belastung umgesetzt) kann dann sinnvoll sein bzw. durchgeführt werden, wenn eine realistische Funktion für den Schichtenverbund gesucht wird, welche besser als für den „Bad Case“ zu erwarten ist.

Die Bewertung des plastischen Verformungsverhaltens von Asphaltstraßenbefestigungen im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus gemäß den RDO Asphalt (2009) geschieht durch eine Abschätzung der Spurrinnengefährdung anhand der deviatorischen Vergleichsspannung, die in der Lastachse ab der Oberfläche bis zu der Grenze zwischen Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht berechnet wird. Als Maß der Spurrinnengefährdung wird das Maximum dieser Vergleichsspannung für die höchste Lastklasse bei der höchsten, zu erwartenden Oberflächentemperatur zugrunde gelegt.

Die Deviatorspannungen wurden für die nachfolgenden Betrachtungen mit dem Finite-Elemente-Programm SAFEM für die Temperaturklassen 32,5°C, 37,5°C, 42,5°C und 47,5°C in der Lastachse (für 10 t Achslast) für den Fall ohne Schichtenverbund (theoretischer Fall), den schlechten (Bad Case) und vollständigen Schichtenverbund (theoretischer Fall) an der Ober- und Unterseite der Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht ermittelt. Sie wurden als die Differenz zwischen der Spannung in vertikaler Richtung (Z) und dem Mittelwert aus den Spannungen in den drei Richtungen (X, Y, Z) berechnet. Für die Abschätzung der Spurrinnengefährdung wurde die Asphalttragschicht nicht weiter betrachtet. Im Anhang 9 sind die Diagramme für alle Temperaturklassen dargestellt. In Abbildung 5.68 werden lediglich die Werte der deviatorischen Spannungen bei der höchsten und der niedrigsten Temperaturklasse dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass mit abnehmendem Schichtenverbund eine deutliche Erhöhung der Deviatorspannungen sowohl an der Oberfläche als auch an der Schichtengrenzfläche (ADS-ABS) und an der Unterseite der Binderschicht festzustellen ist. Am Beispiel in Abbildung 5.68 sind die Deviatorspannungen bei fehlendem Verbund und 47,5°C vier bis fünf Mal höher als diejenigen bei vollem Verbund. Die Deviatorspannungen bei dem schlechten Schichtenverbund liegen bei allen vier Temperaturen zwischen den Werten bei fehlendem und vollständigem Verbund. Bei einer Temperatur von 47,5°C sind alle deviatorischen Vergleichsspannungen (vektoriell betrachtet) vertikal gerichtet, das bedeutet Spurrinnengefährdung, während bei 32,5°C an der Oberfläche keine Spurrinnengefährdung bei vollem Schichtenverbund berechnet wurde. Die Werte der Deviatorspannungen für den guten und den vollständig ermüdeten Schichtenverbund wurden anhand der Erkenntnisse aus der Ermüdung interpoliert.

Die Zunahme der Deviatorspannungen mit abnehmender Qualität des Schichtenverbundes zeigt eindeutig, dass ein schlechter Schichtenverbund zu einer erhöhten Spurrinnengefährdung beiträgt. Demzufolge spielt die Qualität des Schichtenverbundes eine sehr wichtige Rolle für die Verformungsbeständigkeit der zwei oberen Asphaltsschichten.

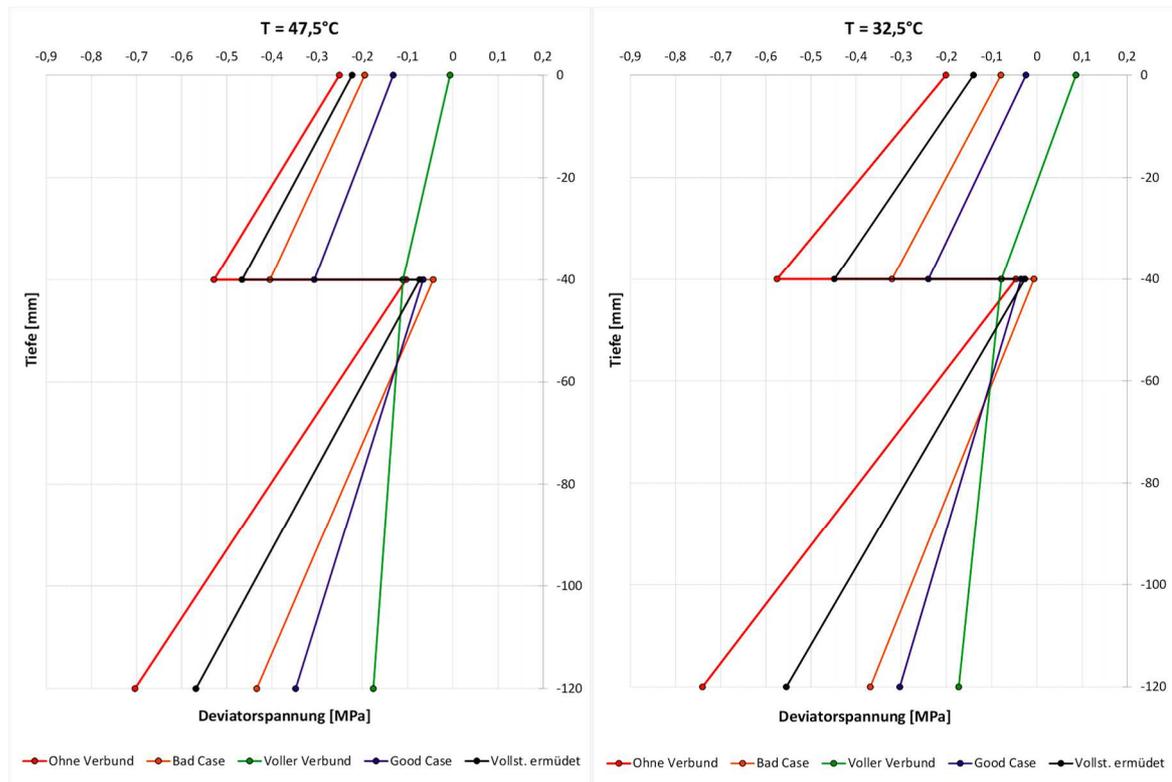


Abbildung 5.68: Deviatorspannungen in der Lastachse an der Ober- und Unterseite der Deckschicht und der Binderschicht bei 47,5°C und 32,5°C

Position	Tiefe [mm]	Deviatorspannung [MPa] bei 47,5°C			Deviatorspannung [MPa] bei 32,5°C		
		Ohne Verbund	Bad Case	Voller Verbund	Ohne Verbund	Bad Case	Voller Verbund
Oberseite ADS	0	-0,2507	-0,1946	-0,0059	-0,2011	-0,0794	0,0866
Unterseite ADS	-40	-0,5284	-0,4047	-0,1103	-0,5751	-0,3209	-0,0786
Oberseite ABS	-40	-0,1033	-0,0432	-0,1103	-0,0463	-0,0065	-0,0786
Unterseite ABS	-120	-0,7032	-0,4337	-0,1756	-0,7401	-0,3686	-0,1727
Oberseite ATS	-120	0,3124	0,0727	-0,1756	0,4205	0,0311	-0,1727
Unterseite ATS	-340	-0,8045	-0,6658	-0,4884	-0,8145	-0,6005	-0,4677
Oberseite FSS	-340	0,0141	0,0094	0,0063	0,0099	0,0051	0,0036

Tabelle 5.1: Werte der Deviatorspannungen in der Lastachse an der Ober- und Unterseite der Deckschicht und der Binderschicht bei 47,5°C und 32,5°C

5.8 Erarbeitung des Bewertungshintergrundes für die zyklische Scherprüfung (Arbeitspaket 10)

5.8.1 Bestimmung der Steifigkeitsmodule

In Abstimmung mit den Fachbetreuern des Projektbegleitenden Ausschusses wurde entschieden, dass in diesem Arbeitspaket noch Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt werden sollen, um die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen und die Ermüdungsfunktionen der drei für die Berechnungen verwendeten Asphaltmaterialien SMA 11 S, AC 16 B S und AC 22 T S zu bestimmen. Dies war sowohl für die Berechnungen mit SAFEM zur Anwendung der rechnerischen Dimensionierung nach RDO Asphalt 09 (2009) als auch für die Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen als Eingangsparameter in REFEM wichtig. Für die Versuche standen insgesamt 84 Probekörper zur Verfügung.

Die Grenzwerte (Maximalwerte) des E-Moduls für alle drei Asphaltmaterialien wurden entsprechend dem Vorgehen gemäß Abbildung 5.69 über den Schnittpunkt der Funktion (lineare Regressionsfunktion) mit der Abszissen-Achse ermittelt (Zeissler/Dragon, 2013). Der kleinste Grenzwert des E-Moduls war immer 0. Ein Beispiel zur Bestimmung des maximalen E-Moduls für den SMA 11 S ist in Abbildung 5.69 gezeigt.

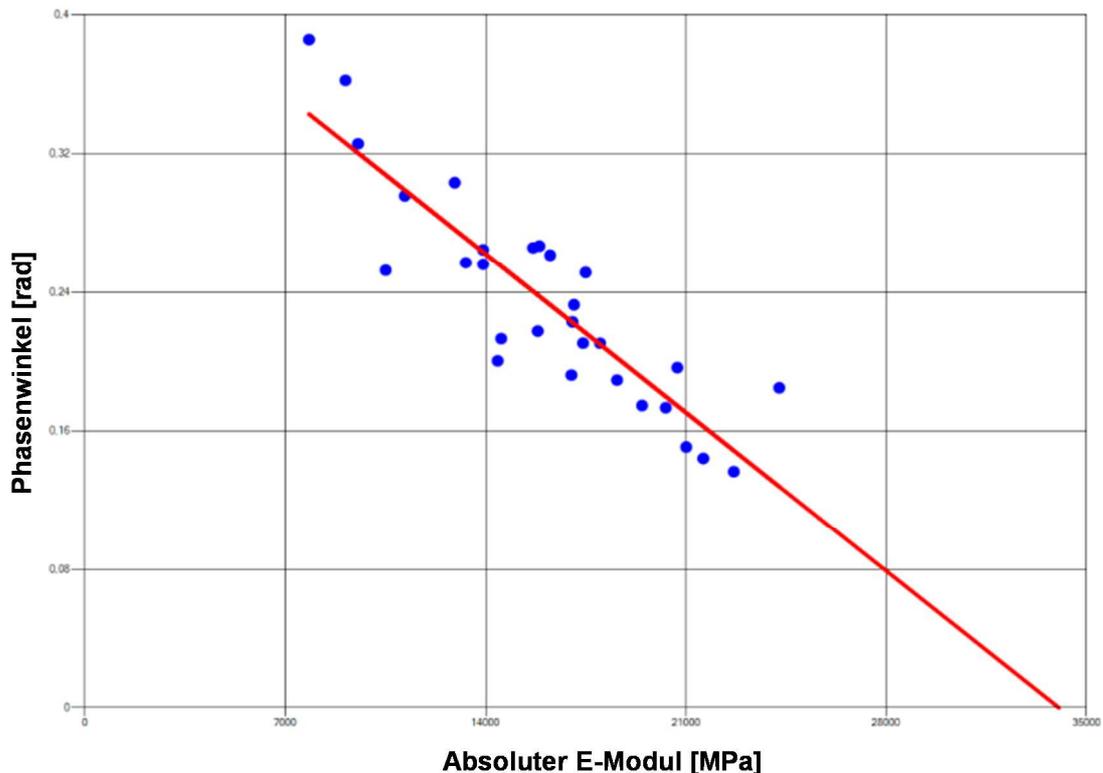


Abbildung 5.69: Abhängigkeit des Phasenwinkels δ vom absoluten E-Modul zur Abschätzung des Grenzmoduls $|E|_{\max}$ für SMA 11 S

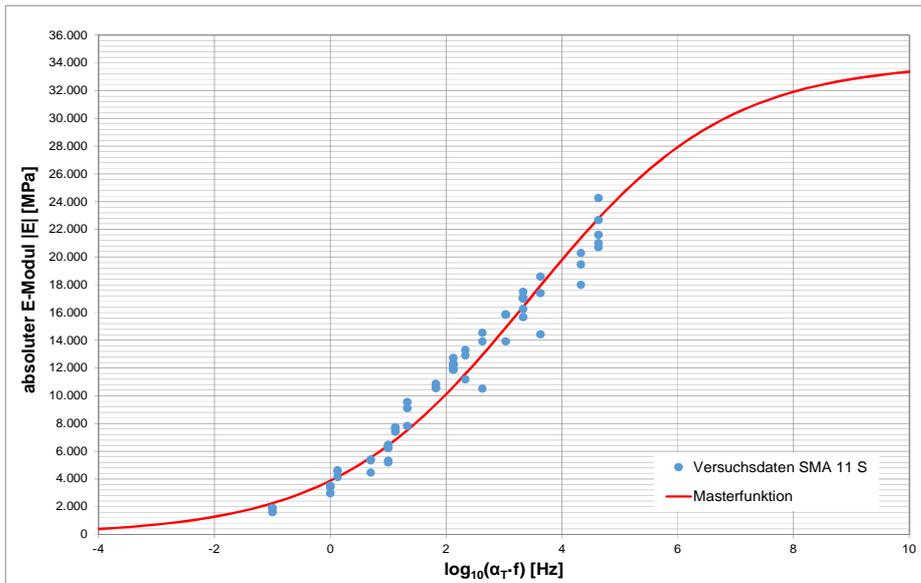


Abbildung 5.70: Masterfunktion des absoluten E-Moduls für SMA 11 S in Abhängigkeit von der korrigierten Frequenz (f_{korr})

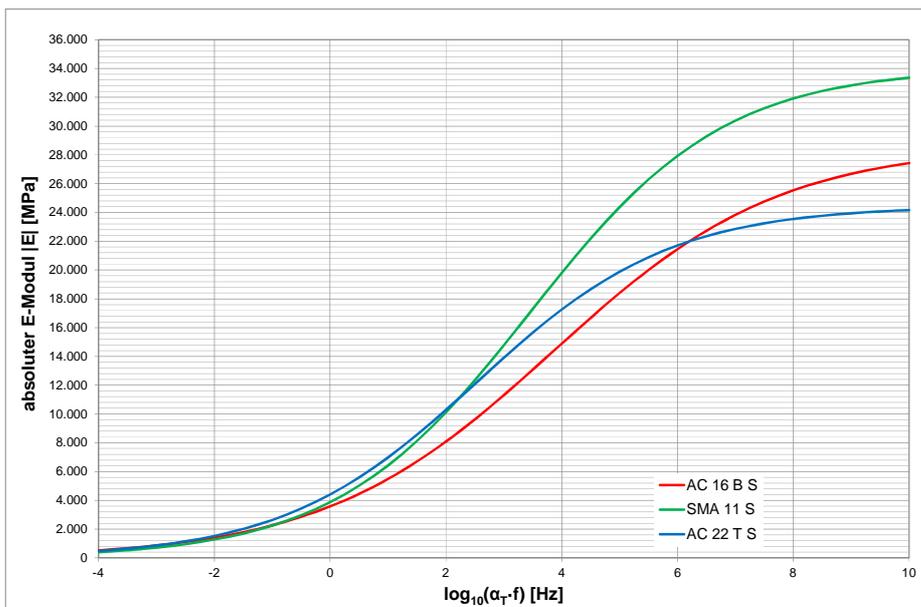


Abbildung 5.71: Masterfunktionen der drei Materialien

Asphaltmischgut	T_R [°C]	m [-]	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	b_1 [-]	b_0 [-]	R^2
SMA 11 S	20	21461	0	34034	-0,5954617	2,05201397	0,954
AC 16 B S		23348	0	28638	-0,5065891	1,94540886	0,923
AC 22 T S		21775	0	24444	-0,5971767	1,51357077	0,957

Tabelle 5.2: Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaß der Masterfunktionen für die drei verwendeten Asphaltmischgüter

Durch eine Anpassung mit einer Funktion fünften Grades, konnten die Masterfunktionen für die Steifigkeiten der drei Mischgüter in Abhängigkeit von der Temperatur bei der maßgebenden Frequenz von 10 Hz ermittelt werden (Abbildung 5.72).

$$E = a_1 \cdot T^5 + a_2 \cdot T^4 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^2 + a_5 \cdot T + a_6 \quad \text{Gleichung 28}$$

mit:

a_1 bis a_6 Regressionsparameter

T Temperatur [°C]

Tabelle 5.3 enthält die Regressionsparameter des funktionalen Zusammenhanges für die drei Asphalte nach Gleichung 28.

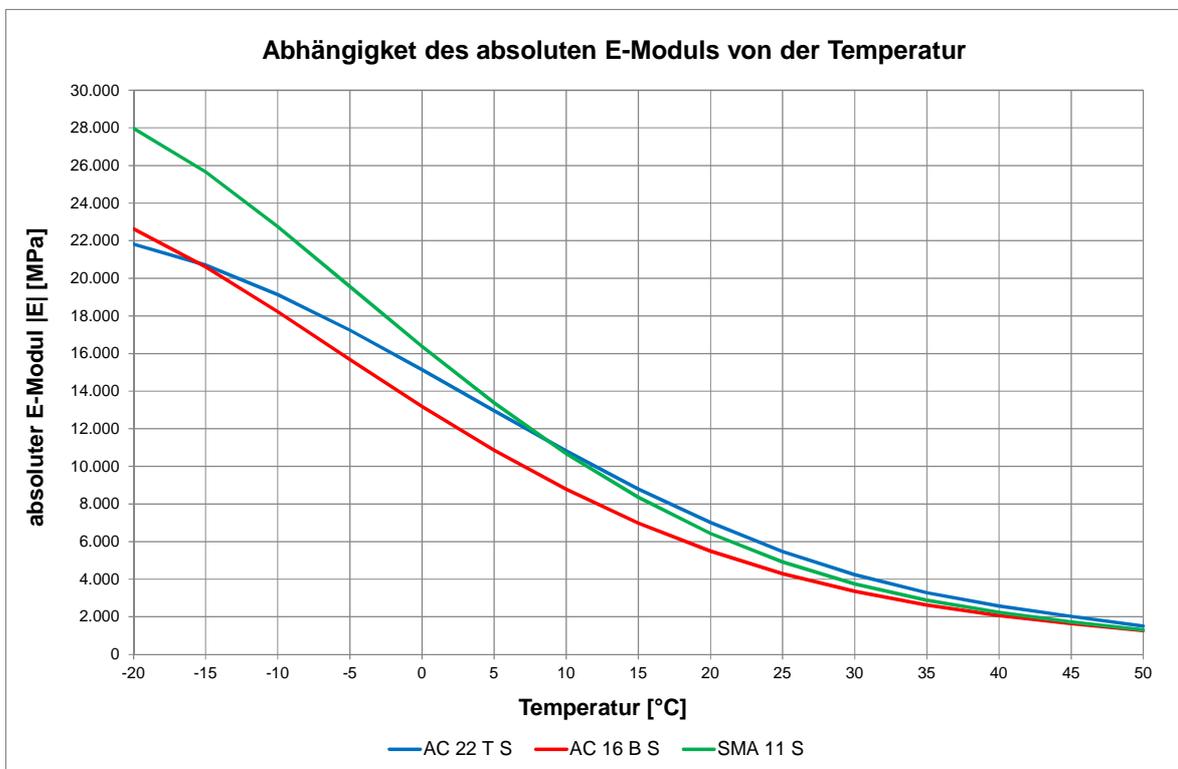


Abbildung 5.72: Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für SMA 11 S, AC 16 B S, AC 22 T S

Asphaltmischgut	f [Hz]	a ₁ [-]	a ₂ [-]	a ₃ [-]	a ₄ [-]	a ₅ [-]	a ₆ [-]
SMA 11 S	10	0,00002243	-0,00417345	0,2076149	3,71489705	-624,994249	16385,02336
AC 16 B S		0,00001729	-0,00296518	0,13672201	3,36688028	-485,969271	13189,31087
AC 22 T S		-0,00001176	-0,00070433	0,15919108	-1,54122533	-432,017247	15138,87178

Tabelle 5.3: Ermittelte Regressionsparameter für den Zusammenhang zwischen E-Modul und Temperatur

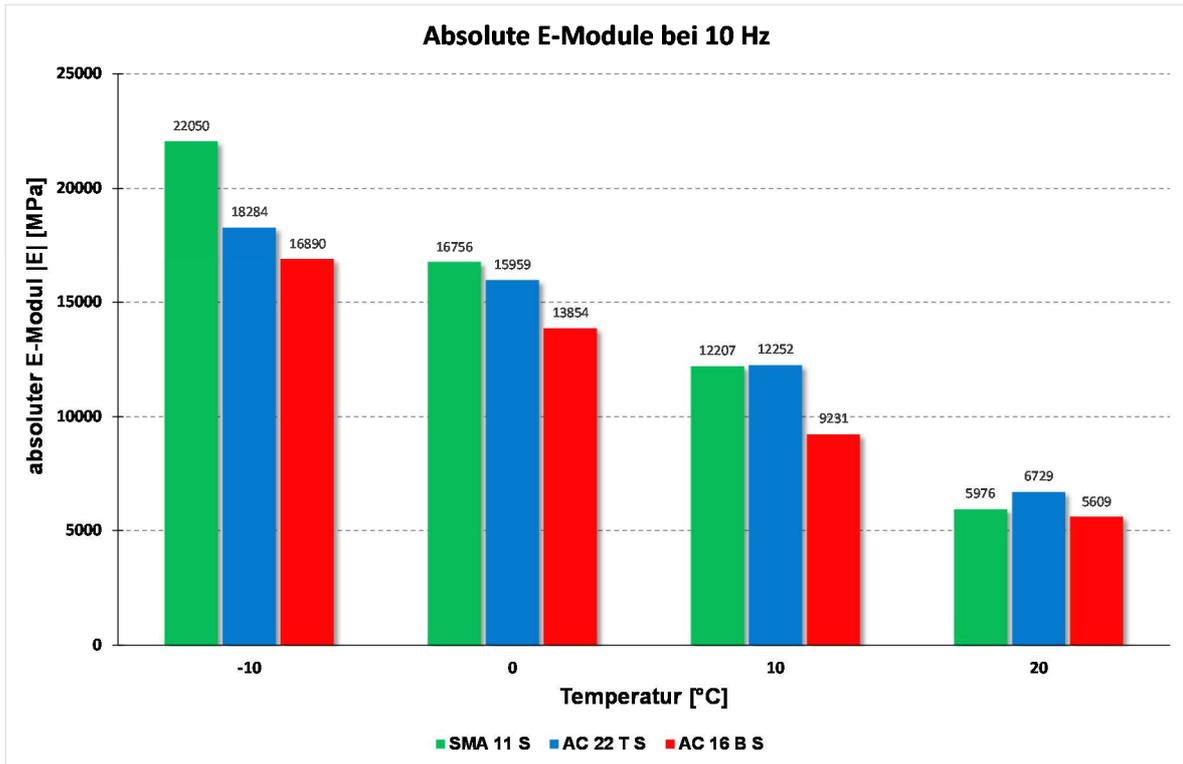


Abbildung 5.73: Vergleich der absoluten E-Moduln der drei Asphaltmaterialien bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und vier Temperaturen

Aus Abbildung 5.74 ist erkennbar, dass der absolute E-Modul sowohl von der Temperatur als auch von der Belastungsfrequenz stark abhängig ist. Mit abnehmender Temperatur steigt der absolute E-Modul an. Bei einer Frequenz von 10 Hz ist der absolute E-Modul des Asphaltdeckschichtmaterials SMA 11 S bei -10°C um ca. 3,5 Mal größer als bei +20°C. Mit Erhöhung der Frequenz steigt der absolute E-Modul bei allen 3 geprüften Asphaltmaterialien an. Dadurch wird bestätigt, dass die Straßenbefestigung durch langsam fahrende Fahrzeuge, was die Belastung mit einer geringen Frequenz entspricht, stärker geschädigt wird, als durch schneller fahrende Fahrzeuge (hohe Belastungsfrequenz).

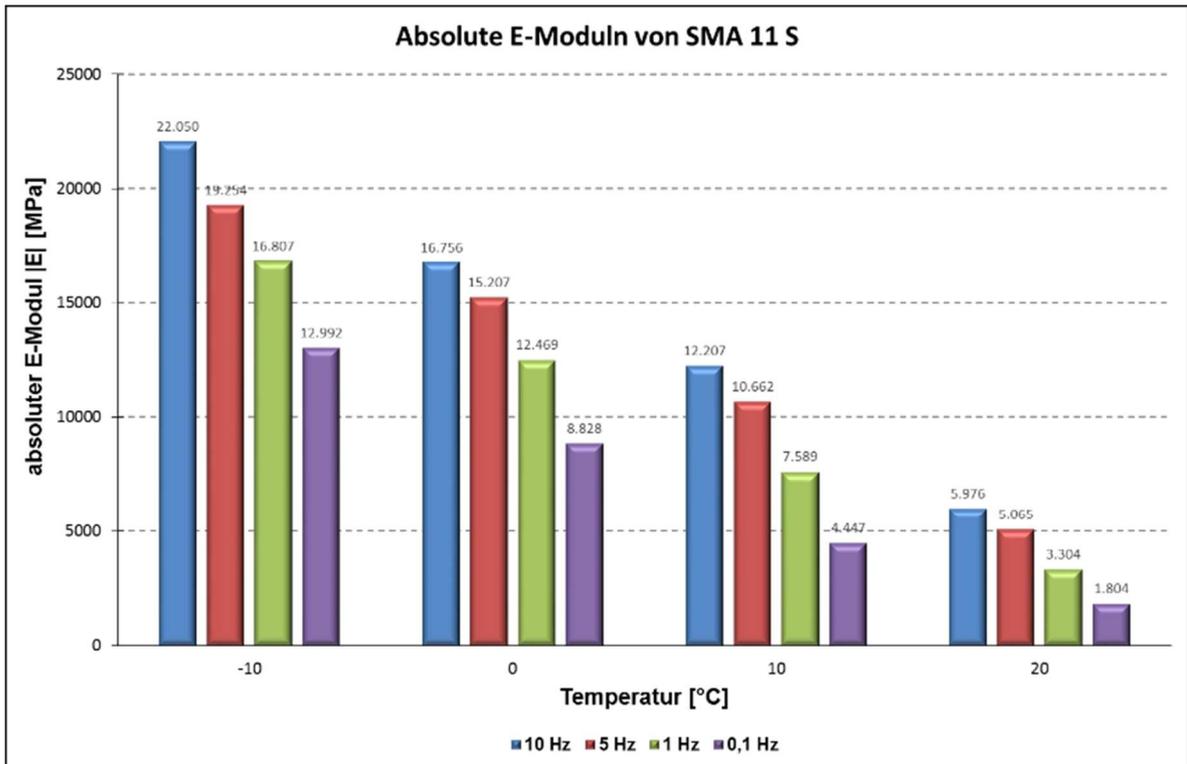


Abbildung 5.74: Vergleich der absoluten E-Moduln des Asphaltdeckschichtmaterials SMA 11 S bei vier Belastungsfrequenzen und vier Temperaturen

5.8.2 Ermittlung der Ermüdungsfunktionen

Als Beispiel wird in Abbildung 5.75 der Verlauf der Funktion bei dem Ermüdungsversuch von einem Asphalttragschichtprobekörper dargestellt. In diesem Beispiel wurde eine Lastwechselzahl von 10436 bis zum Makrorisskriterium im Asphaltprobekörper bestimmt und die maximale Lastwechselzahl bis zum Bruch war 15223.

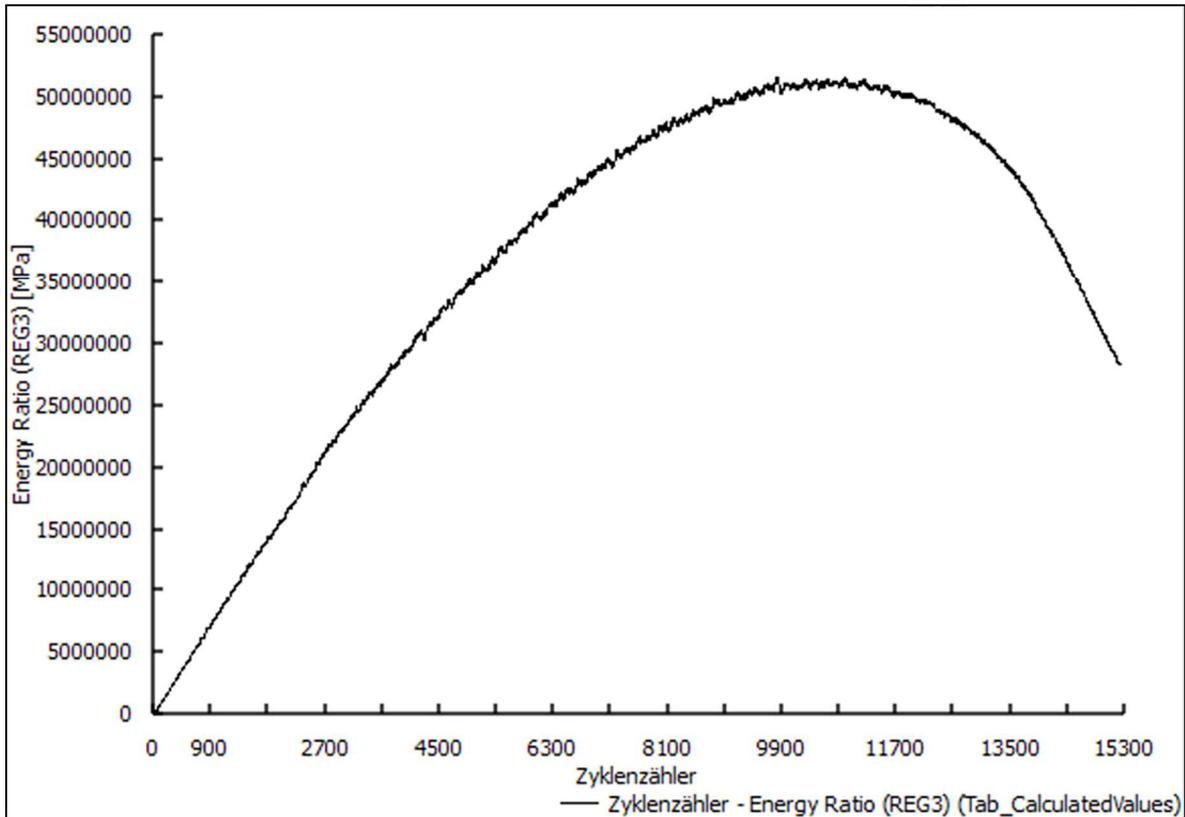


Abbildung 5.75: Bestimmung der Lastwechselzahl N_{Makro} bis zum Kriterium „Makroriss“ (Probekörper Nr. 7 AC 22 T S, siehe Anhang 10)

Die berechneten Ermüdungsfunktionen sind in Abbildung 5.76 dargestellt. Alle drei Ermüdungsfunktionen weisen die gleiche Steigung auf. Die ertragbaren Lastwechselzahlen bei gleicher elastischer Anfangsdehnung unterscheiden sich jedoch signifikant. Es wird deutlich, dass das Asphaltdeckschichtgemisch SMA 11 S die größte Anzahl an ertragbaren Lastwechseln bei gleicher elastischer Anfangsdehnung zeigt. Weniger Lastwechsel erträgt das Binderschichtmischgut AC 16 B S und am wenigsten - das Tragschichtmischgut AC 22 T S. Die Regressionsparameter für die drei Asphaltmischgüter sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

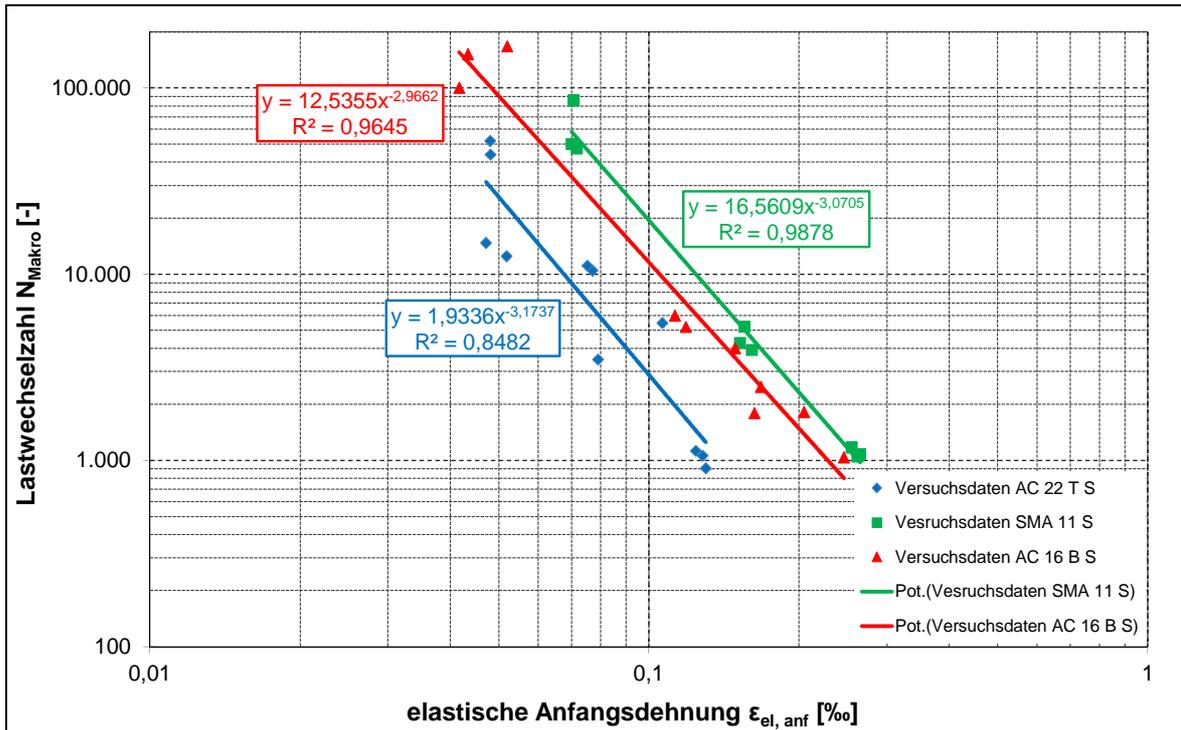


Abbildung 5.76: Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und $T = 20^\circ\text{C}$

Asphaltemischgut	f [Hz]	C1 [-]	C2 [-]	R2 [-]
SMA 11 S	10	16,5609	-3,0705	0,9878
AC 16 B S		12,5355	-2,9662	0,9645
AC 22 T S		1,9336	-3,1737	0,8482

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der Regressionsparameter für die Ermüdungsfunktionen für SMA 11 S, AC 16 B S, AC 22 T S

Weiterhin soll in diesem Arbeitspaket ein Bewertungshintergrund für die Anwendung der zyklischen Scherprüfung abgeleitet werden. Darin enthalten sind:

- Festlegung von Kriterien zur Anwendbarkeit der Versuchsergebnisse als Eingangsparameter für die rechnerische Dimensionierung und Prognose.

Der Versuch zur Bestimmung der Schersteifigkeit nach der im vorliegenden Bericht dargestellten Methode ist äußerst aufwendig. Deshalb wurde im Kap. 4.1 bereits ein Vorschlag zur Verwendung der aus allen durchgeführten Versuchen hergeleiteten Funktionen erstellt. Dementsprechend soll bei der Schersteifigkeitsfunktion für den „Bad Case“ generell dann angewendet werden, wenn Schichtenverbund nach den Kriterien der ZTV Asphalt als ausreichend angenommen werden kann. Die

Schersteifigkeitsfunktion für vollständig ermüdeten Schichtenverbund soll dann angewendet werden, wenn der Schichtenverbund nach ZTV Asphalt als nicht ausreichend angenommen werden muss. Nur dann, wenn zu erwarten ist, dass eine bessere Funktion als die im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichtes für den „Bad Case“ erstellt zu erwarten ist, sollten zusätzlich zyklische Schersteifigkeitsversuche durchgeführt werden. Da die Versuchsergebnisse entsprechen der bisherigen Erfahrungen materialbedingt stark streuen können, sollte bei der Durchführung gemäß Kapitel 4.1 und Bewertung der Ergebnisse nach Kapitel 5.7 vorgegangen werden.

- Erstellung von Empfehlungen für die Prüfmaschinenausrüstung inkl. Prüfvorrichtung für die zyklische Schersteifigkeitsprüfung und Erarbeitung einer Prüfanleitung.

Die Empfehlungen für die Prüfmaschinenausrüstung inkl. Prüfvorrichtung für die zyklische Schersteifigkeitsprüfung und eine Prüfanleitung sind im Entwurf der Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB, Teil 48: Zyklischer Schersteifigkeitsversuch) von 2013 enthalten. Als Ergänzung hierzu sollte die Anzahl und die Größe der Prüffrequenzen (siehe Abschnitt 3.4) sowie die Methodik zur Berechnung der Masterfunktionen für die Schersteifigkeiten in Analogie zur Auswertung des Spaltzug-Schwellversuches zu Anwendung kommen. Für beide Ergänzungen bestehen bereits Textvorschläge in den Entwürfen der überarbeitete AL Sp-Asphalt 09 sowie für den Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt (TP Asphalt-StB, Teil 48: Zyklischer Schersteifigkeitsversuch), weshalb hier auf die Wiederholung des Textes verzichtet wird. Weiterhin erfordert die Anwendung der Schersteifigkeitsfunktionen wegen der Abhängigkeit von der Normalspannung zwingend die Anwendung der Methode der Finiten Elemente. In das Finite-Elemente-Programm SAFEM wurde die Funktion bereits anwendungsbereit durch das Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen implementiert.

- Erarbeitung von Empfehlungen für die Berücksichtigung der Verbundwirkung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen sowie Grundlage für die Erarbeitung bzw. Überarbeitung von Regelwerken (u. a. Ergänzung zur [RDO Asphalt 2009]).

Abschnitte 4.1 und 5.7 können als Empfehlungen für die Berücksichtigung der Verbundwirkung im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen (RDO Asphalt, Ausgabe 2009) dienen.

- Vergleich der ermittelten Verbundwirkung mit den Ergebnissen der Schichtenverbund-Prüfung gemäß TP Asphalt-StB Teil 80. Dadurch kann der mit diesem Prüfverfahren erarbeitete Erfahrungshintergrund einfließen.

Der Vergleich wurde im Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Kapitel 5.3 (Teil 2 des Schlussberichts) niedergeschrieben.

6 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die neu entwickelte Prüfvorrichtung und das angewandte Prüfverfahren für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes von Asphaltbefestigungen gut geeignet sind. Mit dem bisher bekannten umfangreichsten Prüfprogramm kann der Einfluss aus den verschiedenen Kombinationen von Temperatur, Frequenz und Normalspannung auf den Schichtenverbund untersucht werden. Die Qualität des Schichtenverbundes und die Auswirkung dieser drei Einflussgrößen auf den Schichtenverbund wurde anhand der Werte der berechneten Schersteifigkeiten beurteilt. Je höher die Schersteifigkeit umso stärker ist der Schichtenverbund. Es wird festgestellt, dass die berechneten Schersteifigkeiten von der Temperatur stark abhängig sind. Der Schichtenverbund entsteht durch Verklebung, Reibung und Verzahnung. Diese Faktoren wirken in unterschiedlicher Größe in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Verklebung ist stark temperaturabhängig. Bei der niedrigsten Temperatur von -10°C ist die Verklebung an der Schichtengrenzfläche sehr stark, reduziert sich mit steigender Temperatur stetig und bei 50°C ist sie nicht mehr vorhanden. Bedingt durch die Verschlechterung der Verklebung nimmt die Schersteifigkeit mit zunehmender Temperatur rasch ab. Dementsprechend verringert sich deutlich die Wirksamkeit des Schichtenverbundes. Versuchstechnisch können die Effekte von Reibung, Verzahnung und Verklebung jedoch nicht getrennt werden. Eine quantitative Trennung kann nur anhand der berechneten Flächenfunktionen erfolgen.

Generell bewirken eine Erhöhung der Normalspannungen und der Frequenzen eine Erhöhung der Schersteifigkeit, d.h. eine Verbesserung des Schichtenverbundes. Sowohl die Normalspannung als auch die Belastungsfrequenz haben bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich große Auswirkung auf die Schersteifigkeit. Die Auswirkung der Normalspannung ist bei niedrigen Temperaturen wesentlich kleiner als bei den höheren Temperaturen, unabhängig von der Bitumenemulsionsart und -menge. Bei 50°C , geringer Frequenz und fehlender Normalspannung ist nahezu kein Schichtenverbund vorhanden, weil sowohl die Verklebung als auch die normalspannungsabhängige Reibung in der Grenzfläche nicht mehr wirken. Die Belastungsfrequenz hat auch einen signifikanten Einfluss auf die Schersteifigkeit des Schichtenverbundes. Mit zunehmender Frequenz erhöht sich die Schersteifigkeit bei jeder Temperatur, wobei die kleinsten Inkremente bei den zwei extremen Temperaturen von -10°C und 50°C beobachtet werden.

Es wurden Kriterien für das Verwerfen von Prüfergebnissen sowie für den Ausschluss von Probekörpern festgelegt.

Aus den Versuchsergebnissen konnte eine sigmoidale Masterfunktion zur Beschreibung der Schersteifigkeit abgeleitet werden, mit welcher der funktionale Zusammen-

hang zwischen Schersteifigkeit, Temperatur, Frequenz und Normalspannung ermittelt werden kann. Die Flächendiagramme der versuchstechnisch ermittelten Werte der Schersteifigkeit haben stets eine sehr gute Übereinstimmung mit den Flächendiagrammen der mit der Masterfunktion berechneten Schersteifigkeiten gezeigt. Diese Masterfunktion wurde in das Finite-Elemente-Programm SAFEM eingesetzt, um den Einfluss des Schichtenverbundes auf die Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung zu untersuchen.

Der zyklische Schersteifigkeitsversuch wurde auch mit einem anderen Finite-Elemente-Programm REFEM nachgebildet. Mit diesem numerischen Modell konnten die Verteilungen der Scherspannungen und Dehnungen sowie eine Masterfunktion zum Zusammenhang zwischen Scherkraft, Scherweg und Schersteifigkeit ermittelt werden. Die Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen zur Bestimmung einer Mindestschichtdicke zeigen, dass bei Prüfung von 1,5 cm dünnen Asphaltsschichten keine verwertbaren Ergebnisse zu erwarten sind. Aus den Laborversuchen kann demgegenüber festgestellt werden, dass diese Schichten zwar geprüft werden können, die verwendeten Stahldummies jedoch eine Auswirkung auf den gemessenen Schichtenverbund haben. Die Ergebnisse können nicht als zuverlässig angesehen werden. Deshalb müssen noch weitere Laborversuche mit und ohne Anwendung von Stahldummies durchgeführt werden, um die Auswirkung der Dummies auf die Messwerte zu klären.

Durch den Vergleich der Flächenfunktionen des Schichtenverbundes zwischen fein geschliffenen Oberflächen und des normal hergestellten Schichtenverbundes konnte eine quantitative Trennung der Effekte von Verklebung, Verzahnung und Reibung erreicht werden. Die gemeinsame Wirkung dieser Effekte ermöglicht generell einen stärkeren Schichtenverbund.

Der direkte Vergleich der berechneten Schersteifigkeiten zwischen Laboratorium und Baustelle zeigten eine sehr gute Übereinstimmung bei den zwei geprüften Verbundvarianten (ADS-ABS und ABS-ATS). Dadurch konnte die Richtigkeit der Herstellung des Schichtenverbundes im Laboratorium überprüft werden.

Es konnte festgestellt werden, dass die optimale Menge der Bitumenemulsion C60BP1-S zur Herstellung des Schichtenverbundes zwischen fein geschliffenen Oberflächen 200 g/m² ist. Bei Anwendung einer Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) ist für die Herstellung des stärksten Schichtenverbundes die größte Menge von 400 g/m² notwendig.

Es wurden auch Versuche zum Schichtenverbund ohne Bitumenemulsion durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die beste Verklebung des Bindemittels bei der Verbundkombination der Asphaltsschichten mit dem höchsten polymermodifizierten Bindemittelgehalt erreicht wird (Deckschicht auf Deckschicht und Deckschicht auf Binderschicht).

Die stärkste Verzahnung wurde bei der Verbundvariante der heiß-auf-heiß Bauweise und die höchste Reibung bei dem Verbund zwischen groben Oberflächen festgestellt. Generell hat sich gezeigt, dass das Bindemittel, die Korngrößenverteilung und die Einbautechnologie die größte Bedeutung für den Schichtenverbund haben, wenn keine Bitumenemulsion zwischen den Schichten verwendet wird.

Die Untersuchung des Schichtenverbundes bei sauberen, mittelverschmutzten und stark verschmutzten Oberflächen hat gezeigt, dass der Bereich zwischen sauberer und mittelverschmutzter Oberfläche unkritisch ist und ein guter Schichtenverbund durch die Anwendung von 300 g/m^2 C60BP1-S erreicht werden kann. Diese Bitumenemulsionsmenge hat sich als optimal erwiesen. Bei starker Verschmutzung der Oberfläche sollte der Haftkleber C40BF1-S mit 400 g/m^2 angewendet werden. Mit dieser Ausnahme kann die Verwendung der Bitumenemulsion C60BP1-S als optimal angesehen werden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung der Bitumenemulsionsmenge nicht zu einem besseren Schichtenverbund führt. Die Ergebnisse bestätigen außerdem, dass stark verschmutzte Oberflächen eine deutlich negative Auswirkung auf die Qualität des Verbundes haben.

In dieser Forschungsarbeit konnte durch die Untersuchungen an der TU Braunschweig auch eine Ermüdungsfunktion für den Schichtenverbund erstellt werden. Es wurde festgestellt, dass bei fehlender Normalspannung eine schnellere Ermüdung stattfindet. Bedingt durch die Aktivierung der Reibungskräfte bewirkt die Erhöhung der Normalspannung generell eine Steigerung der Schersteifigkeit über die gesamte Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung und eine Erhöhung der Lastwechselzahl bis zur vollständigen Ermüdung.

Aus den Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Programm SAFEM unter Anwendung des Verfahrens der rechnerischen Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09 konnten die Auswirkungen des vollständigen, guten („Good Case“), schlechten („Bad Case“), vollständig ermüdeten und fehlenden Schichtenverbund über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren ermittelt werden. Es kann angenommen werden, dass die Funktion für den „Bad Case“ in der Regel mindestens erreicht wird und vorausgesetzt werden kann, wenn eine Verklebung der Schichten z.B. am Bohrkern augenscheinlich zwischen den Schichten vorhanden ist und mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Abscherversuch nach den Kriterien der ZTV Asphalt Schichtenverbund als ausreichend nachgewiesen wurde. Mit dieser Funktion kann ohne zusätzliche Durchführung eines zyklischen Versuches zur Bestimmung der Schersteifigkeit immer gerechnet werden. Weiterhin könnte diese Funktion für zukünftige Kalibrierrechnungen bei Weiterentwicklungen von RDO Asphalt und RSO Asphalt angesetzt werden. Wird jedoch am Bohrkern augenscheinlich kein Schichtenverbund festgestellt, oder mit dem Versuch nach TP Asphalt – StB, Teil 80, Ab-

scherversuch nach den Kriterien nach ZTV Asphalt ermittelt, dass kein ausreichender Schichtenverbund vorhanden ist, dann sollte mit der Funktion der Schersteifigkeit des vollständig ermüdeten Schichtenverbundes gerechnet werden.

Auf Nachweis kann auch der gute Bereich angesetzt werden. Weder der sehr gute noch der sehr schlechte Bereich konnte versuchstechnisch nachgewiesen werden. Diese beiden Bereiche können deshalb als nicht bzw. noch nicht praxisrelevant angesehen werden.

Die Abschätzung der Spurrinnengefährdung zur Bewertung des plastischen Verformungsverhaltens wurde anhand der deviatorischen Spannungen in der Lastachse an der Oberfläche und an den Schichtengrenzflächen zwischen Deckschicht und Binderschicht und Binderschicht und Tragschicht mit den verschiedenen aus den Versuchen bestimmten Funktionen für den Schichtenverbund durchgeführt. Bei jeder der untersuchten Temperaturbedingungen führt die Verschlechterung des Schichtenverbundes zu einer deutlich erhöhten Spurrinnengefährdung. Somit hat der Schichtenverbund eine sehr große Bedeutung für die Verformungsbeständigkeit der Asphaltsschichten in den Befestigungen.

In dem vorgestellten Projekt musste festgestellt werden, dass die Ausfallrate der Probekörper teilweise schon bei Einbau bzw. auch während des laufenden Versuches sehr hoch war. In Bezug auf die Probekörperanzahl wird empfohlen, mindestens 50% mehr als die geplante Anzahl an zu prüfenden Probekörpern herzustellen. Die Planung sollte so ausgelegt sein, dass immer eine Dreifachbelegung je Versuchsbedingungen für die Auswertung der Versuche gesichert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- AL Sp-Asphalt 09
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens
von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch
als Eingangsgröße in die Dimensionierung
FGSV Verlag, Köln 2009
- ALP A-StB, Teil 4
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner
Köln, 1999
- Al-Qadi, I. L. u.a.
TACK COAT OPTIMIZATION FOR HMA OVERLAYS: LABORATORY TESTING
Illinois Center for Transportation
September 2008
- Ascher, D.
Manuskript zur Promotion
TU Dresden, unveröffentlicht
- Assi, M.
Une methode d'etude du comportement des enrobes bitumineux a la fatigue
en cission
Laboratoire central des ponts et chaussées
Paris, 1983
- Böhm, S / Stöckert, U.
Zur Umsetzung der Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner in die
Praxis
Bitumen, 2002
- Bondt de, A.H.
Anti-reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays
Ph.D. Thesis
Delft University of Technology, 1999
- Bondt de, A.H.
Anti-reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays
PhD. Thesis
Delft University of Technology, 1999

- Braddy, B. / Brown, E.
Rock Mechanics for Underground Mining, 1985
- Canestrari, F. / Santagata, E.
Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements
The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 1, March 2005, 39–46
- Chowdhury, A. / Button, J.
Evaluation of Superpave Shear Test Protocols
Texas Transportation Institute, 2002
- Cominsky, R. / Killingsworth, B. M. / Anderson, R.
Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt
NCHRP Report 409: Transportation Research Board, National Research Council,
Washington, D.C., 1998
- Crispino, M. / Festa, B. / Giannattasio, P. / Nicolosi, V.
Evaluation of the interaction between the asphalt concrete layers by a new dynamic test
8th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements
Washington State University, Seattle, 1997, pp. 741-754
- D'Andrea, A / Tozzo, C. / Boschetto, A et al.
Interface Roughness Parameters and Shear Strength
Modern Applied Science; Vol. 7, No. 10; 2013
- Diakhaté, M. / Millien, A / Petit, C. et al.
Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces
Construction and Building Materials, 2011
- Diakhaté, M. / Petit, C. / Millien, A. et al.
Interface fatigue cracking in multilayered pavements: Experimental analysis
6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements
United States. pp.649-659, 2008
- Diakhaté, M. / Petit, C. / Millien, A. et al.
Comparison of direct shear and torque tests for determining viscoelastic shear behavior of tack coats
International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials
Athens 2007

- Donovan, E. / Al-Qadi, I. / Loulizi, A.
 Optimization of Tack Coat Application Rate for Geocomposite Membrane on Bridge Decks
 Transportation Research Record 1740, pp. 143–150
 Washington DC, 2000
- FGSV 1989
 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
 Begriffsbestimmungen im Straßenbau
 Teil: Straßenplanung und Straßenverkehrstechnik
 FGSV Verlag, Köln 1989
- GCTS-Prüfvorrichtung SDS-150 (Arizona, USA)
http://www.gcts.com/?s=prod_ver&p=products&ID=75#tab-1
- Harrigan E. T. / Leahy, R. B.
 Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes
 SHRP Strategic Highway Research Program SHRP-A-415
 Washington, DC 1994
- Harrigan, E.
 Field Shear Test for Hot Mix Asphalt
 National Cooperative Highway Research Program NCHRP 9-18
 RESEARCH RESULTS DIGEST
 February 2002—Number 262
- Harrigan, E. / Sousa, J. / Solaimanian, M. / Weissman, S.
 Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool
 Strategic Highway Research Program SHRP-A-698
 Washington, DC 1994
- Hopman, P. / Kunst, P. / Pronk, A.
 a renewed interpretation model for fatigue measurement
 4th Eurobitume Symposium, Vol 1, pp. 557-561
 Madrid 1989
- Hürtgen, H.
 Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie)
 Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover
 Heft 20, Hannover 2000
- Johannsen, K.
 Prüfung und Bewertung des Verbundzustandes von Asphaltbefestigungen
 Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Dresden 2012

Killingsworth, B. M.

Demonstration of Field Shear Tester (FST) for Quality Control of Superpave Designed Hot-Mix Asphalt, Austin, TX: BRE-Fugro, 1998

Kim, H. / Arraigada, M. / Raab, C. / Partl, M.

Numerical and Experimental Analysis for the Interlayer Behavior of Double-Layered Asphalt Pavement Specimens
Jornal of materials in civil engineering
ASCE, 2011

Korn, S. / Johannsen, K.

Nachuntersuchungen an ausgesuchten Streckenabschnitten zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von TA-Asphalten
B 202 Ortsdurchfahrt Hohn: Shell Mexphalte 45 S
Gutachten Nr. 09/2008

Kulkarni, M. / Fischer, W. / Tayebali, A.

Evaluation of tack coat bond strength for mixtures containing baghouse fines
International Journal of Pavement Engineering, Volume 6, Issue 3, 2005

Leutner, R.

Untersuchung des Schichtenverbundes beim bituminösen Oberbau
Bitumen, 1979

Leutner, R. / Renken, P.

Auswirkungen unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes
AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13339N
Braunschweig, November 2004

Lobach, T. / Renken, P.

Schichtenverbund unterschiedlicher Verbundsysteme
Asphalt, 2005

M DSH-V

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Merkblatt Dünne Schichten im Heißeinbau auf Versiegelung M DSH-V
Ausgabe 2003

Millien, A. / Petit C. / Rosier J.

Comportement au cisaillement des couches d'accrochage dans les chaussées
Rapport interne Laboratoire 3MsGC
Université de Limoges, France, 1996.

- Miner, M.
Cumulative damage of fatigue
Journal of Applied Mechanics, 1945
- Miró, R. / ; Pérez, F. et al.
EVALUATION OF THE EFFECT OF TACK COATS . LCB SHEAR TEST
6th RILEM Symposium PTEBM'03
Zurich, 2003
- Mo, L. / Wu, S. / Huurman, A. et al.
Damage accumulation model for monotonic and dynamic shear fracture of asphalt-stone adhesion
Theoretical and Applied Fracture Mechanics
Volume 46, Issue 2, Pages 140–147, October 2006
- Mohammad, L. / Bae, A. / Mostafa A. et al.
Interface Shear Strength Characteristics of Emulsified Tack Coats
NCHRP 9-40
- Mohammad, L. / Raqib, M. / and Huang, B.
Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength
Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1789, TRB, National Research Council, pp. 56-65
Washington DC, 2002
- Mohammad, L. N. / Elseifi, M. A. / Bae, A. et al.
Optimization of Tack Coat for HMA Placement
NCHRP REPORT 712
TRB, 2012
- Mohammad, L. N. / Wu, Z. / Raqib, A.
Investigation of the Behavior of Asphalt Tack Coat Interface Layer
Louisiana Transportation Research Center, 2005
- Oeser, M.
Nichtlineare numerische Simulationsmodelle für Verkehrswegebefestigungen
Schriftenreihe der Professur für Straßenbau, Heft 18
Dresden, 2010
- Petit, C. / Laveissiere, D. / Millien, A.
Modelling of reflective cracking in pavements: fatigue under shear stresses
Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D finite element for pavement analysis
Design and Research, Amsterdam, pp. 111-123 2-5 April 2002

- Raab, C.
State of the Art of Adhesion testing
Report EMPA, 2007
- Raab, C. / Partl, M.
Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbunds von Asphaltbelägen
ASTRA-Project FA 12/94, 1999
- Raab, C. / Partl, M.N.
Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbunds von Asphaltbelägen
ASTRA-Project FA 12/94, 1999
RDO Asphalt 09
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht
Köln, 2009
- Romanoschi, S.
Characterization of Pavement Layer Interfaces
Ph.D. Dissertation
Louisiana State University, Baton Rouge, 1999
- Romanoschi, S. / Metcalf, J.
The characterization of pavement layer interfaces
Ninth International Conference on Asphalt Pavements
Denmark 2002
- Romanoschi, S. A. / Metcalf 2002
Errors in Pavement Layer Moduli Backcalculation due to Improper Modeling of the Layer Interface Condition
TRB, 2003
- Rosier, J. / Petit, C. / Ahmiedi, E. / Millien, A.
Mixed mode fatigue crack propagation in pavement structures under traffic load
Proceedings of the 3rd International RILEM Conference, pp. 143-152
Maastricht, October 1996
- RStO 12
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
Köln, 2012
- Sanders, P.J. / Brown, S. F. / Thom N. H.
Reinforced asphalt for crack and rut control.
7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa
CAPSA, 1999

- Santagata, F. / Partl, M. / Ferrotti, G. et al.
Layer characteristics affecting interlayer shear resistance in flexible pavements
J. Assoc. Asph. Paving Technol., 77, 221–254, 2008
- Sholar, G. / Page, G. / Musselman, J. u.a.
Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats
Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists
Volume 73, 2004
- Sholar, G.A. / Page G.C. / Musselman, J.A. / Upshaw, P.B. / Moseley, H.L.
Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats
Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists, 2004
- Sokolov, K. / Gubler, R. / Partl, M.
Extended numerical modeling and application of the coaxial shear test for asphalt pavements
Materials and Structures, Volume 38, Issue 5, pp 515-522, 2005
- Stöckert, U.
Schichtenverbund - Prüfung und Bewertungshintergrund
Straße und Autobahn, 11, 324–631, 2001
- Tayebali, A.
A Mechanistic Approach to Evaluate Contribution of Prime and Tack Coat
In Composite Asphalt Pavements
North Carolina State University, 2004
- TP Asphalt-StB, Teil 48
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Technische Prüfvorschriften für Asphalt
TP Asphalt-StB, Teil 48: Zyklischer Schersteifigkeitsversuch
Entwurf, Stand Januar 2013
- TP Asphalt-StB, Teil 80
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Technische Prüfvorschriften für Asphalt
Abscherversuch
Köln, 2007
- Ulrike Stöckert
Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau
Darmstadt 2002

- Uzan, J. / Livneh, M. / Eshed, Y.
Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layer
Asphalt Paving Technology, Vol.47, 1978
- Uzan, J. / Livneh, M. / Eshed, Y.
Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers
Asphalt Paving Technology, Vol.47, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists
Technical Sessions, Feb. 1978
- Uzan, J. / Livneh, M. / Y. Eshed, Y.
Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers
Asphalt Paving Technology, Vol.47, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Technical Sessions, Feb. 1978
- Wellner, F. / Ascher, D.
Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen
Schlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 13589 BR/1
Dresden, 2007
- Wellner, F. / Werkmeister, S. / Ascher, D.
Auswirkung der Alterung und des Schichtenverbundes auf den Beanspruchungszustand von Asphaltbefestigungen
Straße + Autobahn, Heft 7, 2012
- West, R. C. / Zhang, J. / Moore, J.
Evaluation of Bond Strength between Pavement Layers
NCAT Report 05-08, The Alabama Department of Transportation, 2005
- Wheat, M.
Evaluation of bond strength at asphalt interfaces
Master thesis, Kansas State University
- Witczak, M. W. / Andrei, D. / Mirza, W.
Development of revised predictive model for the dynamic complex modulus of asphalt mixtures
Inter-team Technical Rep., NCHRP Project No.1-37A, Univ. of Maryland, 1999
- Witczak, M.W. / Kaloush, K. / Pellinen, T.
Simple Performance Test for Superpave Mix Design
NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., 2002
- Zeißler, A. / Dragon, I.
Erweiterte Ansätze zur Versuchsauswertung und Bestimmung der Materialkenngrößen von Asphalt
Dresdner Asphalttage, 2013

ZTV Asphalt-StB 07
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau
von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt
Köln, 2007

Schlussbericht

zum IGF Vorhaben

Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt

Teilbericht Nr. 2 der Forschungsstelle

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen

Das IGF-Vorhaben Nr. 17634 BG der Forschungsvereinigung Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Braunschweig, im Januar 2016

Michael P. Wistuba,
Ivan Isailović und
Stephan Büchler

Inhalt

1	Einleitung zu Projektteil 2: Scherermüdungsprüfung	4
1.1	Hintergrund	4
1.2	Ziel	6
2	Asphaltverhalten unter Dauerbeanspruchung	8
2.1	Ermüdungswiderstand als performance-orientierte Asphaltspezifikation	8
2.2	Theorie der Materialermüdung	10
2.2.1	Prüfung der Steifigkeit und des Ermüdungswiderstandes von Asphalt	10
2.2.2	Ermüdungskriterien	12
2.2.3	Scherfestigkeit und Scherermüdung	16
3	Untersuchungsmethodik	26
3.1	Überblick	26
3.2	Eingesetzte Baustoffe und Festlegung der Verbundvarianten	26
3.3	Mechanische Konfiguration der Prüfsysteme	30
3.3.1	Statischer Abscherversuch	30
3.3.2	Zyklischer Scherversuch	31
3.4	Gewählte Prüfbedingungen und Prüfmatrix	33
4	Scherermüdungsprüfungen	35
4.1	Scheramplituden	35
4.2	Materialverhalten infolge der zyklischen Scherbeanspruchung	39
4.2.1	Schersteifigkeit	43
4.2.2	Phasenwinkel	44
4.2.3	Dissipierte Energie	44
4.2.4	Wiederholversuche	45
4.3	Versuchsauswertung	45
4.3.1	Konventionell und nach der Dissipationsenergie	45
4.3.2	Empfehlungen für die Auswertung von Prüfergebnissen	49
4.4	Abhängigkeiten der Prüfergebnisse von den Prüfparametern	50
4.4.1	Scheramplitude	50
4.4.2	Normalspannung	53
4.4.3	Prüftemperatur	60
4.5	Funktionale Beschreibung der Scherermüdung	65
4.5.1	Simulation mittels einer Exponentialfunktion	65
4.5.2	Abhängigkeit der Funktionsparameter von den Prüfbedingungen	67

4.5.3	Einheitliche funktionale Beschreibung über alle Verbundvarianten.....	88
5	Scherermüdungsbeständigkeit der Verbundvarianten im Vergleich.....	91
5.1	Erfahrungen zur Erzielung eines guten Schichtenverbundes aus Forschung und Baupraxis.....	91
5.2	Reihung der geprüften Verbundvarianten.....	92
5.3	Vergleich mit Ergebnissen aus statischen Abscherversuchen	98
5.3.1	Reihung der Verbundvarianten A bis F	98
5.3.2	Variation der Schicht-Kombinationen	99
5.3.3	Variation der Emulsionsart und -menge	100
5.3.4	Variation der Verschmutzung und der Bitumenemulsion	101
6	Prüfanleitung	103
6.1	Prüfgerät und Probekörper	103
6.2	Schersteifigkeitsprüfung im Amplitudensweep	103
6.3	Scherermüdungsprüfung und Auswertung	106
7	Zusammenfassung.....	107
8	Literatur	110

1 Einleitung zu Projektteil 2: Scherermüdungsprüfung

Dieser Bericht beinhaltet den zweiten Teil des IGF-Projekts „*Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt*“. Er wurde am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig erarbeitet mit dem Ziel, einen zyklischen Scherversuch zur Beurteilung der Materialermüdung im Schichtenverbund von Asphaltstraßenkonstruktionen zu entwickeln.

1.1 Hintergrund

Straßenoberbauten aus Asphalt sind aus mehreren Schichten zusammengesetzt, im Regelfall bestehend aus Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht und Asphalttragschicht. Für die Gewährleistung eines guten Verbundes zwischen zwei Schichten wird die Oberfläche einer fertigen Schicht vor dem Einbau der jeweils nächsten Schicht gesäubert und mit einem Vorspritzmittel als Haftbrücke angespritzt.

Die Funktion des Schichtenverbundes ist die vollständige Übertragung von Scherspannungen an der Schichtgrenze, die durch Achsenüberrollung, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge innerhalb des Schichtenpaketes entstehen (Abbildung 1). Der Schichtenverbund wird durch das Zusammenwirken von Verklebung, Reibung und Verzahnung an der Schichtengrenze erreicht, wobei deren Wirkungsanteile von Temperatur, Asphaltart sowie Vorspritzmittelart- und -menge abhängig sind und diese prüftechnisch nicht einfach getrennt voneinander angesprochen werden können.

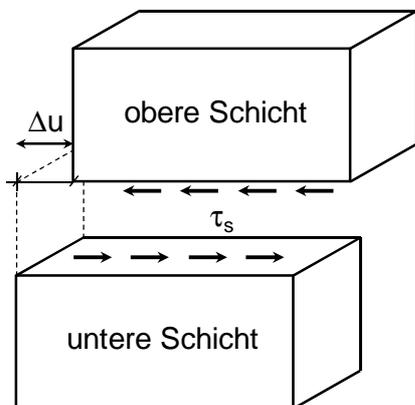


Abbildung 1: Scherspannung τ_s und Relativverschiebung Δu zwischen zwei Schichten unter Achsenbeanspruchung (Walther, 2015).

Nur bei vollständigem Schichtenverbund zwischen allen Asphaltsschichten wirkt die Asphaltbefestigung als eine strukturelle Einheit. Ein schlechter oder kein Schichtenverbund führt zu einer Veränderung des dreidimensionalen Beanspruchungszustandes in der gesamten Befestigung und zu einer signifikanten Erhöhung der aus der Belastung resultierenden Biegezugbeanspruchung.

Den Unterschied zwischen den Beanspruchungszuständen bei vollständigem Schichtenverbund und bei vollständig aufgehobenem Schichtenverbund zeigt Abbildung 2 beispielhaft (Weber, 1991). Zur Veranschaulichung des Spannungsverlaufes innerhalb eines Schichtensystems mit und ohne Schichtenverbund ist ein monolithischer Balken (mit vollständigem Schichtenverbund) einem dreiteiligen Balken (Abbildung 2, rechts) gegenübergestellt. Für die dreigeteilte Konstruktion wird nach der linearen Biegetheorie eine neunfache Vergrößerung der Durchbiegung in der Mitte des Balkens ermittelt. Betrachtet man den Radialspannungsverlauf kommt es bei dem dreiteiligen System in den Schichtgrenzen zu Spannungsumlagerungen, die an der Unterseite des Systems in erheblich höheren Biegezugspannungen resultieren. So verdeutlicht dieses einfache Beispiel, dass ein schlechter Schichtenverbund eine Reduktion der strukturellen Tragfähigkeit verursachen kann und damit eine deutlich kürzere Nutzungsdauer der Gesamtbefestigung.

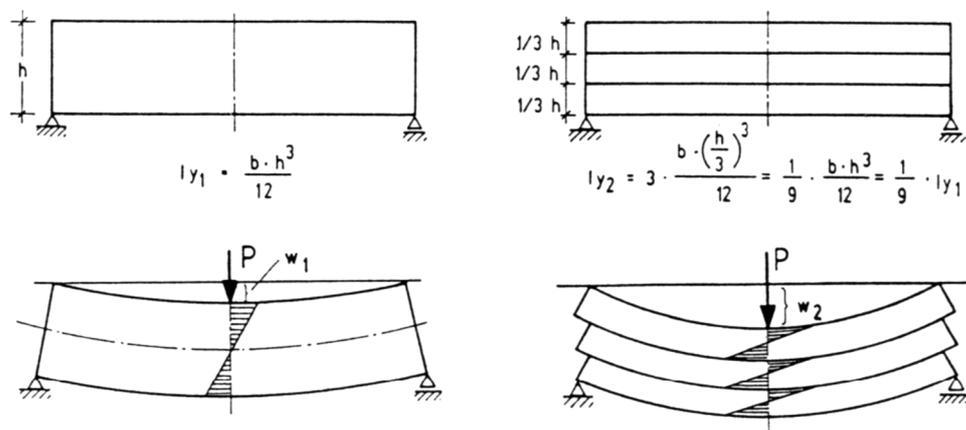


Abbildung 2. Darstellung des Spannungsverlaufes unterschiedlicher Verbundsysteme: (links) voller Verbund zwischen den Schichten und (rechts) Auflösung des Verbundes an den Schichtgrenzen (Weber, 1991).

Die Beurteilung des Schichtenverbundes in einer Asphaltbefestigung erfolgt in Deutschland zurzeit mittels statischem Abscherversuch (FGSV, TP Asphalt-StB Teil 80). Dabei wird eine Bohrkernprobe bestehend aus zwei Schichten horizontal zwischen zwei Scherbacken eingespannt, sodass die Schichtengrenze in der Mitte der Scherbacken zu liegen kommt. Während der Prüfung wird die Bohrkernprobe abgeschert, d. h. die bewegliche Scherbacke wird vertikal, parallel zur Schichtengrenze gegenüber der fixierten zweiten Scherbacke verschoben. Die beim Versagen gemessene Höchstkraft ist die Scherfestigkeit (besser Abscherfestigkeit), welche als Maß für den Schichtenverbund im Technischen Regelwerk als Anforderungswert verankert ist.

Die Vorteile des statischen Abscherversuches sind die einfache Prüfvorrichtung und Versuchsdurchführung, die Nachteile sind die Versuchsanordnung an sich, weil die im Straßenaufbau vorherrschenden, zyklischen und ortsveränderlichen Beanspruchungsbedingungen an der Schichtengrenze nicht praxisnah simuliert werden, und die Un-

klarheit darüber, ob die aus dem statischen Abscherversuch abgeleitete Scherfestigkeit der optimale Kennwert zur Beurteilung der Haltbarkeit des Schichtenverbundes ist.

Dieses Prüfverfahren lässt auch keine mechanische Analyse zu dem in der Befestigung tatsächlich wirkenden Verbundverhalten unter verschiedenen Verhältnissen (Temperatur, Last, Art und Menge des Vorspritzmittels, u. ä.) zu. Weiterhin ist dieses Prüfverfahren ungeeignet für eine Ableitung jener Materialparameter bzw. Materialgesetze, die für eine Simulation der an den Schichtengrenzen resultierenden Spannungen und Dehnungen und zur rechnerischen Prognose der Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen erforderlich sind.

Aus diesem Grund wurde u. a. an der TU Dresden ein zyklisches Prüfverfahren zur praxisnäheren Ansprache des Schichtenverbundes vorgeschlagen, ein entsprechendes Prüfgerät gebaut und damit die Ermittlung der Schersteifigkeit an der Schichtengrenze erprobt. Die Geometrie des Prüfgeräts ist ähnlich zu jener des statischen Abscherversuches (s. o.), ist allerdings insofern erweitert, dass zum einen die Relativverschiebung der Bohrkernhälften (Δu , Abbildung 1) in horizontaler Richtung zyklisch erfolgen kann, und zum anderen in der Längsachse des Bohrkerns zusätzlich eine statische Druckbeanspruchung (Normalspannung) aufgebracht werden kann. Da die Probe nicht wie beim statischen Abscherversuch zur Gänze bis zum Bruch abgeschert wird, wird in der Folge dieses Prüfverfahren als „zyklischer Scherversuch“ bezeichnet.

Bisher wurde dieser zyklische Scherversuch an der TU Dresden ausschließlich zur Prüfung der Schersteifigkeit des Schichtenverbundes eingesetzt. Bei der Schersteifigkeitsprüfung muss die Beanspruchung des Probekörpers während des gesamten Versuchs ausreichend klein gewählt werden, sodass der Probekörper nicht geschädigt wird, d. h. die gesamte Prüfung muss im linear-elastischen Bereich erfolgen, weil sonst die Schersteifigkeit nicht korrekt bestimmbar ist. Im ersten Teil dieses Forschungsprojekts (siehe Teilbericht der TU Dresden) werden unter Variation der maßgebenden Randbedingungen deren Einflüsse auf die Schersteifigkeit des Schichtenverbundes analysiert.

Es ist nicht bekannt, ob der zyklische Scherversuch auch im nicht linearen Beanspruchungsbereich, d. h. bei abnehmender Schersteifigkeit zufolge Materialschädigung, zur Beurteilung des Dauerverhaltens des Schichtenverbundes unter zyklischer Belastung (d. h. Ermüdungswiderstand) eingesetzt werden kann.

1.2 Ziel

Ziel des zweiten Teils dieses Forschungsprojekts (TU Braunschweig) ist es, die Frage zu klären, ob ein direkter, zyklischer Scherversuch zur Ermüdungsbewertung des Schichtenverbundes herangezogen werden kann und wenn ja, welche Prüfmodalitäten hierzu festzulegen sind. Zu diesem Zweck sind zunächst grundlegende Studien zur Anwendbarkeit des direkten, zyklischen Scherversuches durchzuführen, die Prüfmodalitäten zu identifizieren und festzulegen, und danach serienmäßig der Einfluss

von verschiedenen Verbundvarianten, Temperaturen und Normalspannungen auf den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes systematisch zu überprüfen. Insgesamt sind dazu ca. 600 Einzelversuche notwendig. So sollen die optimalen Prüfparameter, die Anwendungsgrenzen und ein Bewertungshintergrund für einen neuen zyklischen Scherversuch für die Prüfung des Dauerverhaltens erarbeitet werden.

2 Asphaltverhalten unter Dauerbeanspruchung

2.1 Ermüdungswiderstand als performance-orientierte Asphaltspezifikation

Im Jahr 2008 wurde in der Europäischen Union – auf gesetzlicher Grundlage der Bauproduktenrichtlinie – mit der Normenserie EN 13108 „Bituminous mixtures - Material specifications“ ein neues System zur Spezifikation und zur Führung des Konformitätsnachweises von Asphaltmischgut im Straßenbau verbindlich eingeführt. Die Europäische Norm EN 13108 enthält die Anforderungen an europäisch harmonisierte Asphaltmischgutsorten und die Ausführungsbestimmungen zur Qualitätssicherung im Rahmen der Konformitätsbewertung durch Erstprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle. Die Erstprüfung gibt somit die Sicherheit, dass eine (europäisch harmonisierte) Asphaltmischung jede in der jeweiligen Produktnorm gestellte Anforderung erfüllt.

Erstmals wurden in der Europäischen Norm EN 13108 Teil 1 für die Spezifikation von Asphaltbetonmischgut (AC Asphalt Concrete, für Trag-, Binder- und Deckschichten) wahlweise zwei Ansätze zugelassen: der empirische und der fundamentale Ansatz (Performance-Ansatz). Festhaltend am Erfahrungshintergrund hat Deutschland zunächst nur den empirischen Ansatz national in Form der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07) umgesetzt.

Der wesentliche Unterschied zwischen dem empirischen und dem fundamentalen Ansatz liegt in der Nachweisführung der Konformität des Asphaltbetonmischguts im Rahmen der Erstprüfung gemäß EN 13108 Teil 20. Beim empirischen Ansatz wird im Wesentlichen das Asphaltbetonmischgut – in Anlehnung an die traditionell übliche Vorgangsweise – auf der Grundlage von volumetrischen Kennwerten konzipiert, wie Korngrößenverteilung, Bindemittel- und Hohlraumgehalt. Hingegen basiert der fundamentale Ansatz auf fundamentalen, am Gebrauchsverhalten orientierten Laborprüfungen. Man spricht von einer performance-orientierten Asphaltspezifikation.

Für eine performance-orientierte Asphaltspezifikation sind zusätzliche fundamentale Materialprüfungen gefordert, die am verdichteten Asphaltbetonmischgut im Labor unter möglichst realitätsnahen Belastungsbedingungen stattfinden.

In Performance-Prüfungen wird an Asphaltprobekörpern im Labor das nichtlineare Verhalten von Asphaltsschichten simuliert. Dabei wird unter kontrollierten, isothermen Prüfbedingungen zeitraffend eine hohe Zahl von Belastungswiederholungen auf einen Asphaltprobekörper mit definierten Abmessungen aufgebracht und die allmähliche Veränderung der Asphalteigenschaften in Form der Primärwirkungen im Asphaltprobekörper (Spannungen, Dehnungen) gemessen.

In einem kraftgeregelten (bzw. spannungsgeregelten) Versuch wird eine wiederkehrende (zyklische) konstante Kraft (bzw. Spannung) aufgebracht und die resultierende Zunahme der Verformung (bzw. Dehnung) gemessen. Hingegen wird beim weggere-

gelten (bzw. verformungsgeregelten) Versuch eine konstante Verformung (bzw. Dehnung) aufgebracht und die resultierende Abnahme der Kraft (bzw. Spannung) gemessen (siehe Wistuba et al., 2009).

Die während der Performance-Prüfung festgestellte Änderung der Primärwirkungen in Abhängigkeit von den aufgetragenen Belastungszyklen wird zur Beurteilung des Dauerhaltens und zur Ableitung von Materialkenngrößen bzw. Materialgesetzen herangezogen.

Ergebnis von Performance-Prüfungen sind somit physikalisch interpretierbare Materialkenngrößen bzw. -gesetze, die - gegebenenfalls in Verbindung mit Stoffmodellberechnungen - das Asphaltverhalten unter Gebrauch, d. h. im eingebauten Zustand in der Straße unter den Einflüssen aus Verkehr und Wetter beschreiben. Die fundamentale Asphaltprüfung soll zukünftig eine projektbezogene Optimierung des Mischguts unter Berücksichtigung der tatsächlich zu erwartenden Beanspruchung ermöglichen.

Zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften sind in der Europäischen Normenserie EN 12697 unterschiedliche Prüfverfahren beschrieben. Zurzeit besteht international weder eine Einigung über das jeweils optimale Verfahren, noch über die für den jeweiligen Versuch festzulegenden Prüfbedingungen. Die Möglichkeit der freien Wahl der Versuchsmethode bzw. der Prüfbedingungen führt zu teils widersprüchlichen Prüfergebnissen, zu Problemen bei der vergleichenden Interpretation und zu Kritik an der gebrauchsverhaltensorientierten Prüfsystematik insgesamt. Das angegebene Portfolio an Prüfverfahren zur Bewertung des Gesamtverhaltens der Straße während der Liege- und Gebrauchsdauer ist zurzeit noch unvollständig und im Rahmen von Forschungsprojekten weiter zu entwickeln.

In Deutschland wird das Gebrauchsverhalten von Asphalt anhand folgender Gebrauchseigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch bewertet (Begriffsbestimmungen vgl. FGSV, 2014):

- Verformungswiderstand (Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung),
- Steifigkeit (komplexer E-Modul und komplexe Querdehnzahl),
- Ermüdungswiderstand (Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse),
- Widerstand gegen Kälterissbildung (infolge ver- bzw. behinderten thermischen Schrumpfens).

Zur Prüfung des Dauerhaltens des Schichtenverbundes kommen von ihrer Art her nur die Prüfungen zur Ermittlung des Ermüdungswiderstandes in Frage, diese werden nachfolgend erläutert.

2.2 Theorie der Materialermüdung

2.2.1 Prüfung der Steifigkeit und des Ermüdungswiderstandes von Asphalt

Unter Materialermüdung versteht man im Allgemeinen ein allmähliches Baustoffversagen bei Dauerbeanspruchung. Obwohl die Einzellast kleiner als die Festigkeit des Materials ist, wird infolge der Lastwiederholungen ein allmählicher Abfall der Materialsteifigkeit festgestellt. Man geht davon aus, dass die Schädigung durch infinitesimale Mikrorisse initiiert und vorangetrieben wird, die sich im Laufe der Zeit zu einem Makroriss vereinigen und anschließend zum Bruchversagen des Materials führen.

In einer Ermüdungsprüfung wird eine hohe Zahl von Belastungswiederholungen aufgebracht und die daraus resultierende Änderung der mechanischen Eigenschaften festgestellt. Dabei wird ein Probekörper mit definierten Abmessungen einer zyklischen Kraft- oder Verformungsamplitude ausgesetzt und die resultierende "Antwort" des Materials gemessen bzw. berechnet.

Abbildung 3 zeigt schematisch den Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei einem kraftregulierten zyklischen Versuch. Da im Asphalt die viskosen Bitumeneigenschaften wie ein Dämpfer wirken, kommt es bei zyklischer Lastaufbringung zu einer Zeitverschiebung zwischen aufgebrachter Spannung $\sigma(t)$ und resultierender Dehnung $\varepsilon(t)$, die als Phasenverschiebung ϕ bezeichnet wird (Abbildung 3).

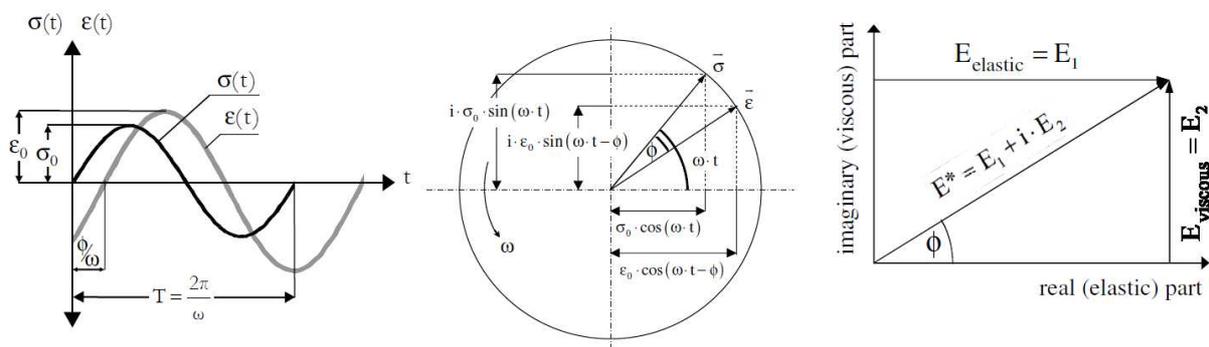


Abbildung 3. Spannungs- und Dehnungsdiagramm als Funktion der Zeit: Die resultierende Dehnung läuft der aufgebrachten konstanten Spannung zeitlich hinterher. Legende: $\sigma(t)$...Spannung; $\varepsilon(t)$...Dehnung, ϕ ...Phasenverschiebung, T ...Periodendauer einer Oszillation, ω ...Winkelgeschwindigkeit.

Die maßgebliche Kenngröße von visko-elastischen Materialien wie Asphalt, die aus zyklischen Laborprüfungen erhalten wird, ist der komplexe dynamische E-Modul. Dieser kann wie folgt bestimmt werden:

$$E^*(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + i \cdot \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \phi) + i \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos\phi + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot i \cdot \sin\phi = E' + i \cdot E'' \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

$E^*(t)$: komplexer dynamischer E-Modul,

- $\sigma(t)$: Spannung,
- $\varepsilon(t)$: Dehnung,
- ω : Winkelgeschwindigkeit,
- φ : Phasenverschiebungswinkel,
- E' : realer Anteil: elast. od. Elastizitätsmodul od. Speichermodul (engl. 'storage modulus'),
- E'' : imaginärer Anteil: viskoser Modul oder Verlustmodul (engl. 'loss modulus').

Der Betrag des komplexen dynamischen E-Moduls wird oft dynamischer E-Modul E_{dyn} (oder absoluter E-Modul oder Steifigkeitsmodul) genannt und kann berechnet werden aus:

$$|E^*(t)| \equiv E_{\text{dyn}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot i \cdot \sin \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Gl. 2}$$

Während einer Ermüdungsprüfung verändert sich der E-Modul aufgrund der voranschreitenden Materialschädigung kontinuierlich (Abbildung 4). Im Regelfall ist dieser Steifigkeitsabfall durch zwei oder drei Phasen charakterisiert. Phase 1 ist durch eine rasche Steifigkeitsabnahme gekennzeichnet, die nach einigen Lastwechseln in eine quasi-lineare Steifigkeitsabnahme übergeht (Phase 2). Versagen tritt ein, wenn sich die Mikrorisse zu einem ungeordneten Netz verdichten und einen Makroriss bilden. Bei fortgeschrittener Schädigung nimmt die Steifigkeit daher progressiv ab (Phase 3).

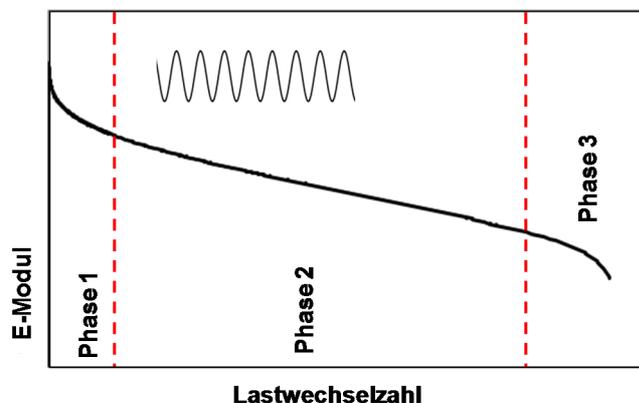


Abbildung 4. Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl und Kennzeichnung der drei dominanten Phasen während einer Ermüdungsprüfung (schematisch).

Das Material gilt als ermüdet, wenn das Ende der Phase 2 erreicht ist. Werden die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zur Ermüdung als Funktion der aufgebrauchten Beanspruchung aufgetragen, so ergibt sich die Funktion der Ermüdung aus:

$$\varepsilon_i = C_1 \cdot N^{C_2} \quad \text{Gl. 3}$$

mit:

- ε_i : Wegamplitude [mm],
- N : Lastwechselzahl bei Ermüdung [-],

- C₁: Parameter der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktion [-],
 C₂: Exponent der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktion [-].

Die auf diese Weise entstandene Potenzfunktion wird Wöhler-Kurve oder Wöhler-Linie genannt und stellt sich in einem doppelt logarithmischen Diagramm als eine Gerade dar (Abbildung 5). Die Wöhler-Linie ist das Ermüdungsgesetz der geprüften Asphaltvariante und ermöglicht eine Extrapolation der Prüfergebnisse auch für Amplituden, die bei der Ermüdungsprüfung nicht angesteuert wurden.

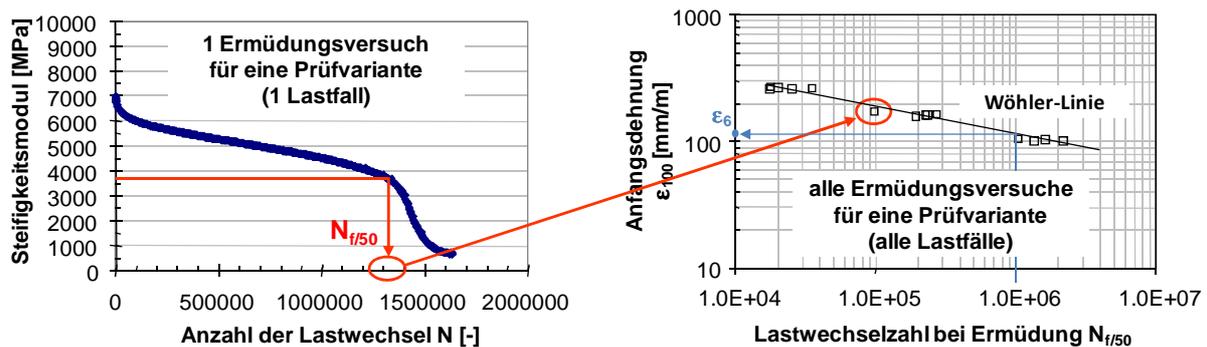


Abbildung 5. Beispiel für eine Ermüdungsfunktion (Wöhler-Linie) als Materialgesetz für das Ermüdungsversagen.

2.2.2 Ermüdungskriterien

Das Ermüdungsversagen, das heißt der Zeitpunkt der Makrorissbildung, ist oft nicht eindeutig bestimmbar. Per Konvention gilt Asphalt dann als ermüdet, wenn bei fortgeschrittener Laborprüfung ein definierter Materialzustand, also ein festgelegtes Ermüdungskriterium, erreicht ist. Für die Auswertung und die Interpretation von zyklischen Ermüdungsprüfungen an Asphalt unter definierten Beanspruchungsbedingungen wird im Allgemeinen die bis zum Eintritt des Ermüdungskriteriums ertragbare Lastwechselzahl bestimmt. Dazu finden verschiedene Auswertungsverfahren Anwendung, welche meist den Verlauf des Steifigkeitsmoduls bzw. den Verlauf der dissipierten Energie zu Grunde legen (siehe Wistuba et al., 2009).

a) Konventionelles Ermüdungskriterium

Als weit verbreitetes, konventionelles Ermüdungskriterium gilt, wenn in der Ermüdungsprüfung jene Lastwechselzahl $N_{f/50}$ erreicht wird, bei welcher der Abfall des Steifigkeitsmoduls 50 % seines Anfangswertes erreicht. Als anfänglicher Wert des E-Moduls ist jener Wert definiert, bei welchem die vorgegebene Kraft- oder Verformungsamplitude erreicht wird (nach ca. 100 Lastwechseln). Dieses Kriterium ist dann problematisch bzw. kann nicht angewandt werden, wenn der Probekörper bereits mit einer Steifigkeit größer als 50 % der Anfangssteifigkeit bricht. Dies ist oft bei niedrigen Prüftemperaturen der Fall. In Abbildung 6 sind exemplarisch die Ergebnisse aus Zug-Schwellversuchen dargestellt, jeweils bei 10 °C und bei 20 °C. Es ist zu erkennen,

dass aufgrund der höheren Viskosität des Asphalts bei 10 °C die Probe bei einem höheren E-Modul versagt, der über 50 % seines Anfangswertes zu liegen kommt. Als Ergebnis wird in diesem Fall die Bruchlastwechselzahl herangezogen.

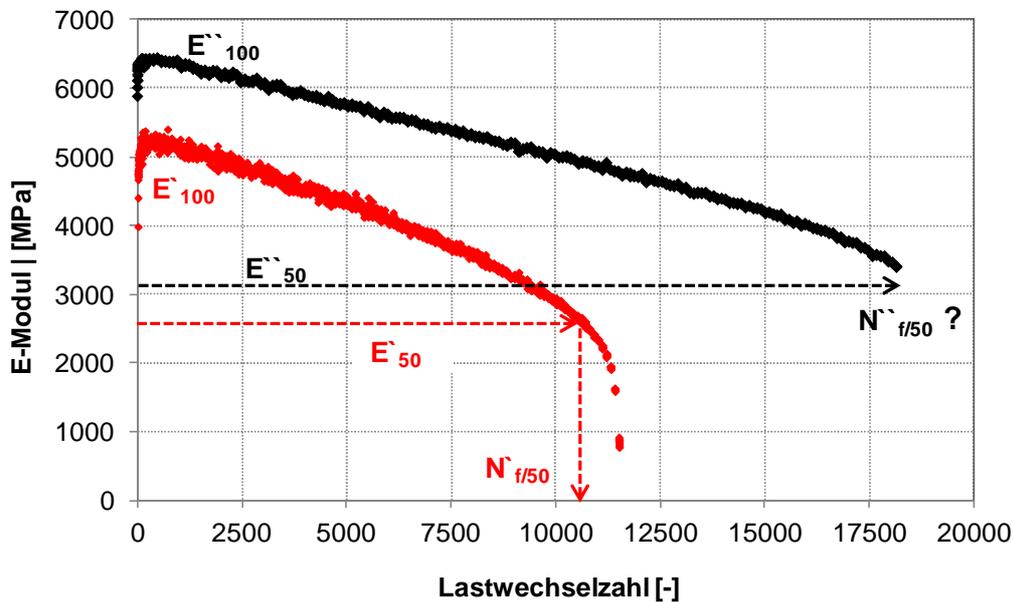


Abbildung 6. Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl, festgestellt in Zug-Schwellversuchen durchgeführt bei 10 °C (schwarz) und 20 °C (rot).

b) Energiebasierte Ermüdungskriterien

Neben dem konventionellen, empirisch basierten Ermüdungskriterium, haben sich andere Auswertemethoden etabliert, welche die Veränderung der Primärwirkungen (Spannung, Dehnung) während einer Ermüdungsprüfung zu Grunde legen. Als aussagekräftige Kenngröße gilt die dissipierte Energie (vgl. Shen & Carpenter, 2007).

Als dissipierte Energie werden jene energetischen Anteile zusammengefasst, die in einem Belastung-Entlastungszyklus verbraucht werden, in Form von mechanischer Arbeit, Wärmeerzeugung oder Materialschädigung (Rissbildung).

Die dissipierte Energie errechnet sich für ein Volumenelement je Belastungszyklus aus dem Produkt der Spannungsamplitude $\sigma_{0,i}$, der Dehnungsamplitude $\varepsilon_{0,i}$ und dem Sinus des Phasenwinkels φ_i (Gl. 4):

$$W_i = \pi \cdot \sigma_{0,i} \cdot \varepsilon_{0,i} \cdot \sin\varphi_i \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

- W_i : dissipierte Energie je Volumenelement und Belastungszyklus i [J/m^3],
- $\sigma_{0,i}$: Spannungsamplitude [MPa],
- $\varepsilon_{0,i}$: Dehnungsamplitude [-],
- φ_i : Phasenverschiebungswinkel [°].

Bei einem ideal elastischen Material wird die gesamte Energie, die während der Belastung in den Probenkörper eingebracht wird, bei Entlastung vollständig zurückgestellt. Es gibt keinen Energieverlust bzw. keine Energiedissipation, die Belastungskurve in Spannungs-Dehnungsdiagramm ist mit der Entlastungskurve ident. Bei einem visko-elastischen Material wie Asphalt folgen Entlastungs- und Belastungskurve von einem Belastungszyklus unterschiedlichen Wegen, wobei ein Teil der Energie durch die viskose Verformung verbraucht, d. h. dissipiert wird. In einem Spannungs-Dehnungsdiagramm erscheint der Belastungszyklus als eine Ellipse (Hysteresis), die nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822–1880) Lissajous-Figur genannt wird. Die der Ellipse eingeschriebene Fläche entspricht der dissipierten Energie (Abbildung 7).

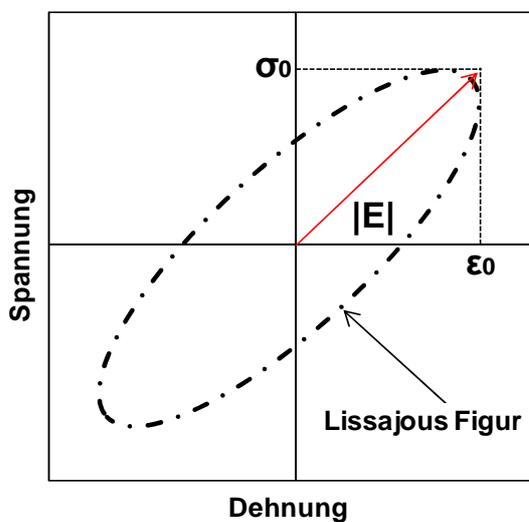


Abbildung 7. Darstellung von einem Belastungszyklus in Spannungs-Dehnungsdiagramm bei einem visko-elastischen Material wie Asphalt.

Die dissipierte Energie ist ein hervorragender Indikator für die Änderung der mechanischen Eigenschaften während der zyklischen Belastung, weil die Veränderung von primären Materialparametern wie Spannungs- oder Dehnungsamplitude und Phasenwinkel abhängt. Die Energie, die während eines Belastungszyklus dissipiert wird, ist nicht ausschließlich für die Materialschädigung verantwortlich, aber der Großteil der Änderung der dissipierten Energie zwischen zwei betrachteten Lastwechseln führt zur Rissausweitung und damit zur Materialermüdung (Shen et al., 2006; Wistuba & Isailović, 2014).

Aufgrund der fortschreitenden Schädigung während der zyklischen Belastung und infolge der Zunahme der Dehnungsamplitude steigt die dissipierte Energie mit steigender Lastwechselzahl in einer kraftgeregelten Ermüdungsprüfung kontinuierlich an. Hingegen sinkt die dissipierte Energie in einem weggeregelten Versuch wegen der abnehmenden Spannungsamplitude.

Unter Anwendung des Prinzips der dissipierten Energie entwickelte Hopman (1989) ein Verfahren für die Auswertung von Ermüdungsprüfungen auf Grundlage der Energierate („Energy Ratio“, ER). Die Energierate ist der Quotient aus den dissipierten Energien zu Versuchsbeginn und zum n-ten Lastwechsel, multipliziert mit der Lastwechselzahl n:

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} [-] \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

ER(n): Energierate (Energy Ratio) beim Lastwechsel n [-],

W_0 : dissipierte Energie zu Versuchsbeginn [J/m^3],

W_n : dissipierte Energie beim Lastwechsel n [J/m^3].

Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Verlauf der Energierate während einer 4-Punkt-Biegeprüfung bzw. während einer einaxialen Zug-Schwellprüfung. In der weggeregelter Ermüdungsprüfung unter 4-Punkt-Biegung (links) weist die Energierate von Versuchsbeginn an einen quasi-linearen Anstieg auf und wächst erst nach einer längeren Versuchsphase überproportional an. Man geht davon aus, dass sich ab dem Wendepunkt erste Makrorisse im Probekörper bilden, die zum raschen Bruch führen. Der Zeitpunkt des Wendepunktes wird als Erreichen der Ermüdungswiderstandes definiert und die zugehörige Lastwechselzahl als Prüfergebnis N_{Makro} herangezogen.

In kraftgeregelten Prüfungen weist die Energierate von Prüfungsbeginn an einen steilen Anstieg auf, der kontinuierlich abnimmt, bis kurz vor Versuchsende ein Maximum erreicht ist. Der Hochpunkt entspricht dem Zeitpunkt der Makrorissbildung, die zugehörige Lastwechselzahl wird als Ermüdungskriterium N_{Makro} definiert. Bis zum vollständigen Bruch des Probekörpers können im Regelfall noch wenige weitere Lastwechsel ertragen werden, wobei die erfolgte Makrorissbildung zu einem starken Abfall der Energierate führt (Abbildung 8, rechts).

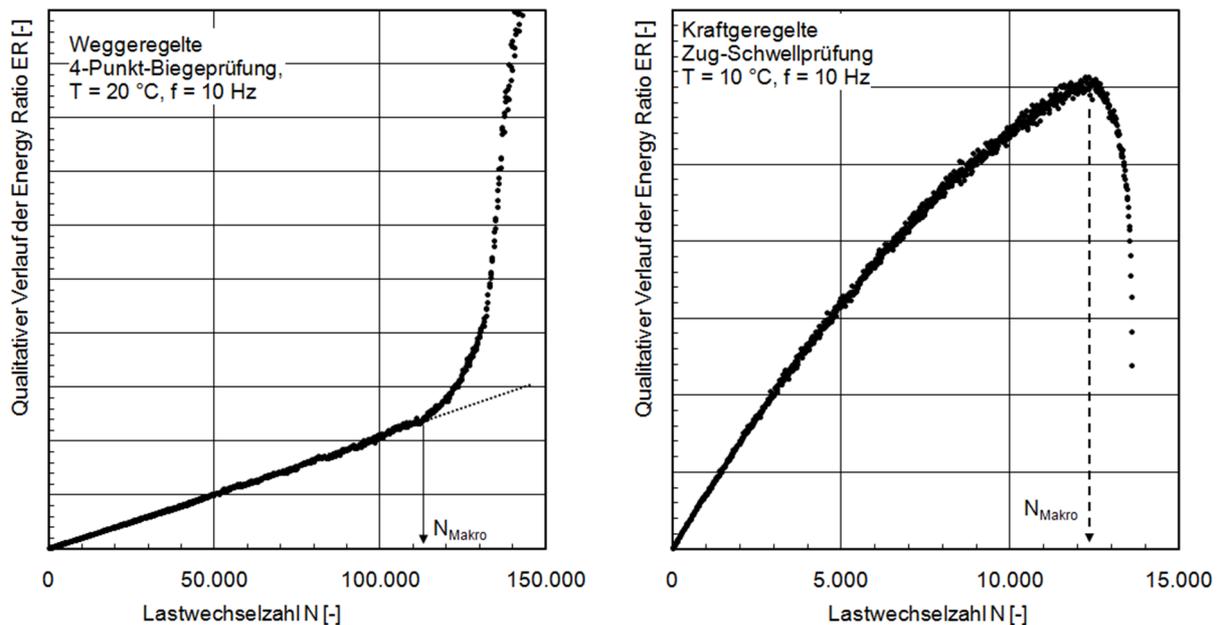


Abbildung 8. Verlauf der Energieraten während eines weggeregelten 4-Punkt-Biegeversuchs (links) und eines kraftgeregelten Zug-Schwellversuchs (rechts) und Definition der Lastwechselzahlen bei Makrorissbildung N_{Makro} (Mollenhauer & Wistuba, 2011).

Bei Annahme eines während der Ermüdungsprüfung konstanten Phasenwinkels kann die Energierate von Hopman (1989) vereinfacht werden und ist proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl n und dem E-Modul zu diesem Zeitpunkt.

Es gilt:

$$ER(n) = n \cdot |E|_n \text{ [MPa]}$$

Gl. 6

mit:

$ER(n)$: Energierate beim Lastwechsel n [MPa],

n : Lastwechselzahl [-],

$|E|$: E-Modul [MPa].

Der Verlauf der Energierate entspricht in diesem Fall dem Verlauf in Abbildung 8 rechts, sowohl für weggeregelte als auch für kraftgeregelte Ermüdungsprüfungen. Der Hochpunkt der Kurve entspricht dem Zeitpunkt der Makrorissbildung, die zugehörige Lastwechselzahl wird als Ermüdungskriterium N_{Makro} definiert.

2.2.3 Scherfestigkeit und Scherermüdung

Verkehrsbelastung und witterungsbedingte Einwirkungen können an der Schichtgrenze extreme Beanspruchungen bewirken. Neben Scherbeanspruchungen, die durch Achsüberrollung, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge hervorgerufen werden können, treten in dünnen Deckschichten zusätzliche Zugspannungen auf (siehe Abbildung 9), die den Schichtenverbund beeinträchtigen können.

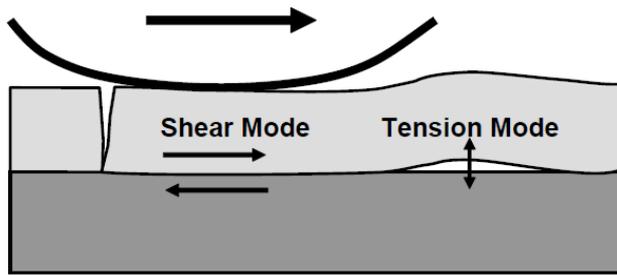


Abbildung 9. Scher- und Zugbeanspruchungen, die durch Achsbelastung an der Schichtgrenze entstehen (Raab & Partl, 2004).

Unter Berücksichtigung solcher Spannungszustände wurden in Vergangenheit verschiedene Prüfmethoden zur Beurteilung des Schichtenverbundes entwickelt, in welchen ein Probekörper entweder einem direkten Abscheren oder einem direkten Ziehen oder auch einer Kombination aus Abscheren und Torsion ausgesetzt ist (Abbildung 10).

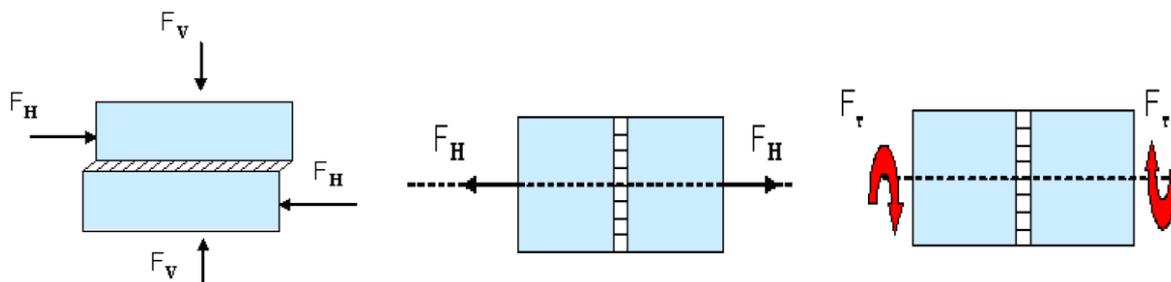


Abbildung 10. Meist verwendete Belastungsvorgänge zur Beurteilung der Qualität des Schichtenverbundes; direktes Abscheren (links), direktes Ziehen (mittig) und Kombination aus Abscheren und Torsion (rechts) (Al-Qadi et al., 2008).

Zur Bewertung von Scherfestigkeit und Scherermüdungswiderstand des Schichtenverbundes sind Prüfungen unter direktem Abscheren international am weitesten verbreitet. In Abhängigkeit von der Art der Scherbelastung können Scherprüfungen entweder statisch oder zyklisch durchgeführt werden.

Die statischen Abscherversuche dienen der Prüfung der Scherfestigkeit des Schichtenverbundes. Dazu wird ein Probekörper auf einer Seite der Schichtengrenze fixiert und an der Grenzfläche mit einer konstanten Vorschubkraft bzw. -geschwindigkeit (F_H , Abbildung 10, links) bis zum Bruch abgeschert. Als Ergebnis und als Kriterium für die Beurteilung des erzielten Schichtenverbundes wird die maximal erreichte Kraft bzw. Scherspannung als Kennwert für die Scherfestigkeit herangezogen.

Weltweit gibt es viele Variationen an statischen Abscherversuchen, beispielweise:

- Abscherversuch nach Leutner (FGSV, TP Asphalt-StB Teil 80),
- Prüfvorrichtung der EMPA/Schweiz (Raab & Partl, 2004),
- Florida DOT shear test (Al-Quadi et al., 2008),

- LBISD Prüfung (Woods, 2004) oder
- Iowa Simple Shear Test Device (Sholar et al., 2004).
- ASTRA Prüfung (Santagata & Canestrari, 1994),
- Prüfvorrichtung nach Romanoschi (1999),
- NCAT Prüfung (West et al., 2005).

Die statischen Abscherversuche unterscheiden sich bezüglich der Prüfbedingungen, wie z. B. in der Probekörpergeometrie, im Scherbackenabstand, in der Prüftemperatur oder Vorschubkraft bzw. -geschwindigkeit. Einige Prüfvorrichtungen bieten die Möglichkeit, zusätzlich zum Abscheren eine Normalspannung während des Versuchs aufzubringen (siehe F_v , Abbildung 10, links). Zu den statischen Prüfverfahren besteht ein großer internationaler Erfahrungshintergrund und es wurden bereits zahlreiche unterschiedliche Verbundsysteme mit Variation der Haftvermittlermengen und -arten auf unbehandelten und vorbehandelten Unterlagen untersucht. Die maßgebenden materialspezifischen und prüftechnischen Einflussfaktoren auf die Scherfestigkeit des Schichtenverbundes gelten daher als bekannt. Dazu zählen folgende Erkenntnisse:

- Mit zunehmender Temperatur sinkt die Scherfestigkeit des Schichtenverbundes (Sholar et al., 2004; Canestrari & Santagata, 2005) und Materialverzahnung- und -reibung gewinnen gegenüber der Schichtenverklebung an Bedeutung.
- Asphaltstruktur und Oberflächenrauheit haben einen großen Einfluss auf den Schichtenverbund. Raue und gefräste Oberfläche wirken sich erhöhend auf die Scherfestigkeit aus (Al-Quadi et al., 2008). Auch eine feinkörnige Struktur und eine enggestufte Korngrößerverteilung begünstigen den Schichtenverbund (Sholar et al., 2002; West et al., 2005).
- Die Untersuchungen von West et al. (2005) haben gezeigt, dass eine aufgebrauchte Normalspannung einen Anstieg der Scherfestigkeit bewirkt.
- Art und Menge des Vorspritzmittels können den Schichtenverbund stark beeinflussen. Besonders polymer modifizierte Emulsionen (Muench & Moomaw, 2008) und Emulsionen mit einem niedrigen Anteil an Wasser (Deysarkar & Tandon, 2005) bewirken einen besseren Verbund. Die Untersuchungen des Einflusses der Vorspritzmittelmenge auf die Scherfestigkeit des Schichtenverbundes zeigen inkonsistente Ergebnisse. Mohammad et al. (2005) behaupten, dass es für einige Emulsionen eine optimale Aufbringmenge gibt, mit der ein bestmöglicher Verbund erreicht werden kann. Die Aufbringung von zu viel Emulsion kann dazu führen, dass das aufgespritzte Bitumen als „Schmierfilm“ zwischen den Schichten wirkt, wodurch die Übertragung der Scherkräfte reduziert wird (Muench & Moomaw, 2008). Kruntcheva et al. (2006) weisen darauf hin, dass eine trockene und saubere Oberfläche ohne Vorspritzmittel einen ähnlichen Schichtenverbund erreichen kann wie dieselbe Oberfläche mit einer normierten Vorspritzmittelmenge. Einige Emulsionen führen sogar zu schlechterem

Schichtenverbund als bei der Verbundvariante ohne Vorspritzmittel (Muench & Moomaw, 2008).

Jeder der oben aufgelisteten statischen Abscherversuche eignet sich grundsätzlich zur Beurteilung der Scherfestigkeit des Schichtenverbundes, jedoch hat sich bisher kein Prüfverfahren international durchgesetzt. Die Vielzahl an Prüfverfahren mit deren unterschiedlichen Prüfbedingungen führt zu einer mangelnden Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Im Extremfall sind die Prüfergebnisse widersprüchlich.

Trotz ihrer Eignung zur Untersuchung der Scherfestigkeit des Schichtenverbundes und ihrer einfachen und schnellen Durchführung, können die Prüfergebnisse der statischen Abscherversuche nur bedingt für weitere Analysen verwendet werden.

Aus Gründen der Komplexität der Prüfsteuerung und des Prüfaufwandes wurden bisher nur wenige zyklische Prüfungen für die Beurteilung des Schichtenverbundes entwickelt, die eine realistische Simulation des veränderlichen Spannungszustandes im Schichtenverbund infolge einer wiederholten und ortsveränderlichen Belastung ermöglichen. Die entwickelten zyklischen Prüfverfahren unterscheiden sich nicht nur bezüglich der Prüfbedingungen, sondern auch bezüglich der Art der Belastung (direktes Scheren, Torsion), der Belastungsrichtung, der Möglichkeit der Aufbringung einer Normalspannung und der Auswertung der Prüfergebnisse.

Wie bei den statischen Abscherversuchen, wird bei den meisten zyklischen Prüfverfahren für die Bewertung des Schichtenverbundes das Prinzip des direkten Scherens ohne Aufbringung oder in Kombination mit einer Normalspannung verwendet (Crispino et al., 1997; Donovan et al., 2000; Sanders, 2001; Carr, 2001; Wellner & Ascher, 2007; Diakhaté et al., 2010; Górszczyk und Malicki, 2012). Ein Beispiel für die Prüfvorrichtung „Shear Box“, mit deren Hilfe ein Probekörper einem direkten zyklischen Scheren unter einer aufgetragenen Normalspannung ausgesetzt ist, zeigt die Abbildung 11 (Sanders, 2001).

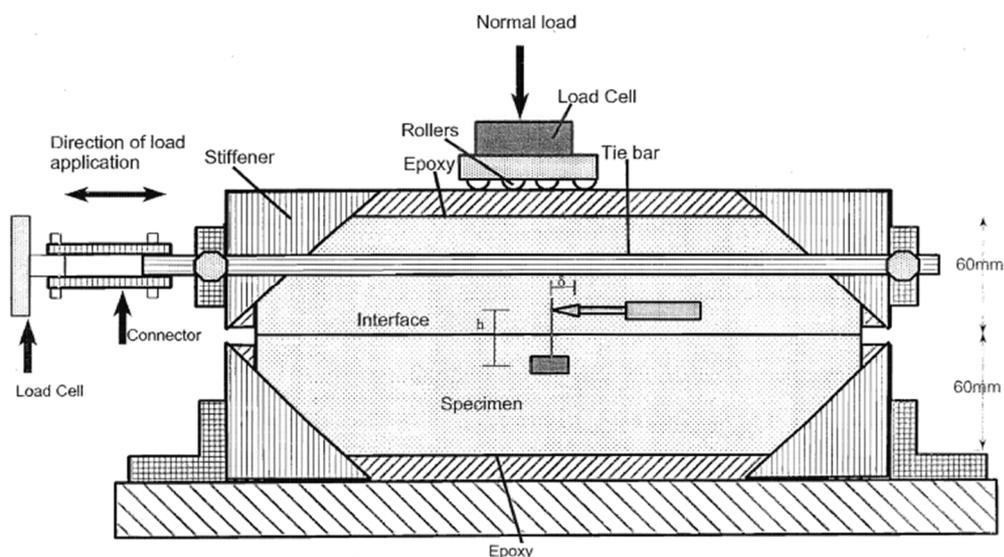


Abbildung 11. Direkter zyklischer Scherversuch mit zusätzlicher Applikation einer Normalspannung (Shear Box, Sanders, 2001).

Neben direkten wurden in der Vergangenheit auch indirekte Scherversuche entwickelt, wo die Scherbelastung nicht parallel zur Scherfläche erfolgt (Romanoschi & Metcalf, 2000; Wheat, 2007; Tozzo, et al., 2014). Durch die Variation der Lage des Probekörpers bzw. Schichtenverbundes in vertikaler Richtung (Veränderung des Winkels A, Abbildung 12), verändert sich das Verhältnis zwischen der wirkenden Normal- und der Scherkraft. So können verschiedene Spannungszustände simuliert werden.

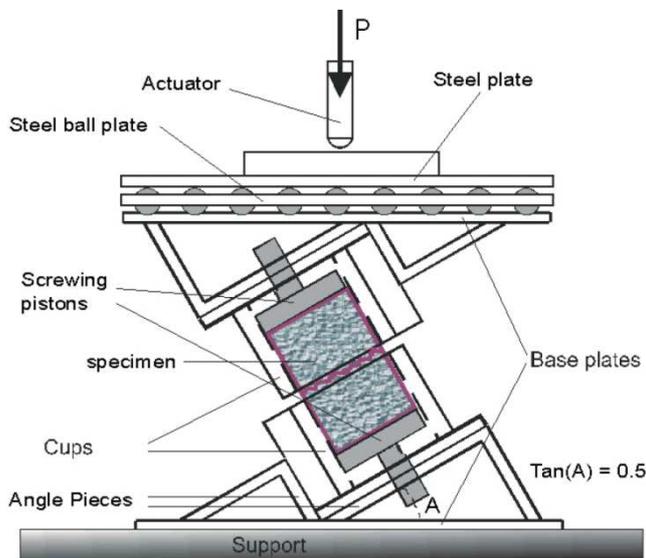


Abbildung 12. Indirekter zyklischer Abschersversuch von Romanoschi und Metcalf (2000).

Alternativ zur Ermittlung der Scherfestigkeit kann der Schichtenverbund auch in einer zyklischen Biegebeanspruchung (de Bondt, 1999; Kim et al., 2011) oder in einer zyklischen Torsionsbeanspruchung (Sutanto, 2009) beurteilt werden. Ein Beispiel einer Schersteifigkeitsprüfung unter zyklischer Vier-Punkt-Biegung zeigt die Abbildung 13. Die Überprüfung des Schichtenverbundes mittels Torsionsversuch ist in Abbildung 14 dargestellt.

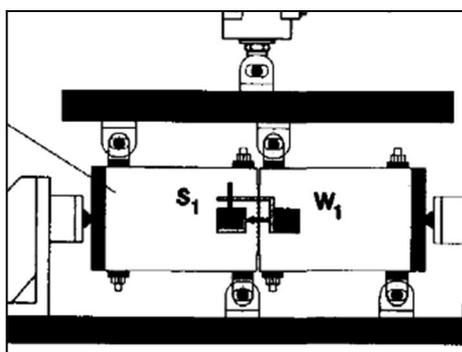


Abbildung 13. Ermittlung der Schersteifigkeit unter zyklischer Vier-Punkt-Biegung (de Bondt, 1999).

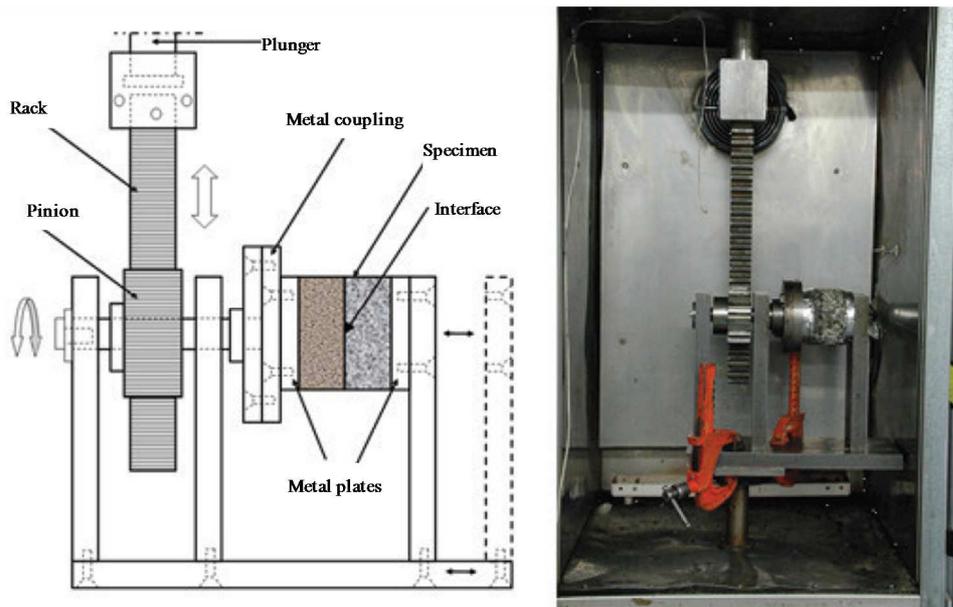


Abbildung 14. Zyklischer Torsionsversuch für die Bewertung des Schichtenverbundes (Sutanto, 2009).

Mit diesen Prüfverfahren wurden Kennwerte zur Schersteifigkeit und zum Scherermüdungswiderstand bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen bestimmt.

Einen Vergleich zwischen den Ergebnissen aus statischen Abscherversuchen und zyklischen direkten Scherversuchen zeigt die Abbildung 15 (Crispino et al., 1997). Daraus geht hervor, dass die Schersteifigkeiten stark von der Prüftemperatur abhängen und die mit dem zyklischen Scherversuch erhaltenen Schersteifigkeiten ungefähr dreimal so groß sind wie die Vergleichswerte aus dem statischen Abscherversuch.

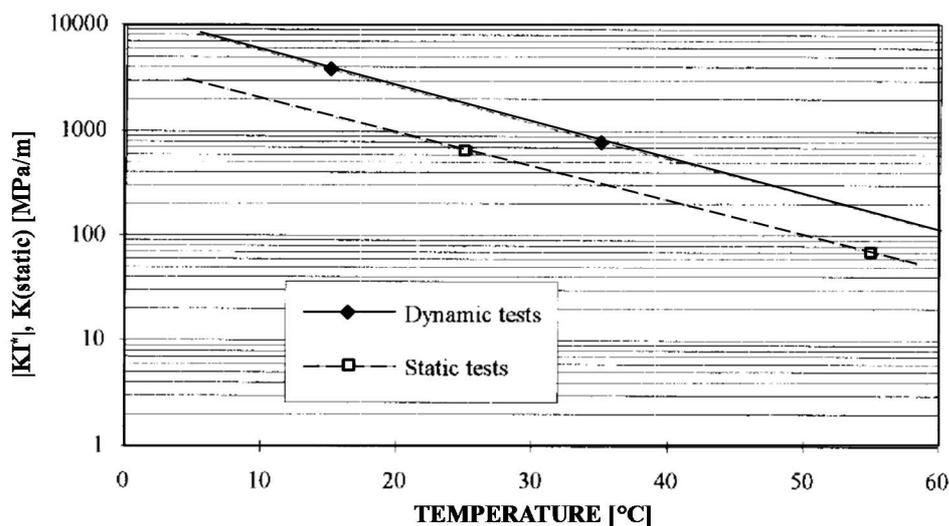


Abbildung 15. Temperaturabhängigkeit der Schersteifigkeiten ermittelt mit dem statischen Abscherversuch (gestrichelte Linie) und mit dem zyklischen Scherversuch (durchgehende Linie) (Crispino et al., 1997).

Diakhaté et al. (2010) führten unter Verwendung des "Double Shear Test" (ohne Aufbringung einer Normalspannung) zahlreiche kraftgeregelte Ermüdungsprüfungen an zwei Varianten des Schichtenverbundes bei zwei Temperaturen durch (siehe Abbildung 16, links). Sie konnten zeigen, dass sich ein Ermüdungsvorgang infolge der zyklischen Beanspruchung einstellt und die Schersteifigkeit mit steigender Lastwechselanzahl sinkt (Abbildung 16, rechts). Da es in diesem Fall um einen kraftgeregelten Versuch handelt, steigt der Phasenwinkel während des Versuchs infolge der voranschreitenden Materialschädigung an (siehe Abbildung 16, rechts). Für die Bestimmung der Lastwechselzahl $N_{f/50}$ (auch N_{50}) beim Eintritt des Ermüdungsversagens wurde das konventionelle Ermüdungskriterium (Lastwechselzahl bei Abfall der Ausgangssteifigkeit um 50 %) verwendet. Anhand der Prüfergebnisse bei verschiedenen Spannungsamplituden wurde die Ermüdungsfunktion (Wöhler-Linie, siehe dazu Kapitel 2.2) erzeugt (Abbildung 17) und damit verschiedene Varianten des Schichtenverbundes hinsichtlich ihres Ermüdungswiderstandes bewertet. Wie bei den statischen Abscherversuchen sinkt der Ermüdungswiderstand mit zunehmender Temperatur von 10 °C auf 20 °C. Die Aufbringung der Emulsion zwischen den Schichten bewirkt eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens bei gleicher Temperatur (siehe Abbildung 17).

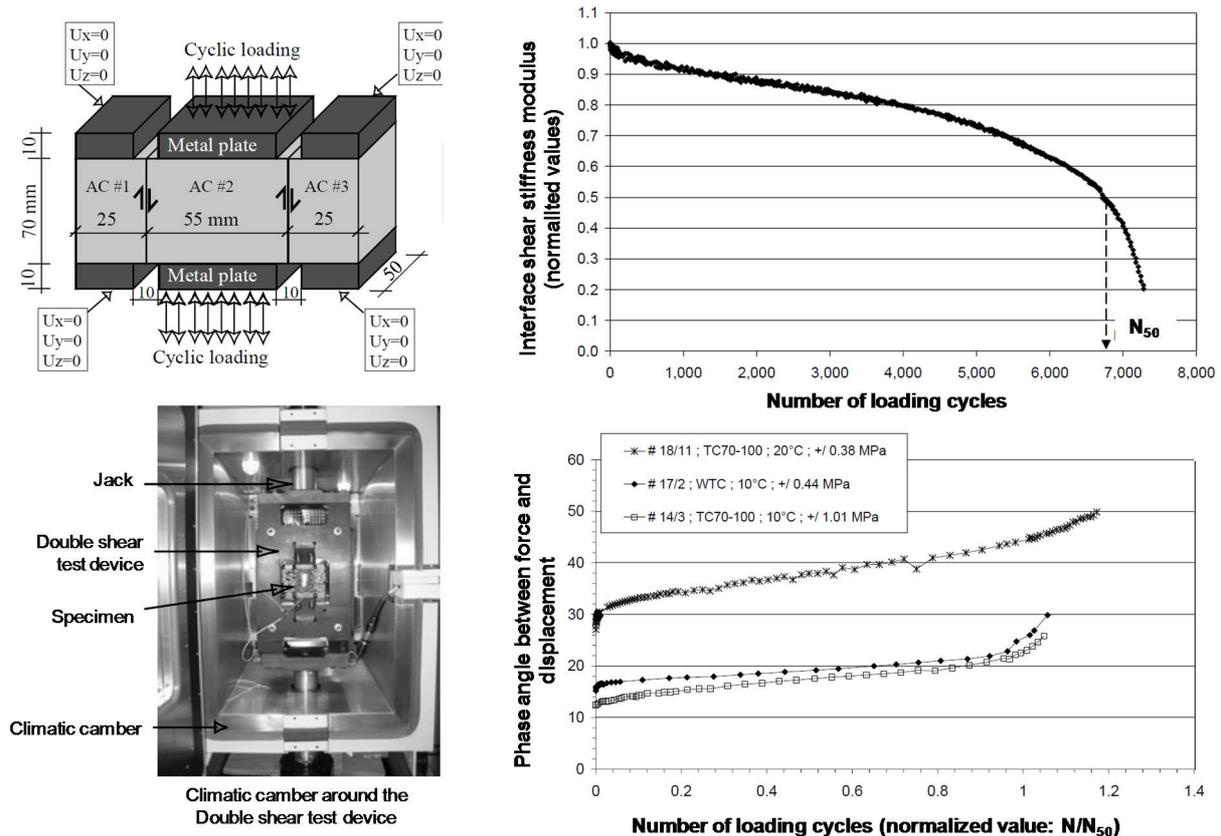


Abbildung 16. Prüfvorrichtung des "Double Shear Test" (links); resultierende Verläufe von Schersteifigkeit und Phasenwinkel als Funktion der Lastwechselanzahl (rechts) (Diakhaté et al., 2010).

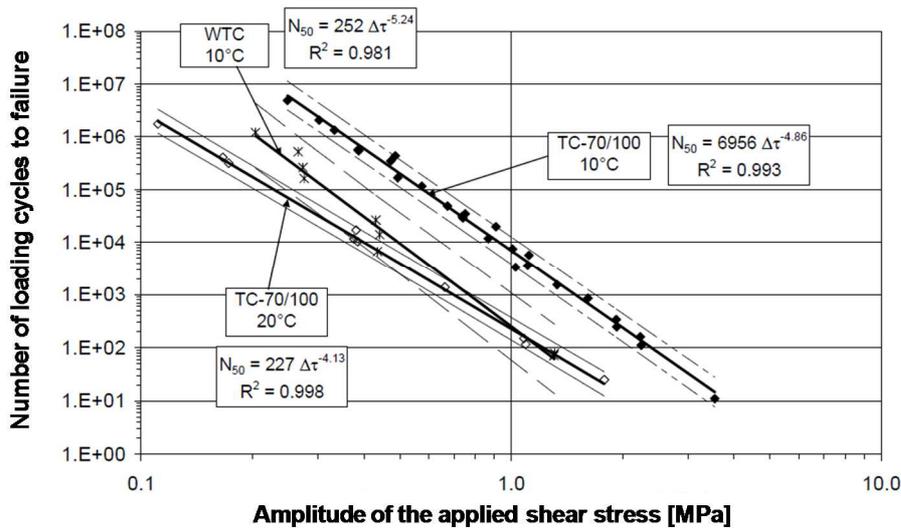


Abbildung 17. Ermüdungsfunktionen der geprüften Verbundvarianten zum Schichtenverbund bei 10 °C und 20 °C (bei 10 Hz): TC = Verbundvariante mit Emulsion; WTC = Verbundvariante ohne Emulsion (Diakhaté et al., 2010).

Górszczyk und Malicki (2012) verglichen die Scherfestigkeiten aus statischen Abscherversuchen mit den in zyklischen Scherversuchen (ohne Normalspannung; bei 20 °C und 0,833 Hz) ermittelten Ermüdungskennwerten. Als Ergebnis halten sie fest, dass die Reihung der Prüfergebnisse aus beiden Versuchstypen annähernd gleich ist, die Verbundvariante mit Emulsion zeigt fast gleiche Werte wie die Variante ohne. Das Einsetzen einer Geokunststoffbewährung schwächt deutlich die Scherfestigkeit und den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes.

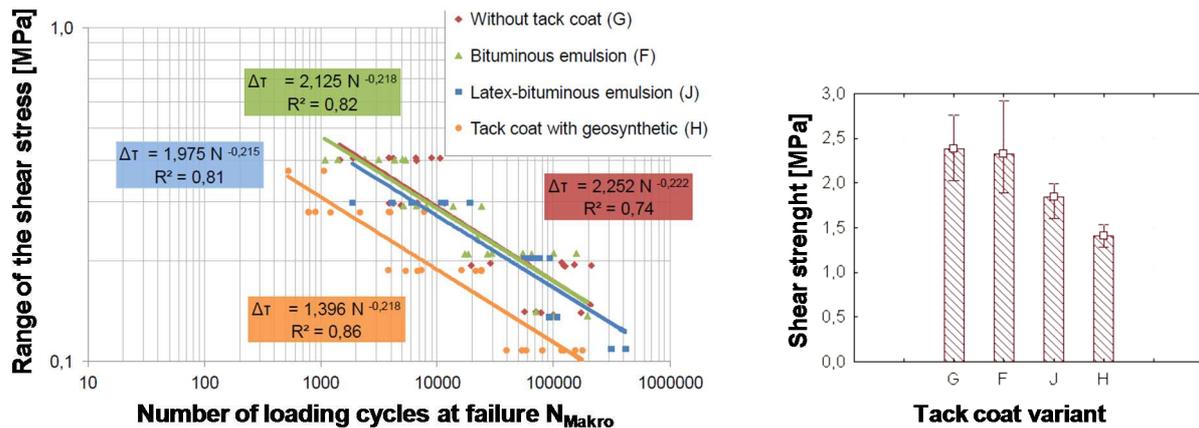


Abbildung 18. Ermüdungsfunktionen aus zyklischen Scherversuchen für verschiedene Verbundvarianten an Schichtenverbund (links); Scherfestigkeiten aus statischen Abscherversuchen für die gleichen Verbundvarianten (rechts) (Górszczyk & Malicki, 2012).

Romanoschi & Metcalf (2000) und Tozzo et al. (2014) verwendeten auch für die Ermüdungsbeurteilung des Schichtenverbundes den kraftgeregelten, indirekten, zyklischen Scherversuch (siehe Abbildung 12). Aufgrund der Prüfgeometrie beträgt die Scher-

spannung die Hälfte des Werts der Normalspannung. Zwei Varianten des Schichtenverbundes wurden bei einer Temperatur von 25 °C und bei einer Frequenz von 5 Hz sowie bei verschiedenen Spannungen untersucht. Die Prüfergebnisse für zwei Varianten des Schichtenverbundes sind in Abbildung 19 dargestellt, links ohne und rechts mit Emulsion als Vorspritzmittel. Die Zeitpunkt der Ermüdung des Schichtenverbundes ist als Lastwechselzahl definiert, bei welcher die gesamte horizontale, bleibende Verformung 6 mm erreicht wird.

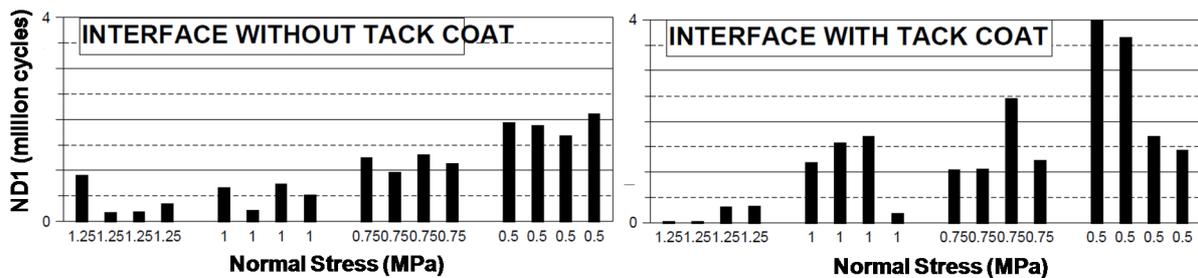


Abbildung 19. Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes im kraftgeregelten, indirekten, zyklischen Scherversuch: ohne Emulsion (links) und mit Emulsion (rechts) (Romanoschi & Metcalf, 2000).

Die Untersuchungen zeigen, dass die Probekörper der Verbundvariante ohne Emulsion im Durchschnitt weniger Lastwechselzahl je 1 mm Anstieg an horizontaler Verformung brauchen. Das lässt darauf schließen, dass das Ermüdungsverhalten der Verbundvariante mit Emulsion besser ist. Die höhere Prüfstreuung bei der Verbundvariante mit Emulsion begründen die Autoren durch die zufälligen Variationen der Emulsionsfilmdicke bei verschiedenen Probekörpern. Je höher die applizierte Normalspannung ist, desto besser ist der Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes. Dieses Erkenntnis wurde durch die Untersuchungen mit gleicher Prüfvorrichtung von Tozzo, et al. (2014) bestätigt (siehe Abbildung 20). Die Prüfvorrichtung war in diesem Fall so eingerichtet, dass der Wert der Scherspannung 1,73 Mal größer als der Wert der Normalspannung war.

Sutanto (2009) beurteilte den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes mittels Torsionsversuch (siehe Abbildung 14). Er führte kraftgeregelte, zyklische Torsionsversuche bei einer Frequenz von 2 Hz und bei zwei Temperaturen durch (20 °C und 30 °C). Abbildung 21 (links) zeigt die Verläufe der normalisierten Schersteifigkeit bei drei verschiedenen Scheramplituden. Je größer die Scheramplitude ist, desto schneller ermüdet der Schichtenverbund. Aus Abbildung 21 (rechts) ist zu entnehmen, dass der Ermüdungswiderstand bei 20 °C höher ist.

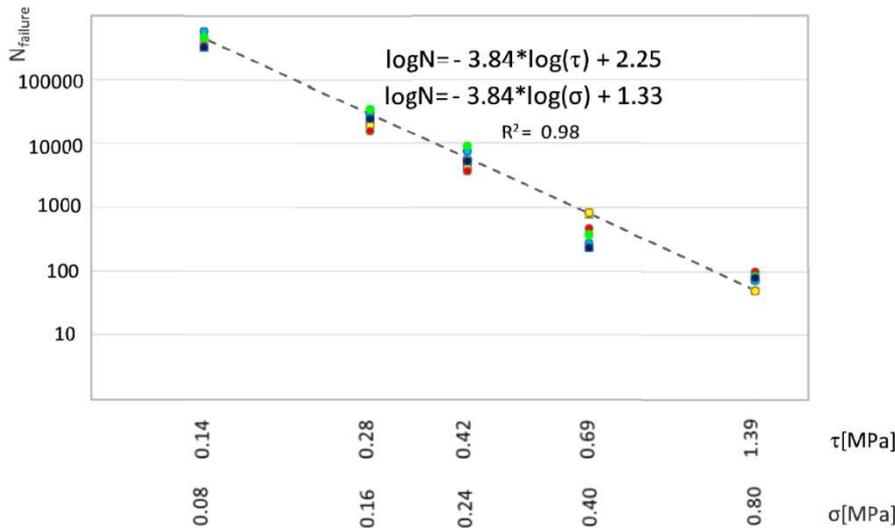


Abbildung 20. Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes im kraftgeregelten, indirekten, zyklischen Scherversuch bei verschiedenen Normalspannungen und bei 20 °C (Tozzo et al. 2014).

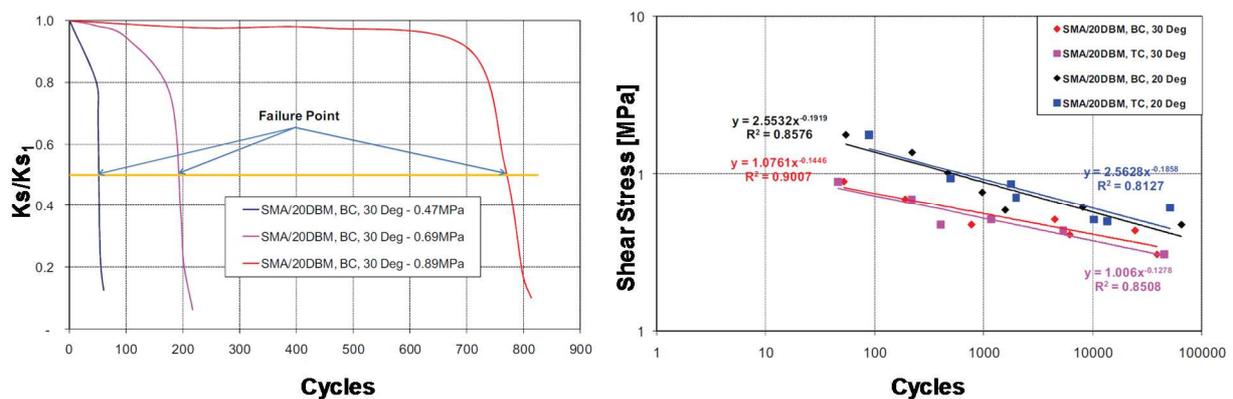


Abbildung 21. Verlauf der normalisierten Schersteifigkeiten im zyklischen Torsionsversuch bei drei Scheramplituden als Funktion der Lastwechselzahl (links); Wöhler-Linien der geprüften Verbundvarianten bei 20 °C und 30 °C (rechts) (Sutanto, 2009).

Die hier aufgelisteten zyklischen Prüfverfahren bieten grundsätzlich die Möglichkeit, über eine zyklische Lasteinleitung dauerhafte Scherbeanspruchungen in den Probekörper einzuleiten. Es konnte damit eine Verschlechterung des Schichtenverbundes infolge fortschreitender Belastung festgestellt werden. Mit Hilfe einiger Prüfverfahren konnte die Ermüdungsfunktion (Wöhler-Linie) erstellt werden, womit die Beurteilung des Ermüdungswiderstandes eines Schichtenverbundes unter verschiedenen Randbedingungen (Verbundvariante, Temperatur, Normalspannung, etc.) möglich ist.

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Überblick

Im Rahmen dieses zweiten Teils des Forschungsprojektes soll erstmals und systematisch die Frage geklärt werden, ob zur Beurteilung des Dauerverhaltens des Schichtenverbundes ein direkter, zyklischer Scherversuch entwickelt werden kann. Als Grundlage wird der an der TU Dresden zur Prüfung der Schersteifigkeit eingesetzte, zyklische Scherversuch herangezogen, dessen Prüfsystem speziell für eine Dauerbeanspruchung adaptiert werden soll.

Die Neuentwicklung eines Prüfverfahrens für die Scherermüdung umfasst die aufwändige Erprobung und Festlegung einer geeigneten Prüfsystematik zur Ansprache des Ermüdungswiderstandes, als auch die Validierung in Reihenuntersuchungen an unterschiedlichen Verbundvarianten. Mit einer Anzahl von ca. 600 Einzelversuchen soll ein ausreichender Hintergrund für eine statistisch abgesicherte Bewertung des Prüfverfahrens geschaffen werden.

Zur Bearbeitung sind folgende Arbeitspakete vorgesehen:

- Beschaffung des Materials und die Herstellung von Probekörpern im Labor: Die Asphaltmischgutproben stammen aus der industriellen Produktion an Asphaltmischwerken. An allen Proben werden sämtliche konventionelle Materialkennwerte und die Scherfestigkeiten im statischen Abscherversuch bestimmt.
- Erarbeitung einer Prüfsystematik zum Zwecke der zyklischen Scherermüdungsprüfung.
- Untersuchungen zum Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes infolge Dauerbeanspruchung: Es werden drei Verbundvarianten mit zweifacher Variation des Vorspritzmittels bei drei bis fünf Temperaturen, drei Normalspannungen und drei Belastungsamplituden mit dreifacher Belegung der Ergebnisse durchgeführt (insgesamt ca. 600 Einzelprüfungen). Damit wird ein Bewertungshintergrund geschaffen. Die mittels zyklischer Scherprüfung erzielten Ergebnisse werden jenen aus statischen Abscherversuchen gemäß TP Asphalt-StB Teil 80 gegenübergestellt.
- Prüfanleitung: Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise zur Scherermüdungsprüfung und Festlegung der Prüfeinstellungen.

3.2 Eingesetzte Baustoffe und Festlegung der Verbundvarianten

Alle Prüfungen zur Ansprache der Scherfestigkeit und des Ermüdungswiderstandes mittels statischen Abscherversuchen und zyklischen Scherversuchen erfolgen unter Verwendung von folgenden regelwerkskonformen Asphaltmischgut-Varianten:

- Asphaltmischgut für Asphalttragschichten der Sorte AC 22 T S,
- Asphaltmischgut für Asphaltbinderschichten der Sorte AC 16 B S und

- Asphaltmischgut für Deckschichten der Sorte SMA 11 D S.

Alle Asphaltmischgut-Varianten stammen aus dem Mischwerk der Hermann Wegener GmbH & Co. in Braunschweig. Die Spezifikationen der Asphaltmischgut-Varianten sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1. Zusammensetzung und Eigenschaften der berücksichtigten Asphaltmischgut-Varianten

	Merkmal	Massenprozent	Verbundvariante		
			AC 22 T S	AC 16 B S	SMA 11 S
Korngrößenverteilung	≤ 0,063 mm	M.-%	5	7,1	10
	0,063 - 0,125 mm	M.-%	1,2	1,9	1,8
	0,125 - 0,25 mm	M.-%	2,7	2,6	2,2
	0,25 - 1 mm	M.-%	11,4	11,3	7,9
	1 - 2 mm	M.-%	8,2	7,4	5,3
	2 - 5,6 mm	M.-%	12,2	14,2	15,7
	5,6 - 8 mm	M.-%	15,2	12,1	12,2
	8 - 11,2 mm	M.-%	14,3	19	40,6
	11,2 - 16 mm	M.-%	18,8	21,6	4,3
	16 - 22,4 mm	M.-%	9,9	2,8	-
	22,4 - 31,5 mm	M.-%	1,1	-	-
	Summe	M.-%	100	100	100
	Zusatz Faserstoffe	M-%	nein	nein	ja
Gesteinsart	-	Kalkstein	Basalt	Basalt	
Zugabe Asphaltgranulat	M.-%	30	-	-	
Bindemittelsorte	-	50/70	25/55-55 A	25/55-55 A	
Bindemittelgehalt	M.-%	4,1	4,7	6,0	
Rohdichte	g/cm ³	2,564	2,646	2,562	
Raumdichte	g/cm ³	2,374	2,475	2,461	
Hohlraumgehalt	V.-%	7,4	6,5	3,9	

Zur Untersuchung des Schichtenverbundes werden zweischichtige Asphaltprobepplatten verdichtet und daraus sämtliche Asphalt-Probekörper gebohrt. Die Herstellung von 700 x 500 mm² großen Asphalt-Probepplatten erfolgt mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33.

Beim Walzsektor-Verdichtungsgerät wird zunächst das zu verdichtende Asphaltmischgut auf die vorgesehene Verdichtungstemperatur (bei Straßenbaubitumen 135 °C, bei Polymermodifizierten Bitumen 145 °C) gebracht und anschließend gleichmäßig auf das Einlegeblech in die auf 80 °C vorgeheizte, rechteckige Verdichtungsform gelegt. Anschließend wird der ebenfalls beheizte Walzsektor abgesenkt und erzeugt dann eine Druckspannung zwischen dem Sektor und dem zu verdichtenden Asphaltmischgut. Zeitgleich wird die Verdichtungsform horizontal hin- und her bewegt. Der dabei mitgeführte Walzsektor wird während des Vorgangs um seinen Drehmittelpunkt ausgelenkt und erzeugt eine Walzbewegung auf der Oberseite der Mischgutprobe. Der

Verdichtungsvorgang gliedert sich in zwei Verdichtungsdurchgänge. Während der *Vorverdichtung* wird die Verdichtungsarbeit der schwimmenden (Hochverdichtungs-) Einbaubohe des Straßenfertigers nachgestellt. Dazu wird der Walzsektor mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphaltplatte eine Last von 2,6 kN erreicht wird. Die dabei erreichte Plattenhöhe wird für weitere fünf Übergänge konstant gehalten. Danach wird der Walzsektor hochgefahren (0,5 mm / Übergang), bis die Platte vollständig entlastet ist. Mittels der *Hauptverdichtung* wird der Verdichtungsprozess der in situ eingesetzten Walzen simuliert. Zunächst werden zur Glättung der Oberfläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 0,52 kN aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zu Erreichen einer Maximalkraft von 19,5 kN gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. Abbildung 22 zeigt das am ISBS verwendete Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probeplatten (500 x 700 mm²).



Abbildung 22. Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probeplatten (500 x 700 mm²) (ISBS).

Die Herstellung der zweischichtigen Asphaltprobeplatten erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird die untere Mischgutschicht standardmäßig verdichtet und über Nacht abgekühlt. Für die Gewährleistung eines guten Verbundes wird am nächsten Tag zunächst die Bitumenemulsion gleichmäßig mit einer Schaumstoffrolle aufgebracht. Nach 2 bis 3 Stunden ist diese abgebunden und das dabei austretende Wasser verdunstet, so dass die zweite Asphaltenschicht standardmäßig eingefüllt und verdichtet werden kann. Dieses Herstellungsverfahren wird "heiß auf kalt" Verfahren genannt.

In diesem Projekt wurden drei Emulsionssorten für "heiß auf kalt" Einbau verwendet:

- eine kationische, polymermodifizierte Emulsion des Typs C60BP1-S mit 60 M.-% Bindemittelgehalt,

- eine kationische Emulsion des Typs C40BF1-S (Haftkleber) mit 40 M.-% Bindemittelgehalt und haftverbesserten Zusätzen und
- eine kationische Emulsion des Typs C60B1-S mit 60 M.-% Bindemittelgehalt.

Bei Herstellung von zweischichtigen Asphaltprobepplatten mit dem "heiß auf heiß" Verfahren wird unmittelbar nach der Verdichtung der unteren Mischgut, die zweite Schicht ohne Auftragen einer Bitumenemulsion hergestellt. Dadurch ist ein gegenseitiges Eindringen von Gesteinskörnungen in die benachbarte Schicht gewährleistet. Ein optimaler Schichtenverbund, der in diesem Fall durch eine ausgeprägte Verzahnung charakterisiert ist, ist die Folge. Um übermäßige Endverdichtung der ersten Schicht zu vermeiden, wird diese ausschließlich weggeregelt vorverdichtet. Durch die sofortige Herstellung der oberen Schicht wird die untere Schicht dadurch nachverdichtet und erreicht so den erforderlichen Verdichtungsgrad.

Nach der Abkühlphase werden aus der zweischichtig hergestellten Asphaltprobepplatte die benötigten zylindrischen Probekörper (ϕ 99 mm für den zyklischen Scherversuch und ϕ 150 mm für den statischen Abscherversuch) gebohrt (Abbildung 23).

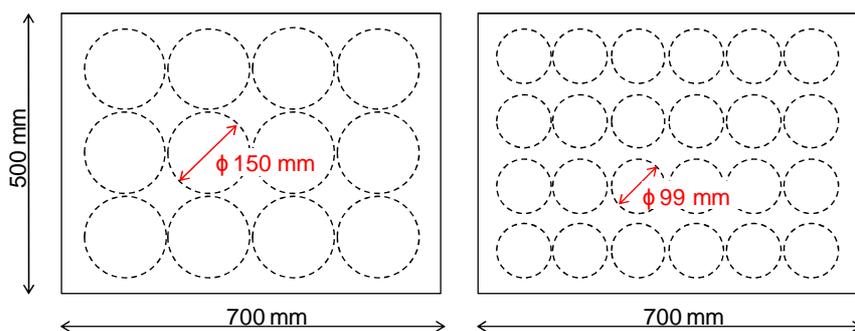


Abbildung 23. Bohrschema für die Probekörperentnahme aus den zweischichtig hergestellten Asphaltprobepplatten für die statischen Abscherversuch (links) und den zyklischen Scherversuch (rechts).

Durch die Variation von Asphaltmischgut, Bitumenemulsion und Verdichtungsverfahren ergeben sich insgesamt 11 Verbundvarianten (A bis K, siehe Tabelle 2), an denen die Einflüsse der jeweiligen Variationsparameter auf den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes bestimmt werden. Die statischen Abscherversuche zur Bestimmung der Scherfestigkeiten erfolgen nur an den Verbundvarianten A bis F.

Es gelten die Abkürzungen:

- D-D ... Deckschicht auf Deckschicht,
- D-B ... Deckschicht auf Binderschicht,
- B-T ... Binderschicht auf Tragschicht,
- D-D ... Deckschicht auf Deckschicht (Lagenverbund),
- B-B ... Binderschicht auf Binderschicht (Lagenverbund),
- T-T ... Tragschicht auf Tragschicht (Lagenverbund),

- H_{auf}H ... heiß auf heiß eingebaut und
- H_{auf}K ... heiß auf kalt eingebaut.

Tabelle 2. Berücksichtigte Verbundvarianten (A bis K)

Verbundvariante	Aufbau	Dicke der Asphalt-schichten [cm]	Emulsions-typ [g/m ²]	Emul-sions-menge [g/m ²]	Einbauart	
A	AC 16 B S auf AC 22 T S	5 cm auf	C60BP1-S	300	B-T	heiß auf kalt (H _{auf} K)
B		6 cm	C40BF1-S			
C	SMA 8 S auf AC 16 B S	4 cm auf	C60BP1-S	200	D-B	
D		5 cm	C40BF1-S			
E	AC 22 T S auf AC 22 T S	6 cm auf	C60BP1-S	300	T-T	
F		6 cm	C60B1-S			
G	AC 22 T S auf AC 22 T S	6 cm auf 6 cm	-	-	T-T	heiß auf heiß (H _{auf} H)
H	AC 16 B S auf AC 16 B S	5 cm auf 5 cm			B-B	
I	SMA 8 S auf SMA 8 S	4 cm auf 4 cm			D-D	
J	AC 16 B S auf AC 22 T S	5 cm auf 6 cm			B-T	
K	SMA 8 S auf AC 16 B S	4 cm auf cm5			D-B	

3.3 Mechanische Konfiguration der Prüfsysteme

Um ein Vergleich der Prüfergebnisse zu erzielen, werden in diesem Forschungsprojekt statische Abscherversuche gemäß TP Asphalt-StB (Teil 80) und zyklische Scherversuche durchgeführt. In folgenden Kapiteln sind die beiden Prüfmethode beschrieben.

3.3.1 Statischer Abscherversuch

Die Beurteilung des Schichtenverbundes einer Asphaltbefestigung erfolgt in Deutschland zurzeit mit dem direkten, statischen Abscherversuch (FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012). Beim diesem Versuch wird ein momentenfreier Abschervorgang in der Grenze zwischen zwei Schichten oder Lagen von zweischichtigen bzw. -lagigen Probekörpern durchgeführt. Dieser Abschervorgang erfolgt weggeregelt unter isothermen Prüfbedingungen. Abbildung 24 zeigt die Schervorrichtung mit seinen wichtigsten Teilen.

Vor der Prüfung wird der Probekörper mit Durchmesser 150 mm über 12 Stunden im Luftbad auf die Prüftemperatur von 20 °C gebracht. Bei einem konstanten Vorschubweg von 50 mm pro Minute und einer Prüftemperatur von 20 °C wird der Schichtenverbund bis zum Versagen abgeschert. Gleichzeitig erfolgt eine Aufzeichnung von Kraft und Scherweg.

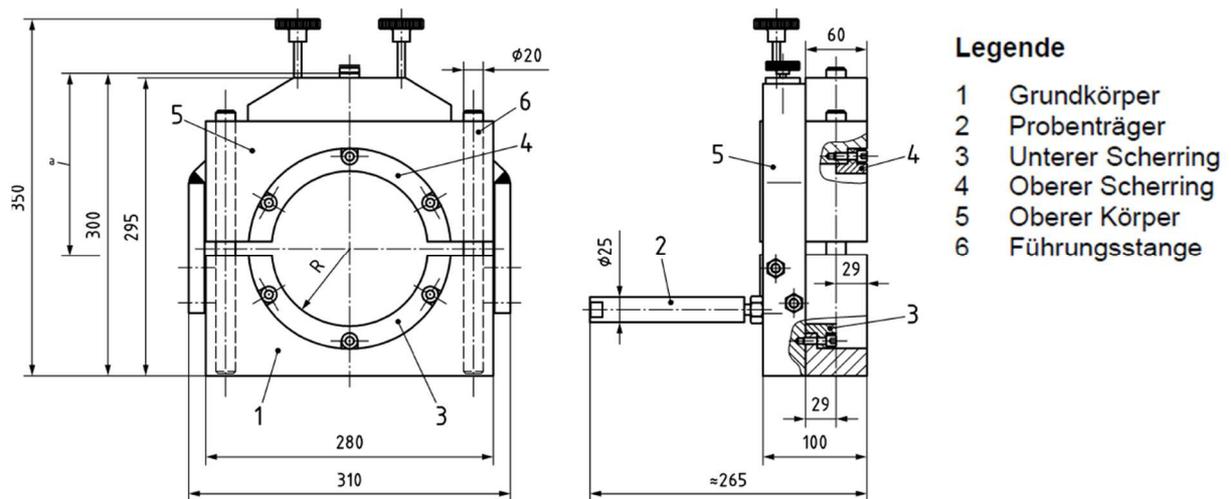


Abbildung 24. Vorrichtung für den statischen Abscherversuch (FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012).

Als Prüfergebnis wird die zur Abscherung notwendige, bzw. maximale Scherkraft ermittelt und als Kriterium für die Beurteilung des herstellungstechnisch erzielten Schichtenverbunds herangezogen (siehe Abbildung 25). Dazu wird auch der Scherweg berechnet.

Die minimale Dicke der abzuschierenden Schicht beträgt 20 mm. Die darunter liegenden Schichten müssen insgesamt eine Schichtstärke von mindestens 70 mm aufweisen (FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012).

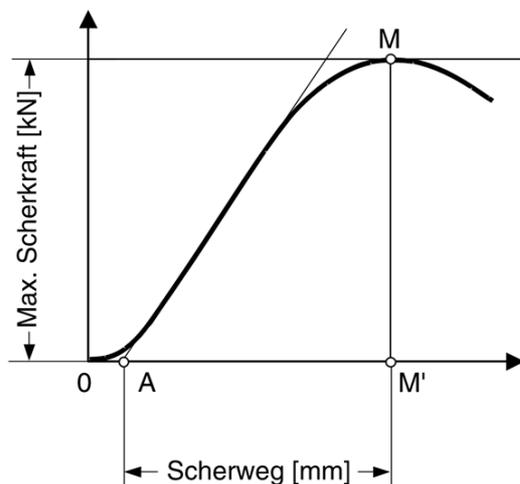


Abbildung 25. Scherkraft-Scherweg-Diagramm aus dem statischen Abscherversuch (FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012).

3.3.2 Zyklischer Scherversuch

Für die Untersuchung des Ermüdungswiderstandes eines Schichtenverbundes unter Dauerbeanspruchung wird in diesem Teilprojekt ein direkter, zyklischer Scherversuch zur Prüfung des Dauerhaltens entwickelt. Dabei wird von einer an der TU Dresden

entwickelten Vorrichtung zur Steifigkeitsprüfung (Wellner & Ascher, 2007) ausgegangen.

Diese Vorrichtung zur Steifigkeitsprüfung wurde unter der Maßgabe entwickelt, dass die in einer Straßenbefestigung auftretenden Einflussgrößen auf den Schichtenverbund beanspruchungsgerecht geprüft werden können. Daher wird zur Steifigkeitsprüfung des Schichtenverbundes der Probekörper einer direkten zyklischen Scherbeanspruchung (s_1 , Abbildung 26) und einer zusätzlichen statischen Normalspannung (σ_2 , Abbildung 26) ausgesetzt.

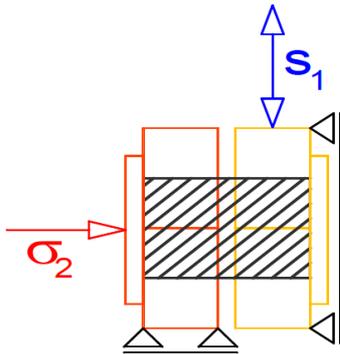


Abbildung 26. Mechanisches Modell des zyklischen Scherversuchs zur Steifigkeitsprüfung; s_1 - zyklische Scherbeanspruchung; σ_2 - Normalspannung (Wellner & Ascher, 2007).

Die zyklische Scherbeanspruchung des Probekörpers wird durch den Hydraulikzylinder der servo-hydraulischen Prüfmaschine realisiert (Abbildung 27). Diese Scherbelastung wird weggeregelt in Form eines Sinusimpulses aufgebracht. Die vorgegebene Verformungsamplitude wird über zwei induktive Wegaufnehmer gesteuert, die jeweils auf jeder Seite der Prüfvorrichtung platziert sind (vertikale Wegaufnehmer 1 und 2, Abbildung 27). Die statische Normalkraft bzw. Normalspannung wird über einen pneumatischen Zylinder im Widerlager der Prüfvorrichtung aufgebracht, dessen Kraft, über ein Manometer eingestellt wird. Um das nicht vermeidbare Spiel des horizontal beweglichen Teils infolge Normalbeanspruchung zu erfassen, wird auf einer Seite der Prüfvorrichtung der horizontale Weg aufgezeichnet (horizontaler Wegaufnehmer, Abbildung 27).

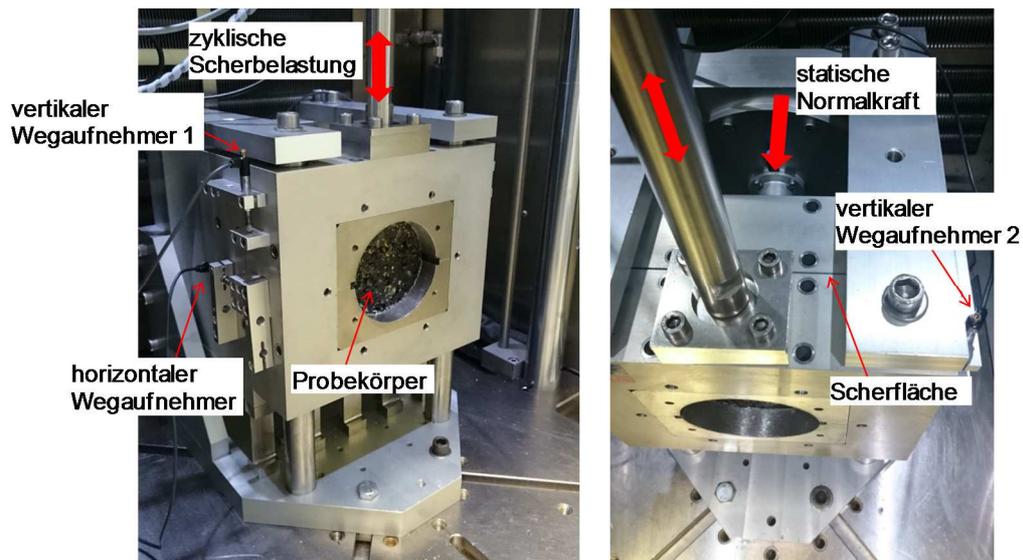


Abbildung 27. Zyklische Schervorrichtung am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig.

3.4 Gewählte Prüfbedingungen und Prüfmatrix

Die Analysen zum Schichtenverbund im Rahmen dieses Teilprojekts erfolgen anhand

- des statischen Abscherversuches zur Ermittlung der Abscherfestigkeit,
- des zyklischen Scherversuches zur Ermittlung der Schersteifigkeit und
- des neu entwickelten Verfahrens zur zyklischen Scherermüdungsprüfung.

Beim statischen Abscherversuch gemäß TP Asphalt-StB (Teil 80) wird bei einem konstanten Vorschubweg von 50 mm pro Minute und bei einer Prüftemperatur von 20 °C die zur Abscherung notwendige Kraft ermittelt. Laut Norm werden insgesamt 2 Prüfungen pro Verbundvariante durchgeführt. Die Prüfungen der Abscherfestigkeit des Schichtenverbundes (für den späteren Vergleich mit Scherfestigkeiten aus zyklischen Scherversuchen) erfolgen bei folgenden Verbundvarianten: A, B, C, D, E und F (Tabelle 2, Kapitel 3.2).

Die zyklischen Steifigkeitsprüfungen dienen als Tastversuche für die nachfolgenden Scherermüdungsprüfungen und können zur Validierung der in Teilprojekt 1 durchgeführten Steifigkeitsprüfungen herangezogen werden.

Die Beurteilung des Scherermüdungswiderstandes des Schichtenverbundes erfolgt unter Anwendung der in Teilprojekt 2 entwickelten Prüfsystematik zur zyklischen Scherermüdungsprüfung. Die zyklische Scherbelastung wird weggeregelt in Form eines Sinusimpulses mit einer Frequenz von 10 Hz aufgebracht, die Normalspannungen werden variantenabhängig zwischen 0 und 0,50 MPa und die Temperaturen zwischen -10 °C und +50 °C variiert, siehe Prüfmatrix in Tabelle 3.

Tabelle 3. Prüfmatrix für die zyklischen Schererermüdungsprüfungen (AD = Asphaltdeckschicht, Abi = Asphaltbinderschicht, AT = Asphalttragschicht).

Variante	Aufbau	Emulsionstyp und -menge [g/m ²]	Einbauart	Normalspannung [MPa]			Temperatur [°C]				
				0	0,25	0,50	-10	10	20	30	50
A	Abi auf AT	C60BP1-S; 300	heiß auf kalt								
B		C40BF1-S; 300					-				-
C	AD auf Abi	C60BP1-S; 200					-				-
D		C40BF1-S; 200					-				-
E	AT auf AT	C60BP1-S; 300					-				-
F		C60B1-S; 300					-				-
G	AT auf AT	-	heiß auf heiß		-	-	-	-		-	-
H	Abi auf Abi				-	-	-	-		-	-
I	AD auf AD				-	-	-	-		-	-
J	Abi auf AT				-	-	-	-		-	-
K	AD auf Abi				-	-	-	-		-	-

4 Scherermüdungsprüfungen

Im Folgenden werden die Prüfergebnisse aus den Scherermüdungsprüfungen anhand von ausgewählten Ergebnisdiagrammen erläutert. Sämtliche Einzelergebnisse sind auf Datenträger am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig abgelegt.

4.1 Scheramplituden

Die Wahl der Scheramplituden für eine Scherermüdungsprüfung erfolgt auf der Grundlage eines Amplitudensweeps (sh. Kapitel 6.2).

Abbildung 28 zeigt exemplarisch die Verläufe der Kraft und der Schersteifigkeit für Verbundvariante F (vgl. Tabelle 3) bei einer Prüftemperatur von 20 °C und bei einer Normalspannung von 0 MPa. Mit dem Anstieg der Scheramplitude bei jeder Belastungsstufe ist eine Abnahme der Schersteifigkeit zu beobachten. Hingegen steigt die für das Erreichen der Scheramplitude notwendige Kraft bis zu jener Scheramplitude an (0,045 mm, Abbildung 28), bei der ein drastischer Abfall der Kraftamplitude festzustellen ist. Obwohl die Scheramplitude weiter ansteigt, verbleibt die Kraft auf einem niedrigen Niveau, was auf das Versagen des Schichtenverbundes zurückzuführen ist. Diese Kraft wird nur durch die Reibung zwischen den Asphaltsschichten verursacht.

Jene Scheramplitude, bei der ein überproportionaler plötzlicher Abfall der Kraftamplitude zu beobachten ist, gilt als der Grenzwert für die zu wählenden Scheramplituden während einer Scherermüdungsprüfung (schwarz gestrichelte Linie in Abbildung 28). Es wird empfohlen, die maximale Scheramplitude für die Scherermüdungsprüfung mindestens zwei Stufen unterhalb dieses Grenzwertes zu wählen.

In den Tastversuchen wurde festgestellt, dass die niedrigste Scheramplitude, die maschinentechnisch aufgebracht werden kann, 0,008 mm beträgt. Sie stellt den unteren Grenzwert der für die Scherermüdungsprüfung zu wählenden Scheramplituden dar.

Beispielsweise können anhand des Amplitudensweeps für die Verbundvariante F bei 20 °C und 0 MPa Normalspannung (Abbildung 28) die folgenden drei Scheramplituden für die Scherermüdungsprüfungen ausgewählt werden: 0,01 mm, 0,02 mm und 0,03 mm.

Bei den Tastversuchen mit zusätzlicher Aufbringung einer Normalspannung von 0,25 MPa ergeben sich ähnliche Verläufe der Kraft wie ohne Normalspannung, wobei die Kräfte im Versagensbereich deutlich höher ausfallen. Dies ist auf die Wirkung der Normalspannung zurückzuführen. Ein Beispiel des Amplitudensweeps bei dieser Normalspannung zeigt die Abbildung 29. Die Ermittlung von Eingangswerten für die Scherermüdungsprüfungen erfolgt analog zu den Tastversuchen ohne Normalspannung.

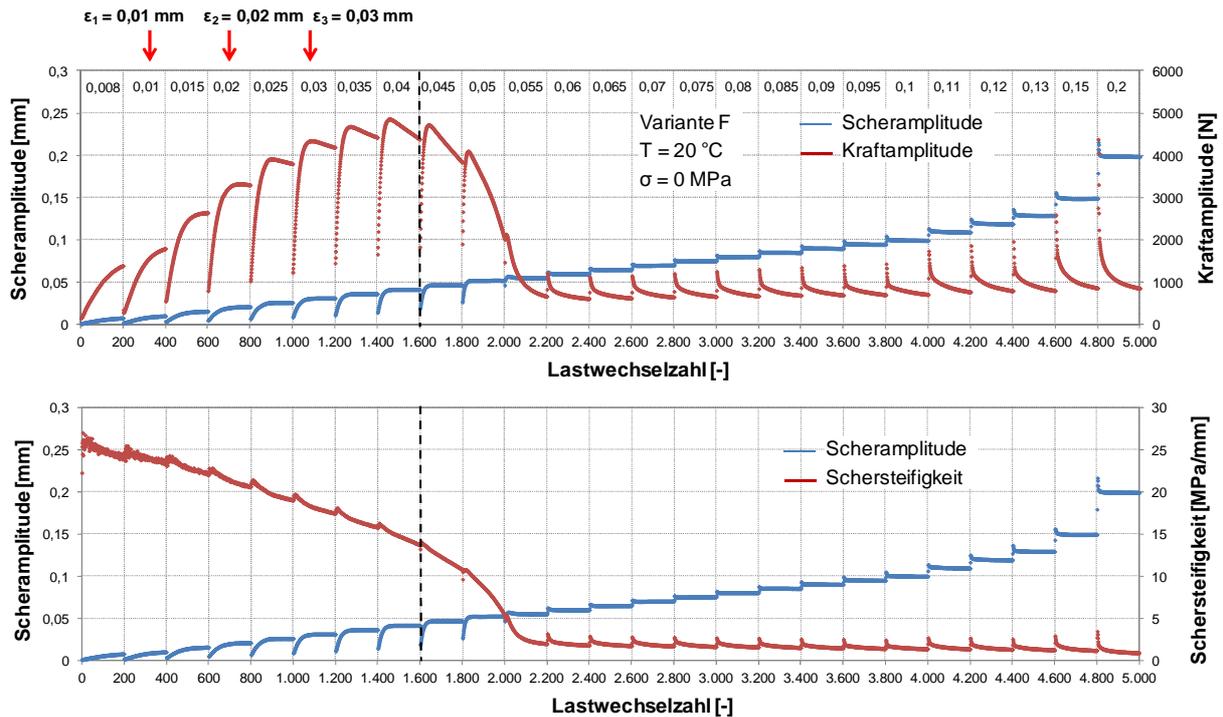


Abbildung 28. Verbundvariante F: Verläufe der Kraft (oben) und der Schersteifigkeit (unten) während des Amplitudensweeps bei 20 °C und 0 MPa Normalspannung.

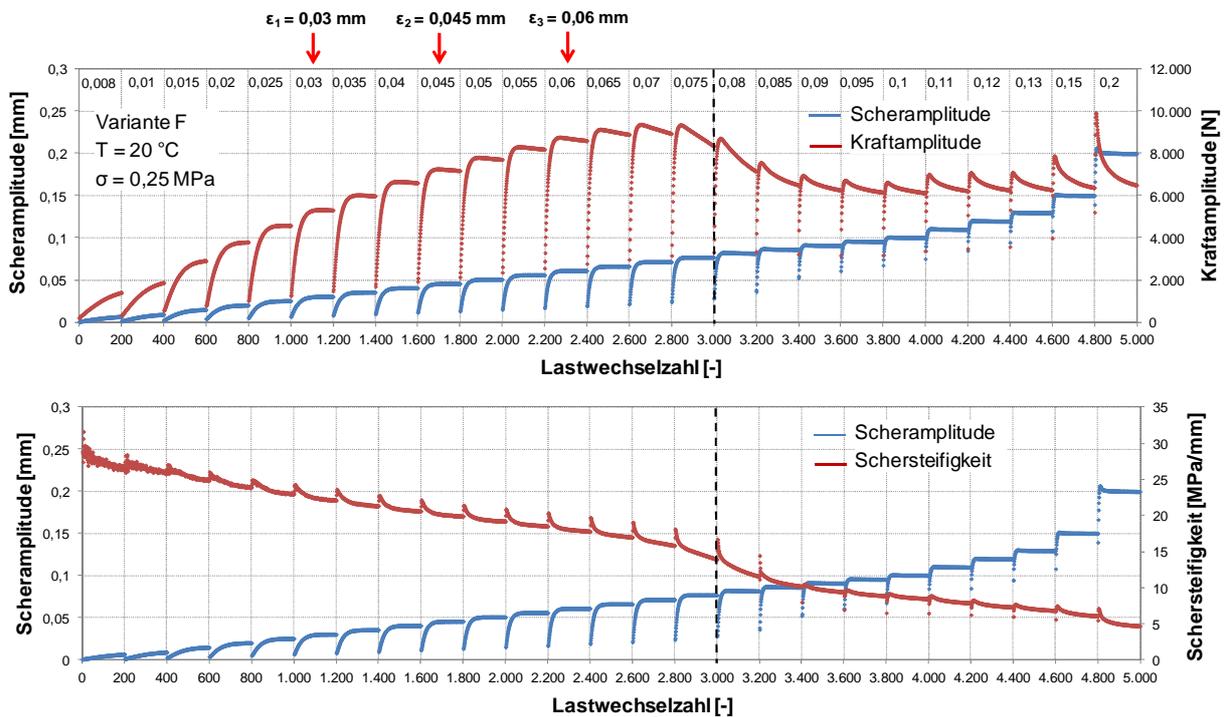


Abbildung 29. Verbundvariante F: Verläufe der Kraft (oben) und der Schersteifigkeit (unten) während des Amplitudensweeps bei 20 °C und 0,25 MPa Normalspannung.

Bei den Tastversuchen mit zusätzlicher Aufbringung einer Normalspannung von 0,50 MPa weist im Regelfall die Kraftamplitude im Amplitudensweep zunächst einen steilen Anstieg auf, flacht dann ab und geht in eine quasi-stationäre Phase über. Es ist kaum definierbar, ab welchem Zeitpunkt der Schichtenverbund versagt, siehe z. B. den

Verlauf der Verbundvariante F bei einer Prüftemperatur von 20 °C in Abbildung 30. Es ist eine Abnahme der Schersteifigkeit erkennbar, aber eine exakte Bestimmung der Lastwechselzahl zum Versagenseintritt ist nicht möglich. Daher können die Scheramplituden im Bereich der quasi-stationären Phase des Kraftamplitudenverlaufes frei gewählt werden (Abbildung 30).

Wegen der Sprödhheit des Schichtenverbundes bei einer Prüftemperatur von 10 °C ergeben sich für die Amplitudensweeps mit 0,50 MPa Normalspannung ähnliche Verläufe der Kraft wie bei einer Normalspannung von 0,25 MPa. Die Festlegung der Scheramplituden für die Scherermüdungsprüfungen ist daher wesentlich einfacher.

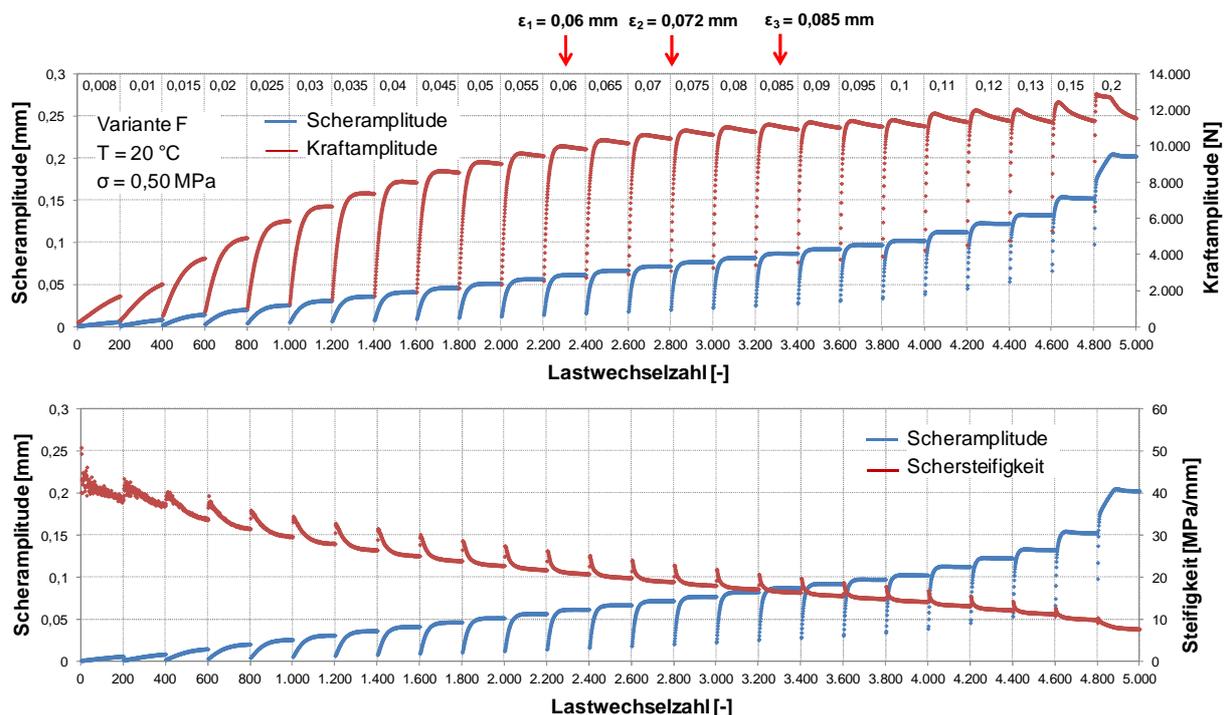


Abbildung 30. Verbundvariante F: Verläufe der Kraft (oben) und der Schersteifigkeit (unten) während des Amplitudensweeps bei 20 °C und 0,50 MPa Normalspannung.

Die Dauer der quasi-stationären Phase kann kurz sein, wie beispielsweise bei Verbundvariante B bei 20 °C und 0 MPa Normalspannung mit einer möglichen Scheramplitude zwischen 0,008 mm und 0,017 mm. In diesem Fall wird besonders deutlich, dass der Amplitudensweep unentbehrlich ist für eine zielsichere Bestimmung der Prüfparameter für die Scherermüdungsprüfung.

Zur Überprüfung des linear-visko-elastischen Bereichs werden für jede Stufe des Amplitudensweeps die letzten 10 Werte der Schersteifigkeit (von 190 bis 200 Lastwechsel) gemittelt und gegenüber der zugehörigen Scheramplitude dargestellt. Abbildung 32 bis Abbildung 33 zeigen die Steifigkeitswerte für drei Verbundvarianten bei drei Temperaturen (10 °C, 20 ° und 30 °C) und drei Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa) bei zweifacher Belegung der Prüfergebnisse. Die Ergebnisse weisen eine erhebliche Streuung zwischen zwei Wiederholungsprüfungen auf, was auf die herstellungsbedingten Schwankungen des Schichtenverbundes zurückgeführt

wird. Die Streuung nimmt mit abnehmender Temperatur zu, weil die Sprödheit des Schichtenverbundes ansteigt. Obwohl die Prüfstreuung groß ist, ist der Einfluss der Normalspannung eindeutig. Mit zunehmender Normalspannung und abnehmender Temperatur steigt die Schersteifigkeit.

Die Ermittlung der Schersteifigkeit mittels zyklischem Scherversuch muss im linear-visko-elastischen Bereich erfolgen. Anhand der Verläufe der Schersteifigkeit im Amplitudensweep kann festgestellt werden, dass mit steigender Scheramplitude unabhängig von Normalspannung und Prüftemperatur keine konstante Phase der Schersteifigkeit zu beobachten ist. Die Schersteifigkeit sinkt von Beginn an deutlich. Eine Abnahme der Anfangssteifigkeit um 5 % tritt meist schon früh, d. h. etwa bei der zweiten Belastungsstufe ein. Daraus lässt sich schließen, dass bereits bei Scheramplituden ab 0,008 mm der linear-visko-elastische Bereich verlassen wird. Die Grenze des linearen Bereichs kann nicht festgestellt werden.

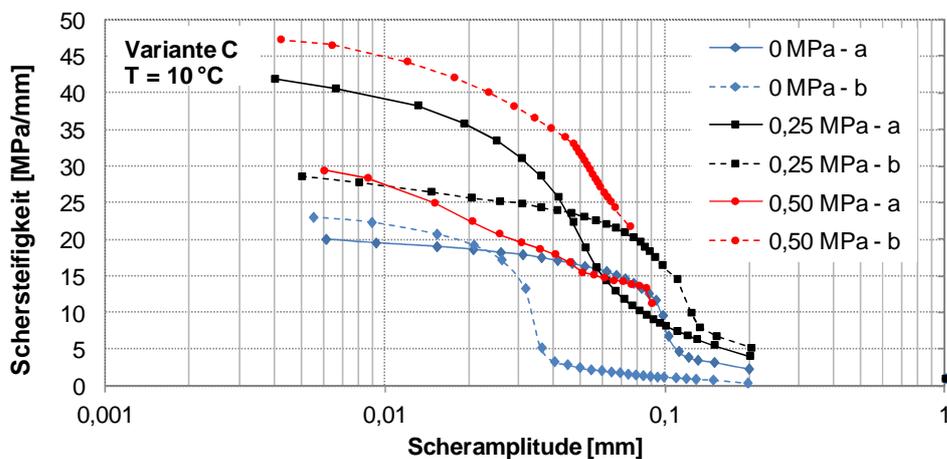


Abbildung 31. Verbundvariante C: Verläufe der Schersteifigkeiten bei drei Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa) während des Amplitudensweeps bei 10 °C.

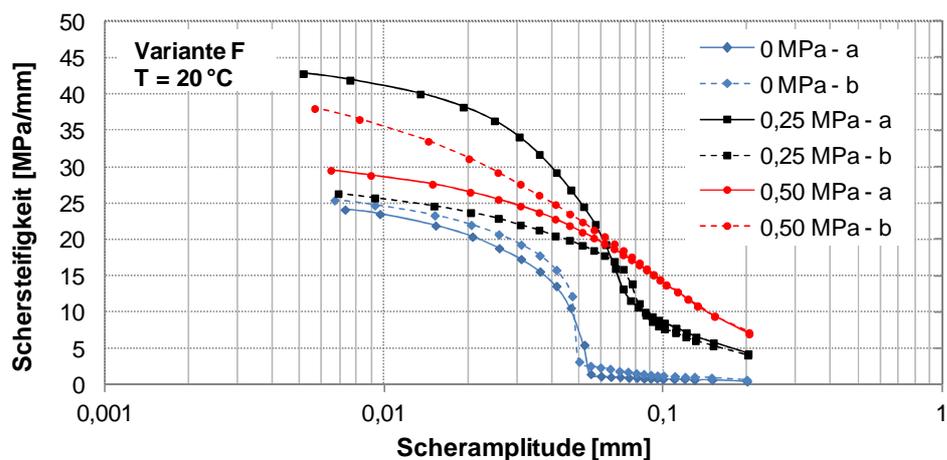


Abbildung 32. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeiten bei drei Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa) während des Amplitudensweeps bei 20 °C.

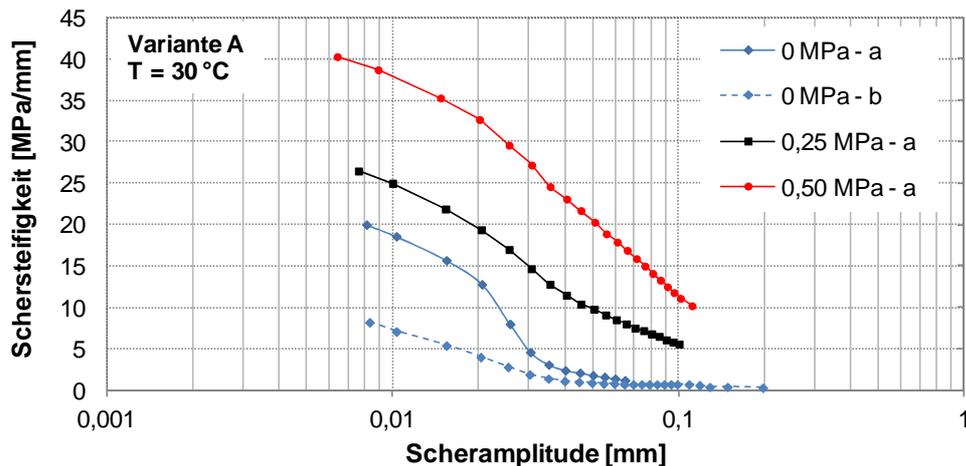


Abbildung 33. Verbundvariante A: Verläufe der Schersteifigkeiten bei drei Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa) während des Amplitudensweeps bei 30 °C.

4.2 Materialverhalten infolge der zyklischen Scherbeanspruchung

Für die Auswertung von Scherermüdungsprüfungen werden folgende Materialkenngröße herangezogen: Schersteifigkeit, Phasenwinkel und dissipierte Energie.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Prüfergebnisse für die Verbundvarianten F, A und E in Abhängigkeit von Prüftemperatur, Normalspannung und Scheramplitude:

- Abbildung 34: Verbundvariante F bei einer konstanten Prüftemperatur von 20 °C für die Scheramplituden 0,02 mm, 0,045 mm und 0,06 mm und für die Normalspannungen 0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa,
- Abbildung 35: Verbundvariante F bei einer konstanten Scheramplitude von 0,02 mm für die Prüftemperaturen 30, 20 und 10 °C, ohne Normalspannung,
- Abbildung 36: Verbundvariante A bei einer konstanten Prüftemperatur von 20 °C und bei einer konstanten Scheramplitude von 0,05 mm, ohne Normalspannung.
- Abbildung 37: Verbundvariante E bei einer konstanten Prüftemperatur von 10 °C, bei einer konstanten Scheramplitude von 0,045 mm und mit einer konstanten Normalspannung von 0,25 MPa.

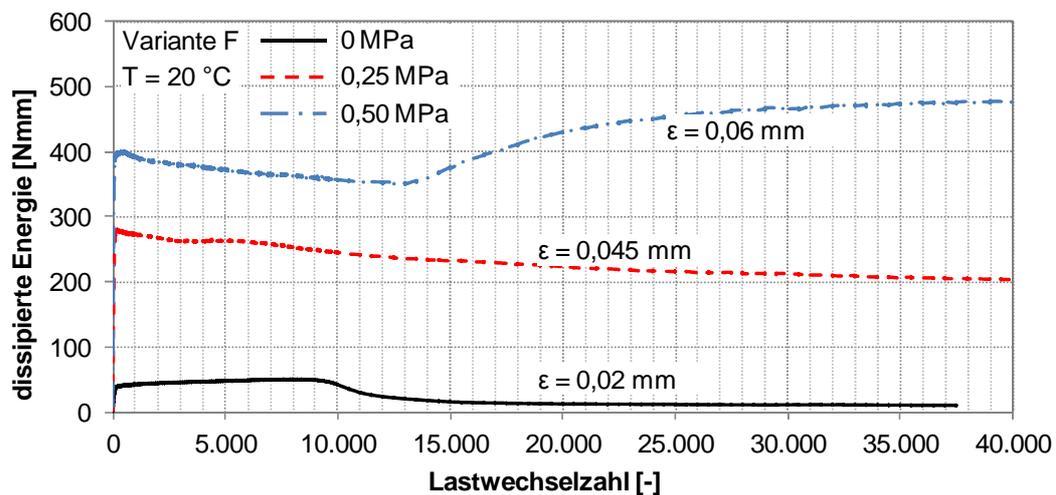
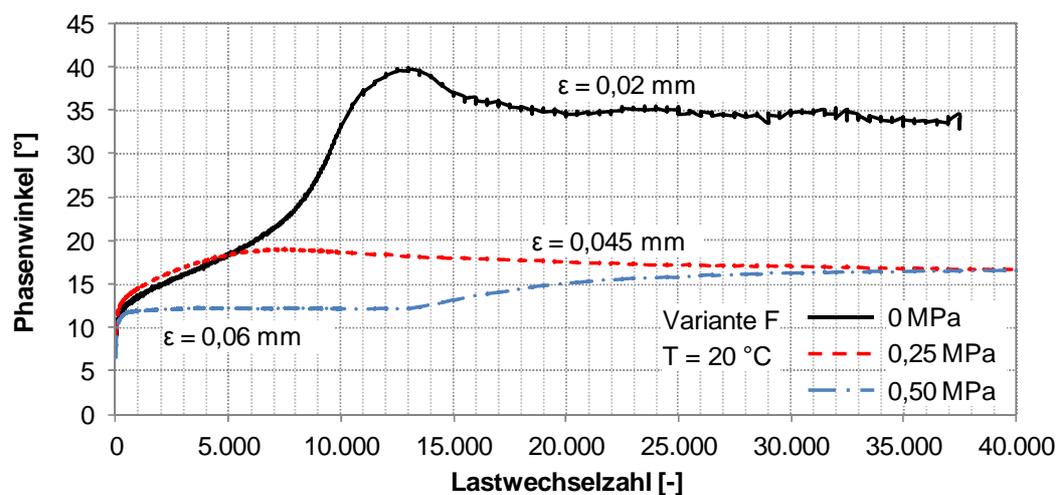
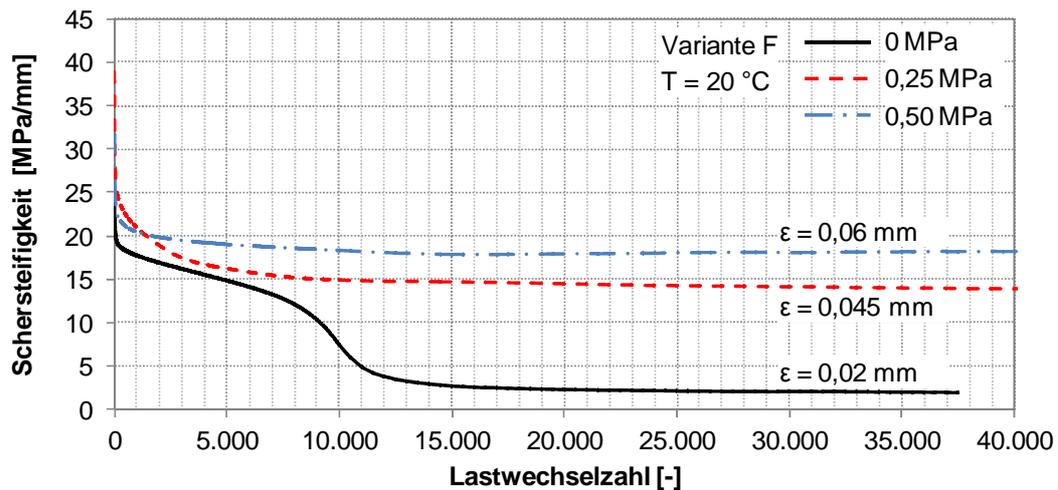


Abbildung 34. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeit (oben), Phasenwinkel (Mitte) und dissipierten Energie pro Lastwechsel (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 20 °C und 0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa Normalspannung.

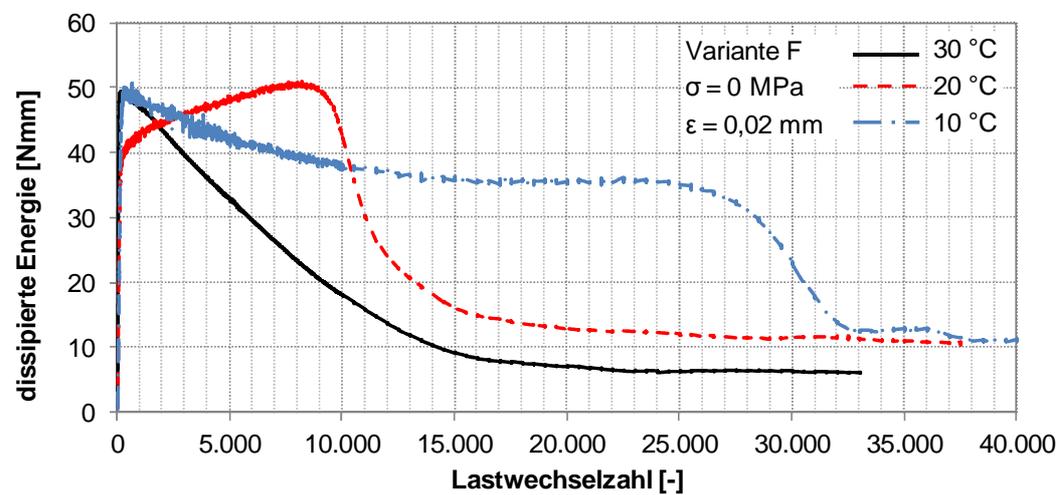
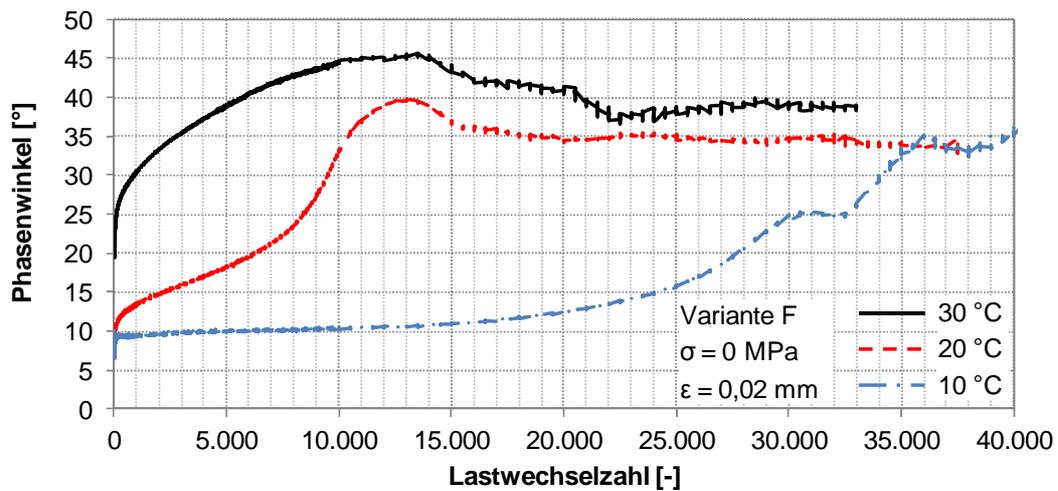
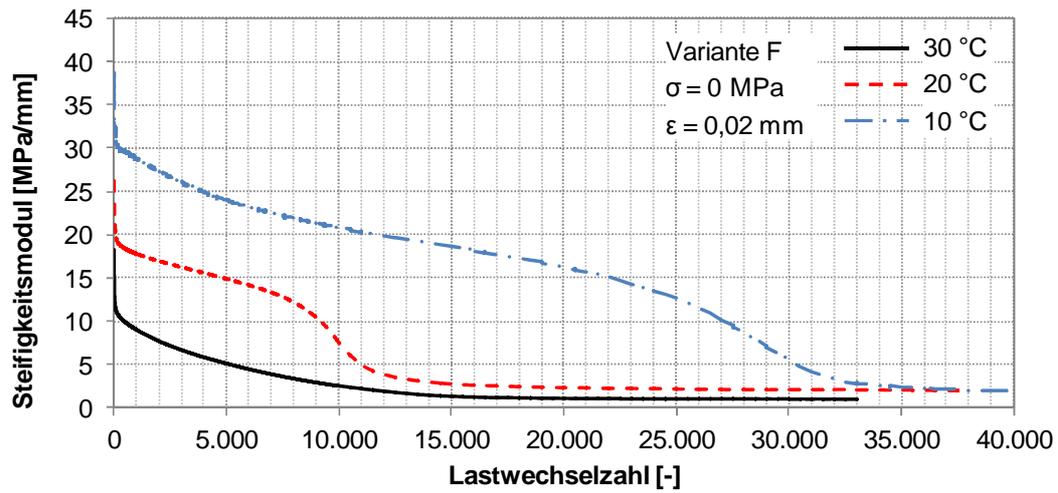


Abbildung 35. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeit (oben), Phasenwinkel (Mitte) und dissipierten Energie pro Lastwechsel (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 0 MPa Normalspannung und 30 °C, 20 °C und 10 °C.

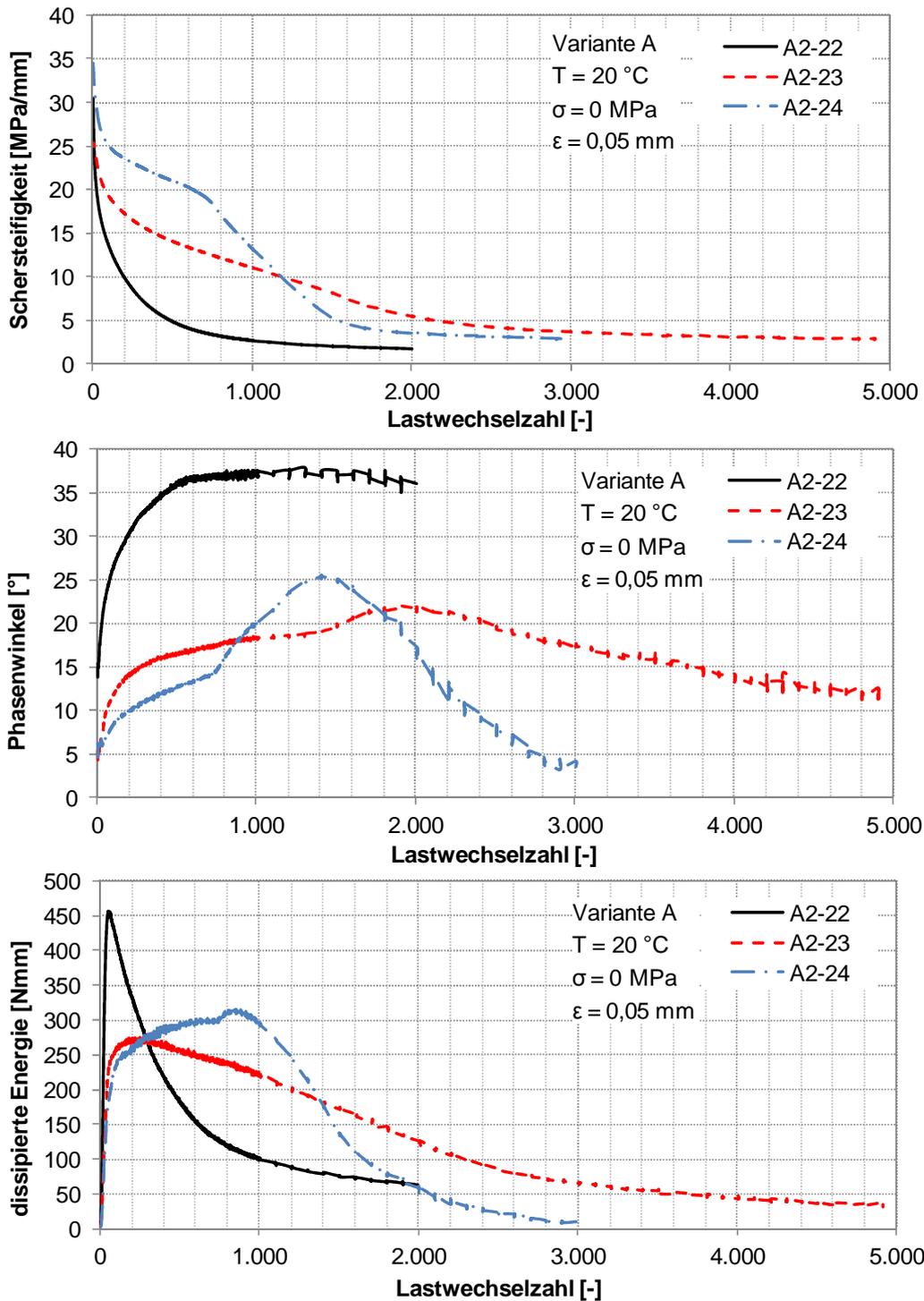


Abbildung 36. Verbundvariante A: Verläufe der Schersteifigkeit (oben), Phasenwinkel (Mitte) und dissipierten Energie pro Lastwechsel (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 0 MPa Normalspannung, 20 °C Prüftemperatur und 0,05 mm Scheramplitude.

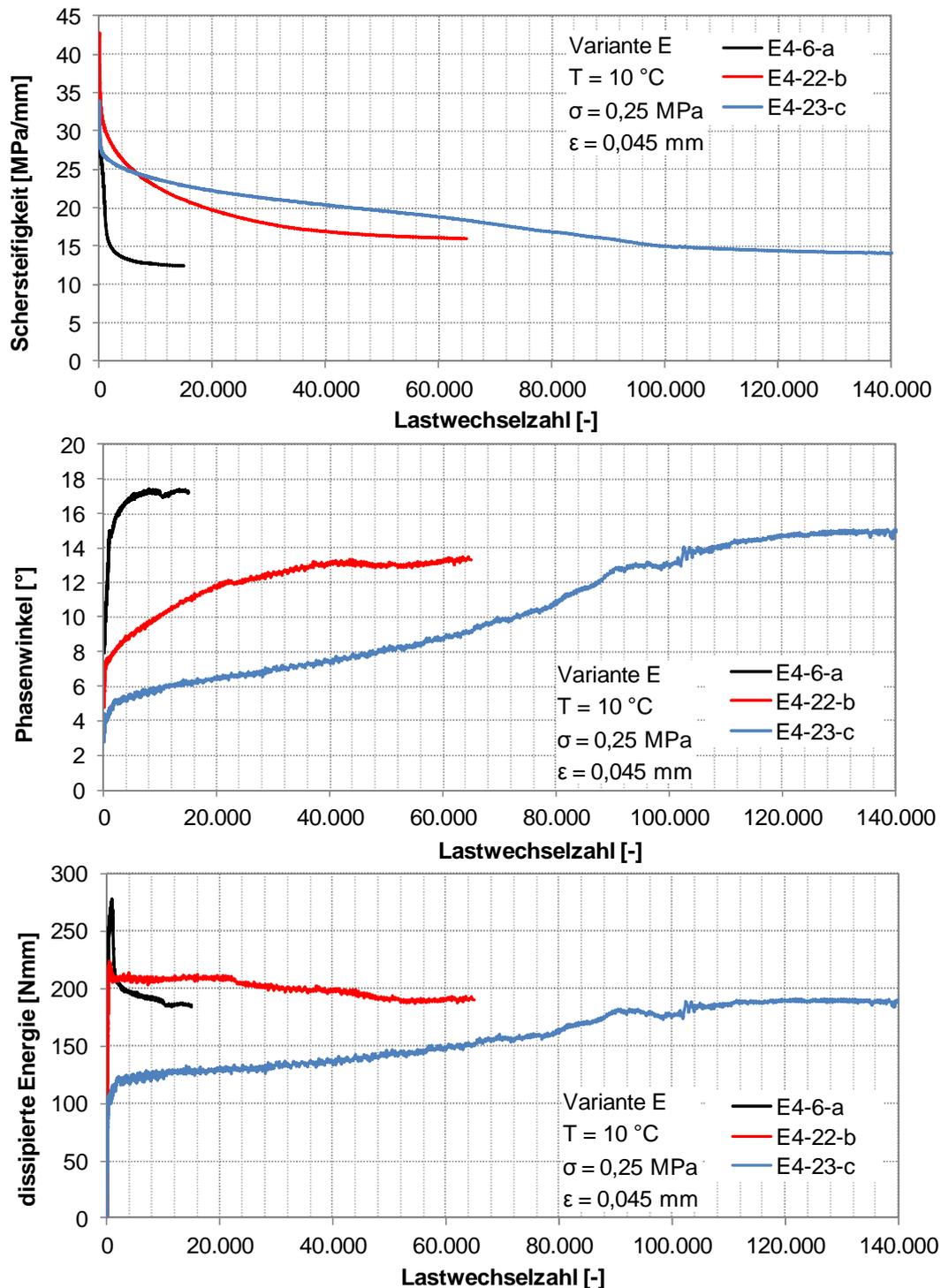


Abbildung 37. Verbundvariante E: Verläufe der Schersteifigkeit (oben), Phasenwinkel (Mitte) und dissipierten Energie pro Lastwechsel (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 10 °C Prüftemperatur, 0,25 MPa Normalspannung und 0,045 mm Scheramplitude.

4.2.1 Schersteifigkeit

Abbildung 34 zeigt übereinander die Verläufe der drei Parameter bei einer Prüftemperatur von 20 °C und bei verschiedenen Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa). Von Beginn an fällt Schersteifigkeit infolge der Materialermüdung ab. Zwei

typische Verläufe der Schersteifigkeit können unterschieden werden, je nachdem eine Normalspannung aufgebracht wurde, oder nicht (Abbildung 34, oben).

Beim Scherversuch ohne Normalspannung können (wie bei den konventionellen Ermüdungsprüfungen) drei Phasen der Steifigkeitsabnahme beobachtet werden:

- eine rasche Steifigkeitsabnahme am Anfang des Versuches,
- eine länger andauernde, quasi-lineare Phase der Steifigkeitsabnahme und
- eine kurze Phase beim Versagen des Probekörpers.

Nach der dritten Phase verläuft die Schersteifigkeit konstant auf sehr niedrigem Niveau. Die Reststeifigkeit wird auf den Effekt der Materialreibung innerhalb der Schichtgrenze zurückgeführt, ausgehend davon, dass Verklebung und Verzahnung in dieser Phase kaum vorhanden sind. Solche Steifigkeitsverläufe sind auch bei 10 °C sowohl bei niedrigerer Normalspannung (0,25 MPa) als auch ohne Normalspannung (Abbildung 35, oben) zu beobachten, weil die Sprödhheit des Schichtenverbundes bei dieser Temperatur deutlich höher als bei 20 °C ist.

Meist können bei den Schersteifigkeitsprüfungen mit Normalspannung (Abbildung 34 bei 20 °C) aber nicht alle Schersteifigkeitsphasen beobachtet werden, weil kein rasches Versagen des Schichtenverbundes auftritt. Dies ist eine Folge des konstanten Einflusses der Normalspannung, die durch ihre stützende Wirkung alle Effekte aus Reibung, Verzahnung und Verklebung innerhalb der Schicht auf hohem Niveau hält. Die Schersteifigkeit weist einen potenziellen Verlauf auf. Je größer die Normalspannung ist, umso höher ist die Reibung und folglich die Schersteifigkeit während der Versagensphase (Abbildung 34, oben). Diese Schersteifigkeitsverläufe können auch bei 30 °C ohne Normalspannung beobachtet werden (siehe Abbildung 35, oben), weil sich der Schichtenverbund bei dieser Temperatur wesentlich viskoser als bei 20 °C oder 10 °C verhält. Ein potenzieller Verlauf der Schersteifigkeit ist auch bei 10 °C und 0,50 MPa Normalspannung festzustellen.

4.2.2 Phasenwinkel

Aufgrund der zyklischen Belastung des Schichtenverbundes steigt der Phasenwinkel während der Scherermüdungsprüfung (Abbildung 34, Abbildung 35, Mitte) an, stark abhängig vom Niveau der Normalspannung und der Temperatur. Die höchsten Werte für den Phasenwinkel werden bei den Versuchen ohne Normalspannung und bei hohen Temperaturen festgestellt. Nach dem Versagen des Schichtenverbundes (bei konstanter Schersteifigkeit) verbleibt der Phasenwinkel einigermaßen konstant. Seltener wird eine Abnahme des Phasenwinkels während der Scherermüdungsprüfung beobachtet (z. B. bei Verbundvariante B).

4.2.3 Dissipierte Energie

Erwartungsgemäß sollte die dissipierte Energie während einer weggeregelten Ermüdungsprüfung stets absinken. Dies wird in den weggesteuerten Scherermüdungsprü-

fungen nur teilweise bestätigt, meist steigt die dissipierte Energie allerdings an. Abbildung 34 und Abbildung 35 (unten) zeigen die Verläufe der dissipierten Energie bei verschiedenen Normalspannungen und Temperaturen. Sowohl eine Abnahme als auch eine Zunahme der dissipierten Energie können festgestellt werden. Aufgrund der höheren Spannungsamplitude steigt die pro Lastwechsel dissipierte Energie mit erhöhter Normalspannung. Eine mögliche Ursache für die Erhöhung der dissipierten Energie liegt am Anstieg des Phasenwinkels, welcher die Absenkung der Spannungsamplitude nicht kompensieren kann.

Weil die energiebasierten Auswertemethoden nach Hopman und Rowe (siehe Kapitel 2.2.2) vom jeweiligen Verlauf der dissipierten Energie und vom Verlauf der Schersteifigkeit abhängen, können diese nicht immer angewandt werden (siehe Kapitel 4.3).

4.2.4 Wiederholversuche

In Abbildung 36 sind Wiederholungsversuche der Verbundvariante A bei 20 °C Prüftemperatur, 0,05 mm Scheramplitude und ohne Normalspannung dargestellt. Die Verläufe der Schersteifigkeit weisen bei gleichen Prüfbedingungen sowohl alle drei Steifigkeitsphasen (Probe A2-23; A2-24) als auch einen potenziellen Verlauf (Probe A2-22) auf. Der Phasenwinkel steigt mit fortgeschrittener Scherbelastung. Die Verläufe der dissipierten Energie weisen entweder eine Zunahme oder eine Abnahme mit dem Anstieg der Lastwechselzahl auf.

Abbildung 37 zeigt die Prüfergebnisse der drei wiederholten Versuche bei 10 °C, 0,25 MPa Normalspannung und 0,045 mm Scheramplitude (Verbundvariante E). Mit abnehmender Temperatur steigt die Prüfstreuung deutlich, mehr als drei Wiederholungen sind notwendig. Die Prüfstreuung ist vermutlich auf die höhere Sprödhheit des Schichtenverbundes bei 10 °C und auf die herstellungsbedingten Materialschwankungen der Schichtoberfläche zurückzuführen. Die Wiederholpräzision der zyklischen Scherermüdungsprüfung kann aus diesen Prüfergebnissen nicht abgeleitet werden, ist aber jedenfalls vor einer breiten Anwendung dieses Versuchstyps in fortführenden Untersuchungen zu ermitteln.

4.3 Versuchsauswertung

4.3.1 Konventionell und nach der Dissipationsenergie

Für die Auswertung der Scherermüdungsprüfungen wurden alle drei Ermüdungskriterien aus dem Kapitel 2.2.2 herangezogen,

- das konventionelle Ermüdungskriterium ($N_{f/50}$),
- das energiebasierte Ermüdungskriterium nach Hopman und
- das energiebasierte Ermüdungskriterium nach Rowe.

Abbildung 38 zeigt exemplarisch für die Verbundvariante F die Verläufe der Schersteifigkeit und der Energieraten nach Hopman sowie nach Rowe bei der Prüftemperatur von 20 °C und bei verschiedenen Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und

0,50 MPa). Aus den drei ermittelten Ermüdungswerten bei der Scherermüdungsprüfung ohne Normalspannung lässt sich zeigen, dass die drei Ermüdungskriterien miteinander korrelieren.

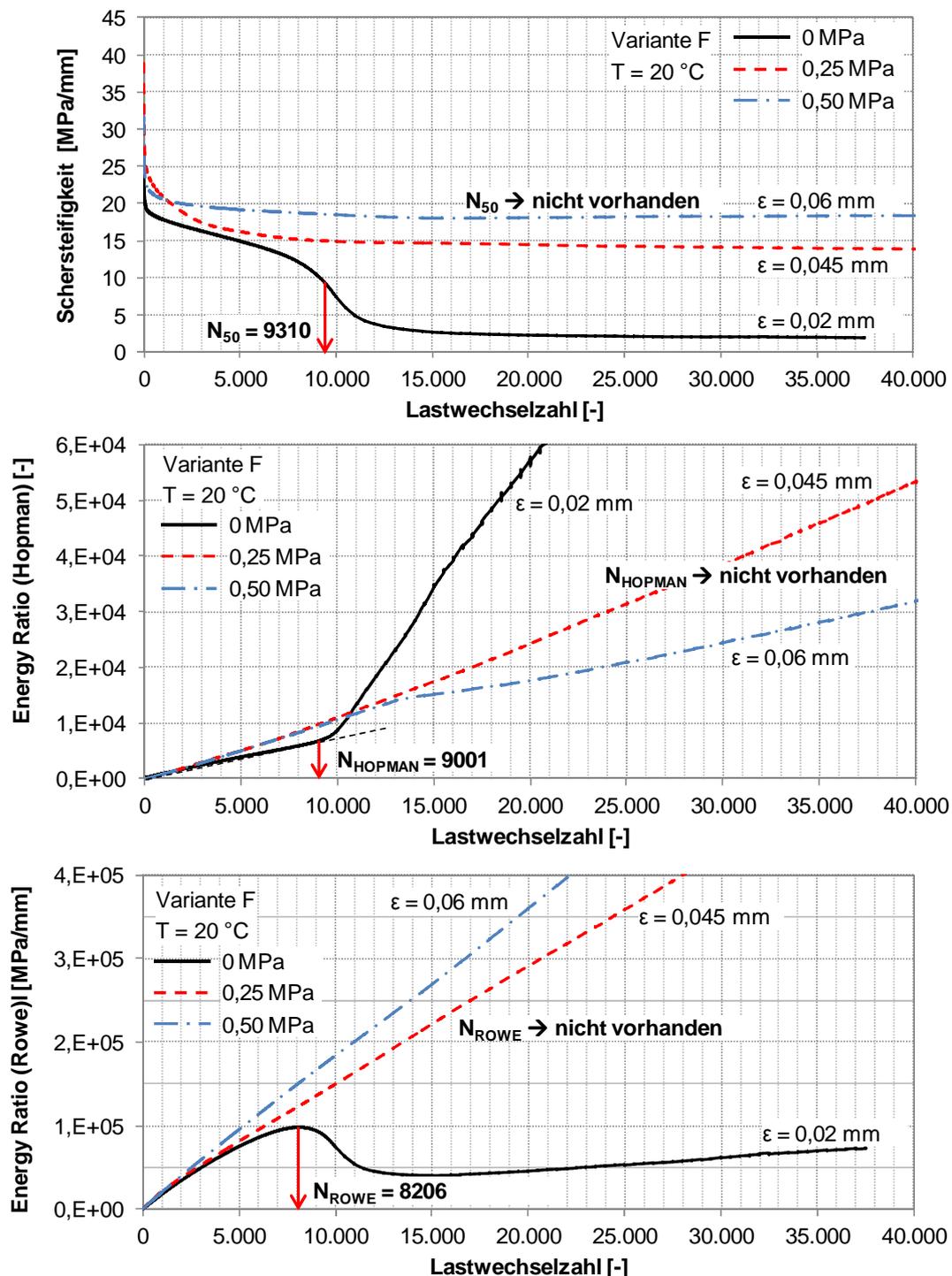


Abbildung 38. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeit (oben), Energierate nach Hopman (Mitte) und Energierate nach Rowe (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 20 °C und 0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa Normalspannung.

(a) Ermüdungskriterium $N_{f/50}$

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, weist der Versuch ohne Normalspannung einen dreiphasigen Verlauf der Schersteifigkeit auf (siehe Abbildung 38, oben). Die Schersteifigkeit liegt am Ende der Prüfung auf einem niedrigen Niveau. Aufgrund der hohen Steifigkeitsabnahme kann die Lastwechselzahl beim Versagenseintritt mit dem konventionellen Ermüdungskriterium ausgewertet werden und beträgt $N_{f/50} = 9310$. Auch im Fall einer Potenzfunktion der Schersteifigkeit (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 36) bei 0 MPa Normalspannung lässt sich die Lastwechselzahl $N_{f/50}$ auswerten.

Hingegen können bei den Prüfungen mit 0,25 MPa und 0,50 MPa Normalspannung keine Lastwechselzahlen mittels konventionellen Ermüdungskriteriums ermittelt werden, weil die Abnahme der Schersteifigkeit unter 50 % liegt. Dies ist eine Folge des konstanten Einflusses der Normalspannung, die durch ihre stützende Wirkung die Steifigkeit auf hohem Niveau hält.

(b) Ermüdungskriterium nach Hopman

Trotz der leichten Zunahme der dissipierten Energie beim Versuch ohne Normalspannung (siehe Abbildung 34, unten), ist ein quasi-linearer Anstieg der Energierate nach Hopman festzustellen, der ab einer bestimmten Lastwechselzahl überproportional anwächst (Abbildung 38, Mitte). Dieser Zeitpunkt wird als jene Lastwechselzahl beim Versagenseintritt definiert, bei der sich erste Makrorisse im Probekörper bilden. Sie beträgt bei diesem Versuch ohne Normalspannung $N_{\text{HOPMAN}} = 9001$.

Obwohl die dissipierten Energien bei einer Normalspannung von 0,25 MPa und von 0,50 MPa abnehmen (siehe Abbildung 34, unten), ist es mit dem energiebasierten Ermüdungskriterium nach Hopman hier nicht möglich, die Lastwechselzahlen beim Versagenseintritt zu definieren.

Eine erfolgreiche Auswertung der Lastwechselzahl N_{HOPMAN} wie in Abbildung 38 ist jedoch auch ohne Aufbringen einer Normalspannung nicht immer möglich (vgl. Abbildung 39), was auf den Verlauf der dissipierten Energie zurückzuführen ist. Wenn ein dreiphasiger Verlauf der Schersteifigkeit vorhanden ist und die dissipierte Energie eine ständige Zunahme aufweist, verhält sich der Verlauf der Energierate typischerweise wie in Abbildung 39. Aufgrund ihrer Abweichung von der Asymptote nach unten, lässt sich dann keine Lastwechselzahl beim Versagenseintritt definieren.

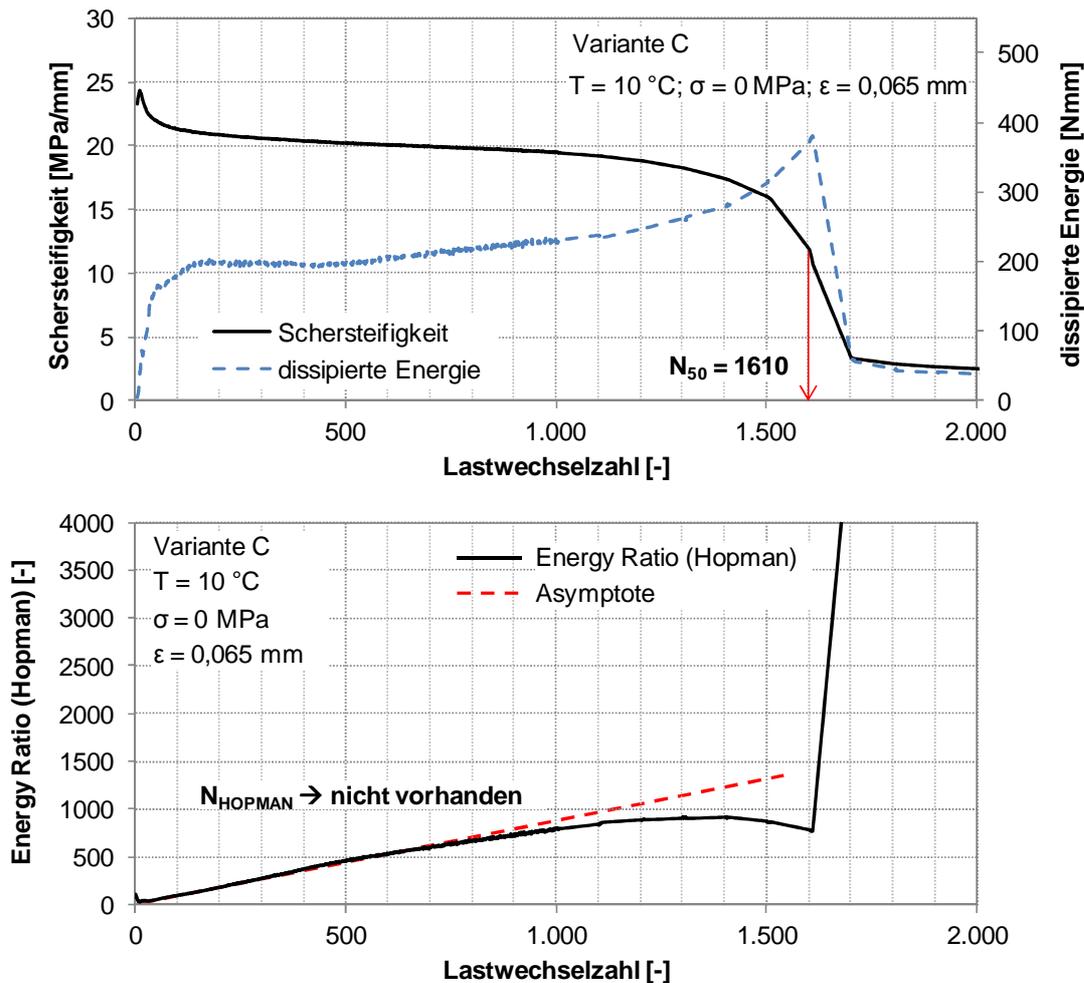


Abbildung 39. Verbundvariante C: Verläufe der Schersteifigkeit, dissipierten Energie (oben) und Energierate nach Hopman (unten) während des zyklischen Scherversuchs bei 10 °C, 0 MPa Normalspannung und 0,065 mm Scherweg.

(c) Ermüdungskriterium nach Rowe

Da der Verlauf der Energierate maßgeblich vom Verlauf der Schersteifigkeit abhängt, ist eine Bestimmung der maximalen Energierate nach Rowe nur dann möglich, wenn die Schersteifigkeit rasch abfällt. Dies ist nur bei der Scherermüdungsprüfung ohne Normalspannung zu beobachten (Abbildung 38, unten). Der Hochpunkt entspricht der Lastwechselzahl bei Makrorissbildung und beträgt hier $N_{\text{ROWE}} = 9001$.

Bei anderen Normalspannungen als 0 MPa verläuft die Energierate nach Rowe linear. Daher ist eine Bestimmung der Lastwechselzahl beim Versagenseintritt nicht möglich.

Aber das energiebasierte Ermüdungskriterium nach Rowe ist nicht immer erfolgreich. Abbildung 40 zeigt exemplarisch den Fall eines raschen Abfalls der Schersteifigkeit. Trotz des dreiphasigen Steifigkeitsverlaufs kann kein eindeutiges lokales Maximum der Energierate festgestellt werden. Der Verlauf der Energierate nach Rowe zeigt zwar eine leichte Krümmung, aber sie reicht nicht für eine präzise Definition der Lastwechselzahl beim Versagenseintritt aus. Auch die Versuche ohne Normalspannung, bei

welchen ein potenzieller Verlauf der Schersteifigkeit vorhanden ist, lassen sich mittels dieses Ermüdungskriteriums nicht auswerten.

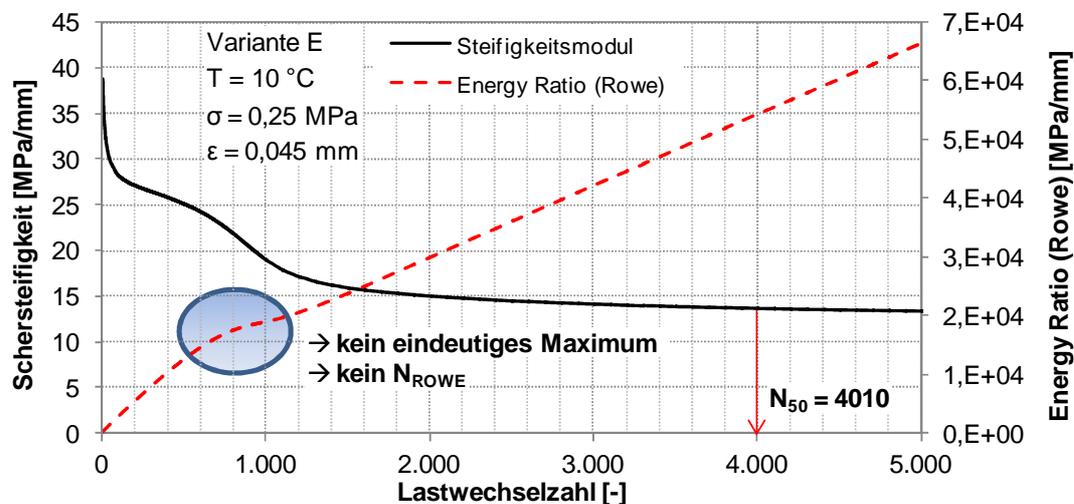


Abbildung 40. Verbundvariante E: Verläufe der Schersteifigkeit und dissipierten Energie nach Rowe während des zyklischen Scherversuchs bei 10 °C, 0,25 MPa Normalspannung und 0,045 mm Scherweg.

4.3.2 Empfehlungen für die Auswertung von Prüfergebnissen

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Auswertung der Lastwechselzahl bei Ermüdung mit dem konventionellen Ermüdungskriterium $N_{f/50}$ bei Versuchen ohne Normalspannung immer erfolgen kann und nicht vom spezifischen Verlauf der Schersteifigkeit abhängt (dreiphasig oder Potenzfunktion). Hingegen können die Auswertemethoden nach Hopman und Rowe nicht immer angewandt werden, weil sie vom jeweiligen Verlauf der dissipierten Energie und vom Verlauf der Schersteifigkeit abhängen.

Aus diesem Grund wird für die Auswertung und die Interpretation der Scherermüdungsprüfungen ohne Normalspannung das konventionelle Ermüdungskriterium bei allen Prüftemperaturen und allen Verbundvarianten herangezogen.

Da für die Auswertung der Scherermüdungsprüfungen mit Normalspannung das konventionelle Ermüdungskriterium $N_{f/50}$ nur bedingt verwendet werden kann (vgl. Abbildung 38 und Abbildung 40), muss nach einer alternativen Auswertemethode gesucht werden. Als Möglichkeit bietet sich die Bestimmung der Lastwechselzahl $N_{\text{asympt.}}$ bei Scherermüdung an, bei welcher die Schersteifigkeit ihren niedrigsten Wert erreicht und danach einigermaßen konstant bleibt (siehe Abbildung 41, oben). Vermutlich ist der Schichtenverbund in dieser konstanten Steifigkeitsphase zerstört und die verbleibende Schersteifigkeit ist allein auf die Reibung in der Schichtgrenze zurückzuführen. Die Bestimmung der Lastwechselzahl an dem die Schersteifigkeit einen konstanten Wert annimmt (asymptotisch verläuft), kann näherungsweise aus dem Kurvenverlauf per Augenschein bestimmt werden. Eine Approximation der Schersteifigkeitskurve mittels einer Potenzfunktion liefert keinen konstanten Wert (siehe Abbildung 41, unten). Eine

verbesserte Auswertung kann mittels passender Schersteifigkeitsfunktion erfolgen (sh. Kapitel 4.5).

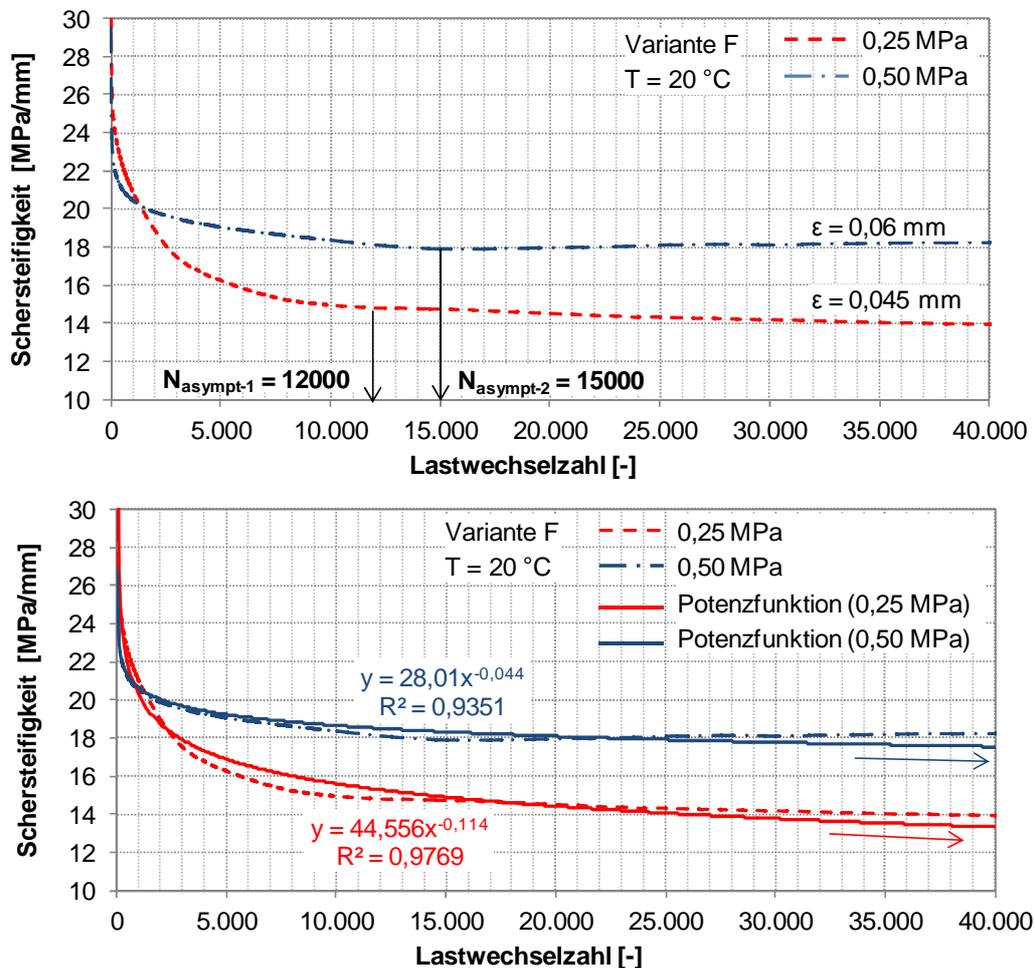


Abbildung 41. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeit während des zyklischen Scherversuchs bei 20 °C und 0,25 MPa und 0,50 MPa Normalspannung (oben). Approximation der Steifigkeitsverläufe mittels Potenzfunktion (unten).

4.4 Abhängigkeiten der Prüfergebnisse von den Prüfparametern

4.4.1 Scheramplitude

Die Beurteilung der Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes erfolgt mittels zyklischen Scherermüdungsprüfungen bei drei verschiedenen Scheramplituden (siehe Kapitel 4.1). Bei jeder Scheramplitude wird der Versuch mindestens dreifach wiederholt. Werden die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Versagen (bei insgesamt 9 Scherermüdungsprüfungen) als Funktion der aufgetragenen Scheramplitude in einem Diagramm aufgetragen und eine Regressionskurve gebildet, so ergibt sich die materialspezifische Wöhler-Linie in Form einer Potenzfunktion, die sich im doppelt logarithmischen Maßstab als eine Gerade darstellt.

Abbildung 42 zeigt exemplarisch die Wöhler-Linie für die Verbundvariante J bei einer Temperatur von 20 °C und einer Normalspannung von 0 MPa. Die resultierenden Lastwechselzahlen bei Scherermüdung ($N_{f/50}$) sind für die gewählten Scheramplituden in Tabelle 4 aufgeführt.

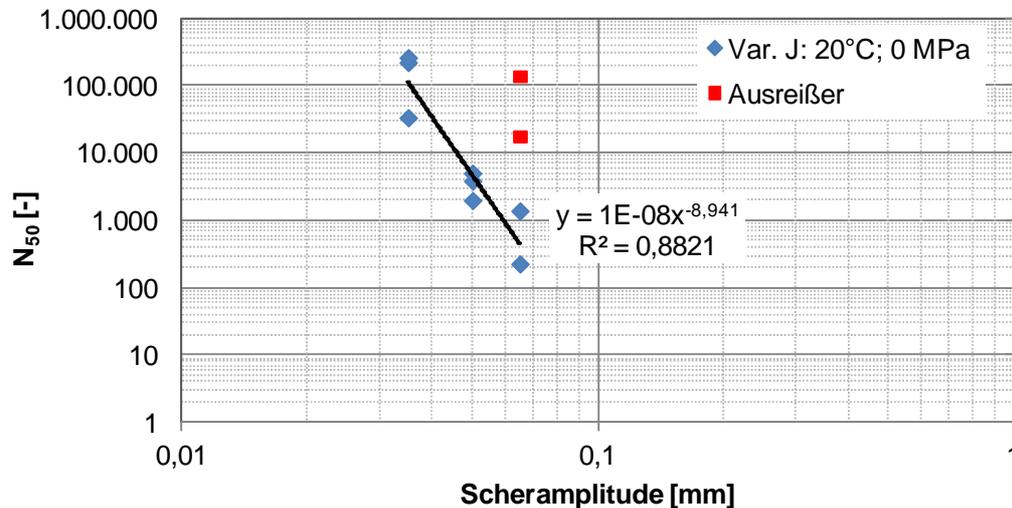


Abbildung 42. Verbundvariante J: Ermüdungspotenzfunktion (Wöhler-Linie) bei 20 °C und 0 MPa Normalspannung.

Tabelle 4. Verbundvariante J: Ergebnisse der zyklischen Scherversuche bei drei unterschiedlichen Scheramplituden bei 20 °C und 0 MPa Normalspannung. Darstellung der Lastwechselzahlen bei Ermüdung (N_{50}), Anfangssteifigkeit ($E_{Anf.}$) und Steifigkeit am Ende des Versuches (E_{Ende}). Rote Zahlen stellen die Ausreißer dar

Probe N_0	Scheramplitude [mm]	$N_{f/50}$ [-]	$E_{Anf.}$ [MPa/mm]	E_{Ende} [MPa/mm]
J2-1-a	0,065	1.410	20,40	2,50
J5-2-b	0,065	230	17,71	2,12
J2-23-c	0,065	140.506	7,18	-
J3-3-d	0,065	18.010	13,49	2,41
J5-1-a	0,050	5.110	19,68	1,68
J1-2-b	0,050	3.910	16,67	2,36
J3-2-c	0,050	2.010	22,15	2,21
J1-1-a	0,035	34.010	16,75	1,92
J4-3-b	0,035	224.510	12,04	3,42
J5-3-c	0,035	266.010	12,16	3,51

Aus Abbildung 42 ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Scheramplitude die resultierende Lastwechselzahl infolge des höheren Schädigungseintrags je Lastwechsel abnimmt (nach Ausreißerbereinigung der Verbundvarianten J2-23-c und J3-3-d).

Wegen der großen Prüfstreuung können bei manchen Verbundvarianten trotz der dreifachen Wiederholung der Scheramplitude (mit dreifacher Belegung der Prüfergebnisse) keine ausreichend guten Regressionen erzielt werden. Dies gilt insbesondere

bei einer Prüftemperatur von 10 °C, unabhängig von der aufgetragenen Normalspannung. Der im Rahmen dieses Projekts beobachtete ungünstigste Fall aus allen Verbundvarianten ist die Verbundvariante B bei 10 °C und 0 MPa Normalspannung (Abbildung 43). Infolge der großen Prüfstreuung kann kein Zusammenhang zwischen der Scheramplitude und resultierenden Lastwechselzahl bei Scherermüdung des Schichtenverbundes festgestellt werden. Dies ist vermutlich auf eine Zusammenwirkung von tiefer Temperatur, grober Schichtoberfläche (Asphaltbinderschicht auf Asphaltdeckschicht) und magerer Bitumenemulsion (mit 40 M.-% Bitumen) zurückzuführen. Die entsprechenden Lastwechselzahlen bei Scherermüdung ($N_{f/50}$) sind für alle Scheramplituden in Tabelle 5 aufgeführt.

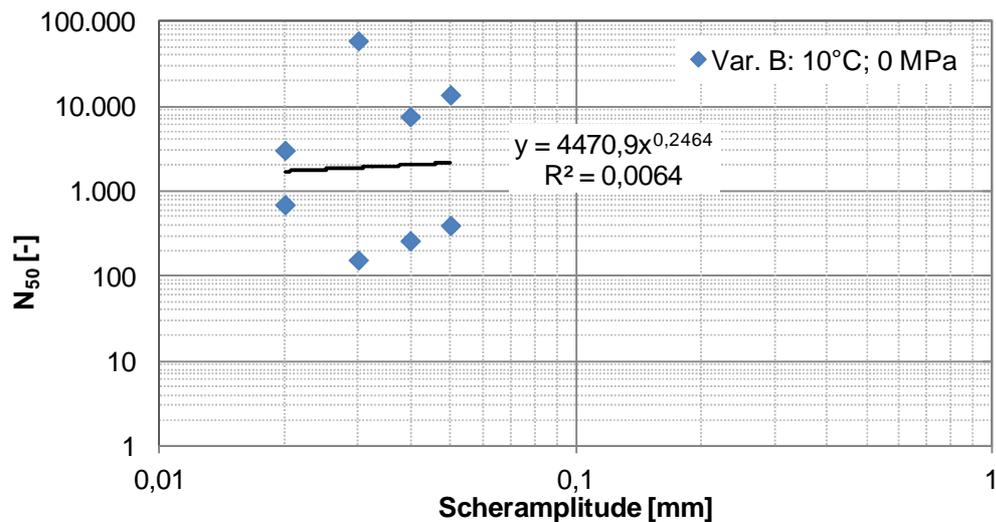


Abbildung 43. Verbundvariante B: Ermüdungspotenzfunktion (Wöhler-Linie) bei 10 °C und 0 MPa Normalspannung; fehlender Zusammenhang zwischen Scheramplitude und resultierender Scherermüdung ($N_{f/50}$).

Tabelle 5. Verbundvariante B: Ergebnisse der zyklischen Scherermüdungsprüfungen bei drei unterschiedlichen Scheramplituden, bei einer Prüftemperatur von 10 °C und einer Normalspannung von 0 MPa; Darstellung der Lastwechselzahlen bei Ermüdung ($N_{i/50}$), Anfangssteifigkeit ($E_{Anf.}$) und Steifigkeit am Ende des Versuches (E_{Ende})

Probe N_0	Scheramplitude [mm]	N_{50} [-]	$E_{Anf.}$ [MPa/mm]	E_{Ende} [MPa/mm]
B3-1-a	0,02	3.010	20,85	3,78
B3-9-b	0,02	689	13,75	3,23
B3-19-a	0,03	58.510	24,59	3,11
B3-3-b	0,03	154	15,47	2,43
B3-12-c	0,03	100	22,59	1,59
B2-22-a	0,04	7.510	18,38	5,59
B2-23-b	0,04	259	13,70	3,03
B3-17-a	0,05	13.510	19,22	3,59
B2-24-b	0,05	393	19,69	1,65

Nach Auswertung der Scherermüdungsprüfungen an allen Verbundvarianten sind die Bestimmtheitsmaße bekannt. Dabei zeigt sich, dass über 80 % der Wöhler-Linien ein Bestimmtheitsmaß von über 0,7 aufweisen und etwa 5 % der Versuche ein Bestimmtheitsmaß von kleiner 0,5 (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6. Häufigkeit des Auftretens der Bestimmtheitsmaße der Wöhler-Linien für alle durchgeführten Scherermüdungsprüfungen (ca. 600 Einzelversuche).

Bestimmtheitsmaß R^2 [-]	Häufigkeit [%]
< 0,50	4,76
$0,50 \leq R^2 < 0,70$	14,28
$0,70 \leq R^2 < 1,0$	80,95

4.4.2 Normalspannung

Der Verlauf der Schersteifigkeit wird maßgeblich von der aufgetragenen Normalspannung beeinflusst (siehe Kapitel 4.2). Bei hoher Normalspannung liegt Steifigkeitsverlauf auf einem hohen Niveau, weil die aufgetragene Normalkraft den Zusammenhalt an der Schichtgrenze erhöht.

Abbildung 44 zeigt Fotos von abgescherten Probekörperhälften nach der Scherermüdungsprüfung bei einer Prüftemperatur von 20 °C und ohne Normalspannung (oben) sowie bei 0,50 MPa Normalspannung. Deutlich ist zu erkennen, dass infolge des Aufbringens einer Normalspannung der Anteil der hellen Flächen an gebrochenen Gesteinskörnern zunimmt. Vermutlich werden infolge des Zusammenpressens des Probekörpers nach Aufbringen einer Normalspannung die Schersteifigkeit und die Reibung an der Schichtgrenze „künstlich“ erhöht. Dies könnte sich auf das Prüfergebnis der Scherermüdungsprüfung auswirken und eine mögliche Ursache für die zeitweise schlechte Wiederholpräzision der Scherermüdungsprüfung sein.

Abbildung 45 zeigt exemplarisch die Verläufe der abnehmenden Schersteifigkeiten für die Verbundvariante F bei einer Prüftemperatur von 10 °C und bei verschiedenen Normalspannungen (0, 0,25 und 0,5 MPa) und Scheramplituden (0,05 und 0,06 mm). Bei gleichen Scheramplituden (0,05 mm) ist die Lebensdauer bei einer Normalspannung von 0,25 MPa Normalspannung deutlich höher als ohne ($N_2 > N_1$). Auch weist der Versuch bei 0,50 MPa Normalspannung und 0,06 mm Scheramplitude eine höhere resultierende Lastwechselzahl im Vergleich zum Versuch bei 0,25 MPa und gleicher Scheramplitude ($N_4 > N_3$) auf.

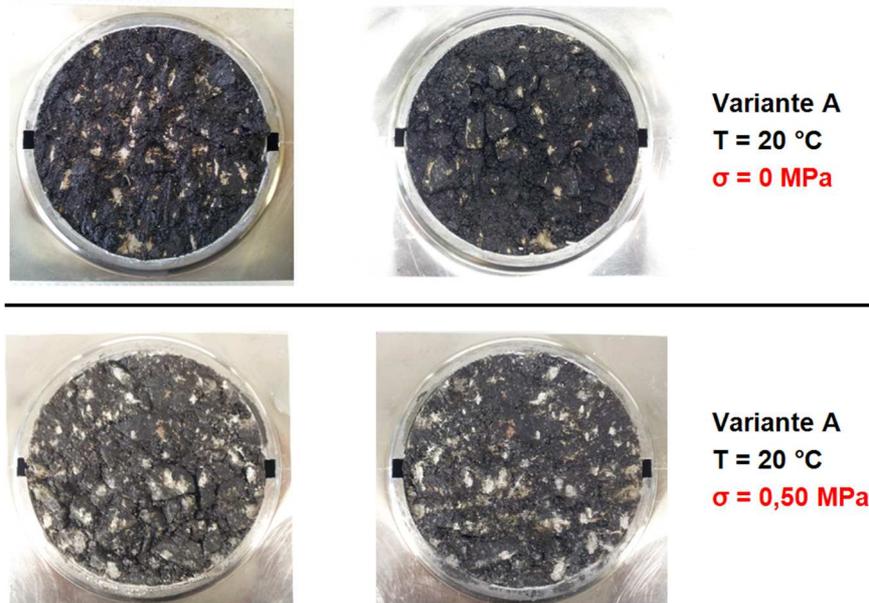


Abbildung 44. Verbundvariante A: Zwei Seiten der Schichtgrenze nach der Schererermüdungsprüfung bei 20 °C, ohne Normalspannung (oben) und bei einer Normalspannung von 0,50 MPa (unten).

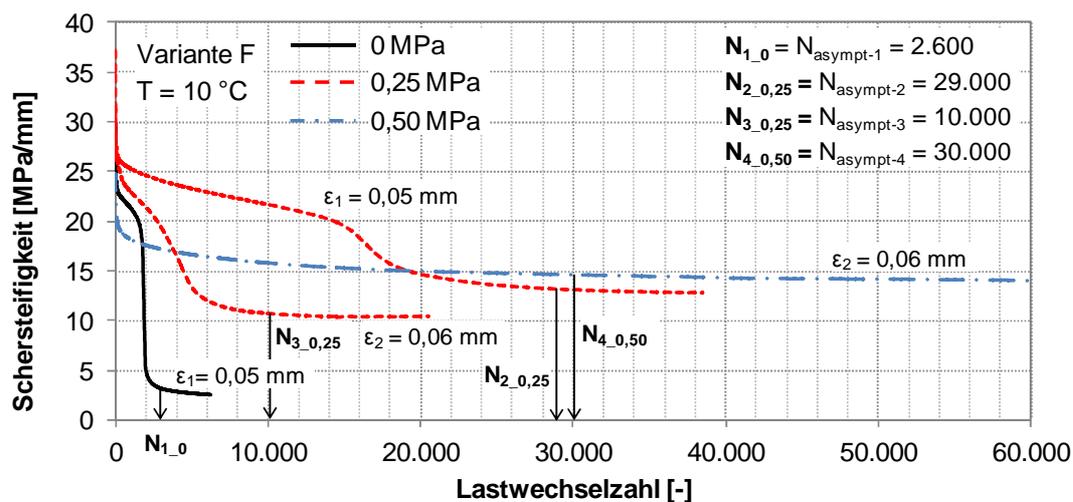


Abbildung 45. Verbundvariante F: Schersteifigkeitsverläufe bei einer Prüftemperatur von 10 °C, bei verschiedenen Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa) und bei zwei Scheramplituden (0,05 mm und 0,06 mm).

Bei Betrachtung aller Ergebnisse aus Scherermüdungsprüfungen an der Verbundvariante F bei einer Prüftemperatur von 10 °C (Abbildung 46) kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Normalspannung die Wöhler-Linien zunehmend nach rechts verschoben werden. Wie oben festgehalten (vgl. Abbildung 45), nimmt die Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes mit steigender Normalspannung deutlich zu.

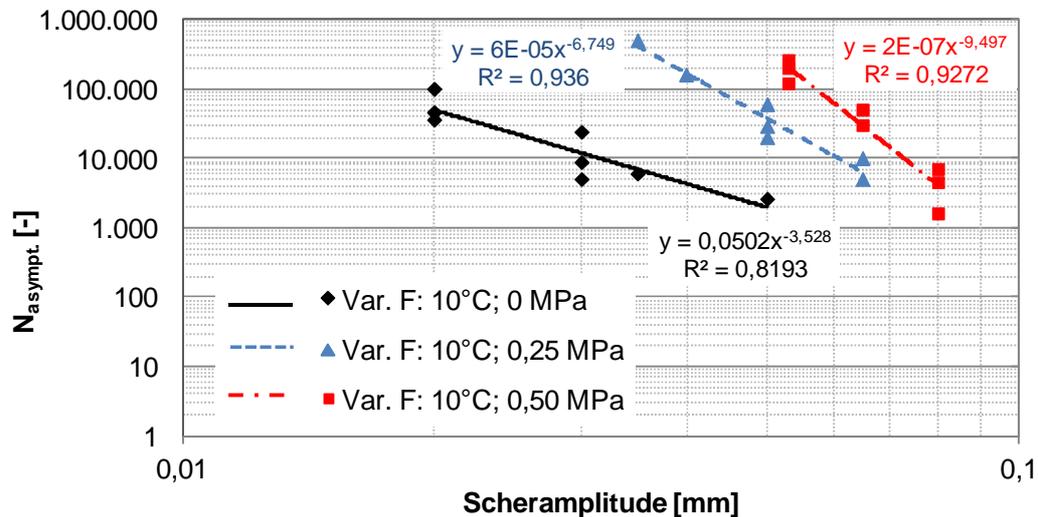


Abbildung 46. Wöhler-Linien für Verbundvariante F bei einer Prüftemperatur von 10 °C und bei drei verschiedenen Normalspannungen (0 MPa, 0,25 MPa und 0,50 MPa).

Ähnliche Zusammenhänge wurde fast bei allen Verbundvarianten bei den Prüftemperaturen 10 °C und 20 °C festgestellt.

Die Beurteilung des Einflusses der Normalspannung auf das Prüfergebnis bei 30 °C ist nur bedingt möglich, weil nicht alle Normalspannungen prüftechnisch umgesetzt werden konnten (siehe unten). Abbildung 47 zeigt die Wöhler-Linien der Verbundvariante A bei den Normalspannungen 0 MPa und 0,25 MPa. Die Wöhler-Linien überschneiden sich, daher kann kein eindeutiger Einfluss der Normalspannung auf die Ermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes gefunden werden.

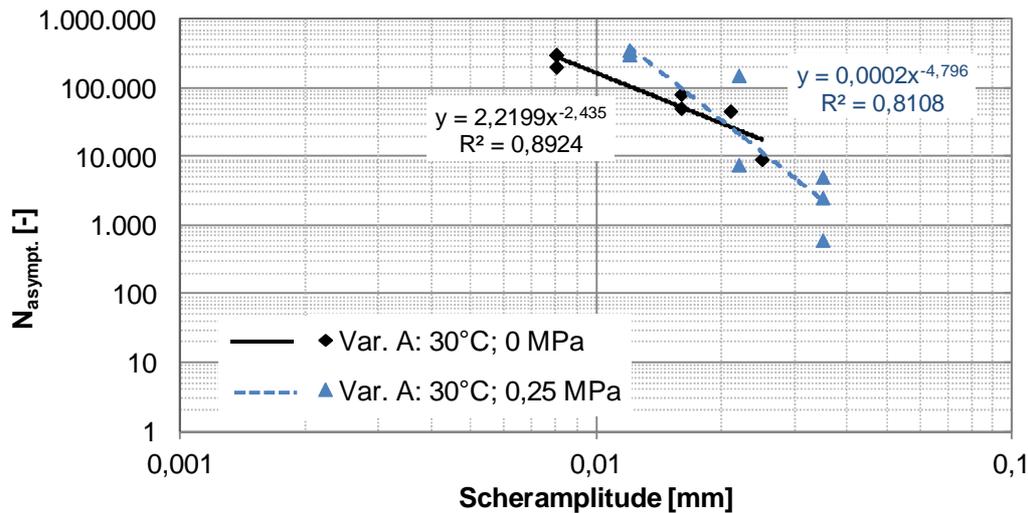


Abbildung 47. Verbundvariante A: Wöhler-Linien bei 30 °C bei den Normalspannungen 0 MPa und 0,25 MPa.

Die Prüfung der Verbundvariante A bei 0,50 MPa Normalspannung und 30 °C war wegen des Zusammendrückens des Probekörpers und der daraus resultierenden großen horizontalen Verformung nicht möglich. Bei diesen Prüfbedingungen ist kein Amplitudensweep durchführbar. Bereits nach 4.200 Lastwechseln ist die maximal zulässige Verformung erreicht (Abbildung 48). Die maximale Verformung ist begrenzt, weil bei Überschreiten der durch die Prüfmachine vorgegebenen Spaltbreite in der Scherzone vom 1 mm würden die Scherbacken aneinander reiben und es würde zu Schädigung der Prüfmachine führen.

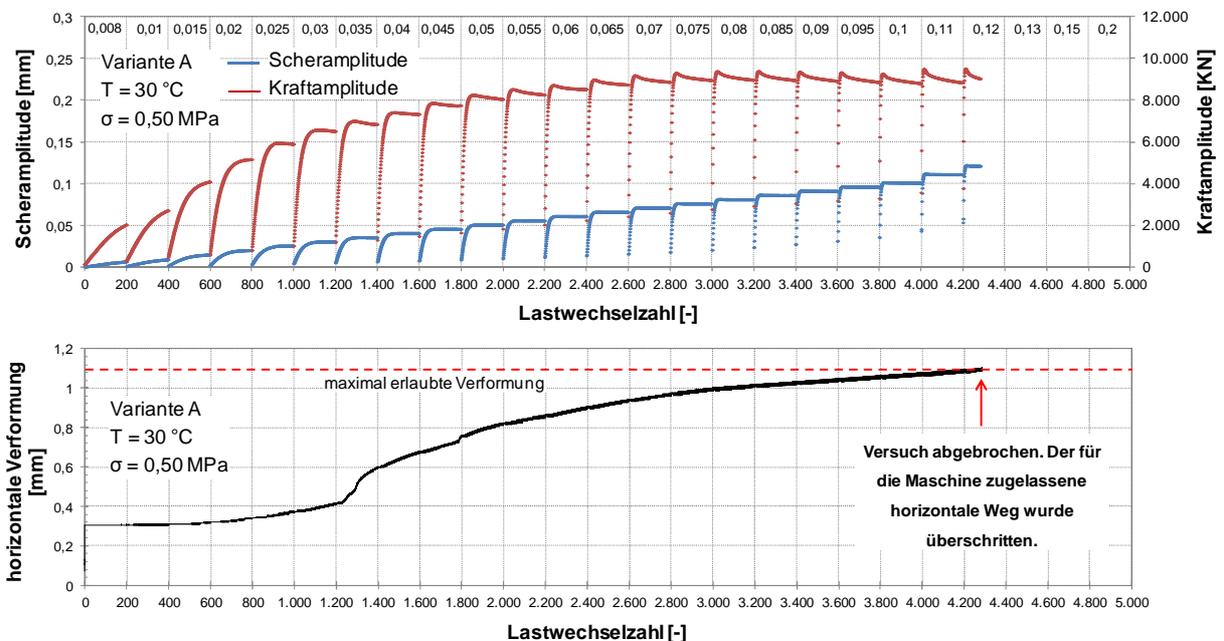


Abbildung 48. Verbundvariante A: Verläufe von Scher- und Kraftamplitude (oben) und Verlauf der horizontalen Verformung (unten) während des Amplitudensweeps bei 30 °C und 0,50 MPa Normalspannung.

Die anderen Verbundvarianten weisen die gleichen Einschränkungen bei der Versuchsdurchführung sowohl bei 0,25 MPa als auch bei 0,50 MPa Normalspannung auf. Aus diesem Grund kann keine Beurteilung des Einflusses der Normalspannung auf die Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes bei 30 ° erfolgen.

Die Untersuchungen zeigen, dass es bei der Normalspannung von 0,50 MPa auch bei 10 °C und 20 °C zu großen horizontalen Verformungen kommen kann. Beispielsweise wurde bei Verbundvariante C nach dem Aufbringen der Normalspannung am Anfang der Temperierungsphase, schon bei 10 °C Prüftemperatur eine Reduzierung der Spaltbreite auf 0,6 mm beobachtet. Unter Berücksichtigung der Dauer von Scherermüdungsprüfungen (etwa über 13 Stunden bei 500.000 Lastwechsel) ist es unerheblich, ob die Normalspannung vor oder nach der Temperierungsphase aufgebracht wird, weil sie nur etwas über eine Stunde bei 10 °C dauert (4.500 Sekunden).

Eine detaillierte Untersuchung der horizontalen Verformung bei einer Prüftemperatur von 20 °C und einer Normalspannung von 0,50 MPa ist in Abbildung 49 dargestellt. Die mittels horizontaler Wegaufnehmer erfassten Verformungen sind für alle Phasen dargestellt, beginnenden mit dem Einbau des Probekörpers bis zum Ende der Prüfung. Während des Aufbaus der Normalspannung innerhalb der ersten 10 Sekunden beträgt die horizontale Vorformung 0,203 mm, während der Temperierungsphase 0,372 mm und danach schließlich 0,361 mm, sodass die gesamte horizontale Verformung vor dem Abbruch des Tests 0,936 mm ist. Diese Gesamtverformung setzt sich zusammen aus der Druckverformung des Probekörpers und der horizontalen Verformung des Prüfrahmens. Durch Messung der Spaltbreite am Ende der Prüfung wurde festgestellt, dass sich die Scherbacken während der Versuchsdurchführung um 0,7 mm auf einander zubewegt haben, von der ursprünglichen Entfernung von 1,1 mm auf 0,4 mm am Ende der Scherermüdungsprüfung (siehe Abbildung 50). Wird der Weg der Scherbacken von der Gesamtverformung abgezogen, so erhält man mit $(0,936 - 0,7 =)$ 0,236 mm die Bewegung des Prüfrahmens.

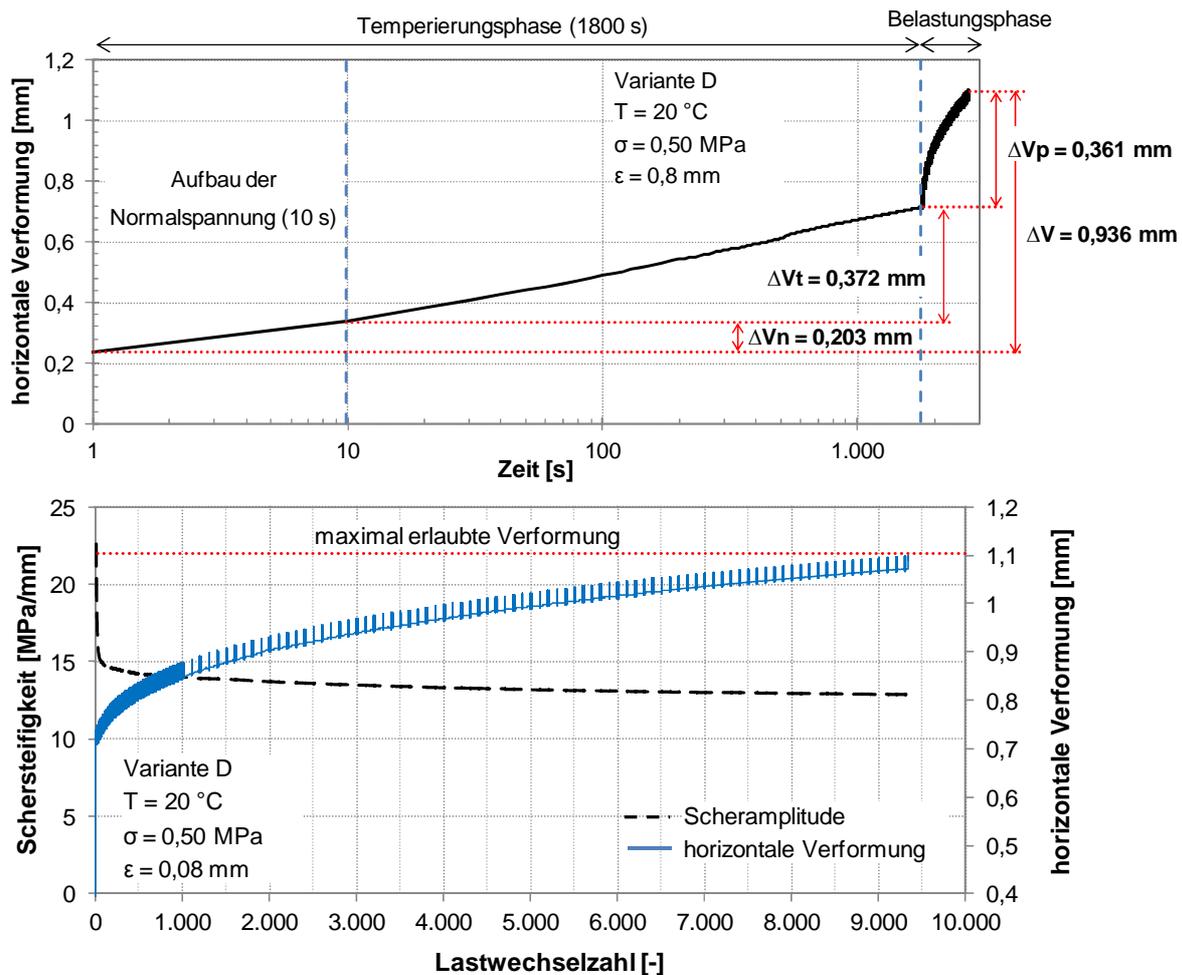


Abbildung 49. Verbundvariante D: Verläufe der horizontalen Verformung und der Schersteifigkeit während der Schermüdigungsprüfung bei 20 °C, 0,50 MPa Normalspannung und 0,08 mm Scherampplitude. ΔV_n ...Anstieg der Verformung während des Aufbaus der Normalspannung; ΔV_t ...Anstieg der Verformung während der Temperierung; ΔV_p ...Anstieg der Verformung während der zyklischen Belastung.

Abbildung 50 zeigt für den gleichen Versuch den Scherbereich der Prüfvorrichtung vor und nach der Prüfung. Es ist deutlich zu sehen, dass die Scherbacken nach der Prüfung eng aneinander liegen. Eine weitere Auslenkung würde zu Schäden an der Prüfmaschine führen.

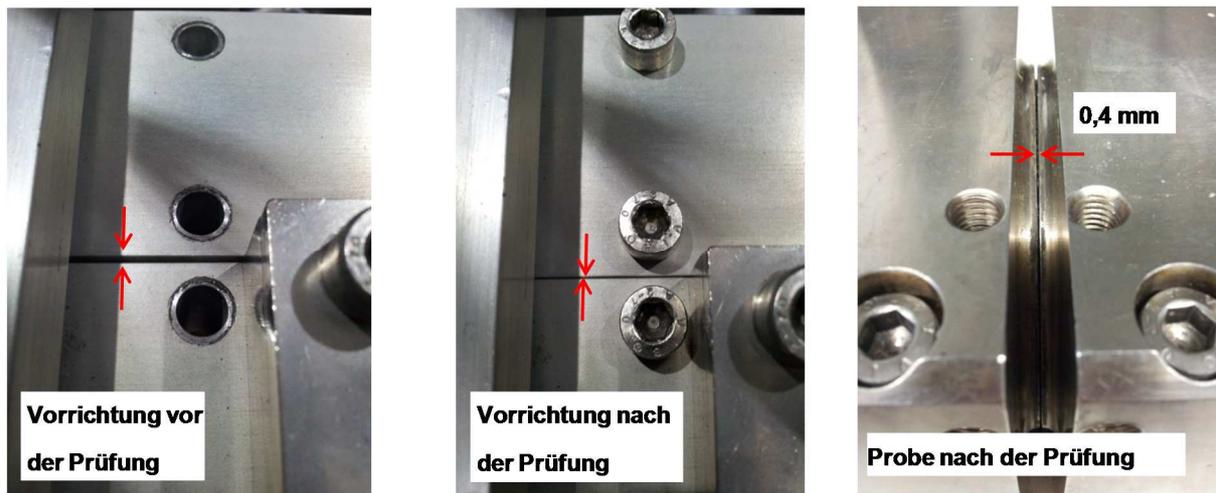


Abbildung 50. Verbundvariante D: Scherbereich der Prüfvorrichtung vor (links) und nach (Mitte) der Scherermüdungsprüfung bei 20 °C, 0,50 MPa Normalspannung und 0,08 mm Scheramplitude mit der Spaltbreite des geprüften Probekörpers (rechts).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Normalspannung einen erheblichen Einfluss auf die Scherermüdungsbeständigkeit hat. Abbildung 51 zeigt die Verläufe der Schersteifigkeit und der horizontalen Verformung während der Scherermüdungsprüfung bei 20 °C, 0,25 MPa Normalspannung und 0,04 mm Scheramplitude. Es ist deutlich zu sehen, dass nach einer Anfangszunahme die Schersteifigkeit nicht auf einem konstanten Niveau verbleibt, sondern einen leichten Anstieg von etwa 2 MPa/mm aufweist. Erst danach verläuft die Schersteifigkeit konstant. Dies lässt darauf schließen, dass durch die erhöhte horizontale Verformung (von 0,28 mm) bzw. das weitere Zusammendrücken des Schichtenverbundes eine verbesserte Reibung, Verzahnung und Verklebung erreicht wird, die zum besseren Schichtenverbund führen. Der Verbesserungsgrad kann sogar höher als der Schädigungsgrad sein, was aus der Abbildung 52 zu entnehmen ist. Die Schersteifigkeit weist nach einem anfänglichen Abfall einen Anstieg auf, der mit einer starken Zunahme der horizontalen Verformung einhergeht. Obwohl die Verformung weiter ansteigt, übt sie keinen weiteren Einfluss auf die Schersteifigkeit aus, die anschließend sinkt.

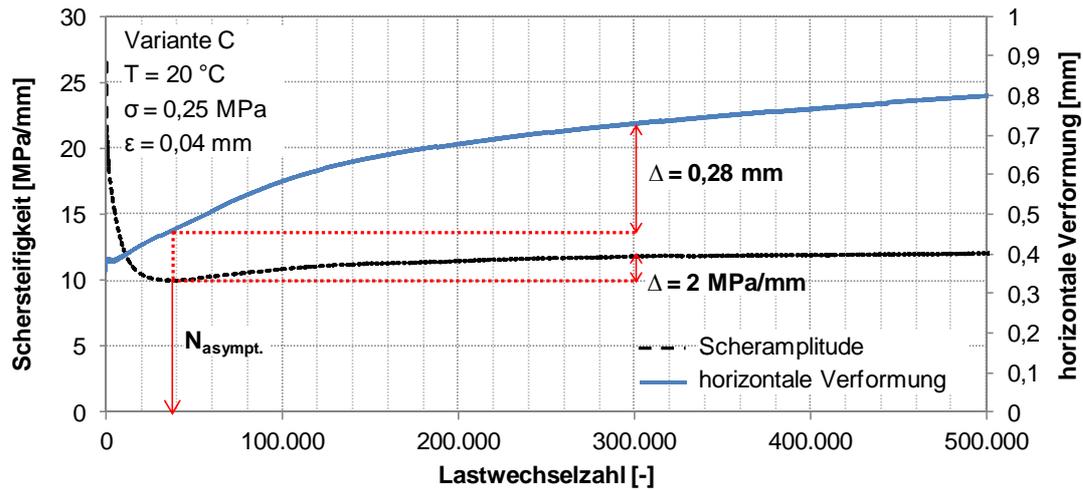


Abbildung 51. Verbundvariante C: Verläufe der Schersteifigkeit und der horizontalen Verformung während der Scherermüdungsprüfung bei 20 °C, 0,25 MPa Normalspannung und 0,04 mm Scheramplitude.

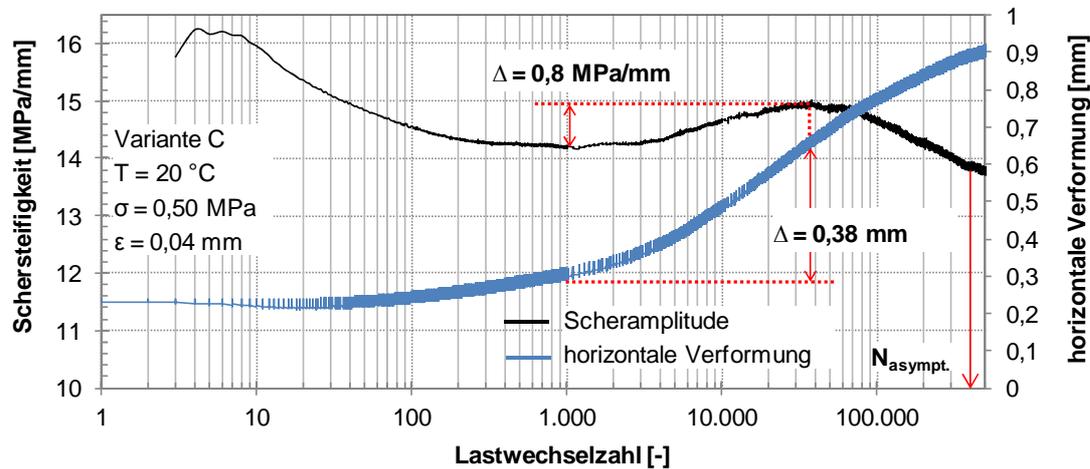


Abbildung 52. Verbundvariante C: Verläufe der Schersteifigkeit und der horizontalen Verformung während der Scherermüdungsprüfung bei 20 °C, 0,50 MPa Normalspannung und 0,04 mm Scheramplitude.

4.4.3 Prüftemperatur

Die Untersuchungen zur Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes decken mit den gewählten fünf Prüftemperaturen von -10 °C bis 50 °C die gesamte Gebrauchstemperaturspanne ab. Es zeigt sich, dass die Kombination aus Temperatur und Scheramplitude die Scherermüdungsbeständigkeit maßgeblich beeinflussen.

Die Scherermüdungsprüfungen bei 50 °C sind als unplausibel und „nicht zielführend“ zu bezeichnen, weil auch höhere Schersteifigkeiten bei geringerer Normalspannung auftreten können (Abbildung 53). Eine erhöhte Normalspannung bei gleicher Scheramplitude sollte eine Zunahme der Schersteifigkeit bewirken (vgl. Kapitel 4.4.2).

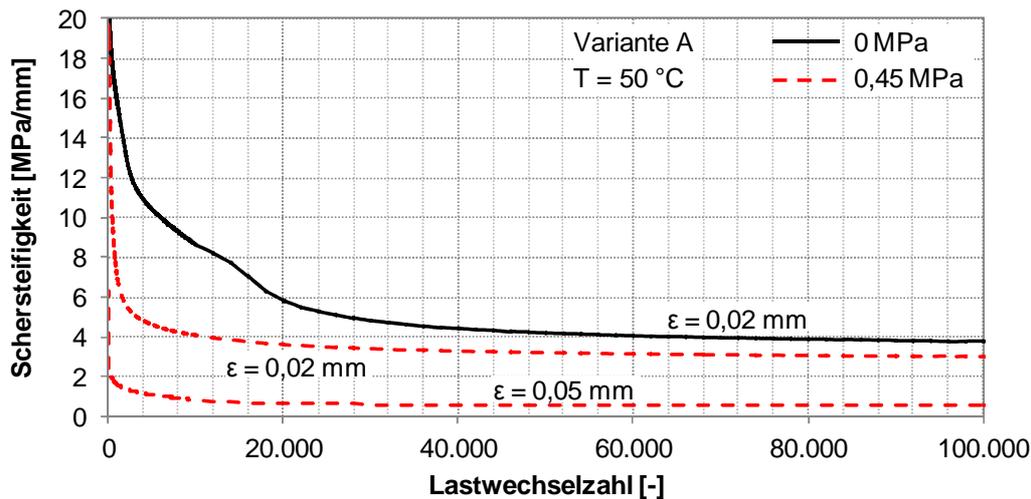


Abbildung 53. Verbundvariante A: Verläufe der Schersteifigkeit während der Scherermüdungsprüfung bei 50 °C, bei zwei Normalspannungen (0 MPa und 0,45 MPa) und bei zwei Scheramplituden (0,02 mm und 0,05 mm).

Die Schersteifigkeiten der Verbundvariante A bei -10 °C, 0 MPa Normalspannung und bei zwei Scheramplituden sind in Abbildung 54 dargestellt. Trotz der größeren Scheramplituden und der höheren Lastwechselzahl (450.000) weist der Steifigkeitsverlauf keine Abnahme auf. Für die Scherermüdung der Probe bei dieser Temperatur müssten deutlich über 500.000 Lastwechsel appliziert werden können. Darüber hinaus sind die Versuche bei -10 °C aus laborökonomischen Gründen nicht zielführend. Höhere Scheramplituden, die gegebenenfalls zur früheren Scherermüdung führen sollten, übersteigen die Möglichkeiten des Prüfrahmens (Kraft über 10 kN) bzw. der Prüfmaschine (Kraft über 20 kN).

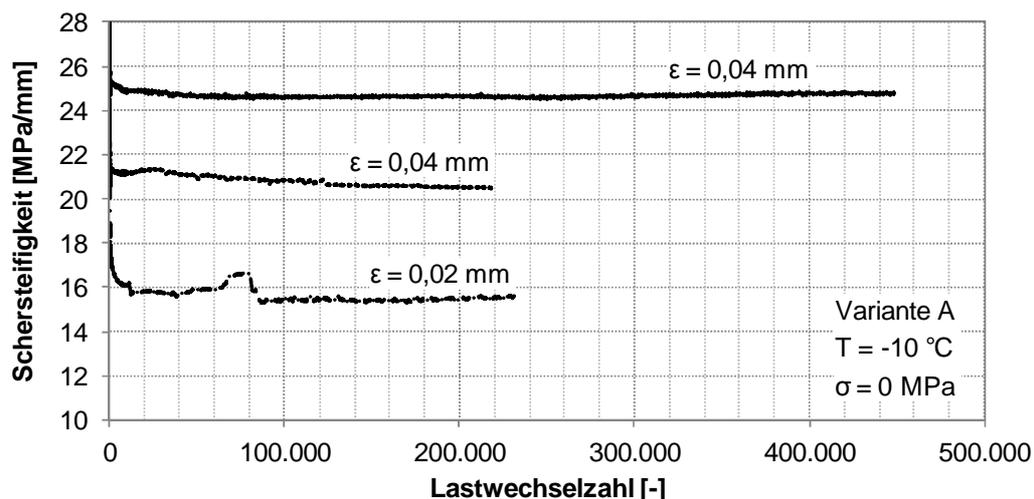


Abbildung 54. Verbundvariante A: Verläufe der Schersteifigkeit während der Scherermüdungsprüfung bei -10 °C, bei 0 MPa Normalspannungen und bei zwei Scheramplituden (0,02 mm und 0,04 mm).

Die Durchführung der Untersuchungen bei den Prüftemperaturen 10 °C und 20 °C ist problemlos möglich. Abbildung 55 zeigt die Verläufe der Schersteifigkeit für Verbundvariante F bei 0 MPa Normalspannung, bei 0,2 mm Scheramplitude und bei den Prüftemperaturen 10, 20 und 30 °C. Es lässt sich zeigen, dass mit sinkender Temperatur die Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes ansteigt ($N_{3_10} > N_{2_20} > N_{1_30}$).

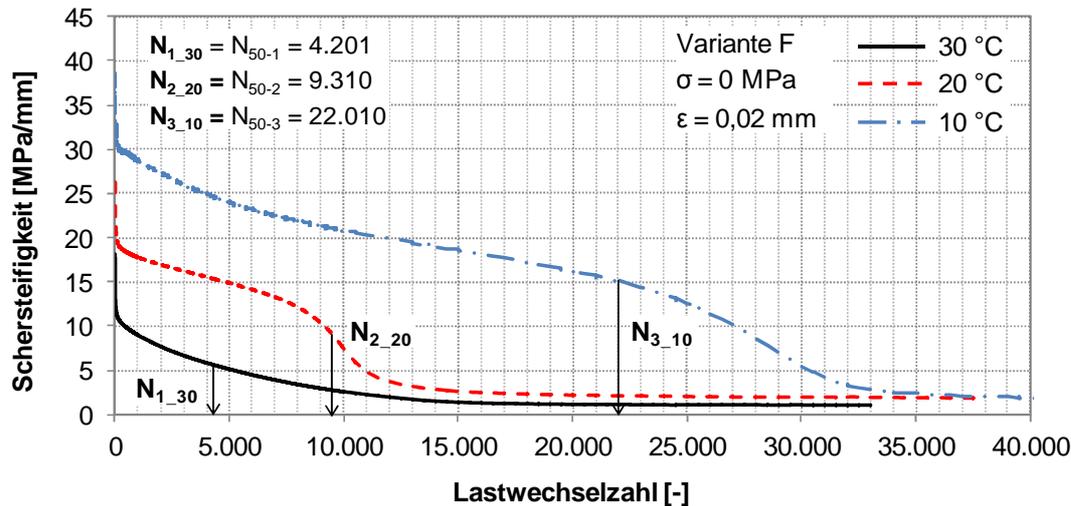


Abbildung 55. Verbundvariante F: Verläufe der Schersteifigkeit während der Scherermüdungsprüfung bei 0 MPa Normalspannung, bei verschiedenen Temperaturen (30 °C, 20 °C und 10 °C) und bei einer Scheramplitude (0,02 mm).

Bei Betrachtung aller Scherermüdungsprüfungen für Verbundvariante F bei 10 °C (Abbildung 56) kann festgestellt werden, dass bei 10 °C die größte Scherermüdungsbeständigkeit erzielt wird. Trotz der bei 0,02 mm Scheramplitude festgestellten größeren Scherermüdungsbeständigkeit bei 20 °C gegenüber 30 °C (siehe Abbildung 55), weisen die Ergebnisse bei 30 °C bei kleineren Scheramplituden eine größere Scherermüdungsbeständigkeit auf (siehe Abbildung 56), die Wöhler-Linien schneiden sich.

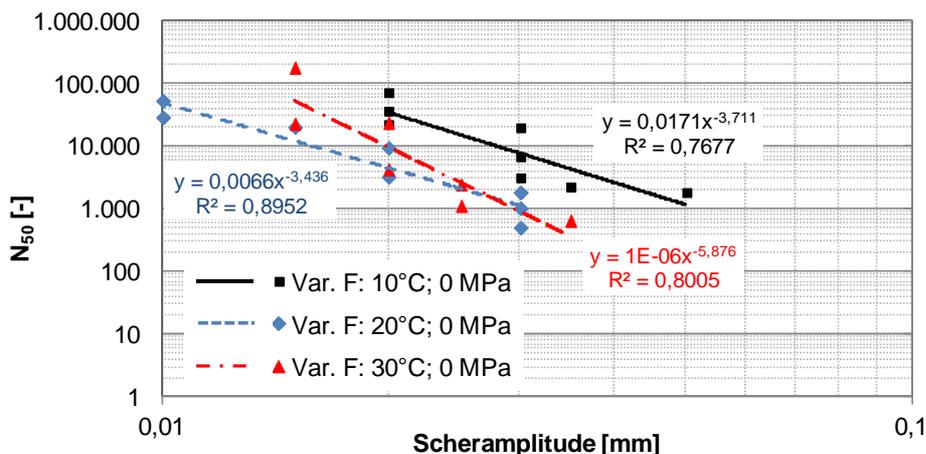


Abbildung 56. Wöhler-Linien für Verbundvariante F bei 0 MPa Normalspannung und bei den Prüftemperaturen 30 °C, 20 °C und 10 °C.

Die Überschneidung der Wöhler-Linien ist auch bei der Verbundvariante E zu beobachten, wobei die Scherermüdungsbeständigkeit bei kleinen Scheramplituden bei 20 °C größer ist.

Die Scherermüdungsprüfungen für Verbundvariante D ergeben bei 0 MPa Normalspannung und für die gewählten Scheramplituden keine Überschneidung der Wöhler-Linien. Die Scherermüdungsbeständigkeiten sind bei 10 °C am größten, bei 20 °C am niedrigsten. Vergleichbare Ergebnisse veröffentlichten Bodin et al. (2010), die zeigten für die weggeregelterte Ermüdungsprüfung mittels Vier-Punkt-Biegung, dass die Ermüdungsbeständigkeit mit sinkender Temperatur zunächst abnimmt und ab Temperaturen von weniger als ca. 10 °C ansteigt.

Bei den Verbundvarianten A und C wird eine Zunahme der Scherermüdungsbeständigkeit mit sinkender Temperatur beobachtet. Abbildung 57 zeigt die Wöhler-Linien für die Verbundvariante A bei 0 MPa Normalspannung und bei den drei Temperaturen 30 °C, 20 °C und 10 °C.

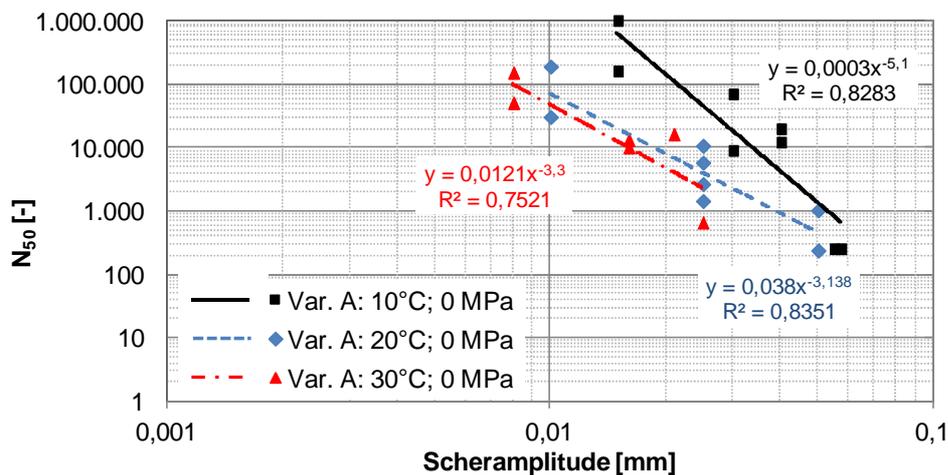


Abbildung 57. Wöhler-Linien für Verbundvariante A bei 0 MPa Normalspannung und bei den Prüftemperaturen 30 °C, 20 °C und 10 °C.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Prüfstreuung bei einer Prüftemperatur von 10 °C werden die Ergebnisse der Verbundvariante B nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen (Abbildung 58).

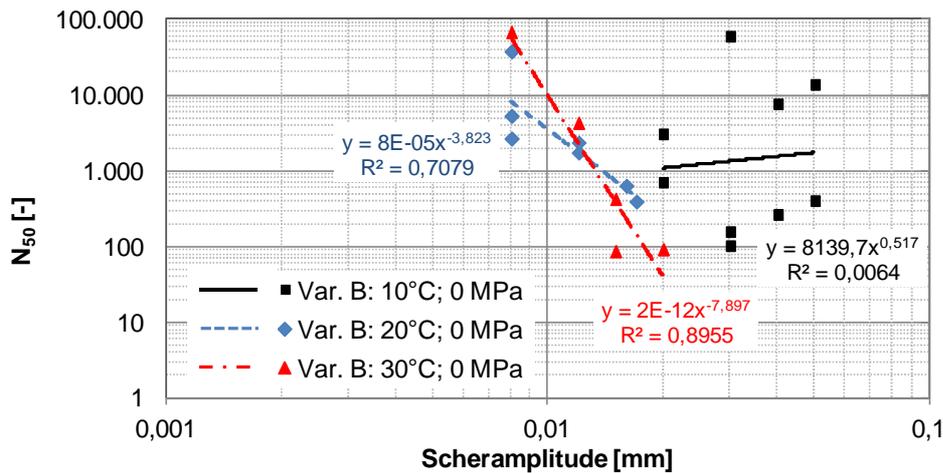


Abbildung 58. Wöhler-Linien für Verbundvariante B bei 0 MPa Normalspannung und bei den Prüftemperaturen 30 °C, 20 °C und 10 °C.

Für Verbundvariante A kann der Temperatureinfluss auf die Scherermüdungsbeständigkeit bei 0,25 MPa Normalspannung für alle drei Prüftemperaturen (10 °C, 20 °C und 30 °C) analysiert werden (Abbildung 59). Die Versuche zeigen bei 10 °C die größte Scherermüdungsbeständigkeit.

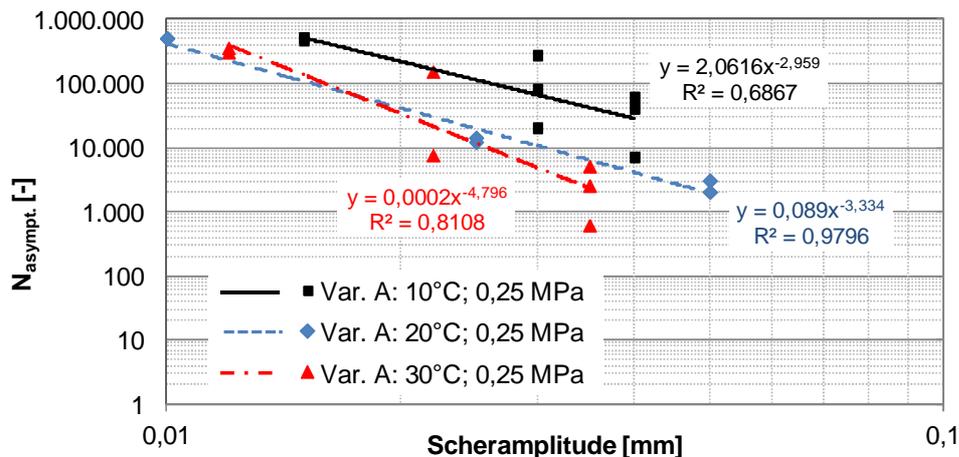


Abbildung 59. Wöhler-Linien für Verbundvariante A bei 0,25 MPa Normalspannung und bei den Prüftemperaturen 30 °C, 20 °C und 10 °C.

Wegen der hohen horizontalen Verformungen ist die Versuchsdurchführung bei Normalspannungen von 0,25 MPa und 0,50 MPa und bei einer Prüftemperatur von 30 °C bei anderen Verbundvarianten nicht möglich.

Für Verbundvariante C zeigt sich, dass die Scherermüdungsbeständigkeit bei 20 °C besser ist als bei 10 °C (Abbildung 60).

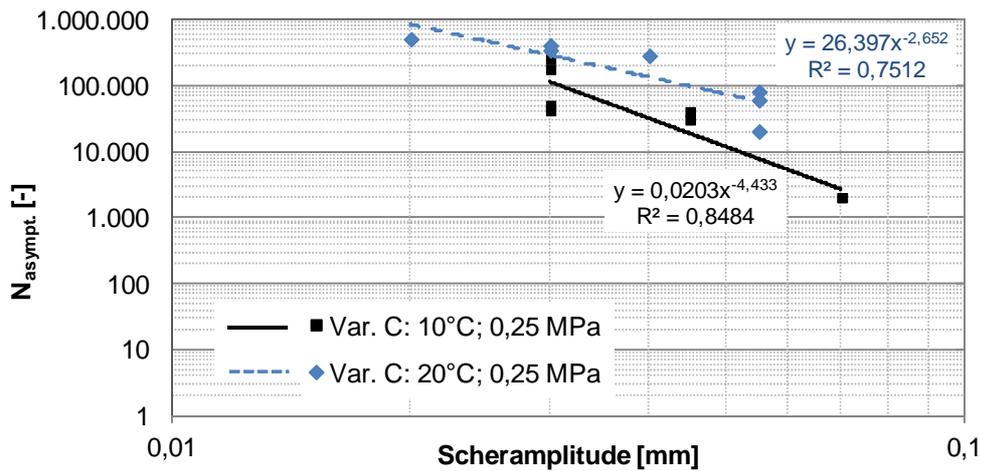


Abbildung 60. Wöhler-Linien für Verbundvariante C bei 0,25 MPa Normalspannung und bei den Prüftemperaturen 20 °C und 10 °C.

Da die Versuchsdurchführung bei 30 °C und 0,50 MPa Normalspannung wegen der zu großen Horizontalverformung nicht möglich war, erfolgt die weitere Beurteilung des Einflusses der Prüftemperatur auf die Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes nur bei 10 °C und 20 °C. Die Versuche an den meisten Verbundvarianten zeigen bei 10 °C bessere Scherermüdungsbeständigkeiten. Die Wöhler-Linien der Verbundvariante A weisen eine Überschneidung auf. Nur für Verbundvariante C zeigt sich, dass die Scherermüdungsbeständigkeit bei 20 °C besser als bei 10 °C ist.

4.5 Funktionale Beschreibung der Scherermüdung

4.5.1 Simulation mittels einer Exponentialfunktion

Ergebnis der Scherermüdungsprüfungen an den 11 Verbundvarianten (A bis K, sh. Tabelle 2) ist der jeweilige Verlauf der Schersteifigkeit als Funktion der Lastwechselzahl. Exemplarisch sind die Kurvenverläufe für die Probekörper A2-22, A2-23 und A2-24 in Abbildung 61 abgebildet.

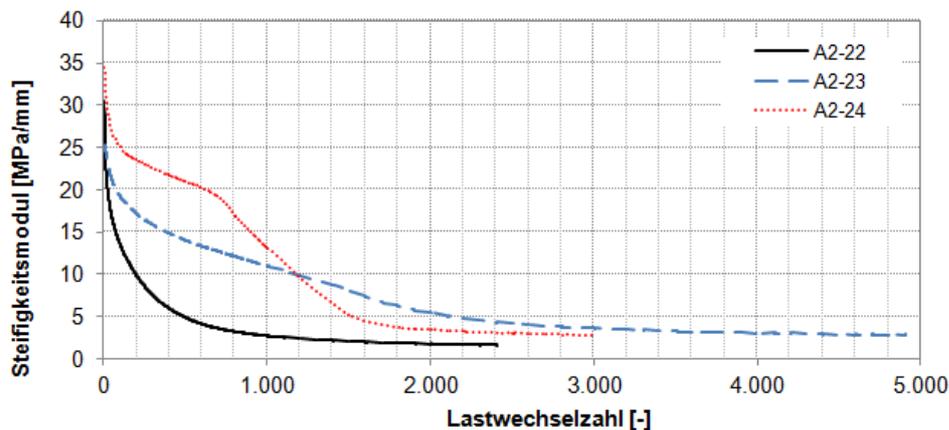


Abbildung 61: Exemplarische Schersteifigkeitsverläufe von drei Probekörpern der Verbundvariante A bei den Prüfparametern $T = 20 \text{ °C}$, $\sigma = 0 \text{ MPa}$ und $\epsilon = 0,05 \text{ mm}$.

In der Mehrzahl der an sämtlichen Verbundvarianten durchgeführten Versuche nimmt der Schersteifigkeitsmodul exponentiell ab, d. h. der Kurvenverlauf folgt einer Exponentialfunktion, wie in Abbildung 61 der Kurvenverlauf für den Probekörper A2-22. Für diese Fälle kann der Verlauf der Scherermüdung mit guter Näherung mit einer vierparametrischen Exponentialfunktion mathematisch beschrieben werden:

$$y = a_0 + a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-a_2}{a_3}\right)} \quad \text{Gl. 7}$$

Gl. 7 ist für die Mehrzahl der Scherermüdungsprüfungen gültig. Die Parameter a_0 , a_1 und a_3 der Exponentialfunktion können physikalisch interpretiert werden (vgl. Abbildung 62):

- a_0 = verbleibende Restschersteifigkeit infolge Reibung und Verzahnung,
- a_1 = Startwert der Schersteifigkeit; gilt solange $a_2 = 0$ ist,
- a_3 = Schersteifigkeitsabfall; je niedriger der Wert, desto schneller der Abfall.

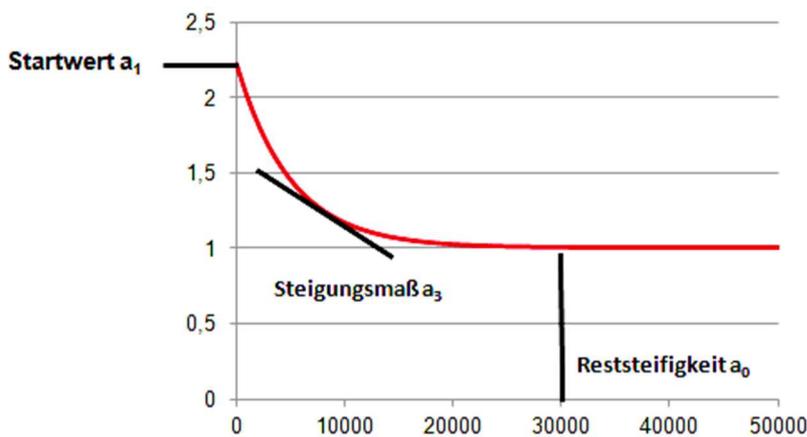


Abbildung 62: Physikalische Interpretation der Parameter a_0 , a_1 und a_3 der Exponentialfunktion zur Simulation des Schersteifigkeitsverlaufes (Gl. 7): verbleibende Restschersteifigkeit infolge Reibung und Verzahnung a_0 , Startwert der Schersteifigkeit a_1 und Schersteifigkeitsabfall a_3 .

Der Parameter a_2 ist physikalisch nicht interpretierbar. Er bewirkt in einigen Fällen eine horizontale Verschiebung der Funktion, in der Mehrzahl der Fälle gilt $a_2 = 0$.

Für jene Kurvenverläufe, die vom Verlauf der Exponentialfunktion abweichen, gilt Gl. 7 nicht; siehe beispielsweise die Verläufe für die Probekörper A2-23 und A2-24. Abweichungen vom exponentiellen Kurvenverlauf erscheinen als „Buckel“ und treten dann auf, wenn es zeitweise zu einer Verkantung oder Verzahnung innerhalb der Scherfläche kommt. Lässt die Verzahnung im weiteren Verlauf des Versuchs wieder nach, nähert sich die Kurve einem exponentiellen Verlauf an, solange bis ein zur Abszisse asymptotischer Verlauf erreicht wird. Kurvenverläufe mit Buckeln können mathematisch mit einem hohen Bestimmtheitsmaß simuliert werden, indem Gl. 7 erweitert wird zu:

$$y = a_0 + a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-a_2}{a_3}\right)} + b_0 \cdot e^{\left(\frac{x-b_1}{b_2}\right)^4}$$

Gl. 8

Für die Beantwortung der grundsätzlichen Fragestellungen sind diese Abweichungen vom exponentiellen Verlauf jedoch nur von untergeordneter Bedeutung. Gl. 8 wird daher nicht weiter verfolgt.

4.5.2 Abhängigkeit der Funktionsparameter von den Prüfbedingungen

Ziel der Auswertung ist es nun, möglichst allgemein gültige Abhängigkeiten der Parameter a_0 , a_1 und a_3 von den Prüfbedingungen (Scheramplitude s [mm], Prüftemperatur T [°C] und Normalspannung σ [MPa]) zu finden und diese Abhängigkeiten funktional zu beschreiben. Diese Auswertung erfolgt für die Verbundvarianten A bis F (vgl. Tabelle 2).

(a) Verbundvariante A: Funktionen für die Parameter a_0 , a_1 und a_3

Folgende funktionale Abhängigkeiten können für die Verbundvariante A (B-T, HautK, C60BP1-S; vgl. Tabelle 2) angegeben werden:

$$a_0(\sigma, s) = (12,123 + 41,253 \times \sigma) - 267,084 \times s \quad \text{Gl. 9}$$

$$a_1(T) = 15,467 - 0,335 \times T \quad \text{Gl. 10}$$

$$a_3(s) = 412430 - 136,33 \times s \quad \text{Gl. 11}$$

Diese funktionale Abhängigkeiten können aus den nachfolgend dargestellten Zusammenhängen für die Parameter a_0 , a_1 und a_3 abgeleitet werden.

(a.1) Parameter a_0 für die Verbundvariante A

In Abbildung 63 sind alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

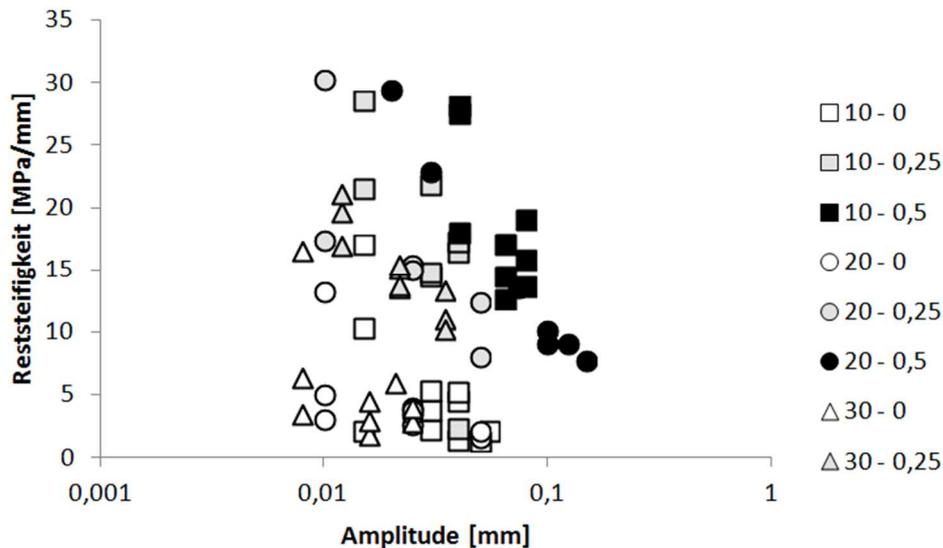


Abbildung 63. Verbundvariante A: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

Der Einfluss der Scheramplitude ist deutlich erkennbar. Zur funktionalen Beschreibung wird eine lineare Regression über die Scheramplitude für jede Prüftemperatur und jede Normalspannung angewandt. Exemplarisch sind für eine Prüftemperatur von $T = +10\text{ °C}$ die Regressionen für die drei eingesetzten Normalspannungen in Abbildung 64 angegeben.

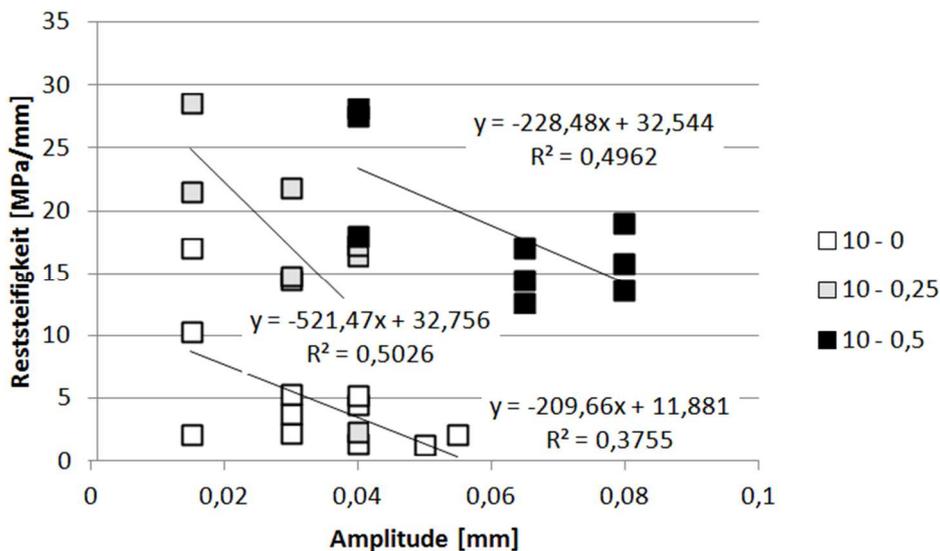


Abbildung 64. Verbundvariante A: Lineare Regressionen der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude für eine Prüftemperatur von $T = +10\text{ °C}$.

Trotz der zum größten Teil geringen Bestimmtheitsmaße geben die linearen Regressionen die Tendenzen der Zahlenwerte wieder. Diese Tendenz wird in den weiteren Verbundvarianten B bis F bestätigt, so dass die lineare Regression beibehalten wird. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7. Verbundvariante A: Parameter der linearen Regressionen zur funktionalen Beschreibung der Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Scheramplitude

Prüftemperatur °C	Normalspannung MPa	c_0 MPa/mm	c_1 -	Bestimmtheitsmaß %
10	0	11,881	-209,66	37,60
	0,25	32,756	-521,47	50,26
	0,5	32,544	-228,48	49,62
20	0	7,5724	-130,11	33,52
	0,25	25,585	-325,35	61,57
	0,5	28,461	-163,31	87,11
30	0	10,168	-301,21	21,94
	0,25	22,46	-328,28	79,95

Um weitere mögliche Einflussgrößen zu identifizieren, werden in Abbildung 65 allein die linearen Regressionen (Geraden) dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass sich die Geraden in Abhängigkeit von der Normalspannungen gruppieren.

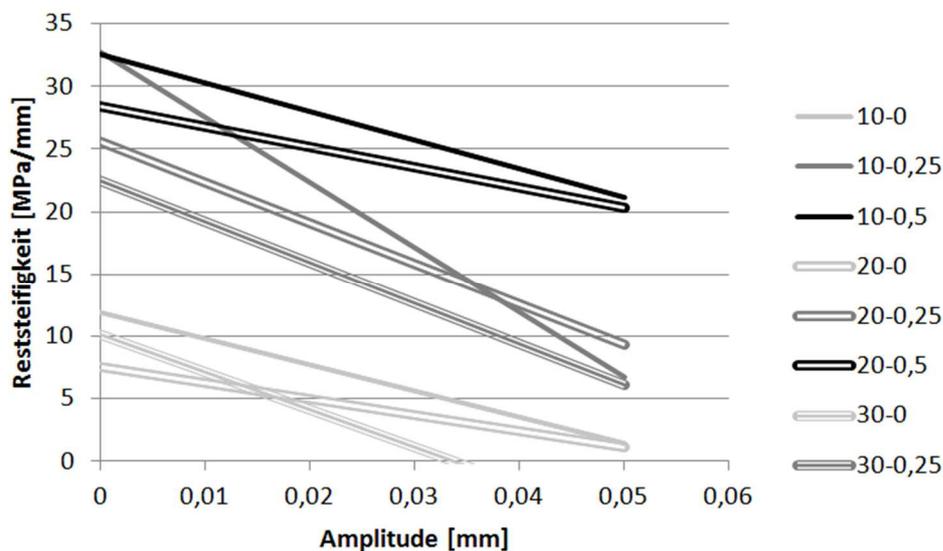


Abbildung 65. Verbundvariante A: Regressionsgeraden für alle Prüftemperaturen und alle Normalspannungen.

Für eine weitere funktionale Beschreibung werden die Regressionen gleicher Normalspannung zusammengefasst. Dies erfolgt über eine einfache Mittelwertbildung (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8. Verbundvariante A: Parameter d_0 und d_1 der Regressionsgeraden zur Beschreibung der Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung

Normalspannung MPa	d_0 MPa/mm	d_1 -
0	9,8733	-213,66
0,25	26,9366	-391,7
0,5	30,50	-195,895

Mit dieser Vereinfachung kann festgehalten werden, dass die Abhängigkeit von der Prüftemperatur entfällt. Die Scheramplitude stellt die primäre Einflussgröße dar, gefolgt von der Normalspannung.

Für eine weitere funktionale Beschreibung lässt sich der Parameter d_0 über eine lineare Regression beschreiben, während der Parameter d_1 keine Systematik erkennen lässt und als Mittelwert angegeben werden kann (Tabelle 9).

Tabelle 9. Verbundvariante A: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1 aus Tabelle 8

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	12,123	41,253	87,51
d_1	-267,084	0	-

Zusammenfassend kann für die Verbundvariante A die Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Normalspannung und der Scheramplitude näherungsweise funktional beschrieben werden durch:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0 e_0 + d_0 e_1 \times \sigma) + d_1 e_0 \times s \quad \text{Gl. 12}$$

mit:

- a_0 : Restschersteifigkeit [MPa/mm],
- σ : Normalspannung [MPa],
- s : Scheramplitude [mm],
- $d_0 e_0, d_0 e_1, d_1 e_0$: Parameter aus Tabelle 9.

Grafisch wird die Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude deutlich, siehe Abbildung 66.

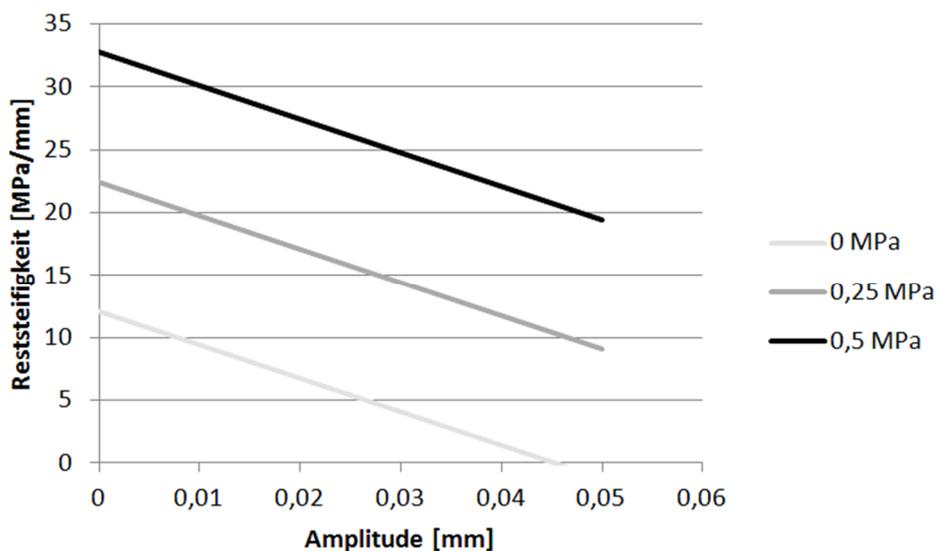


Abbildung 66. Verbundvariante A: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

(a.2) Parameter a_1 für die Verbundvariante A

In Abbildung 67 sind alle Startwerte der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

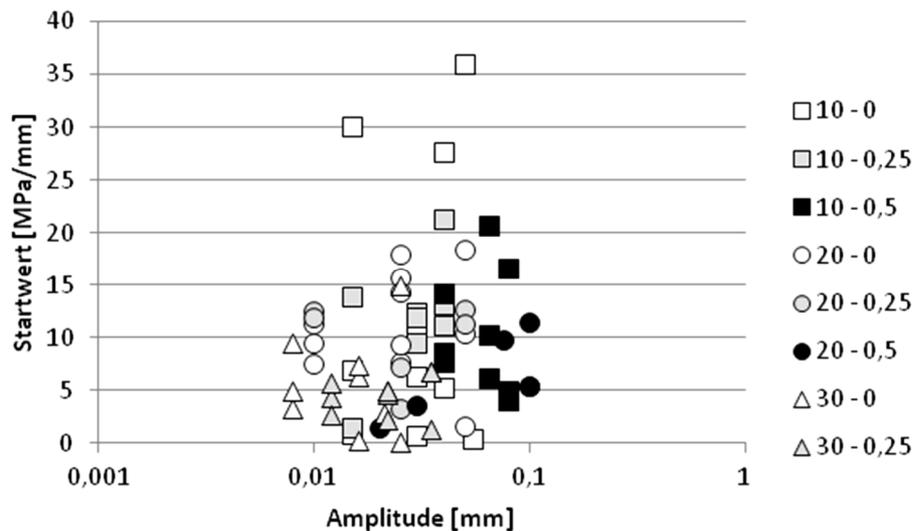


Abbildung 67. Verbundvariante A: Alle Startwerte der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

Abbildung 67 lässt keine Abhängigkeit von der Scheramplitude erkennen, lineare Regressionen zeigen keine Systematik (Tabelle 10). Daher werden Mittelwerte über alle Prüfungen gleicher Prüftemperatur oder Normalspannung gebildet (siehe Abbildung 68).

Tabelle 10. Verbundvariante A: Parameter der linearen Regressionen zur funktionalen Beschreibung der Abhängigkeit der Startwerte a_1 von der Scheramplitude

Prüftemperatur °C	Normalspannung MPa	c_0 MPa/mm	c_1 -	Bestimmtheitsmaß %
10	0	8,3854	129,75	1,98
	0,25	2,8909	299,16	32,03
	0,5	12,167	-28,892	0,79
20	0	11,315	-1,2048	0,0
	0,25	9,185	23,718	1,27
	0,5	1,3451	68,735	44,65
30	0	4,9712	36,237	0,28
	0,25	3,7834	30,284	2,37

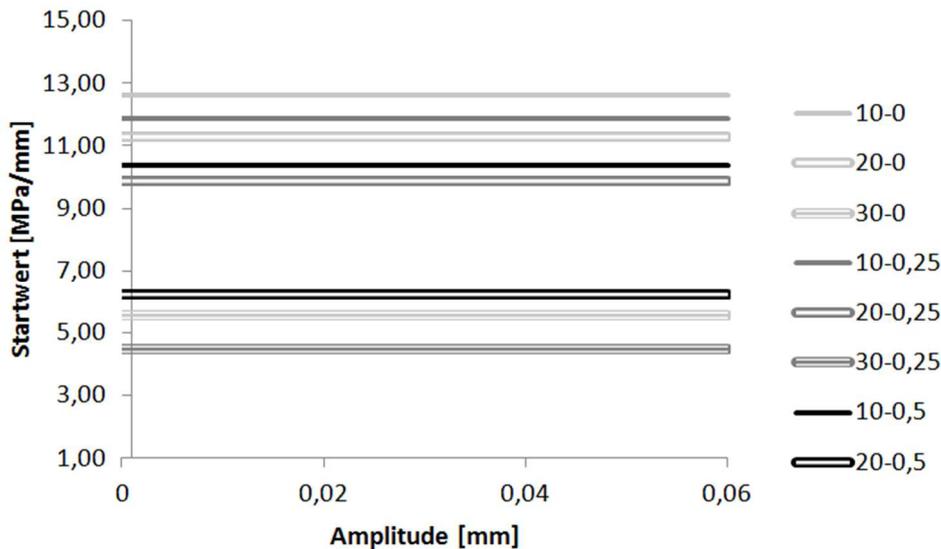


Abbildung 68. Verbundvariante A: Mittlere Startwerte der Schersteifigkeit a_1 .

Tendenziell liegt eine Gruppierung über die Prüftemperatur vor. Daher werden für jede Prüftemperatur Mittelwerte über die Ergebnisse der Normalspannungen gebildet, so dass schließlich nur noch die Abhängigkeit von der Prüftemperatur bleibt (Tabelle 11).

Tabelle 11. Verbundvariante A: Mittlerer Startwert der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Prüftemperatur [°C]	mittlerer Startwert der Schersteifigkeit a_1 [MPa/mm]
10	11,7
20	9,6
30	5,0

Für diese Werte kann vereinfachend eine lineare Regression in Abhängigkeit von der Prüftemperatur mit den Regressionsparametern d_0 und d_1 gefunden werden (Tabelle 12).

Tabelle 12. Verbundvariante A: Parameter d_0 und d_1 der Regressionsgeraden zur Beschreibung der mittleren Startwerte der Schersteifigkeit a_1

d_0	d_1	Bestimmtheitsmaß
MPa/mm	-	%
15,467	-0,335	95,56

Zusammenfassend kann für die Verbundvariante A der Startwert der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur näherungsweise funktional beschrieben werden durch:

$$a_1(T) = d_0 + d_1 \times T \quad \text{Gl. 13}$$

mit:

- a_1 : Startwert der Schersteifigkeit [MPa/mm],
- T: Prüftemperatur [°C],
- d_0, d_1 : Parameter aus Tabelle 12.

(a.3) Parameter a_3 für die Verbundvariante A

In Abbildung 69 sind alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

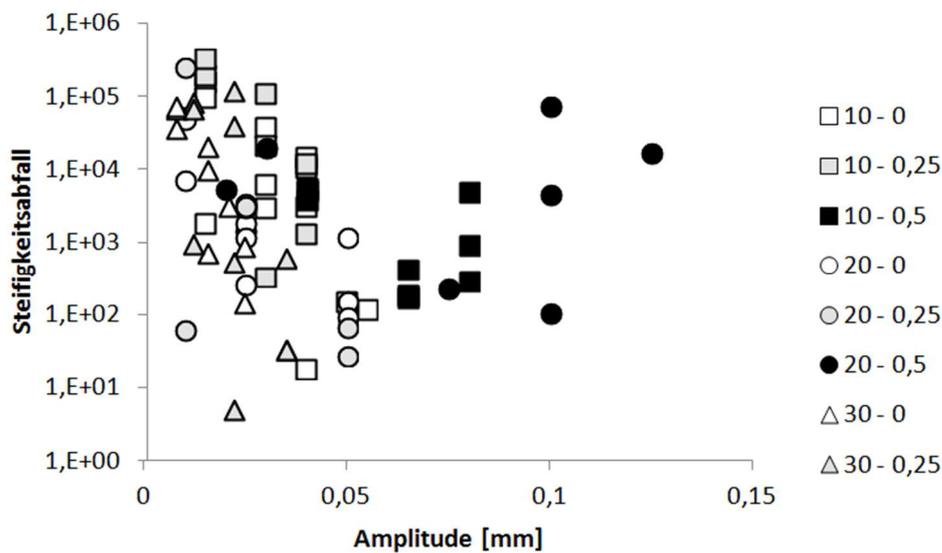


Abbildung 69. Verbundvariante A: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

Abbildung 69 lässt eine Abhängigkeit von der Scheramplitude erkennen, nur für die hohen Normalspannungen ist diese Tendenz nicht eindeutig. Unter Beachtung des logarithmischen Ordinatenmaßstabs wird eine exponentielle Regression gewählt mit der Form:

$$y = a \times e^{b \times x} \tag{Gl. 14}$$

Die Ergebnisse der Regressionen sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13. Verbundvariante A: Parameter der exponentiellen Regressionen für den Steifigkeitsabfall a_3 über die Amplitude

Prüf­temperatur °C	Normal­spannung MPa	c_0 MPa/mm	c_1 -	Bestimmtheits­maß %
10	0	373.803	-146,6	49,69
	0,25	2.000.000	-152,9	43,1
	0,5	17.649	-45,29	27,78
20	0	37305	-108,6	66,71
	0,25	23289	-118,8	37,97
	0,5	5118,3	-3,576	0,34
30	0	550788	-284,1	77,3
	0,25	291491	-230,8	34,29

Die Ergebnisse mit der hohen Normalspannung weisen die geringsten Bestimmtheitsmaße auf. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 70 nur die Regressionen (Exponentialfunktionen) des Parameters a_3 dargestellt.

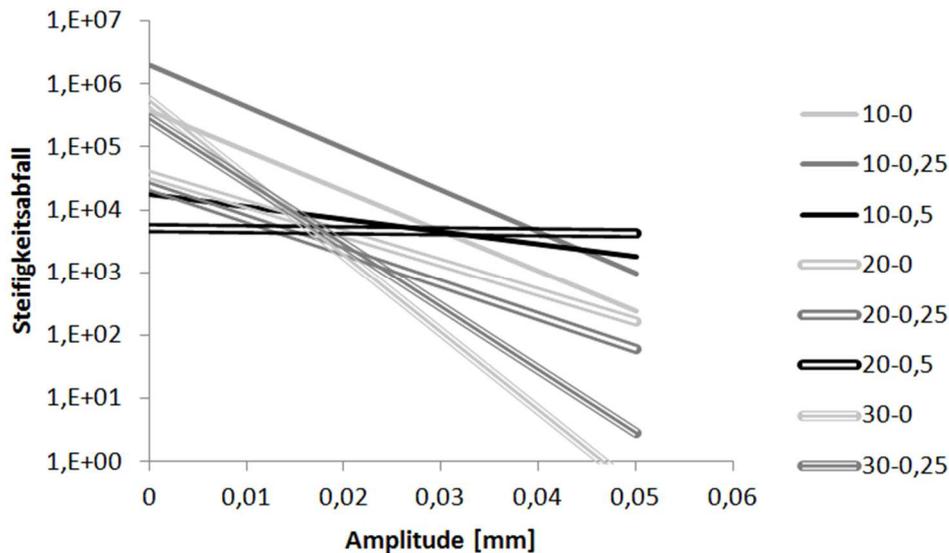


Abbildung 70. Verbundvariante A: Darstellung der ermittelten Regressionen für alle Prüftemperaturen und Normalspannungen.

Eine weitere systematische Zusammenfassung scheint hier nicht möglich. Die Regressionen mit der Prüftemperatur $T = 30 \text{ °C}$ liegen eng beieinander, ebenso wie die Regressionen mit der Normalspannung von $0,5 \text{ MPa}$. Im Bereich der höheren Amplituden könnte teilweise eine Gruppierung über die Prüftemperatur erfolgen. Eine über alle Regressionen eindeutige Systematik kann jedoch nicht ermittelt werden. Um die Veränderungen des Steifigkeitsabfalls dennoch funktional zu beschreiben, werden die Parameter c_0 und c_1 gemittelt.

Tabelle 14. Verbundvariante A: Ergebnis der Zusammenfassung des Parameters a_3 , Steifigkeitsabfall

d_0	d_1	Bestimmtheitsmaß
MPa/mm	-	%
412.430	-136,33	-

Damit lassen sich die Steifigkeitsabfälle, Parameter a_3 , wie folgt beschreiben:

$$a_3(s) = d_0 + d_1 \times s \quad \text{Gl. 15}$$

mit:

- a_3 : Schersteifigkeitsabfall [-],
- s : Scheramplitude [mm],
- d_0, d_1 : Parameter aus Tabelle 14.

(b) Verbundvarianten B bis F: Funktionen für die Parameter a_0 , a_1 und a_3

Folgende funktionale Abhängigkeiten können für die Verbundvariante B (B-T, H_{aufK} , C40BF1-S; vgl. Tabelle 2) angegeben werden:

$$a_0(\sigma, s) = (5,7817 + 44,967 \times \sigma) - (96,49 + 441,27 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 16}$$

$$a_1(T) = 9,99 - 0,1775 \times T \quad \text{Gl. 17}$$

$$a_3(s, \sigma) = (36.123 + 433.534 \times \sigma) - 115,73 \times s \quad \text{Gl. 18}$$

Die funktionalen Abhängigkeiten für die Verbundvariante C (D-B, H_{auf}K, C60BP1-S; vgl. Tabelle 2) lauten:

$$a_0(\sigma, s) = (10,096 + 14,649 \times \sigma) + (-98,405) \times s \quad \text{Gl. 19}$$

$$a_1(T) = 13,831 - 0,3311 \times T \quad \text{Gl. 20}$$

$$a_3(s, \sigma) = (806.947 - 1.000.000 \times \sigma) + (-119,36 + 151,1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 21}$$

Jene für die Verbundvariante D (D-B, H_{auf}K, C40BF1-S; vgl. Tabelle 2) sind:

$$a_0(\sigma, s) = (16,16 + 30,91 \times \sigma) + (-406,89 + 457,77 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 22}$$

$$a_1(T) = 12,01 - 0,14 \times T \quad \text{Gl. 23}$$

$$a_3(s, \sigma) = (3,6 \times 10^6) - (186,32 + 176,5 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 24}$$

Jene für die Verbundvariante E (T-T, H_{auf}K, C60BP1-S; vgl. Tabelle 2) sind:

$$a_0(\sigma, s) = (14,338 + 9,6161 \times \sigma) + (-238,08 + 373,92 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 25}$$

$$a_1(T) = 9,8767 - 0,097 \times T \quad \text{Gl. 26}$$

$$a_3(s, \sigma) = (2 \times 10^{10} - 2 \times 10^9 \times \sigma) - (192,36) \times s \quad \text{Gl. 27}$$

Jene für die Verbundvariante F (T-T, H_{auf}K, C60B1-S; vgl. Tabelle 2) sind:

$$a_0(\sigma, s) = (8,0377 + 31,629 \times \sigma) + (-145,58 + 100,33 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 28}$$

$$a_1(T) = 8,103 \quad \text{Gl. 29}$$

$$a_3(s, \sigma) = (35629403) - (143,85) \times s \quad \text{Gl. 30}$$

Diese funktionale Abhängigkeiten können aus den nachfolgend dargestellten Zusammenhängen für die Parameter a_0 , a_1 und a_3 abgeleitet werden.

(b.1) Parameter a_0 für die Verbundvarianten B bis F

In Abbildung 71 bis Abbildung 75 sind für die Verbundvarianten B bis F alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

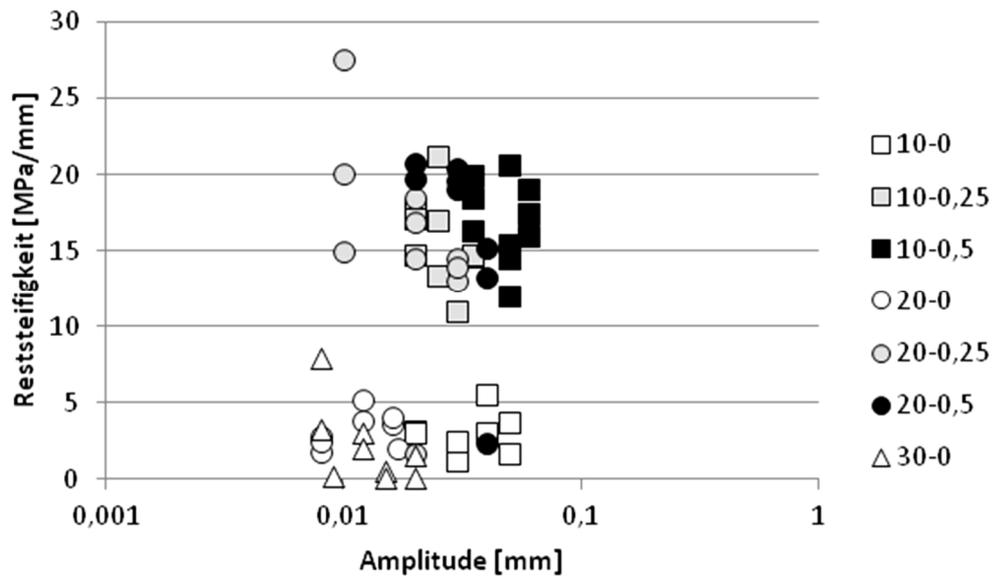


Abbildung 71. Verbundvariante B: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

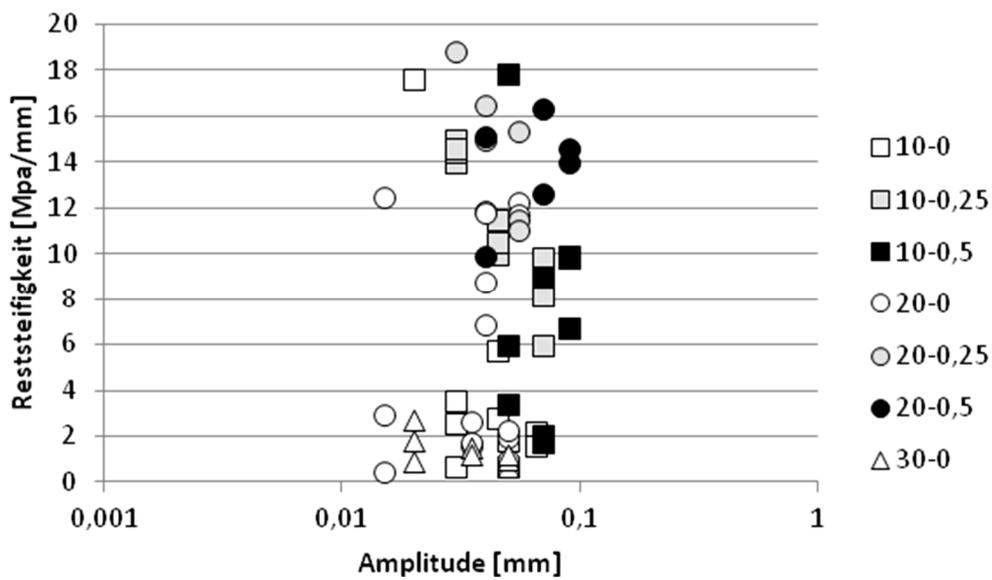


Abbildung 72. Verbundvariante C: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

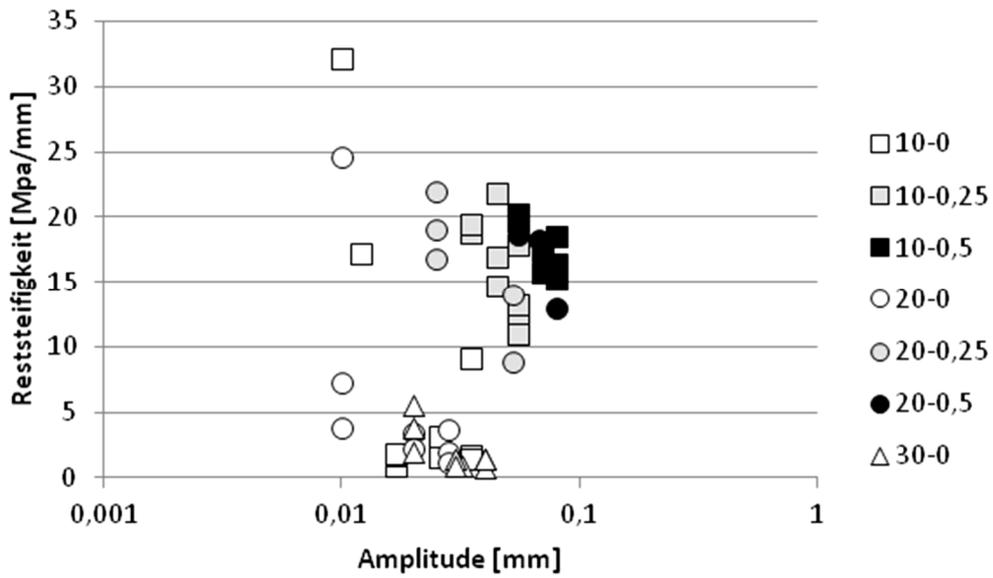


Abbildung 73. Verbundvariante D: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

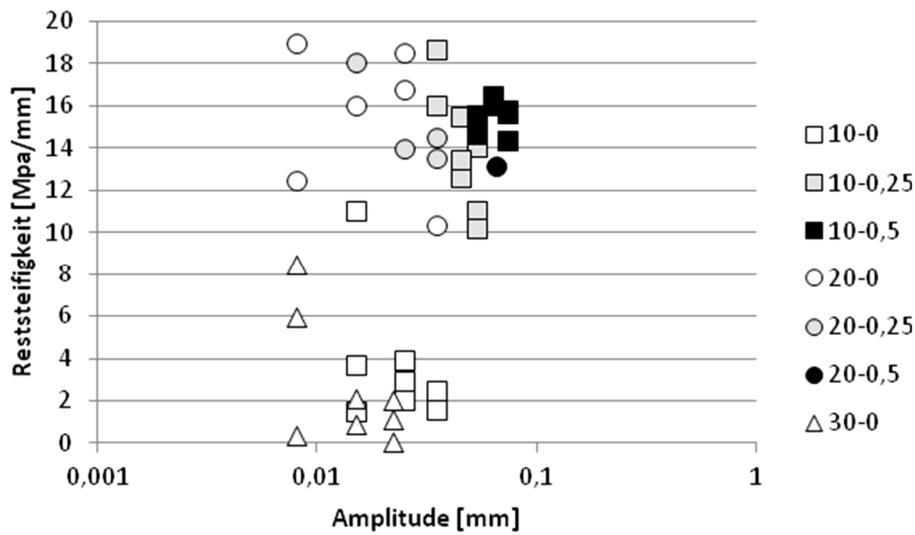


Abbildung 74. Verbundvariante E: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

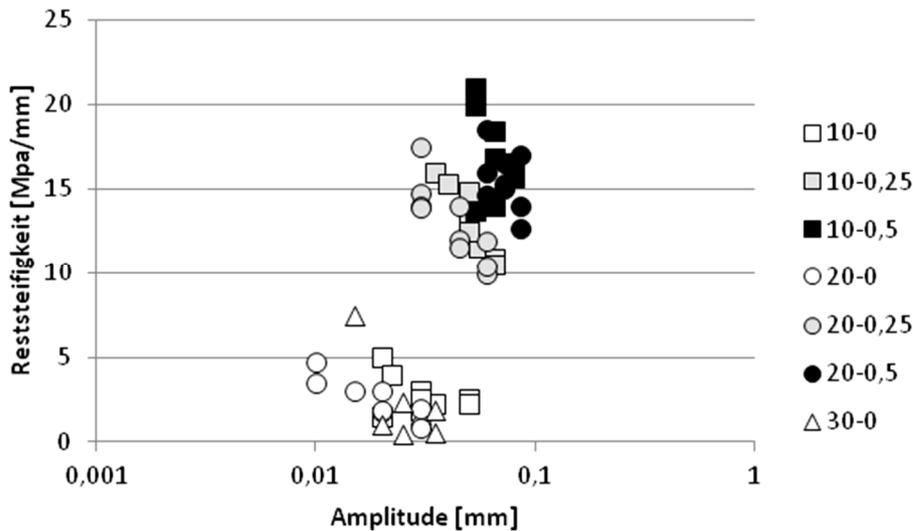


Abbildung 75. Verbundvariante F: Alle Werte der Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

Überall ist eine Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Scheramplitude erkennbar, daher wird eine lineare Regression über die Scheramplitude für jede Prüftemperatur und jede Normalspannung angewandt. Es folgt analog zu Verbundvariante A eine Gruppierung nach den Normalspannungen. Die Parameter d_0 und d_1 können über eine lineare Regression mit den Regressionsparametern e_0 und e_1 beschrieben werden (siehe Tabelle 15 bis Tabelle 19).

Tabelle 15. Verbundvariante B: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	5,7817	44,967	89,40
d_1	-96,49	-441,27	83,06

Tabelle 16. Verbundvariante C: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	10,096	14,649	20,03
d_1	-98,405	0	-

Tabelle 17. Verbundvariante D: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	16,165	30,911	82,54
d_1	-406,89	457,77	99,75

Tabelle 18. Verbundvariante E: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	14,338	9,6161	12,53
d_1	-238,08	373,92	52,30

Tabelle 19. Verbundvariante F: Parameter e_0 und e_1 zur funktionalen Beschreibung der Parameter d_0 und d_1

Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
-	MPa/mm	-	%
d_0	8,0377	31,629	77,17
d_1	-146,58	100,33	31,05

Zusammenfassend kann für jede Verbundvariante die Restschersteifigkeit a_0 in Abhängigkeit von der Normalspannung und der Scheramplitude näherungsweise funktional beschrieben werden (siehe Gl. 31 bis Gl. 35),

für Verbundvariante B:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0e_0 + d_0e_1 \times \sigma) + (d_1e_0 + d_1e_1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 31}$$

mit:

a_0 : Restschersteifigkeit [MPa/mm],
 σ : Normalspannung [MPa],
 s : Scheramplitude [mm],
 $d_0e_0, d_0e_1, d_1e_0, d_1e_1$: Parameter aus Tabelle 15,

für Verbundvariante C:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0e_0 + d_0e_1 \times \sigma) + (d_1e_0) \times s \quad \text{Gl. 32}$$

mit:

d_0e_0, d_0e_1, d_1e_0 : Parameter aus Tabelle 16,

für Verbundvariante D:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0e_0 + d_0e_1 \times \sigma) + (d_1e_0 + d_1e_1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 33}$$

mit:

$d_0e_0, d_0e_1, d_1e_0, d_1e_1$: Parameter aus Tabelle 17,

für Verbundvariante E:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0e_0 + d_0e_1 \times \sigma) + (d_1e_0 + d_1e_1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 34}$$

mit:

$d_0e_0, d_0e_1, d_1e_0, d_1e_1$: Parameter aus Tabelle 18,

für Verbundvariante F:

$$a_0(\sigma, s) = (d_0e_0 + d_0e_1 \times \sigma) + (d_1e_0 + d_1e_1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 35}$$

mit:

$d_0e_0, d_0e_1, d_1e_0, d_1e_1$: Parameter aus Tabelle 19.

Grafisch werden diese Abhängigkeiten in Abbildung 76 bis Abbildung 80 deutlich.

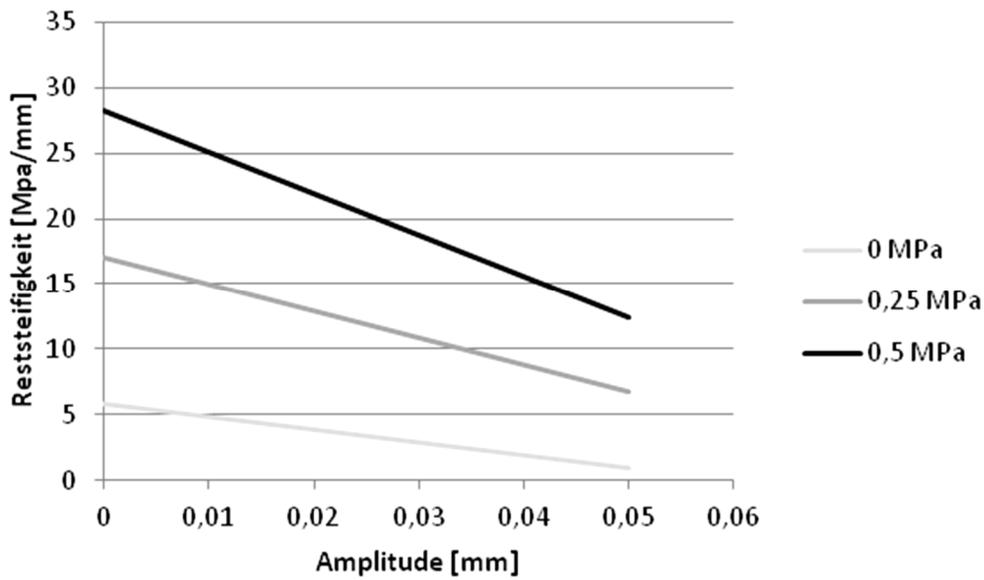


Abbildung 76. Verbundvariante B: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

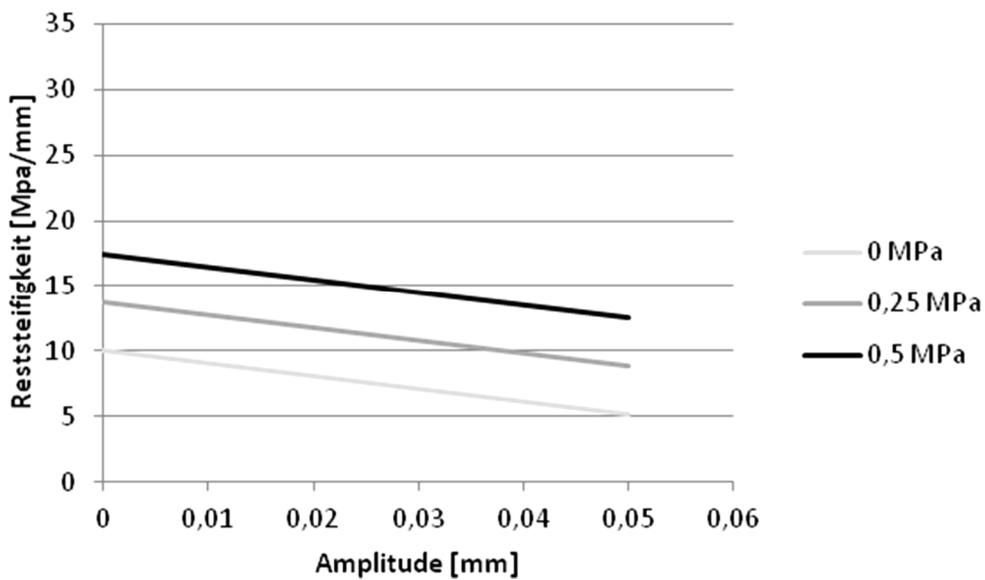


Abbildung 77. Verbundvariante C: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

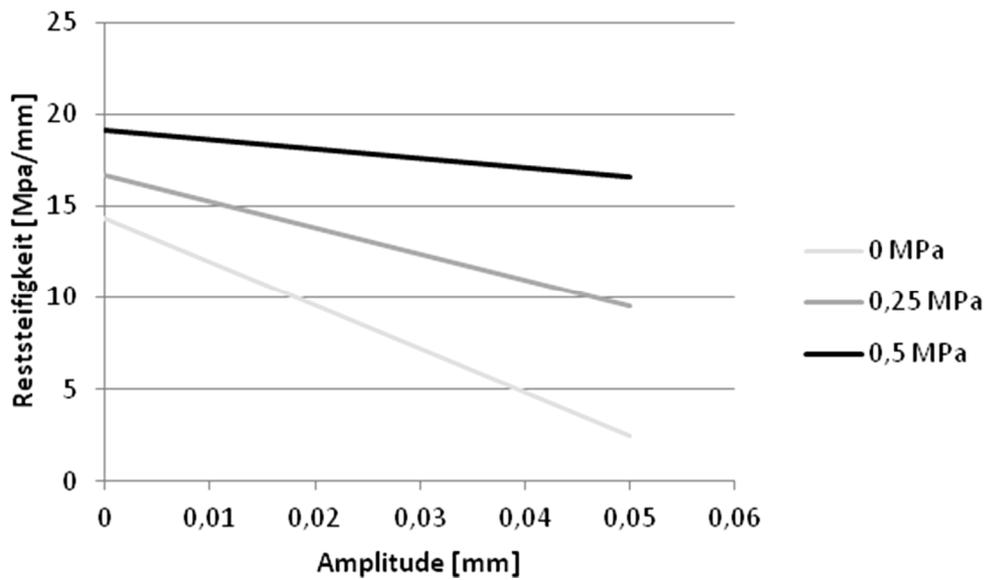


Abbildung 78. Verbundvariante D: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

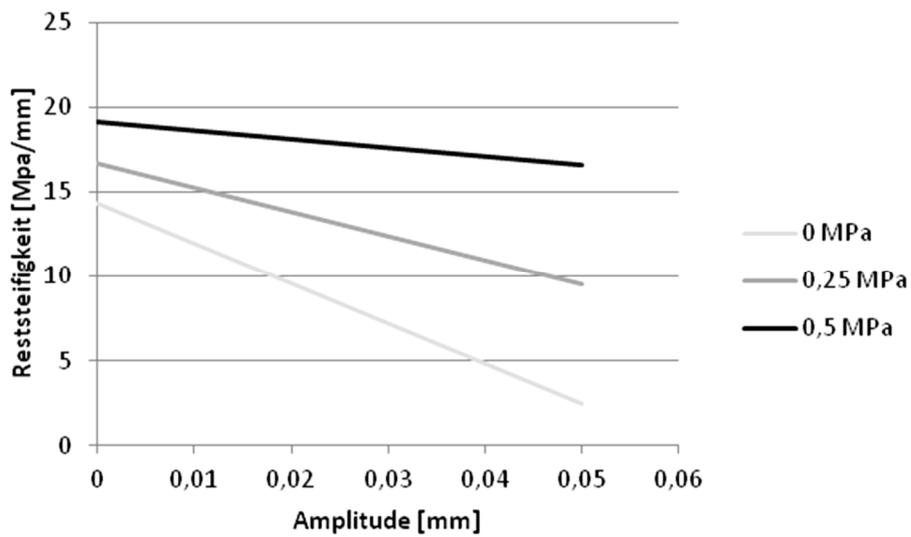


Abbildung 79. Verbundvariante E: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

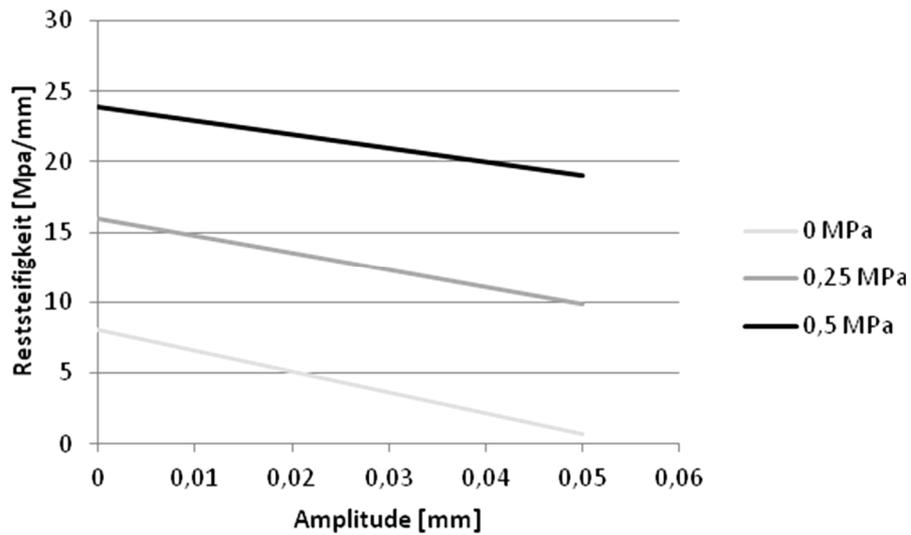


Abbildung 80. Verbundvariante F: Abhängigkeit der Restschersteifigkeit a_0 von der Normalspannung und der Scheramplitude.

(b.2) Parameter a_1 für die Verbundvarianten B bis F

In Abbildung 81 bis Abbildung 85 sind für die Verbundvarianten B bis F alle Startwerte der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

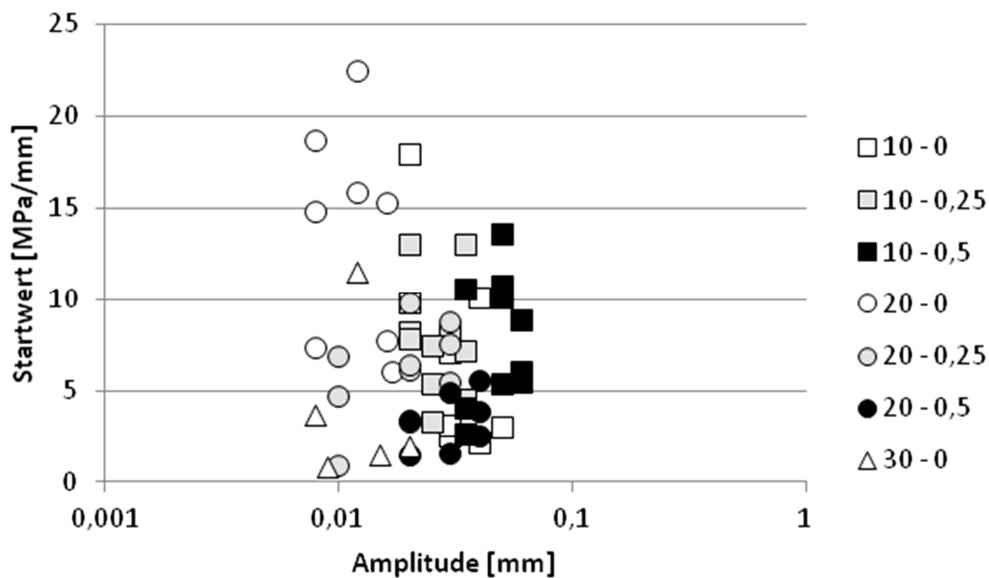


Abbildung 81. Verbundvariante B: Alle Startwerte der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

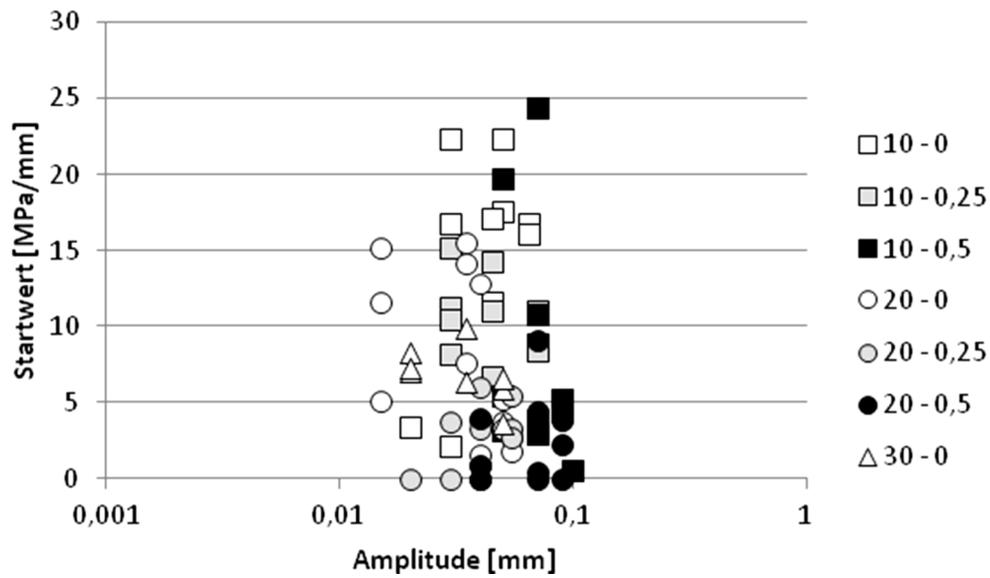


Abbildung 82. Verbundvariante C: Darstellung der Werte des Parameters a_1 über die Scher-amplitude.

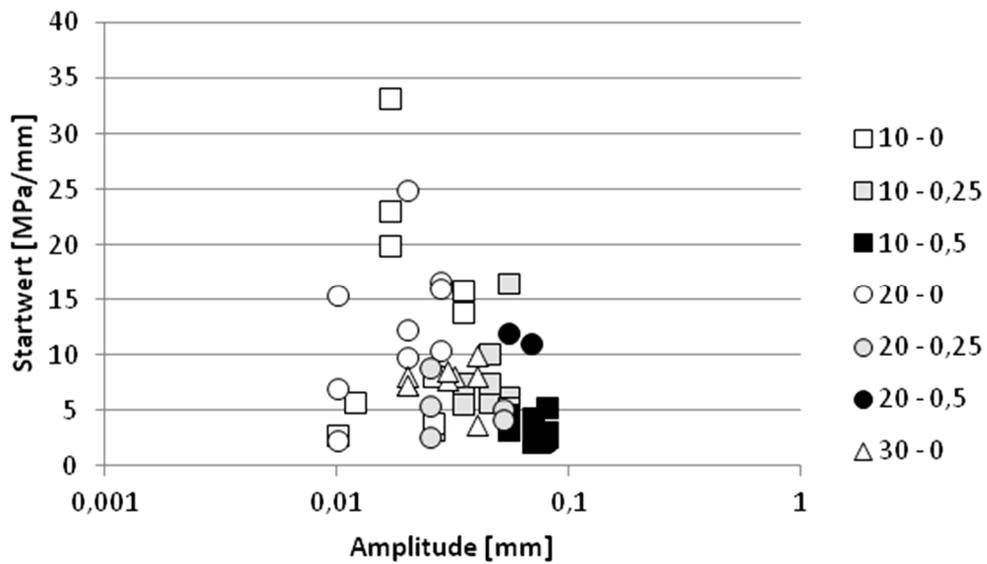


Abbildung 83. Verbundvariante D: Darstellung der Werte des Parameters a_1 über die Scher-amplitude.

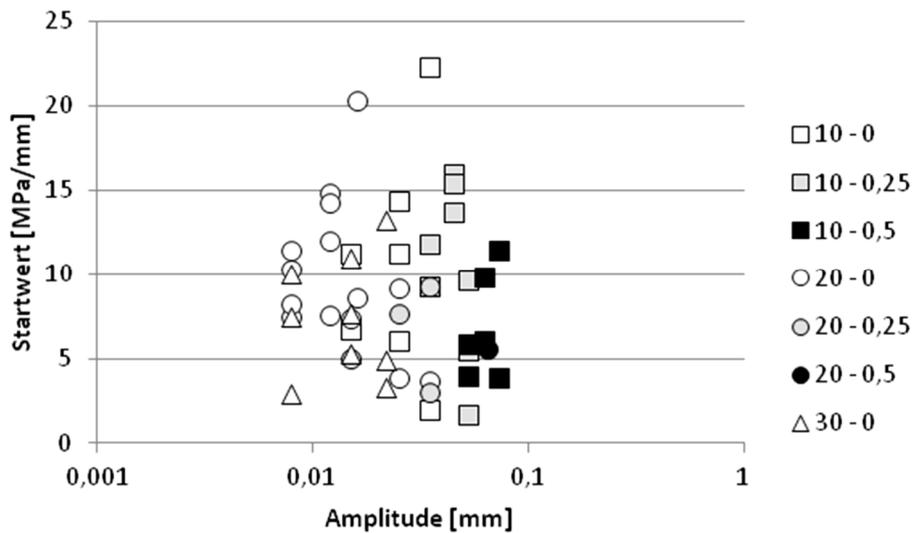


Abbildung 84. Verbundvariante E: Darstellung der Werte des Parameters a_1 über die Scheramplitude.

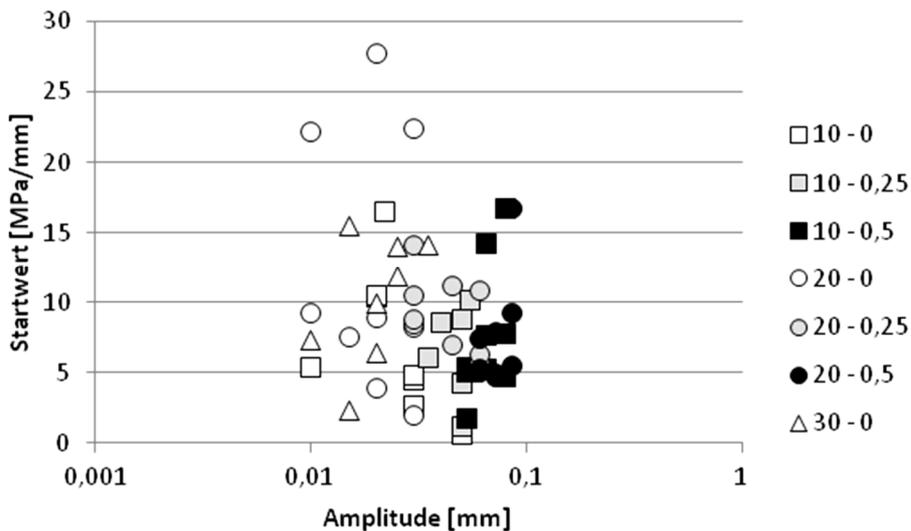


Abbildung 85. Verbundvariante F: Darstellung der Werte des Parameters a_1 über die Scheramplitude.

Auch für die Verbundvarianten B bis F werden keine Abhängigkeiten von der Scheramplitude erkannt, lineare Regressionen weisen keine Systematik auf. Analog zu Verbundvariante A werden daher mittlere Startwerte der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur gebildet (Tabelle 20).

Tabelle 20. Verbundvarianten B bis F: Mittlerer Startwert der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Prüftemperatur [°C]	mittlerer Startwert der Schersteifigkeit a_1 [MPa/mm]				
	Verbundvariante B	Verbundvariante C	Verbundvariante D	Verbundvariante E	Verbundvariante F
10	7,63	11,25	10,53	9,25	7,06
20	7,63	5,75	9,23	7,25	9,74
30	4,08	4,628	7,66	7,31	7,51

Für diese Werte kann analog zu Verbundvariante A vereinfachend eine lineare Regression in Abhängigkeit von der Prüftemperatur mit den Regressionsparametern d_0 und d_1 gefunden werden (Tabelle 21).

Tabelle 21. Verbundvarianten B bis F: Parameter d_0 und d_1 der Regressionsgeraden zur Beschreibung der mittleren Startwerte der Schersteifigkeit a_1

Verbundvariante	d_0	d_1	Bestimmtheitsmaß
	MPa/mm	-	%
B	9,99	-0,1775	75,0
C	13,831	-0,3311	87,3
D	12,01	-0,1435	99,7
E	9,8767	-0,097	72,7
F	8,103	0	-

Zusammenfassend kann auch für die Verbundvarianten B bis F der Startwert der Schersteifigkeit a_1 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur näherungsweise funktional beschrieben werden mittels der Gleichung

$$a_1(T) = d_0 + d_1 \times T \quad \text{Gl. 36}$$

mit:

- a_1 : Startwert [MPa/mm],
- T: Prüftemperatur [°C],
- d_0, d_1 : Parameter aus Tabelle 21.

(b.3) Parameter a_3 für die Verbundvarianten B bis F

In Abbildung 86 bis Abbildung 90 sind alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude dargestellt.

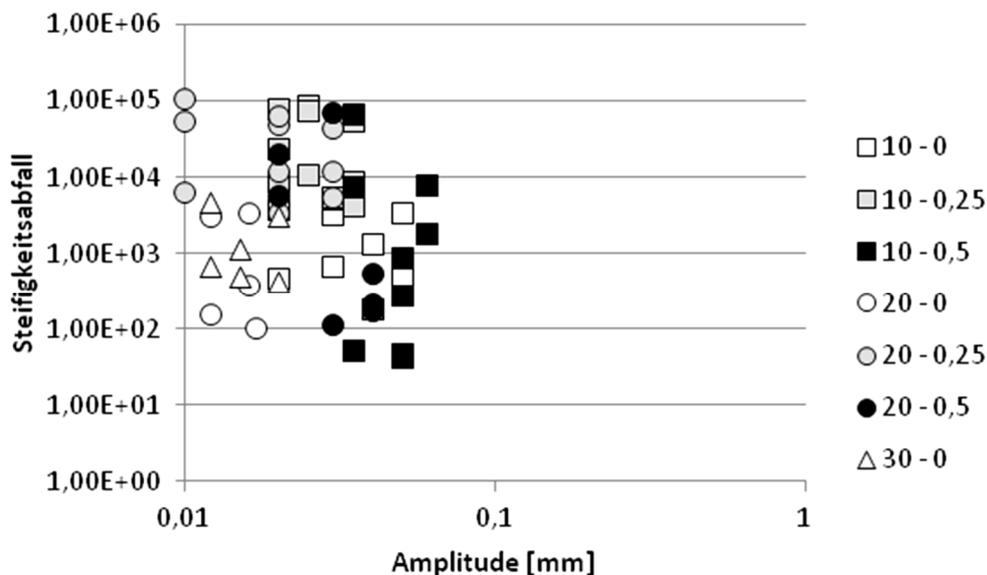


Abbildung 86. Verbundvariante B: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

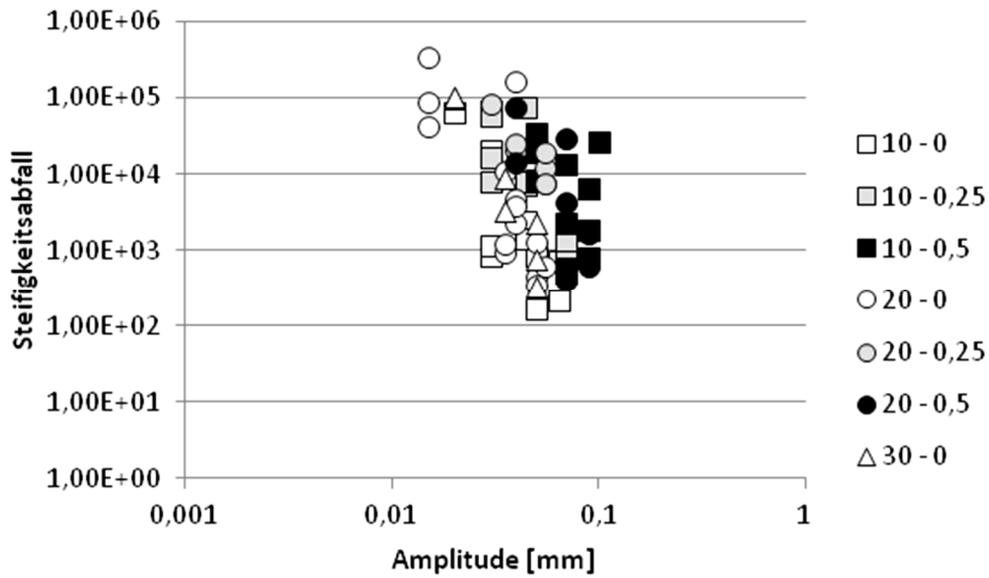


Abbildung 87. Verbundvariante C: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

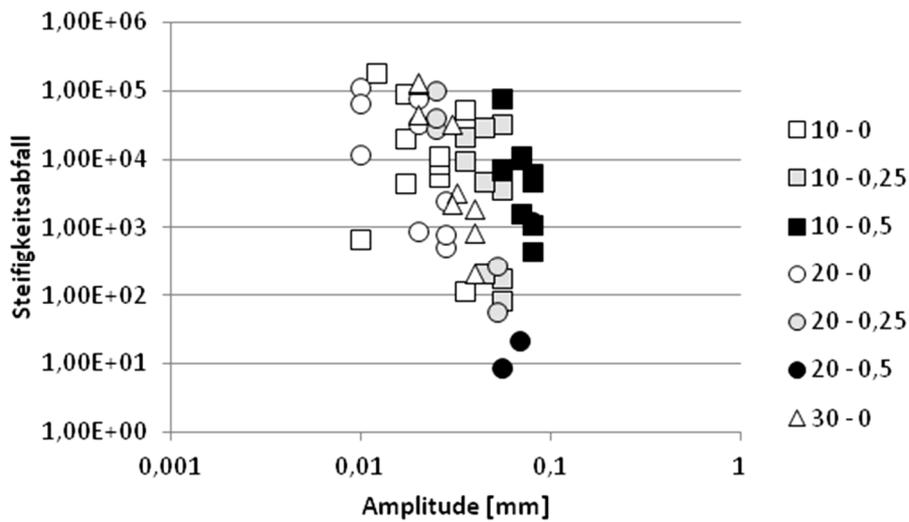


Abbildung 88. Verbundvariante D: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

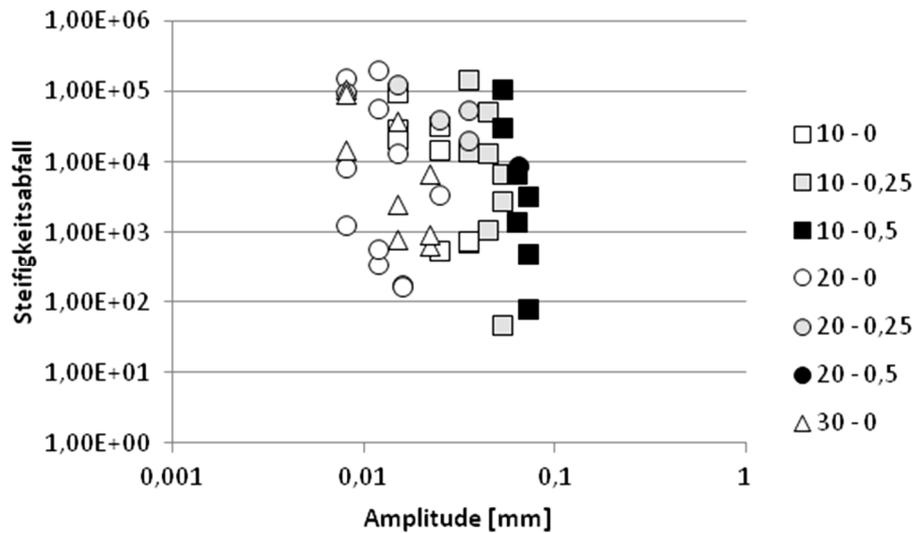


Abbildung 89. Verbundvariante E: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

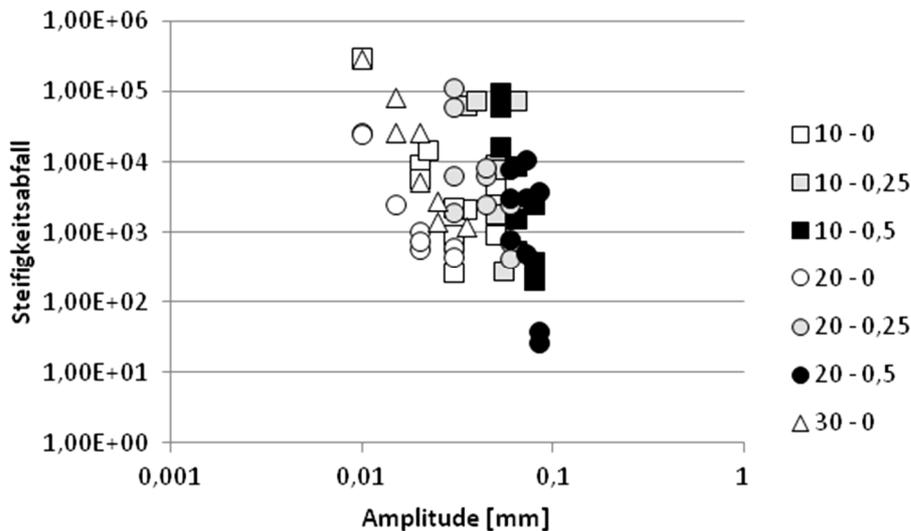


Abbildung 90. Verbundvariante F: Alle Werte des Schersteifigkeitsabfalls a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude.

Analog zu Verbundvariante A ist auch bei den Verbundvarianten B bis F jeweils eine Abhängigkeit des Schersteifigkeitsabfalls a_3 von der Scheramplitude erkennbar. Bei Verbundvariante D werden die Ergebnisse bei $T = 20 \text{ °C}$ in Kombination mit der Normalspannung von 0,5 MPa nicht weiter bewertet, da eine zu geringe und unplausible Datenmenge vorliegt.

Für die Verbundvarianten B bis F wird eine Gruppierung (Mittelwertbildung) über die Normalspannungen vorgenommen. Für eine weitere Vereinfachung lässt sich bei Verbundvariante B der Parameter d_0 über eine lineare Regression beschreiben, während der Parameter d_1 keine Systematik erkennen lässt und als Mittelwert angegeben wird. Bei den Verbundvarianten C bis E lassen sich beide Parameter d_0 und d_1 sich über eine lineare Regression beschreiben. Bei Verbundvariante F werden die Parameter d_0 und d_1 über eine Mittelwertbildung bestimmt.

Die Ergebnisse der Regressionen sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22. Verbundvariante B: Ergebnis der Zusammenfassung des Parameters a_3 , Steifigkeitsabfall

Verbundvariante	Parameter	e_0	e_1	Bestimmtheitsmaß
	-	MPa/mm	-	%
B	d_0	36.123	433.534	83,15
	d_1	-115,73	0	-
C	d_0	806.947	-1.000.000	95,8
	d_1	-119,36	151,1	98,9
D	d_0	3.644.060	0	-
	d_1	-186,32	176,5	75,7
E	d_0	2×10^{10}	-2×10^9	75,4
	d_1	-192,36	0	-
F	d_0	35.629.403	0	-
	d_1	-143,85	0	-

Zusammenfassend kann auch für die Verbundvarianten B bis F der Schersteifigkeitsabfall a_3 in Abhängigkeit von der Scheramplitude und von der Normalspannung näherungsweise funktional beschrieben werden mittels der Gleichung:

$$a_3(s, \sigma) = (d_0 e_0 + d_0 e_1 \times \sigma) + (d_1 e_0 + d_1 e_1 \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 37}$$

mit:

- a_3 : Schersteifigkeitsabfall [-],
- s: Scheramplitude [mm],
- σ : Normalspannung [MPa],
- $d_0 e_0, d_0 e_1, d_1 e_0, d_1 e_1$: Parameter aus Tabelle 22.

4.5.3 Einheitliche funktionale Beschreibung über alle Verbundvarianten

Als Ergebnis der bisherigen Auswertung sind in Tabelle 23 alle ermittelten Parameter zusammengefasst (vgl. Gl. 9, Gl. 10 und Gl. 11 für Verbundvariante A sowie Gl. 16 bis Gl. 30 für die Verbundvarianten B bis F).

Tabelle 23. Zusammenfassung aller Parameter zur Beschreibung der Scherermüdung für alle untersuchten Verbundvarianten

Var.	Parameter a_0				Parameter a_1		Parameter a_3			
	a_{01}	a_{02}	a_{03}	a_{04}	a_{11}	a_{12}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
A	12,12	41,25	- 267,08	0	15,47	-0,34	412430	0	- 136,33	0
B	5,78	44,97	-96,49	- 441,27	9,99	-0,18	36123	433534	- 115,73	0
C	10,10	14,65	-98,41	0	13,83	-0,33	806947	1×10^6	- 119,36	151,1
D	16,16	30,91	- 406,89	457,77	12,01	-0,14	$3,6 \times 10^6$	0	- 186,32	176,5
E	14,34	9,62	- 238,08	373,92	9,88	-0,10	2×10^{10}	-2×10^9	- 192,36	0
F	8,04	31,63	- 146,58	100,33	8,10	0	$3,5 \times 10^7$	0	- 143,85	0

Zusammenfassend für alle Verbundvarianten A bis F können folgende funktionale Beziehungen zur Ermittlung der Parameter a_0 , a_1 und a_3 angegeben werden. Damit ist es möglich, den Verlauf der Schererermüdung näherungsweise funktional zu beschreiben.

$$a_0(\sigma, s) = (a_{01} + a_{02} \times \sigma) + (a_{03} + a_{04} \times \sigma) \times s \quad \text{Gl. 38}$$

$$a_1(T) = a_{11} + a_{12} \times T \quad \text{Gl. 39}$$

$$a_3(s, \sigma) = (a_{31} + a_{32} \times \sigma) \times e^{(a_{33} + a_{34} \times \sigma) \times s} \quad \text{Gl. 40}$$

mit:

- s: Scheramplitude [mm],
- T: Prüftemperatur [°C],
- σ : Normalspannung [MPa].

Zur Visualisierung und Validierung der ermittelten Beziehungen sind in den folgenden Abbildungen die Veränderungen der Schersteifigkeitsabfälle unter unterschiedlichen Prüfbedingungen am Beispiel der Verbundvariante A dargestellt. Ähnliche Zusammenhänge gelten auch für alle anderen Verbundvarianten.

Es ist festzuhalten, dass tendenziell der Schersteifigkeitsverlauf plausibel abgebildet wird. Allerdings kann aufgrund der Vereinfachungen und Näherungen beim Herleiten dieser Beziehungen im Einzelfall die mathematisch ermittelte Funktion von dem im Laborversuch ermittelten Schersteifigkeitsverlauf erheblich abweichen.

Abbildung 91 zeigt anhand der Verbundvariante A, dass die Prüftemperatur, als tertiäre Einflussgröße, im Wesentlichen einen Einfluss auf die Startwerte der Schersteifigkeit ausübt. Mit zunehmender Prüftemperatur sinken die Startwerte.

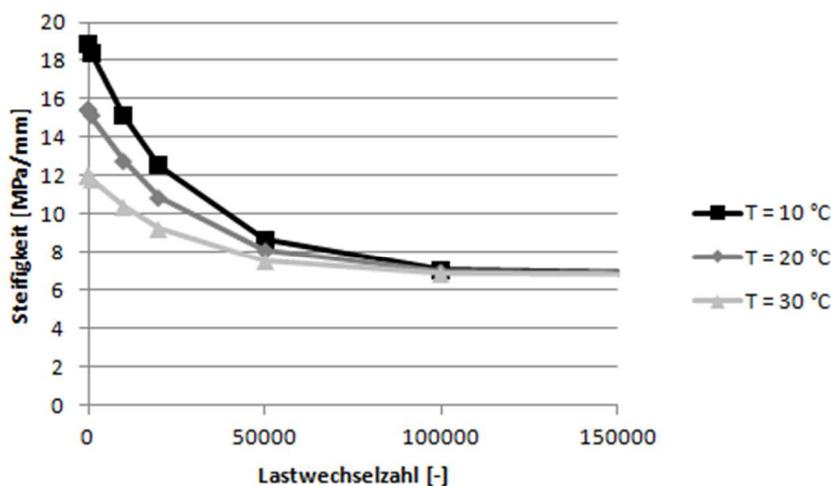


Abbildung 91. Verbundvariante A: Simulation des Schersteifigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Prüftemperatur für 10 °C, 20 °C und 30°C für eine Scheramplitude von $\varepsilon = 0,02$ mm und eine Normalspannung von $\sigma = 0,0$ MPa.

Den Einfluss der Normalspannung zeigt Abbildung 92. Mit steigender Normalspannung geht eine parallele Verschiebung des Schersteifigkeitsverlaufes einher.

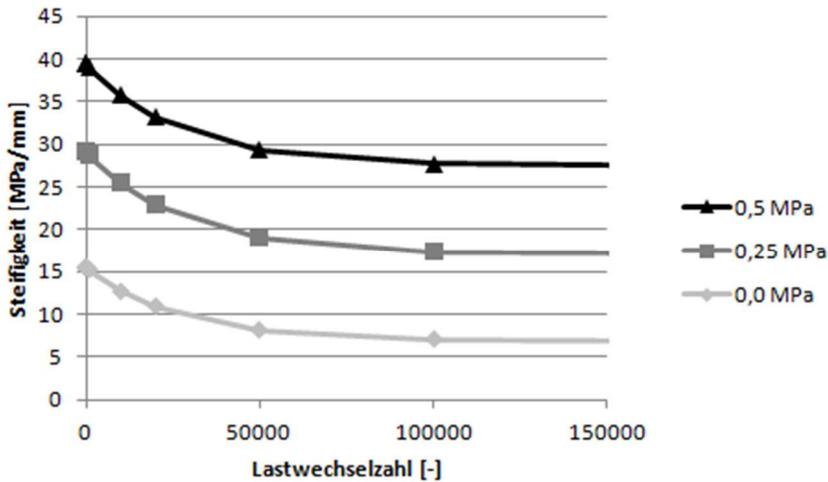


Abbildung 92. Verbundvariante A: Simulation des Schersteifigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Normalspannung für 0,50 MPa, 0,25 MPa und 0,00 MPa für eine Scheramplitude von $\epsilon = 0,02$ mm und eine Prüftemperatur von $T = 20^\circ\text{C}$.

Die Scheramplitude bestimmt dominant den gesamten Schersteifigkeitsverlauf, d. h. Startwert, Schersteifigkeitsabfall und Restschersteifigkeit (Abbildung 93). Hohe Scheramplituden bewirken einen schnellen Abfall der Steifigkeit und eine niedrige Reststeifigkeit.

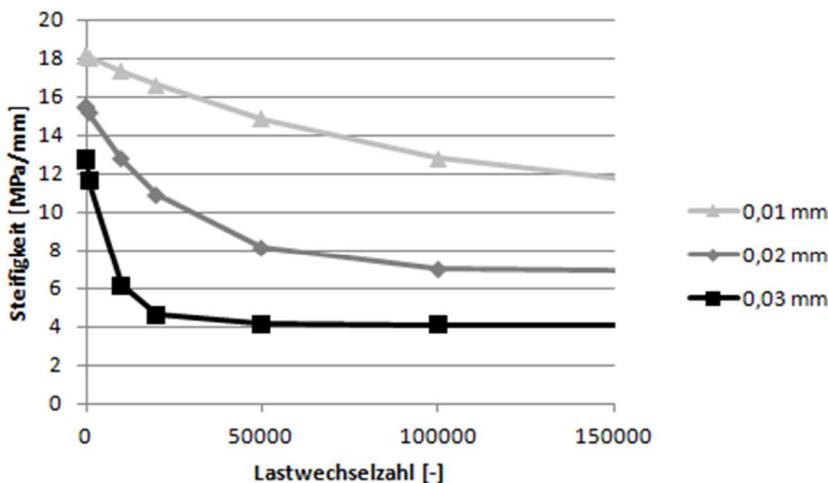


Abbildung 93. Verbundvariante A: Simulation des Schersteifigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Scheramplitude für $\epsilon = 0,01$ mm, 0,02 mm und 0,03 mm für eine Prüftemperatur von $T = 20^\circ\text{C}$ und eine Normalspannung von $\sigma = 0,0$ MPa.

5 Scherermüdungsbeständigkeit der Verbundvarianten im Vergleich

5.1 Erfahrungen zur Erzielung eines guten Schichtenverbundes aus Forschung und Baupraxis

In Forschung und Baupraxis gelten bezüglich der im Rahmen dieses Projekts für die unterschiedlichen Verbundvarianten variierten Prüfbedingungen folgende Faktoren als vorteilhaft für die Erzielung einer hohen Scherermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbundes. Diese Erfahrungen sollten sich in den Ergebnissen widerspiegeln:

- Gegenüber dem Einbau "heiß auf kalt" ist beim Einbau „heiß auf heiß“ die erhöhte Temperatur der unteren Schicht vorteilhaft für die Erzielung eines guten Schichtenverbundes (sh. Sutanto, 2009). Durch das Eindringen von Gesteinskörnern der oberen Schicht in Vertiefungen der Oberfläche der unteren heißen (bzw. warmen) Schicht wird eine bessere Verzahnung erreicht und damit ein besserer Schichtenverbund.
- Eine feinkörnige Struktur und eine enggestufte Korngrößenverteilung begünstigen infolge einer besseren Verzahnung der Gesteinskörner den Schichtenverbund (sh. Sholar et al., 2002 und West et al., 2005). Daher wäre zu erwarten, dass die hier geprüften Verbundvarianten mit dem Aufbau Deckschicht auf Binderschicht (D-B) eine höhere Scherermüdungsbeständigkeit aufweisen als die Verbundvarianten mit dem Aufbau Binderschicht auf Tragschicht (B-T) oder Tragschicht auf Tragschicht (T-T) und somit folgende Reihung ergeben: $(T-T) < (B-T) < (D-B)$.
- Emulsionen und insbesondere polymermodifizierte Emulsionen mit einem niedrigen Anteil an Wasser bewirken eine bessere Verklebung und somit einen besseren Schichtenverbund (Muench & Moomaw, 2008 und Deysarkar & Tandon, 2005). Unter Berücksichtigung der hier eingesetzten Emulsionstypen sollte die polymermodifizierte Emulsion C60BP1-S (mit 60 M.-% Bindemittelgehalt) eine höhere Scherermüdungsbeständigkeit aufweisen gegenüber der Emulsion C40BF1-S (mit 40 M.-% Bindemittelgehalt).

Vor dem Hintergrund der genannten Erfahrungen sollte sich die folgende Reihung bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit für die im Rahmen des Projekts geprüften Verbundvarianten ergeben:

- Die Verbundvarianten G bis K (alle H_{aufH}) sollten grundsätzlich eine höhere Scherermüdungsbeständigkeit aufweisen als die entsprechenden Verbundvarianten A bis F (alle H_{aufK}).
- Innerhalb der fünf Verbundvarianten G bis K (alle H_{aufH} ; ohne Emulsion) sollten die feinkörnig strukturierten als vorteilhaft zu beurteilen sein. Es sollte sich für diese Verbundvarianten daher folgende Reihung ergeben: Verbundvariante I

(D-D) > Verbundvariante K (D-B) > Verbundvariante H (B-B) > Verbundvariante J (B-T) > Verbundvariante G (T-T).

- Feinkörnig strukturierte Verbundvarianten und solche mit einer polymermodifizierten Emulsion bei niedrigerem Wasseranteil sollten vorteilhaft sein, wobei sich diese Kriterien überlagern können und daher die folgenden Reihungen nicht generell gelten:
 - a.) Innerhalb der sechs Verbundvarianten A bis F (alle H_{aufK} ; alle mit Emulsion) sollten die feinkörnig strukturierten als vorteilhaft zu beurteilen sein. Es sollte sich daher für diese Verbundvarianten folgende Reihung ergeben: Verbundvarianten C und D (beide D-B) > Verbundvarianten A und B (beide B-T) > Verbundvarianten E und F (beide T-T). Diese Reihung bezieht sich jeweils auf gleiche Emulsionsarten.
 - b.) Die Verbundvarianten A, C und E (alle mit polymermodifizierter Emulsion und hohem Bindemittelgehalt) sollten gegenüber den Verbundvarianten B, D, F mit nicht modifizierter Emulsion als vorteilhaft zu beurteilen sein.

5.2 Reihung der geprüften Verbundvarianten

Anhand der Ergebnisse der Scherermüdungsprüfungen bei verschiedenen Normalspannungen und Temperaturen können die untersuchten Verbundvarianten bezüglich ihrer Scherermüdungsbeständigkeit miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer baupraktischen Eignung gereiht werden. Prüfungen bei einer Prüftemperatur von 30 °C und bei Normalspannungen von 0,25 MPa und 0,50 MPa werden dabei nicht berücksichtigt, siehe Kapitel 4.4.2.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 94 bis Abbildung 101) zeigen die resultierenden Scherermüdungsdiagramme, in denen jeweils die Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F (bzw. von A bis K nach Möglichkeit) in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Normalspannung dargestellt sind. Aufgrund der jeweiligen Lage der Wöhler-Linie einer Verbundvariante im Scherermüdungsdiagramm kann die Scherermüdungsbeständigkeit dieser Verbundvariante im Vergleich zu den anderen Verbundvarianten bewertet werden. Je weiter rechts die Wöhler-Linie im Scherermüdungsdiagramm liegt bzw. je höher die erreichbare Lastwechselzahl (bei Eintritt der Scherermüdung) für eine definierte Scheramplitude ist, umso höher ist die Scherermüdungsbeständigkeit. Schließlich ergibt sich daraus eine Reihung aller Verbundvarianten in Bezug auf die baupraktische Eignung.

Dieselbe Reihung der Verbundvarianten wird erzielt, wenn anstelle der Lastwechselzahl $N_{f/50}$ ersatzweise die Lastwechselzahl $N_{asymp.}$ (sh. Kapitel 4.3.2) ausgewertet wird, wie exemplarisch für die Verbundvarianten A bis K bei einer Prüftemperatur von 20 °C und ohne Normalspannung in Abbildung 94 und Abbildung 95 gezeigt ist.

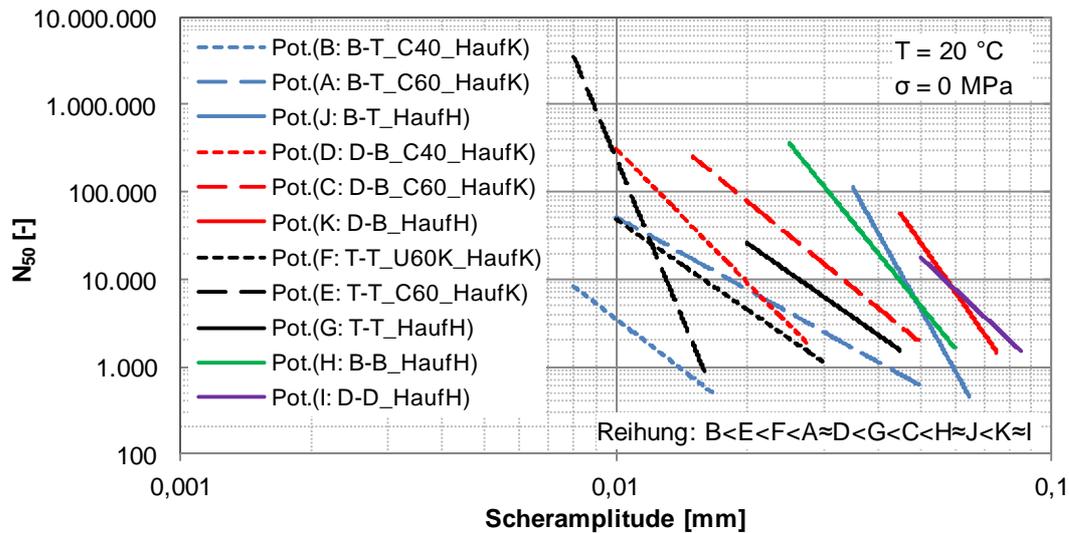


Abbildung 94. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis K bei einer Prüftemperatur von 20 °C und ohne Normalspannung mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

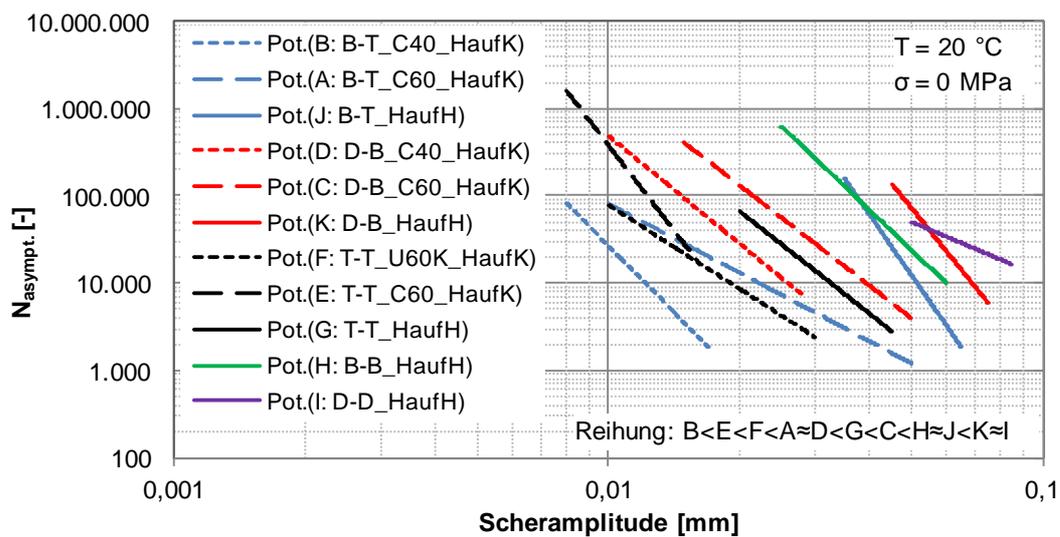


Abbildung 95. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis K bei einer Prüftemperatur von 20 °C und ohne Normalspannung mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

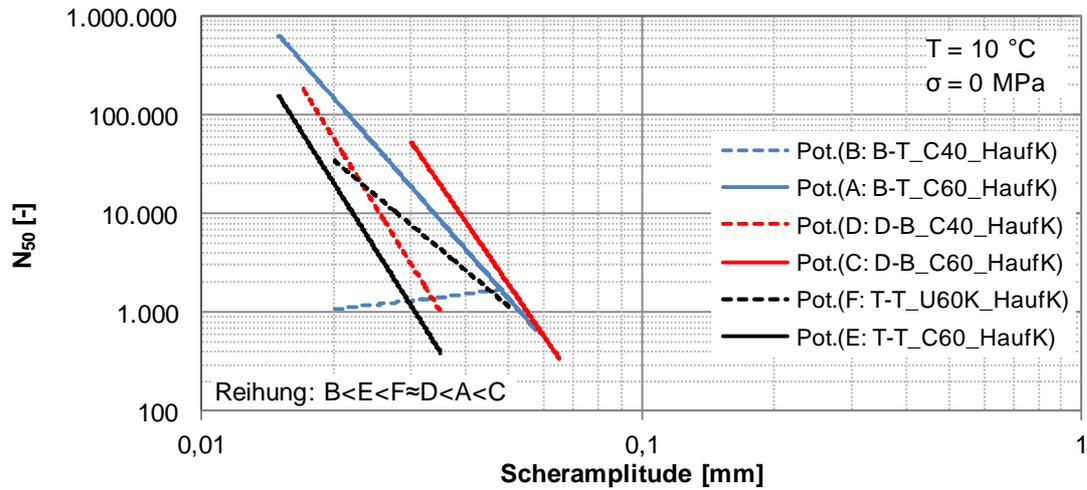


Abbildung 96. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 10 °C und ohne Normalspannung mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

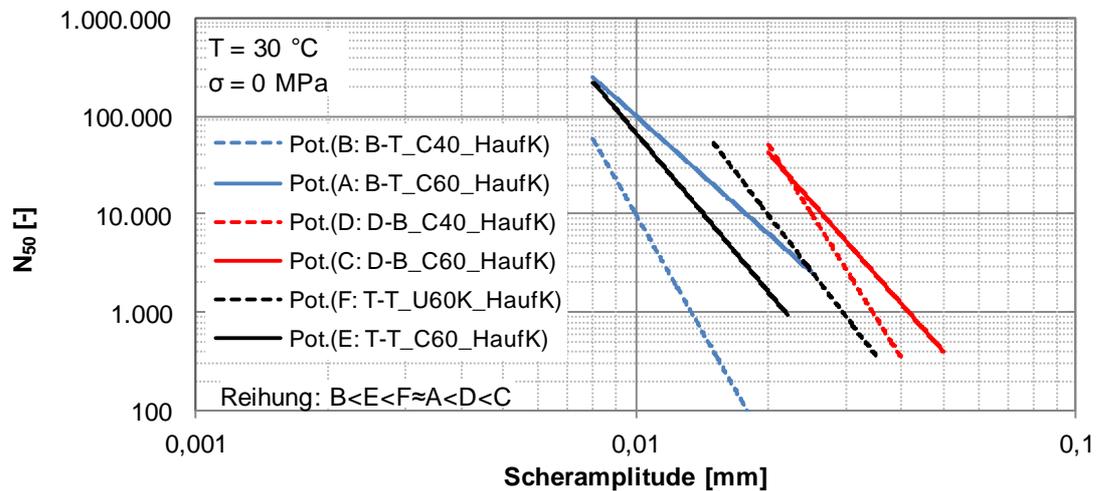


Abbildung 97. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 30 °C und ohne Normalspannung mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

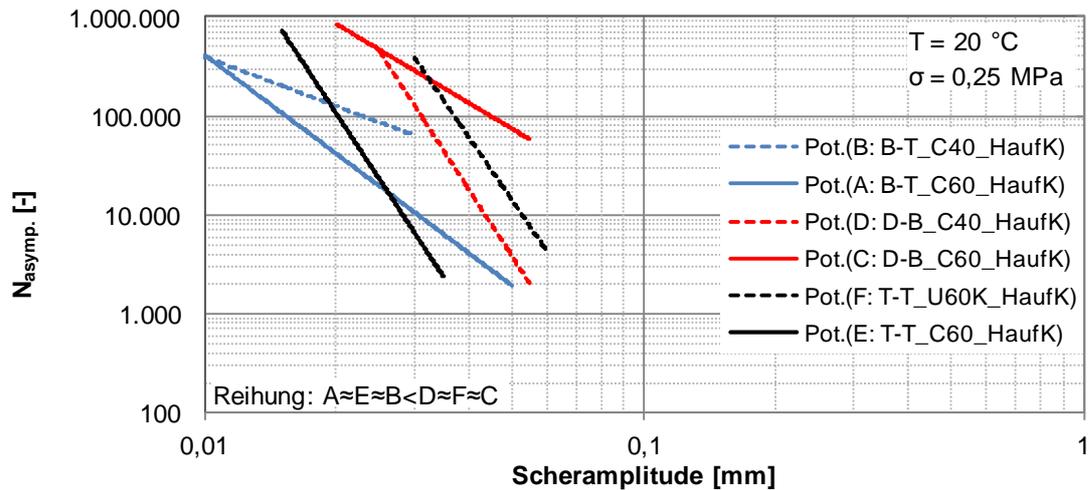


Abbildung 98. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 20 °C und bei einer Normalspannung von 0,25 MPa mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

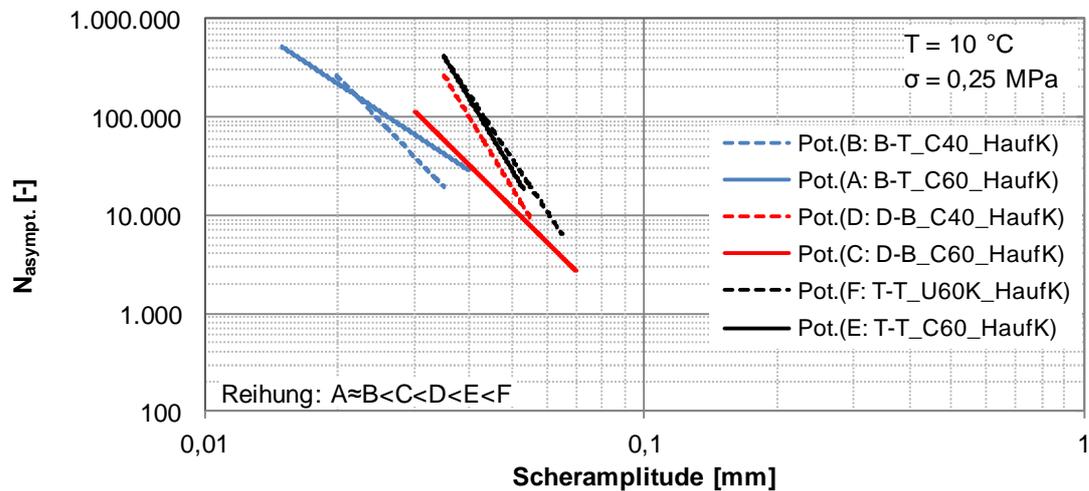


Abbildung 99. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 10 °C und bei einer Normalspannung 0,25 MPa mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

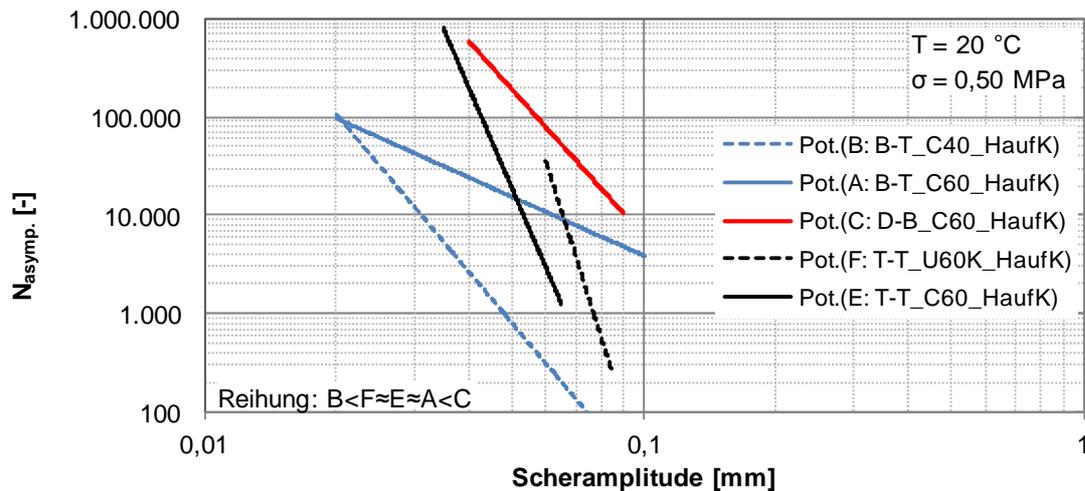


Abbildung 100. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 20 °C und bei einer Normalspannung von 0,50 MPa mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

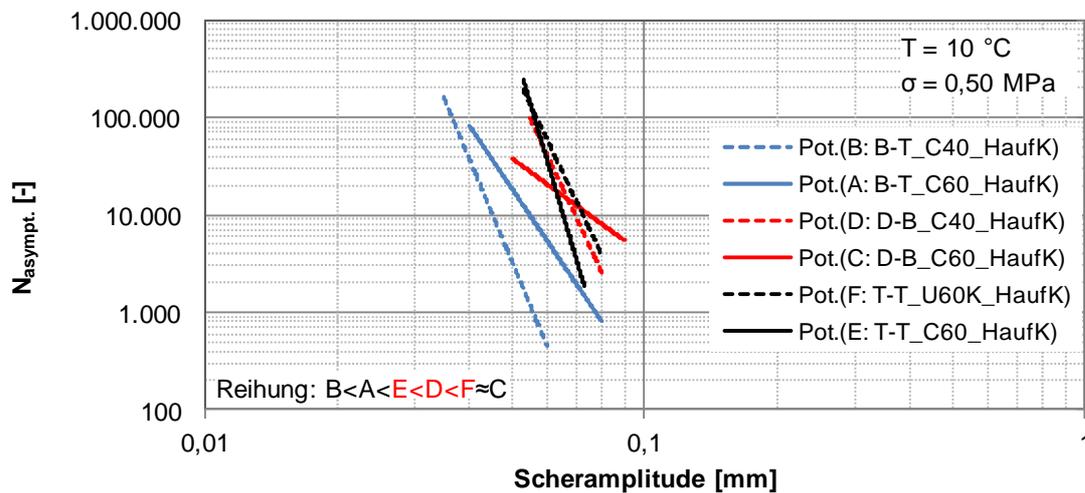


Abbildung 101. Wöhler-Linien für die Verbundvarianten A bis F bei einer Prüftemperatur von 10 °C und bei einer Normalspannung von 0,50 MPa mit einer Reihung der Verbundvarianten bezüglich der Scherermüdungsbeständigkeit.

Aufgrund der Versuchsergebnisse aus Abbildung 94 bis Abbildung 101 können die resultierenden Reihungen aller Verbundvarianten bei verschiedenen Temperaturen und Normalspannungen zusammengefasst und unter Berücksichtigung der baupraktische Erfahrungen (siehe Kapitel 5.1) auf Plausibilität überprüft werden (Tabelle 24).

Tabelle 24. Reihung der Verbundvarianten bezüglich ihrer Scherermüdungsbeständigkeit für verschiedene Prüftemperaturen und Normalspannungen

Prüfbedingungen		Resultierende Reihung der Verbundvarianten	Reihung plausibel?
Temperatur [°C]	Normalspannung [MPa]		
30	0	B<E<F≈A<D<C	ja
20		B<E<F<A≈D<C<H≈J<K≈I	ja
10		B<E<F≈D<A<C	ja
20	0,25	A≈E≈B<D≈F≈C	nein
10		A≈B<C<D<E<F	nein
20	0,50	B<F≈E≈A<C	nein
10		B<A<E<D<F≈C	nein

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Die Reihung der Verbundvarianten entspricht den baupraktischen Erfahrungen (vgl. Kapitel 5.1), wenn keine Normalspannung aufgebracht wird, andernfalls ist die Reihung unplausibel. So schneiden sich beispielsweise bei 20 °C Prüftemperatur und 0,25 MPa Normalspannung die Wöhler-Linien der feinkörnigen Verbundvariante C (D-B; H_{auf}K; C60BP1-S) und der grobkörnigen Verbundvariante F (T-T; H_{auf}K; C60B1-S) und weisen eine ähnliche Scherermüdungsbeständigkeit auf. Dies ist auch der Fall bei 10 °C mit 0,50 MPa Normalspannung. Auch die Ergebnisse bei 10 °C mit 0,25 MPa Normalspannung zeigen Abweichungen von der Soll-Reihung, da die Emulsion C40BF1-S eine bessere Ermüdungsbeständigkeit gegenüber der Emulsion C60BP1-S aufweist. Als wahrscheinliche Ursache dieser Unplausibilitäten wird die erhöhte Prüfstreuung bei niedriger Temperatur in Kombination mit der Normalspannung angesehen und die daraus folgende Darstellung von sich schneidenden Wöhler-Linien (vgl. Abbildung 98 bis Abbildung 101).
- Die „heiß auf heiß“ eingebauten, feinkörnigen Verbundvarianten I (D-D; H_{auf}H) und K (D-B; H_{auf}H) weisen bei 20 °C Prüftemperatur und ohne Normalspannung die höchsten Scherermüdungsbeständigkeiten auf (sh. Abbildung 94). Es folgen die etwas größeren „heiß auf heiß“-Varianten H (B-B; H_{auf}H) und J (B-T; H_{auf}H), die allerdings bessere Ermüdungswerte als die feinkörnigen „heiß auf kalt“-Varianten C (D-B; H_{auf}K; C60BP1-S) zeigen.
- Die polymermodifizierte Emulsion C60BP1-S ist vorteilhaft im Vergleich zur Emulsion C40BF1-S (vgl. Verbundvarianten C und D).
- Die grobkörnigen Verbundvarianten E (T-T; H_{auf}K; C60BP1-S) und F (T-T; H_{auf}K; C60B1-S) sind vorteilhaft gegenüber der Verbundvariante B (B-T; H_{auf}K; C40BF1-S), die trotz der feinkörnigen Struktur die geringste Scherermüdungsbeständigkeit aufweist, was vermutlich auf den geringen Anteil an Bitumen in der Bitumenemulsion zurückzuführen ist.

- Die „heiß auf kalt“ eingebauten Verbundvarianten D (D-B; H_{auf}K; C40BF1-S) und A (B-T; H_{auf}K; C60BP1-S) weisen ähnliche Scherermüdungswiderstände auf. Auch hier zeigt sich, dass der Einsatz einer polymermodifizierten Emulsion mit höherem Bindemittelgehalt die Wirkung einer feinkörnigen Verbundvariante ausgleichen kann.
- Die Untersuchungen bei den Prüftemperaturen von 30 °C und 10 °C ohne Normalspannung ergeben nur teilweise die gleiche Reihung wie bei 20°C. Dabei ist die Verbundvariante D (D-B; H_{auf}K; C40BF1-S) bei 30 °C vorteilhaft gegenüber der Verbundvariante A (B-T; H_{auf}K; C60BP1-S), bei 10 °C ist es umgekehrt.

5.3 Vergleich mit Ergebnissen aus statischen Abscherversuchen

Eine regelwerkskonforme Beurteilung des Schichtenverbundes in einer Asphaltbefestigung erfolgt zurzeit mittels statischem Abscherversuch (FGSV, TP Asphalt-StB Teil 80). Dabei wird die Abscherfestigkeit beim Scherversagen an der Schichtgrenze innerhalb einer Bohrkernprobe bestimmt (siehe Kapitel 3.3.1). Im Rahmen des Projekts wurden auch statische Abscherversuche nach den TP Asphalt-StB Teil 80 durchgeführt.

5.3.1 Reihung der Verbundvarianten A bis F

Die Ergebnisse in Form der Abscherfestigkeiten für die Verbundvarianten A bis F (alle H_{auf}K; gem. Tabelle 2) sind in Abbildung 102 dargestellt.

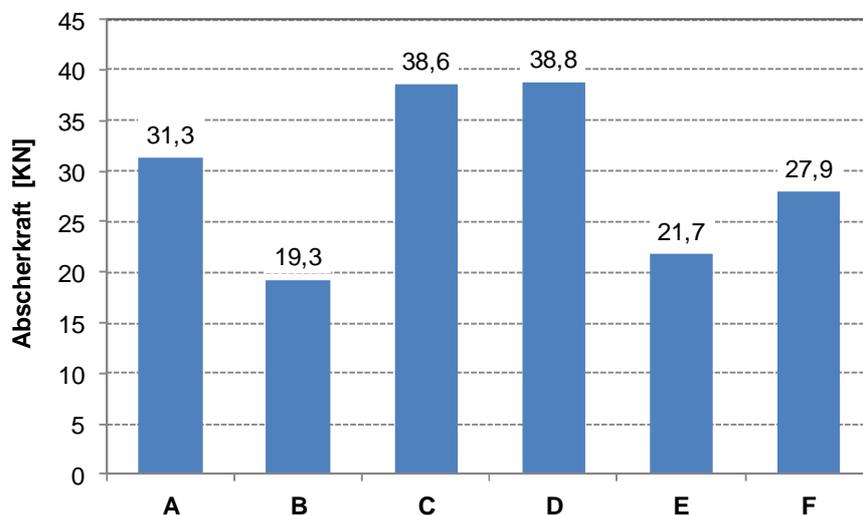


Abbildung 102. Verbundvarianten A bis F (gem. Tabelle 2): Abscherfestigkeiten [kN] ermittelt mit dem statischen Abscherversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 80.

Für die Verbundvarianten A bis F (alle H_{auf}K) ergibt sich hinsichtlich der Verbundwirkung folgende Reihung:

Verbundvariante B (B-T; nicht modifizierte Emulsion) < Verbundvariante E (T-T; polymermodifizierte Emulsion) < Verbundvariante F (T-T; nicht modifizierte Emulsion) <

Verbundvariante A (B-T; polymermodifizierte Emulsion) < Verbundvariante D (D-B; nicht modifizierte Emulsion) \approx Verbundvariante C (D-B; polymermodifizierte Emulsion).

Zur Überprüfung der Plausibilität kann die Reihung nach der statischen Abscherfestigkeit mit jener Reihung verglichen werden, die aus zyklischen Scherermüdungsprüfungen erhalten wird. Dazu werden die Wöhler-Linien für das Ermüdungskriterium $N_{f/50}$ bei einer Prüftemperatur von $T = 20\text{ °C}$ und ohne Normalspannung herangezogen (Tabelle 24).

Tabelle 25. Reihung der Verbundvarianten A bis F (alle H_{aufK}) nach den Abscherfestigkeiten ermittelt mit dem statischen Abscherversuch und nach der Lastwechselzahl $N_{f/50}$ ermittelt aus zyklischen Scherermüdungsprüfungen

Versuchstyp	Reihung der Verbundvarianten
statischer Abscherversuch	$B < E < F < A < D \approx C$
zyklische Scherermüdungsprüfung bei 20 °C Prüftemperatur und ohne Normalspannung	$B < E < F < A \approx D < C$

Die aus den unterschiedlichen Prüfmethoden erzielten Reihungen sind gleichwertig. Bei den statischen Abscherversuchen ergibt sich praktisch kein Unterschied zwischen den Verbundvarianten C und D (D-B, C60BP1-S bzw. C40BF1-S), während dieser in der zyklischen Scherermüdungsprüfung differenziert wird.

5.3.2 Variation der Schicht-Kombinationen

Abbildung 103 zeigt die Ergebnisse der statischen Abscherversuche ohne den Einsatz von Emulsionen. Die Kombinationen Deckschicht auf Deckschicht (D-D), Deckschicht auf Tragschicht (T-D) und Tragschicht auf Tragschicht (T-T) wurden jeweils heiß auf kalt hergestellt. Die Kombinationen Deckschicht auf Binderschicht wurden heiß auf kalt (B-D) und heiß auf heiß (B-D H_{aufH}) hergestellt.

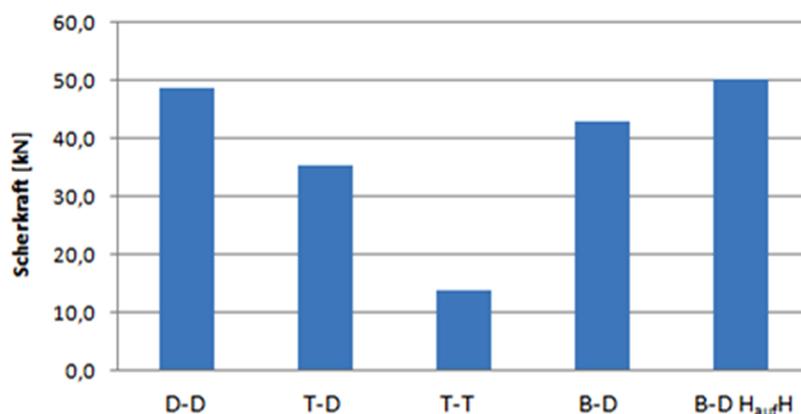


Abbildung 103. Abscherfestigkeiten [kN] ermittelt mit dem statischen Abscherversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 80 für unterschiedliche Schicht-Kombinationen, kalt auf heiß eingebaut (Regelfall) und heiß auf heiß eingebaut (H_{aufH}) ohne Verwendung einer Bitumenemulsion (D...Asphaltdeckschicht, B...Asphaltbinderschicht, T...Asphalttragschicht).

Die erzielten Ergebnisse weisen eine plausible Reihung auf, welche mit den Erfahrungen korrespondiert (vgl. Kapitel 5.1): Der feinkörnige Verbund D-D weist die höchsten Scherkräfte auf, gefolgt von der Kombination B-D und T-D. Die grobkörnigste Variante

T-T weist die geringsten Abscherfestigkeiten auf. Mit der Kombination B-D H_{auf}H werden die höchsten Abscherfestigkeiten erzielt, wobei diese versuchstechnisch 50 kN nicht überschreiten können.

5.3.3 Variation der Emulsionsart und -menge

In Abbildung 104 sind die Ergebnisse der Schicht-Kombination Deckschicht auf Tragschicht (D-T) mit geschliffener Oberfläche der zu verbindenden Schichten dargestellt. Dadurch sollte der Einfluss der Bitumenemulsionen deutlich hervorgehoben werden. Als Variation wurden die Emulsionen C60BP1-S und C40BF1-S eingesetzt und die jeweilige Emulsionsmenge (200, 300 oder 400 g/m²) variiert.

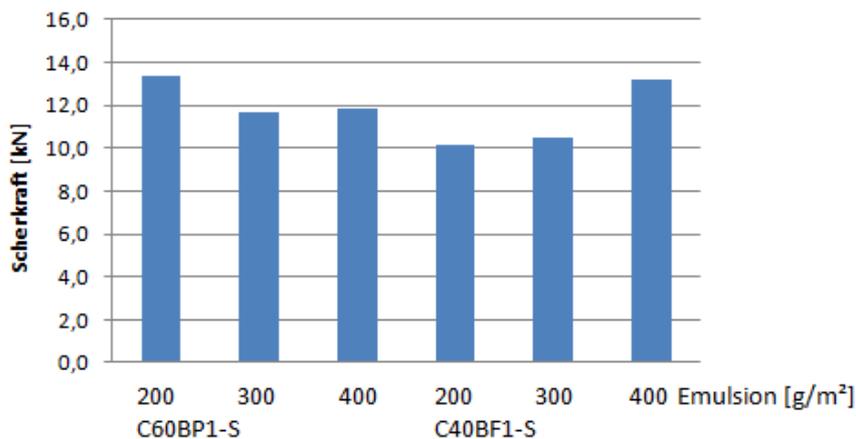


Abbildung 104. Abscherfestigkeiten [kN] ermittelt mit dem statischen Abscherversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 80 für die Schicht-Kombination Deckschicht auf Tragschicht (D-T), kalt auf heiß eingebaut, bei geschliffenen Oberflächen und bei Variation der Art der Bitumenemulsion (C60BP1-S und C40BF1-S) und der jeweiligen Emulsionsmenge (200, 300 und 400 g/m²).

Die ermittelten Abscherfestigkeiten liegen deutlich unterhalb der Abscherfestigkeiten für die vergleichbare Kombination T-D in Abbildung 103, was auf die fehlende Verzahnung zurückgeführt wird.

Die Kombination mit der Emulsion C60BP1-S weist bei 200 g/m² die höchsten Werte auf, mit zunehmender Emulsionsmenge sinken die Abscherfestigkeiten und liegen auf einem praktisch gleichen Niveau.

Demgegenüber weisen die Kombinationen mit der Emulsion C40BF1-S mit zunehmender Emulsionsmenge steigende Abscherfestigkeiten auf.

Die Kombinationen mit 200 g/m² C60BP1-S und 300 g/m² C40BF1-S weisen einen vergleichbaren Bindemittelgehalt auf. Der Vergleich zeigt, dass mit der polymermodifizierten Bitumenemulsion höhere Abscherfestigkeiten erzielt werden. Vergleichbare Abscherfestigkeiten werden mit der Bitumenemulsion C40BF1-S nur bei Einsatz einer erhöhten Menge erreicht.

Die erzielten Ergebnisse liegen relativ eng beieinander. Daher kann – unter Berücksichtigung der Präzision des Verfahrens (ca. 5 - 10 kN, abhängig von der Höhe der

Abscherkräfte) – die Reihung der Ergebnisse lediglich als Tendenz angesehen werden.

5.3.4 Variation der Verschmutzung und der Bitumenemulsion

In Abbildung 106 sind die Ergebnisse von statischen Abscherversuchen der Variante Binder- auf Tragschicht (B-T), nach Auftrag von Schluff zur Simulation einer Verschmutzung der unteren Schicht (Variation der Schluffmenge: 0, 180 oder 360 g/m²) und unter Verwendung von verschiedenen Mengen an Bitumenemulsion (200, 300 oder 400 g/m²) dargestellt.

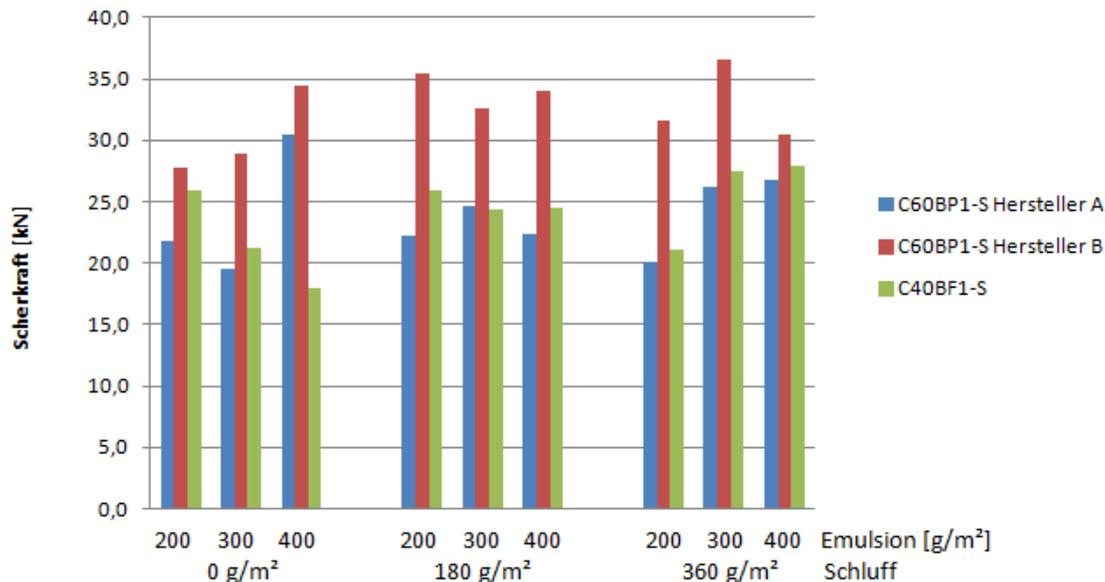


Abbildung 105. Abscherfestigkeiten [kN] ermittelt mit dem statischen Abscherversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 80 für die Schicht-Kombination Binderschicht auf Tragschicht (B-T) bei Variation der auf der Unterlage aufgetragenen Schluffmenge (0, 180 oder 360 g/m²) und der Menge an Bitumenemulsion (200, 300 oder 400 g/m²).

Die Abbildung 105 zeigt kaum eindeutige Tendenzen: Für die Emulsion C40BF1-S wird in den Kombinationen ohne Schluff und bei zunehmender Emulsionsmenge ein Abfall der Abscherfestigkeiten beobachtet. Demgegenüber weisen die Varianten mit C60BP1-S eine steigende Tendenz auf. Wird eine geringe Menge Schluff zwischen die Schichten gegeben, können diese Tendenzen nur noch bedingt beobachtet werden. Zur Erzielung der maximalen Abscherfestigkeit wird für jede Schluffmenge und jede Emulsion eine individuelle Emulsionsmenge benötigt.

Generell bewirkt eine Erhöhung des Schluffanteils in 5 von 9 Fällen auch eine erhöhte Abscherfestigkeit. Dies zeigt sich insbesondere bei der Emulsionsmenge 300 g/m², unabhängig von der eingesetzten Emulsionsart.

Zusammenfassend weisen die Abscherkräfte der statischen Abscherversuche für alle untersuchten Kombinationen plausible Tendenzen auf. Die Aussagen gelten jedoch nicht uneingeschränkt. Liegen die Ergebnisse eng beieinander, lässt die Präzision des Verfahrens (ca. 5 - 10 kN) keine abgesicherten Aussagen zu. Weiterhin können hohe

Scherkräfte > 50 kN oftmals prüftechnisch nicht aufgezeichnet werden, so dass eine quantitative Bewertung nicht möglich ist.

6 Prüfanleitung

6.1 Prüfgerät und Probekörper

Das Prüfgerät zur Durchführung der Scherermüdungsprüfungen entspricht der an der TU Dresden entwickelten Vorrichtung zur Schersteifigkeitsprüfung (sh. Kapitel 3.3.2).

Zur Untersuchung des Ermüdungswiderstandes des Schichtenverbundes werden die Probekörper an ihrer Schichtgrenze einer dauerhaften weggeregelter Scherbelastung bis zum Versagen ausgesetzt.

Die zweischichtigen Probekörper mit einem Durchmesser von 99 mm werden vor der Prüfung mit einem 2-Komponenten-Epoxidharzkleber in einer Klebevorrichtung (siehe Abbildung 106) in jeweils 4 Stahl-Halbschalen eingeklebt und 24 Stunden bei Raumtemperatur zur vollständigen Aushärtung des Klebers gelagert. Die Spaltbreite, die einer direkten Scherbelastung ausgesetzt ist, beträgt 1 mm.

Vor dem Versuchsbeginn wird der Probekörper auf die vorgegebene Prüftemperatur temperiert.

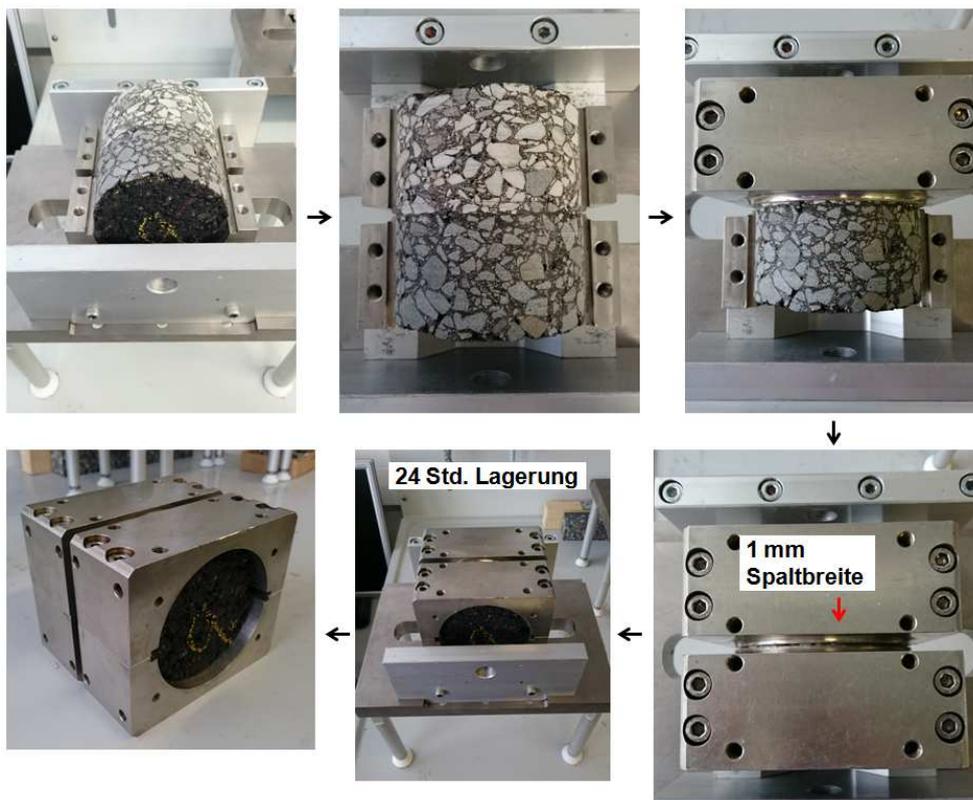


Abbildung 106. Probekörpervorbereitung für den zyklischen Scherversuch.

6.2 Schersteifigkeitsprüfung im Amplitudensweep

Anhand der kontinuierlich aufgezeichneten Rohdaten und der Auswertung der vertikalen Scher- und Kraftamplituden werden die Scherspannung und die Schersteifigkeit ermittelt.

Die Scherspannung wird wie folgt berechnet (DIN EN 12697-48, Teil 48, 2013, Entwurf):

$$\tau_i = \frac{F_i}{A_{\text{eff}}} \quad \text{Gl. 41}$$

mit:

τ_i : Amplitude der Scherspannung bei Lastwechsel i [MPa],
 F_i : Kraftamplitude bei Lastwechsel i [N],
 A_{eff} : wirksame Querschnittsfläche [mm²].

Die Schersteifigkeit ergibt sich aus der Scherspannung und der relativen Verschiebung zwischen den Schichten wie folgt:

$$K_{s,i} = \frac{\tau_i}{U_i} \quad \text{Gl. 42}$$

mit:

$K_{s,i}$: Schersteifigkeit bei Lastwechsel i [N/mm³],
 τ_i : Amplitude der Scherspannung bei Lastwechsel i [MPa],
 U_i : Amplitude der relativen Verschiebung zwischen den Schichten bei Lastwechsel i [mm].

Als Eingangsparameter für die eigentliche Scherermüdungsprüfung ist eine Scheramplitude so zu wählen, dass die Scherermüdung allmählich nach einer ausreichenden Anzahl an Lastwechseln erfolgt, d. h. nicht zu früh und nicht zu spät eintritt.

Die Bestimmung von geeigneten Scheramplituden erfolgt anhand von Steifigkeitsprüfungen mittels Amplitudensweep. Dazu sind für jede Prüfvariante, d. h. jede Verbundvariante, Normalspannung und Temperatur, Tastversuche durchzuführen, in denen die Scheramplitude stufenweise erhöht wird, mit je 200 Lastwechseln je Stufe und (mindestens) 25 Stufen (Beispiel siehe Abbildung 107).

Aus dem jeweiligen Schersteifigkeitsverlauf bei stufenweiser erhöhten Scheramplituden wird jener Amplitudenbereich festgestellt, in welchem in der eigentlichen Scherermüdungsprüfung eine optimale prüftechnische Ansprache der Scherermüdung des Schichtenverbundes erfolgen kann. So werden sowohl materialabhängige als auch maschinentechnische Aspekte berücksichtigt. Gleichzeitig werden diese Tastversuche verwendet, um die optimale Dauer der Scherermüdungsprüfung zu ermitteln, denn es würde z. B. eine zu niedrig gewellte Scheramplitude zu einer zeitaufwendigen Scherermüdungsprüfung führen, oder eine zu hohe Scheramplitude zum frühen Versagen des Schichtenverbundes innerhalb von nur wenigen Lastwechseln. Aus laborökonomischen Gründen werden die Scherermüdungsprüfungen auf maximal 500.000 Lastwechsel begrenzt.

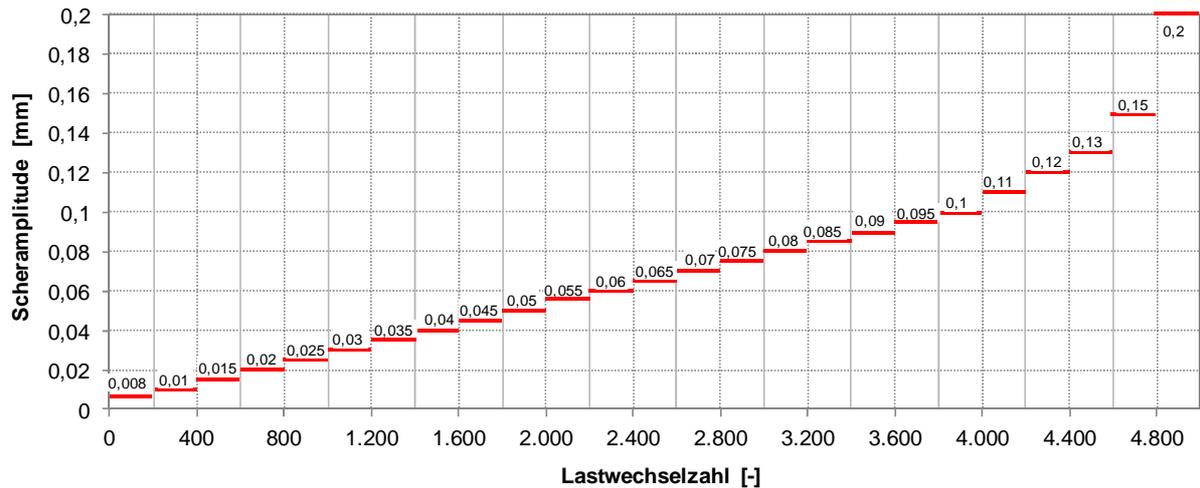


Abbildung 107. Steifigkeitsversuch in Form eines Amplitudensweeps mit dem zyklischen Scherversuch. Stufenweise Erhöhung der Scheramplitude, mit insgesamt 25 Stufen und jeweils 200 Lastwechseln (exemplarisch).

Zusätzlich werden anhand der Tastversuche die Grenzen des linearen Materialverhaltens ausgelotet. Nur bei einem konstanten Schersteifigkeitsverlauf mit stufenweise steigender Scheramplitude erfolgt die Beanspruchung im linear-visko-elastischen Bereich. Die Grenze des linearen Bereichs gilt nach Anderson et al. (1994) als erreicht, wenn bei einer Scheramplitude die Schersteifigkeit um mehr als 5 % in Bezug auf die Anfangssteifigkeit abfällt (Abbildung 108). Wird die Scheramplitude weiter erhöht, ist die Proportionalität zwischen Scherspannung- und Scherdehnung nicht mehr eingehalten, das Material wird außerhalb des linear visko-elastischen Bereichs beansprucht und folglich geschädigt.

Die Tastversuche im Amplitudensweep werden mindestens zweifachbelegt durchgeführt.

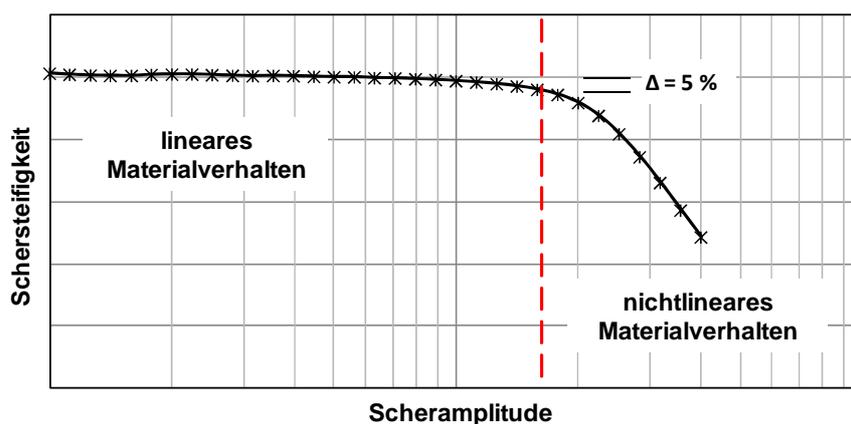


Abbildung 108. Prinzip der Ermittlung des linear-visko-elastischen Bereichs bei einem Amplitudensweep: die rot gestrichelte Linie markiert die Grenze des linearen Materialverhaltens, ab der bei einer konstanten Scheramplitude die Schersteifigkeit um mehr als 5 % vom Startwert abweicht (Anderson et al., 1994).

6.3 Scherermüdungsprüfung und Auswertung

Zyklische Scherermüdungsprüfungen sind bei einer Prüftemperatur von 20 °C ohne Aufbringung einer Normalspannung durchzuführen.

Für die Bestimmung der Scherermüdungsbeständigkeit einer Verbundvariante werden drei Scheramplituden festgelegt und bei jeder Scheramplitude mindestens drei Scherermüdungsprüfungen durchgeführt, sodass eine Verbundvariante neunfach belegt ist.

Die Auswertung einer Scherermüdungsprüfung erfolgt analog zu herkömmlichen Ermüdungsprüfungen (siehe Kapitel 2.2) mit dem Ermüdungskriterium $N_{f/50}$. Aus mindestens 9 Ermüdungsergebnissen wird die Wöhler-Linie gebildet. Die Funktion der Scherermüdung ergibt sich (analog zu herkömmlichen Ermüdungsprüfungen) aus:

$$\varepsilon_i = C_1 \cdot N^{C_2} \quad \text{Gl. 43}$$

mit:

ε_i : Scheramplitude [mm],

N: Lastwechselzahl bei Scherermüdung [-],

C_1 : Parameter der dehnungsabhängigen Scherermüdungsfunktion [-],

C_2 : Exponent der dehnungsabhängigen Scherermüdungsfunktion [-].

Mit den so erhaltenen Scherermüdungsfunktionen können Verbundvarianten vergleichend bewertet und Eingangparameter für die rechnerische Dimensionierung und die Prognose der Lebensdauer einer Asphaltbefestigung gewonnen werden.

7 Zusammenfassung

Dieser Bericht ist der zweite Teil des IGF-Projekts „*Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt*“ und wurde am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig erarbeitet mit dem Ziel, eine zyklische Scherermüdungsprüfung zu entwickeln.

Straßenoberbauten aus Asphalt sind im Regelfall aus mehreren Schichten zusammengesetzt. An den Schichtgrenzen wird ein größtmöglicher Schichtenverbund angestrebt. Nur bei ausreichendem Schichtenverbund zwischen allen Asphaltsschichten werden Scherspannungen, die durch Achsüberrollung, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge innerhalb des Schichtenpaketes entstehen können, vollständig übertragen, und die Asphaltbefestigung wirkt als eine strukturelle Einheit. Ein schlechter oder kein Schichtenverbund führt zu einer Veränderung des dreidimensionalen Beanspruchungszustandes in der gesamten Befestigung und zu einer signifikanten Erhöhung der aus der Belastung resultierenden Biegezugbeanspruchung.

Die Beurteilung des Schichtenverbundes in einer Asphaltbefestigung erfolgt in Deutschland zurzeit mittels statischem Abscherversuch gemäß Technischem Regelwerk (FGSV, TP Asphalt-StB Teil 80). Die Vorteile des statischen Abscherversuches sind die einfache Prüfvorrichtung und die einfache Versuchsdurchführung. Von Nachteil ist die Versuchsanordnung, da die im Straßenaufbau vorherrschenden, zyklischen und ortsveränderlichen Beanspruchungsbedingungen an der Schichtengrenze nicht praxisnah simuliert werden können. Weiterhin ist dieses Prüfverfahren ungeeignet für eine Ableitung von Materialparametern bzw. Materialgesetzen, die für eine Simulation der an den Schichtengrenzen resultierenden Spannungen und Dehnungen und zur rechnerischen Prognose der Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen erforderlich sind. Im Rahmen dieses Projektteils sollte ein alternatives Prüfverfahren gefunden werden, das diese Lücken schließt. Inhalt ist somit die Entwicklung eines direkten, zyklischen Scherversuches zur Ermüdungsbewertung des Schichtenverbundes, die Festlegung der notwendigen Prüfmodalitäten und die Schaffung eines ausreichend großen Bewertungshintergrundes.

Zu diesem Zweck wurden zunächst grundlegende Studien zur Anwendbarkeit des direkten, zyklischen Scherversuches durchgeführt. So konnten die Prüfmodalitäten identifiziert und festgelegt werden. Danach wurde serienmäßig der Einfluss von verschiedenen Verbundvarianten, Temperaturen und Normalspannungen auf den Ermüdungswiderstand des Schichtenverbundes systematisch überprüft. Dabei wurde anhand von ca. 600 Einzelversuchen die Gebrauchstemperaturspanne von -10 °C bis +50 °C und ein weiter Bereich der Normalspannung von 0 bis 0,50 MPa abgedeckt.

Die Wahl der Scheramplitude als Eingangsgröße in die Scherermüdungsprüfung ist auf die Prüfvariante abzustimmen (d. h. Verbundvariante, Normalspannung und Prüftemperatur) und ist entscheidend für die Qualität des Prüfergebnisses. Um die für die

jeweilige Prüfvariante geeigneten Scheramplituden zu finden und um materialabhängige (Scherermüdungsprüfung im linear-visko-elastischen Bereich) als auch maschinentechnische Vorgaben (optimale Dauer der Scherermüdungsprüfung) zu berücksichtigen, sind Steifigkeitsprüfungen mit Amplitudensweeps durchzuführen. Dazu wird die Scheramplitude stufenweise erhöht, mit je 200 Lastwechseln je Stufe und insgesamt 25 Stufen.

Für die Bestimmung der Scherermüdungsbeständigkeit einer Verbundvariante werden anhand der Schersteifigkeitsversuche drei Scheramplituden festgelegt und bei jeder Scheramplitude mindestens drei Scherermüdungsprüfungen durchgeführt, sodass eine Verbundvariante neunfach belegt ist. Die vorgeschlagene, standardisierte Scherermüdungsprüfung erfolgt bei einer Prüftemperatur von 20 °C ohne Aufbringung einer Normalspannung.

Für die Auswertung und die Interpretation der Scherermüdungsprüfung kann das konventionelle Ermüdungskriterium $N_{f/50}$ herangezogen werden. Sollte die Auswertung von $N_{f/50}$ nicht möglich sein, kann alternativ die Lastwechselzahl $N_{\text{asympt.}}$ bestimmt werden, bei welcher die Schersteifigkeit ihren niedrigsten Wert erreicht und näherungsweise konstant bleibt. Es ist zu vermuten, dass der Schichtenverbund in dieser asymptotischen Phase zerstört und die verbleibende Schersteifigkeit allein auf die Reibung in der Schichtgrenze zurückzuführen ist.

Die Auswertung der Scherermüdungsprüfung erfolgt analog zu herkömmlichen Ermüdungsprüfungen. Alle für eine Verbundvariante bestimmten ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Versagen werden als Funktion der aufgetragenen Scheramplitude in einem Diagramm aufgetragen und so die materialspezifische Wöhler-Linie gefunden mit der Regressionsgleichung $\varepsilon_i = C_1 \cdot N^{C_2}$, mit ε_i als Scheramplitude [mm], N als Lastwechselzahl bei Scherermüdung und C_1 und C_2 als die Parameter der dehnungsabhängigen Scherermüdungsfunktion.

Mit den erhaltenen Scherermüdungsfunktionen können Verbundvarianten vergleichend bewertet und Eingangparameter für die rechnerische Dimensionierung und die Prognose der Lebensdauer einer Asphaltbefestigung gewonnen werden.

Die Vorgehensweise zur Scherermüdungsprüfung und zur Festlegung der Prüfeinstellungen ist im Bericht in Form einer Prüfanleitung beschrieben.

Im Bericht sind die Ergebnisse aus insgesamt ca. 600 Einzelprüfungen berücksichtigt, womit ein solider Bewertungshintergrund für die Scherermüdungsprüfung geschaffen ist. Bei den Prüfvarianten sind unterschieden: Verbundvarianten mit unterschiedlichen Kombinationen an Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten, Einbau „heiß auf heiß“ und „heiß auf kalt“, Schichtenverbund ohne und mit Emulsion sowie mit polymermodifizierter und nicht modifizierter Emulsion, drei Prüftemperaturen, drei Normalspannungen und drei Scheramplituden. Daraus ergeben sich insgesamt 11 Verbundvarianten.

In der Mehrzahl der an sämtlichen Verbundvarianten durchgeführten Versuche nimmt der Schersteifigkeitsmodul exponentiell ab, d. h. der Kurvenverlauf folgt einer Expo-

nentialfunktion. Für diese Fälle kann der Verlauf der Scherermüdung mit guter Näherung mit einer vierparametrischen Exponentialfunktion mathematisch beschrieben werden. Die Parameter a_0 , a_1 und a_3 der Exponentialfunktion können physikalisch interpretiert werden: a_0 ist die verbleibende Restschersteifigkeit infolge Reibung und Verzahnung, a_1 ist der Startwert der Schersteifigkeit und a_3 ist der Schersteifigkeitsabfall. Der Parameter a_2 ist physikalisch nicht interpretierbar. Er bewirkt in einigen Fällen eine horizontale Verschiebung der Funktion, in der Mehrzahl der Fälle gilt $a_2 = 0$.

Die Scheramplitude bestimmt dominant den gesamten Schersteifigkeitsverlauf, d. h. Startwert, Schersteifigkeitsabfall und Restschersteifigkeit. Hohe Scheramplituden bewirken einen schnellen Abfall der Steifigkeit und eine niedrige Reststeifigkeit. Mit zunehmender Prüftemperatur sinkt der Startwert a_1 . Mit steigender Normalspannung geht eine parallele Verschiebung des Schersteifigkeitsverlaufes einher.

Die erzielte Reihung der Verbundvarianten entspricht den baupraktischen Erfahrungen. Beispielweise ergeben die „heiß auf heiß“ eingebauten Verbundvarianten generell die höchsten Scherermüdungsbeständigkeiten. Die feinkörnigen Verbundvarianten (Deckschicht auf Deckschicht oder Binderschicht) sind vorteilhaft gegenüber den gröberen Verbundvarianten (Binderschicht auf Binderschicht oder Tragschicht). Die polymermodifizierte Emulsion C60BP1-S ist aufgrund der Modifikation und des erhöhten Bindemittelgehaltes vorteilhaft gegenüber der Emulsion C40BF1-S.

Werden die mittels Scherermüdungsprüfung erzielten Ergebnisse jenen aus statischen Abscherversuchen gemäß TP Asphalt-StB Teil 80 gegenübergestellt, so sind die aus den unterschiedlichen Prüfmethoden erzielten Reihungen annähernd gleichwertig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem entwickelten Verfahren zur Scherermüdungsprüfung eine plausible Bewertung des Dauerverhaltens des Schichtenverbundes erfolgen kann.

8 Literatur

- Al-Qadi, I., L., Carpenter, S., Leng, Z., Ozer, H. & Trepanier, J. 2008. Tack coat optimization for HMA overlays: laboratory testing. Research Report FHWA-ICT-08-023. Illinois Center for Transportation, USA
- Anderson, D.A., Christensen, W.D., Bahia, H., Dongre, R., Sharma, M.G., Antle, C. & Button, J. 1994. Binder characterization and evaluation; Volume 3: physical properties. Research Report SHRP-A-369, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Carr, A. G. 2001. The behaviour of layered pavement structures: the dynamic shear box. Project Report, University of Nottingham, UK.
- Canestrari, F. & Santagata, E. 2005. Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, V. 6, No. 1, pp. 39-46.
- Crispino, M., Festa, B., Giannattasio, P. & Nicolosi, V. 1997. Evaluation of the interaction between the asphalt concrete layers by a new dynamic test. Presented at the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington.
- De Bondt, A., H. 1999. Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.
- Deysarkar, I. & Tandon, V. 2005. Field Evaluation of Tack Coat Quality Measurement Equipments. *International Journal of Pavement Engineering*, V. 4, No. 1-2, pp. 25-37.
- Diakhaté, M., Millien, A., Petit, C. Phelipot-Mardeléb, B. & Pouteau, B. 2011. Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces. *Construction and Building Materials*, V. 25, Issue 2, pp. 1123–1133.
- DIN EN 12697-48. 2013. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 48: Schichtenverbund. prEN 12697-48, deutsche Fassung, Entwurf.
- Donovan, E., Al-Qadi, I. & Loulizi, A. 2000. Optimization of Tack Coat Application Rate for Geocomposite Membrane on Bridge Decks. *Transportation Research Record* 1740, pp. 143–150, Washington D.C.
- FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 33, 2007. Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV). FGSV-Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, TP Asphalt-StB, Teil 80,. 2012. Abscherversuch. FGSV-Verlag, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- FGSV, 2014. Begriffsbestimmungen zur Performance von Asphalt (v. 20. Mai 2014). Arbeitsgruppe "Asphaltbauweisen", Ad-hoc-Gruppe „Performance Asphalt“ 7.02, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

- Hopman, P., Kunst, P. & Pronk, A. 1989. A Renewed Interpretation Model for Fatigue Measurement. Verification of Miner's Rule. Proc., 4th Eurobitumen Symposium, Madrid, Spain.
- Isailović, I., Cannone Falchetto, A. & Wistuba, M. P. 2015. Energy Dissipation in Asphalt Mixtures Observed in Different Cyclic Stress-Controlled Fatigue Tests. Proc., 8th Int. RILEM SIB Symposium, 7-9 October 2015, Ancona, Italy.
- Górszczyk, J. & Malicki, K. 2012. Influence of the tack coat material on interlayer bonding properties in asphalt layers system. Proc., 4th European Pavement and Asset Management Conference, EPAM 2012, Malmo, Sweden, 5-7 September 2012.
- Kim, H., Arraigada, M., Raab, C. & Partl, M. 2011. Numerical and Experimental Analysis for the Interlayer Behavior of Double-Layered Asphalt Pavement Specimens. Journal of materials in civil engineering, January 2011.
- Kruntcheva, M.R., Collop, A.C. & Thom, N.H. 2006. Properties of asphalt concrete layer interfaces. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 18, no. 3, pp. 467-471.
- Mohammad, L. N., Wu, Z. & Raqib, A. 2005. Investigation of the Behavior of Asphalt Tack Interface Layer. Research Report FHWA/LA.04/394, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, LA.
- Mollenhauer, K & Wistuba, M. 2011. Verfahren zur Bestimmung der Ermüdungseigenschaften von Asphalt unter Berücksichtigung der Europäischen Normung – Schaffung eines Bewertungshintergrundes. Schlussbericht, Forschungsprojekt FE 07.0214/2006/EGB i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Muench, S. & Moomaw, T. 2008. De-bonding of hot mix asphalt pavements in Washington State: an initial investigation. Final Technical Report TNW 2008-10, Transportation Northwest (TransNow), University of Washington and Washington State Transportation Commission.
- Raab, C. & Partl, M. 2004. Interlayer Shear Performance: Experience with Different Pavement Structures. Proc., 3rd Eurasphalt & Eurobitumen Congress, Vienna.
- Romanoschi, S. 1999. Characterization of Pavement Layer Interfaces. Ph.D.Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge.
- Romanoschi, S. & Metcalf, J. 2001. The characterization of asphalt concrete layer interfaces. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Jan 2001, Vol. 1778, pp. 132-139.
- Sanders, P.J. 2001. Reinforces asphalt overlays for pavements. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, UK.
- Santagata, E. & Canestrari, F. 1994 Tensile and shear tests of interfaces in asphalt mixes: A new prospective on their failure criteria. Proc., 2nd International Symposium, Ulster, Northern Ireland.

- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H. & Huang, H., 2006. A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 7.
- Shen, S. & Carpenter, S. 2007. Dissipated Energy Concepts for HMA performance: Fatigue and Healing. Final Report, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.
- Sholar, G. A., Page, G. C., Musselman, J. A., Upshaw, P. B. & Moseley, H. L. 2004. Preliminary Investigation of a Test Method to evaluate Bond Strength of bituminous Tack Coats. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 73, 2004.
- Shutanto, H. M. 2009. Assessment of bond between asphalt layers. Ph.D. Thesis. University of Nottingham, UK.
- Tozzo, C., D'Andrea, A., Cozzani, D. & Meo, A. 2014. Fatigue investigation of the interface shear performance in asphalt pavement. *Modern Applied Science*; Vol. 8, No. 2; 2014, Canada.
- Walther, A. 2015. Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 28, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig,
- Weber, R. 1991. Die Rißbildung in Asphaltstraßen als Folge mangelhaften Schichtenverbundes. Dissertation, Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen, Technische Universität München.
- Wellner, F. & Ascher, D. 2007. Untersuchung zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen. Schlussbericht, AiF Forschungsvorhaben Nr. 13589 BR/1, Professur für Straßenwesen, Technische Universität Dresden.
- West, R. C., Zhang, J. & Moore, J. 2005. Evaluation of Bond Strength between Pavement Layers. NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, University of North Carolina.
- Wheat, M. 2007. Evaluation of bond strength at asphalt interfaces. Master thesis, Kansas State University.
- Wistuba, M., Monismith, C., Bahia, H.U., Renken, P., Olard, F., Blab, R., Mollenhauer, K., Metzker, K., Büchler, S., Grönniger, J., Zeng, M., and Nam, K. 2009. Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen. Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 23, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Wistuba, M. & Isailovic, I. 2014. Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 84.0106/2009, i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Woods, M. E. 2004. Laboratory Evaluation of Tensile and Shear Strengths of Asphalt Tack Coats. Master Thesis, Mississippi State University, Starkville.