

Optimierung der Nachhaltigkeit von elastomeren Werkstoffen durch modifizierte Prüfverfahren

Veronika Kollmeier

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
2. Prof. Dr.-Ing. Jia Liu

Die Dissertation wurde am 08.08.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 08.12.2023 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	9
2	Grundlagen der Elastomere.....	13
2.1	Klassifizierung polymerer Werkstoffe.....	13
2.2	Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung von Elastomeren.....	15
2.3	Rheologisches Verhalten von Elastomeren	18
2.4	Thermische Charakteristika	23
3	Wissenschaft und Stand der Praxis	26
3.1	Grundlagen des Körperschalls.....	26
3.1.1	Ursachen und Effekte der Körperschallanregung im Schienenverkehr	28
3.1.2	Eigenfrequenz elastisch gelagerter Systeme	30
3.2	Anwendungen im Bauwesen	31
3.2.1	Baulager	31
3.2.2	Brückenlager	32
3.2.3	Eisenbahn-Oberbau	33
4	Prüfparameter.....	40
4.1	Prüfverfahren.....	40
4.1.1	Ermittlung der statischen Kennwerte	40
4.1.2	Ermittlung der niederfrequenten dynamischen Kennwerte.....	42
4.1.3	Niederfrequente dynamische Versteifung	43
4.1.4	Ermittlung der höherfrequent dynamischen Kennwerte.....	44
4.2	Messtechnik und Prüfmaschinen	46
4.3	Prüfaufbau.....	47
4.4	Messunsicherheiten.....	48
4.5	Prüfkörper und Prüfwerkstoffe	50
5	Laborversuche.....	54
5.1	Prüfkörper- und werkstoffbedingte Einflüsse.....	54
5.1.1	Oberflächenbeschaffenheit.....	54
5.1.2	Prüfkörperwiederverwendung.....	58
5.1.3	Prüfkörpergeometrie	63
5.1.4	Verklebung und Verbund	71
5.1.5	Prüfwerkstoff	79

Inhaltsverzeichnis

5.2	Prüfablaufbedingte Einflüsse	87
5.2.1	Belastungszyklen.....	87
5.2.2	Belastungsgeschwindigkeit.....	91
5.3	Werkstofffunktion	98
6	Einordnung und Interpretation der Ergebnisse.....	111
6.1	Bewertung der prüfkörper- und werkstoffbedingten Einflüsse	111
6.1.1	Oberflächenbeschaffenheit.....	111
6.1.2	Prüfkörperwiederverwendung	112
6.1.3	Prüfkörpergeometrie	113
6.1.4	Verklebung und Verbund	115
6.1.5	Prüfwerkstoff	116
6.2	Bewertung der prüfablaufbedingten Einflüsse.....	117
6.2.1	Belastungszyklen.....	118
6.2.2	Belastungsgeschwindigkeit.....	119
6.3	Bewertung der Werkstofffunktion	120
7	Optimierungsansätze.....	124
7.1	Prüfkörper.....	124
7.2	Prüfverfahren.....	126
7.3	Angepasstes Prüfprozedere	130
8	Fazit und Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	142
	Abbildungsverzeichnis.....	148
	Tabellenverzeichnis.....	153
	Anlagenverzeichnis	156
	Anlagen	157

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
DB	Deutsche Bahn
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
HBM	Hottinger Brüel & Kjaer GmbH
ISO	Internationale Organisation für Normung
M	Werkstoff
MFS	Masse-Feder System
n.v.	nicht vorhanden
PUR	Polyurethan
TU	Technische Universität
USM	Unterschottermatte
WA	Wegaufnehmer

Parameterverzeichnis

Zeichen	Erklärung	Einheit
ΔL_e	Einfügungsdämm-Maß	dB
Δx_i	Störstellenabstand	m
η	Frequenzverhältnis Erregerfrequenz zu Eigenfrequenz	-
$K_{NF,dyn}(10\text{ Hz})$	Niederfrequente dynamische Versteifung bei 10 Hz	-
μ	Querdehnzahl	-
$\sigma_{v,1}$	Vorbelastung, entspricht doppelte dynamischen Minimalbelastung	N/mm ²
$\sigma_{v,2}$	Vorbelastung, entspricht Mittelwert zwischen minimaler und maximaler dynamischer Belastung	N/mm ²
$\sigma_{v,3}$	Vorbelastung, entspricht dynamischen Maximalbelastung	N/mm ²
A	Fläche	mm ²
A_{AM}	Sohlfläche der Schwelle am auflagerfreien Mittelteil	cm ²
B	Breite	mm
C_{dyn}	niederfrequent dynamischer Bettungsmodul	N/mm ³
$C_{dyn,10Hz}$	niederfrequent dynamischer Bettungsmodul bei 10 Hz	N/mm ³
$C_{dyn,5Hz}$	niederfrequent dynamischer Bettungsmodul bei 5 Hz	N/mm ³
\overline{C}_h	Mittelwert der Bettungsmoduln für die Prüfkörperdicke h	N/mm ³
$\overline{C}_{h,uv}$	Mittelwert der Bettungsmoduln für einschichtige/verklebte Prüfkörper für die Prüfkörperdicke h	-
$\overline{C}_{h,v}$	Mittelwert der Bettungsmoduln für die Prüfkörperdicke h für unverklebte Prüfkörper	-
C_{stat}	statischer Bettungsmodul	N/mm ³
$C_{stat,3}$	statischer Bettungsmodul, Auswertung am 3. Belastungszyklus	N/mm ³
$C_{stat,5}$	statischer Bettungsmodul, Auswertung am 5. Belastungszyklus	N/mm ³
d_1	Einsenkung an oberer Auswertgrenze	mm
d_{min}	Einsenkung an unterer Auswertgrenze	mm
F	Kraft	kN
F_1	obere Auswertelast	kN
F_{max}	Minimallast	kN
F_{min}	Maximallast	kN

f	Frequenz	Hz
f ₀	Eigenfrequenz	Hz
f _{err}	Erregerfrequenz	Hz
h	Dicke	mm
k	Federsteifigkeit	kN/mm
k _{dyn}	niederfrequente dynamische Werkstoffsteifigkeit	kN/mm
k _{stat}	statische Werkstoffsteifigkeit	kN/mm
L	Länge	mm
L _v	Schwingschnellepegel	dB _v
m	Masse	kg
n	Faktor für das Verhältnis der Krümmung der Werkstofffunktion	-
n _h	Krümmung der Werkstofffunktion für Prüfkörperdicke h	-
Q	Faktor für das Verhältnis der Werkstofffunktion	-
R ²	Bestimmtheitsmaß	-
S	Formfaktor	-
s	Einsenkung	mm
T _R	Kälterichtwert	°C
t	Faktor für das Verhältnis des y-Achsenabstandes der Werkstofffunktion	-
t _h	y-Achsenabstand der Werkstofffunktion für Prüfkörperdicke h	-
u	Schwingamplitude	mm
V	Faktor für das Verhältnis der Werkstofffunktionen von einschichtigen/verklebten zu unverklebten Prüfkörper	-
v	Geschwindigkeit	m/s
v ₀	Bezugswert	m/s
z	Systemeinsenkung unter Eigengewicht	mm

Kurzfassung

Die weltweit steigende Urbanisierung stellt die Baubranche vor immer größer werdende Herausforderungen. Insbesondere der Körperschallschutz rückt dabei immer mehr in den Fokus. Elastomere können in verschiedenen Formen im Gebäude- und Gleisbau eingesetzt werden und so zu einer Reduktion dieser Emissionen beitragen.

Damit elastischen Werkstoffe zur Anwendung kommen können, muss das Produkt zuerst mehrere Prüfungen zur Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung bestehen. Diese erfolgen nach internationalen Normen und entsprechend dem Produkttyp. Bezogen auf den Aspekt der Ressourcenschonung und der steigenden Rohstoffpreise wurde an selbstermittelten Versuchsergebnissen untersucht, inwieweit die Prüfkörperabmessungen für Prüfungen reduziert werden können. Dies soll einen Beitrag zur Quantifizierung der Bettungsmoduländerung mit abnehmender Prüfkörpergrundfläche leisten. Hierzu fungiert der von der Geometrie abhängige Formfaktor als Basis für den Vergleich von Prüfkörpern unterschiedlicher Form und Größe. Ziel der Forschungsarbeit ist es, reproduzierbare Bettungsmodulverläufe zu erstellen und anhand dieser Rückschlüsse hinsichtlich der Praktikabilität einer Grundflächenreduktion zu ziehen.

In einem weiteren Ansatzpunkt wurden verschiedene Aspekte der vorgegebenen Prüfverfahren bezüglich optimierte Effizienz untersucht. Hierbei wurde unter anderem der Fokus auf die Änderung der Lastzyklenanzahl, die im Zuge der Überarbeitung der Normen zu elastischen Elementen des Oberbaus von Schienenverkehrswegen erfolgte, gelegt. Ein weiterer Fokus lag auf den Prüfgeschwindigkeiten. Aktuell wird diese unabhängig vom Werkstoff durch die Prüfkörperdimension nach den Normen bestimmt. Aus diesem Grund wurden Versuche mit verschiedenen Geschwindigkeiten an verschiedenen Polyurethan-Elastomeren mit unterschiedlichen Steifigkeiten durchgeführt. Durch die Reduzierung der Lastzyklen und die Änderung der Prüfgeschwindigkeit können Kosten und Zeit eingespart und Prüfungskapazitäten optimiert werden.

Die Auswertung der Versuche ergab, dass die Erstellung einer Formel pro Werkstoff zur Berechnung der Bettungsmoduln anhand der Prüfkörpergeometrie möglich ist. Somit ist eine Änderung Prüfkörpergrundfläche als realistisch anzusehen. Des Weiteren wurde bei den Versuchen zur Ermittlung der Bettungsmoduln festgestellt, dass die Anzahl der Lastzyklen reduziert und die Prüfgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Werkstoff angepasst werden kann.

Abstract

Increasing urbanization worldwide presents the construction industry with numerous challenges. Among these, the challenge of structure-borne noise protection is a topic of particular focus. Elastomers can be used in various applications in building and track construction to reduce these noise emissions.

For an elastic product to be utilized, the product must first pass several tests for quality assurance and quality control. These tests are conducted according to international standards and specific to the product type. Given the need for resource conservation and rising raw material prices, self-determined test results were examined to determine the extent to which the standard test specimen dimensions could be reduced. The purpose of doing this is to quantify changes in bedding modulus using a smaller specimen base area. A geometry-dependent shape factor serves as a basis for comparing samples of different shapes and sizes. The objective of the research is to establish reproducible bedding modulus curves and use these to draw conclusions regarding the practicability of a test specimen base area reduction.

Further, various aspects of the specified test procedures were examined with the intent of optimizing their efficiency. This included a focus on the change in the standard number of load cycles for elastic elements of rail infrastructure. Another focus was on test velocities. Currently, test velocity is determined by the test specimen dimensions in accordance with the standards, irrespective of the material. Therefore, experiments were conducted on different polyurethane elastomers with varying stiffness at different velocities. By reducing the number of load cycles and modifying the test velocity, costs and time can be saved, and testing capacities thus optimized.

The experiments revealed that it is possible to establish a formula for each material to calculate the bedding moduli based on the geometry of the test specimens. Thus, a change in the standard test specimen base area could realistically be implemented. Furthermore, during experiments to determine bedding moduli, it was found that the number of load cycles can be reduced and the test velocity can be adjusted depending on the material.

1 Einführung

Die Weltbevölkerung wird bis zum Jahr 2050 voraussichtlich zu 80 % in Städten leben [1]. Diese zunehmende Bevölkerungskonzentration in Ballungsräumen und das Gebot zur Nachverdichtung infolge des Mangels an frei verfügbaren Flächen führt zu einer kontinuierlichen Abnahme des Abstandes zwischen Verkehrswegen und umgebender Bebauung. Die durch den Straßen- und Schienenverkehr verursachten Erschütterungen und Schallimmissionen können gesundheitliche Beeinträchtigungen und bei sehr hohen Pegeln auch Schäden an Bauwerken oder technischen Anlagen zur Folge haben [2]. Im Jahr 2020 haben sich laut einer Umfrage des Umweltbundesamtes über ein Drittel der deutschen Bevölkerung durch Schienenverkehrslärm gestört oder belästigt gefühlt [3]. Dementsprechend gewinnt ein effektiver Schutz vor Erschütterungen und Schallimmissionen immer mehr an Bedeutung. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, sind gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der Erschütterungen sowie des sekundären Luftschalls durchzuführen [4].

Maßnahmen zur Körperschalldämmung zielen darauf ab, die Einleitung von Körperschall in ein Bauteil durch den Oberbau, das Tunnelbauwerk und die Übertragungswege möglichst zu reduzieren [4]. Als eine vielversprechende Maßnahme gilt die Verwendung von Elastomeren. Infolge der im Werkstoffgefüge eingeschlossenen Luft sind sie prädestiniert zur Schwingungsdämpfung [2]. Eine signifikante Reduzierung von Schall- und Erschütterungsemissionen kann durch ihre bauliche Ausbildung in besonders schützenswerten Bereichen erzielt werden [4]. In technischen Anwendungen des Bauwesens werden Elastomere aufgrund der beständig elastischen und dämpfenden Werkstoffeigenschaften vielfach verwendet [5]. Der Nutzungsschwerpunkt liegt auf Verwendung im Brücken-, Eisenbahn- und Hochbau. Dabei richtet sich die optimale Zusammensetzung und Dimensionierung des elastischen Elements nach den projektspezifischen Anforderungen [6]. Im Bereich des Eisenbahnwesens sind Maßnahmen am Oberbau, durch Integration von elastischen Komponenten am effektivsten und gleichzeitig am wirtschaftlichsten. Die hohen Investitionskosten können durch die höhere Nutzungsdauer und den geringen Instandhaltungsaufwand der Strecke kompensiert werden. [4] Die Verwendung von Elastomeren wird schon seit Jahrzehnten im Verkehrswegebau ausgeführt. So wurden beispielsweise im Jahr 1983 Elastomere in Form von Unterschottermatten in die S-Bahnstammstrecke München im Bereich der Philharmonie Gasteig eingebaut. Diese

vermindern den Eintrag von Körperschall in das Gebäude und ermöglichen einen Ruhegeräuschpegel im Konzertsaal von unter 25 Dezibel. Auch nach über 40 Jahren ist die akustische Leistungsfähigkeit und die damit verbundene Minderung des Körperschalls vorhanden. [7]

Jedoch stellt die steigende Ressourcenknappheit im Bereich des Bauwesens die Hersteller und Verwender vor immer größer werdenden Herausforderungen. Aufgrund ihrer Zusammensetzung ist die Herstellung von Polyurethan-Elastomeren stets von den Rohölpreisen der aktuellen Marktsituation abhängig. In den letzten 20 Jahren vervielfachte sich der Rohölpreis um mehr als das 3,5-fache [8]. Dass die Ausgangsmaterialien für Polyurethan aus Erdöl gewonnen werden, stellt noch ein weiteres Problem dar. Aktuell ist das gleichwertige Recycling von Polyurethan-Elastomeren nicht möglich. Somit kommt es bei der Entsorgung und der damit einhergehenden Verbrennung zu einem hohen Emissionsausstoß von Treibhausgasen. Durch die immer strengeren Emissionsgrenzwerte und hohen Entsorgungskosten muss hier eine Reduzierung von Materialabfällen stattfinden. Um trotz steigender Rohstoffkosten und -mangel eine wirtschaftliche Produktion und Einsatz von Elastomeren weiterhin ermöglichen zu können, müssen den Themen Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit noch mehr Beachtung geschenkt werden. Durch einen optimierten Einsatz von Werkstoffen können Kosten dauerhaft minimiert und Werkstoffabfälle deutlich reduziert werden.

Um eine Grundlage für Optimierungsansätze zu schaffen, werden umfangreiche Versuche an Polyurethan-Elastomeren mit unterschiedlichsten Steifigkeitsklassen durchgeführt. Diese Versuche dienen der Beurteilung der Eignung der jeweiligen Elastomere hinsichtlich der Reduktion von Erschütterungen und Körperschall. Im Prüflabor werden daher Kennwerte zur Charakterisierung der statischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften ermittelt. Dabei werden Normen wie die DIN EN 17282:2020, DIN 45673-7:2010 oder DIN EN 17628:2023 als Grundlage für die Kennwertbestimmungen herangezogen [9 – 11].

Grundsätzlich werden in dieser Arbeit zwei Bereiche für mögliche Optimierungsansätze betrachtet. Der erste Ansatzpunkt liegt darin, eine Beurteilungsgrundlage hinsichtlich der Reduktion der Prüfkörpergrundfläche für Eigen- und Fremdüberwachung, Qualitätssicherung und Genehmigungsprüfungen zu schaffen. Durch eine potenzielle Verringerung der Prüfkörpergrundfläche kann eine erhebliche Einsparung von Werkstoffen erreicht werden. Denn gemäß der DIN 45673-7:2010 müssen bei Einzellager in der Regel 3 % und bei Flächenlagern sechs Stück pro Charge der produzierten Lager geprüft werden.

Gerade bei großen Bauprojekten wie beispielsweise Stuttgart 21 inklusive der Neubau-
strecke Wendlingen-Ulm fallen auch eine entsprechend große Menge an Prüfkörper an.
Ein daraus resultierendes Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf den versuchstechnisch
ermittelten Werten, eine mathematische Gleichung abzuleiten, mit deren Hilfe die Bet-
tungsmoduln eines Prüfkörpers beliebiger Geometrie bestimmt werden können. Dies er-
möglicht wiederum die Verwendung reduzierter Prüfkörpergeometrien und führt somit zu
weiteren Werkstoffeinsparungen. Der zweite Bereich für Optimierungsansätze bezieht
sich auf die Prüfdurchführung gemäß den vorgegebenen Normen für die Kennwertbe-
stimmungen. Um diese Prüfungen, die einen wichtigen Bestandteil der Qualitätssiche-
rung, Eigen- und Fremdüberwachung darstellen, möglichst effizient zu gestalten, werden
Aspekte wie Belastungsgeschwindigkeit und Belastungszyklen untersucht. Das Ziel da-
bei ist es, die Prüfungsdauer zu optimieren und somit die damit verbundenen Prüfungs-
kapazitäten zu verbessern. Durch eine effizientere Prüfdurchführung können Zeit und
Ressourcen eingespart werden, ohne dabei die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der
Messergebnisse zu beeinträchtigen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und Optimierungsansätze sind von großer Be-
deutung für die Weiterentwicklung und Anwendung von Polyurethan-Elastomeren.
Durch die Ermittlung präziser Kennwerte sowie die Implementierung von effizienten Prüf-
verfahren können Hersteller, Ingenieure und Forscher fundierte Entscheidungen treffen
und innovative Lösungen entwickeln. Dies trägt nicht nur zur Verbesserung der Qualität
und Nachhaltigkeit von Elastomeren bei, sondern ermöglicht auch eine optimierte Nut-
zung von Ressourcen und eine Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks.

Durch die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Optimierungsansätze wird vor-
rangig das Ziel verfolgt, die Ressourcennutzung und Nachhaltigkeit von elastomeren
Werkstoffen zu verbessern. Dabei steht insbesondere die Reduzierung des Werkstoff-
verbrauchs und -abfalls im Fokus. Mittels Implementierung effizienterer Prozesse und
Techniken sollen wertvolle Ressourcen eingespart werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt
dieser Optimierungsansätze ist die Einsparung von Kosten. Infolge des reduzierten
Werkstoffverbrauchs können nicht nur Materialkosten gesenkt werden, sondern auch
Kosten im Zusammenhang mit Lagerung und Entsorgung von Werkstoffabfällen redu-
ziert werden. Zudem kann durch die Optimierung des Energieverbrauchs weitere Kosteneinsparung erzielt werden. Effizientere Prüfverfahren und eine verbesserte Nutzung von Lagerplatz führen zu geringeren Betriebskosten und tragen somit zur wirtschaftlichen Nachhaltigkeit bei.

1 Einführung

Diese Optimierungsansätze haben also weitreichende Vorteile sowohl für Unternehmen als auch für die Umwelt. Sie ermöglichen eine nachhaltigere Nutzung von elastomeren Werkstoffen, indem Ressourcen geschont, Kosten gesenkt und Umweltauswirkungen minimiert werden. Durch kontinuierliche Verbesserungen in diesen Bereichen kann die Branche einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten und zukunftsfähige Lösungen für elastomere Werkstoffe vorantreiben.

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle der Getzner Werkstoffe GmbH, die die Forschungsarbeit unterstützt und wissenschaftlich begleitet hat.

2 Grundlagen der Elastomere

Seit über 100 Jahren gewinnen Kunststoffe immer mehr an Bedeutung und Notwendigkeit im alltäglichen Leben. Somit stieg die weltweite Kunststoffproduktion seit dem Jahr 1950 bis 2021 um 260 % auf fast 400 Mio. Tonnen an [12]. Als eine Untergruppe der polymeren Werkstoffe spielen Elastomere eine wichtige Rolle in den unterschiedlichsten Branchen. So formuliert der amerikanische Bauingenieur und Technikhistoriker Henry Petroski in einem Artikel zum Thema Werkstoffe für das 21. Jahrhundert: "Elastomers are an essential class of material used in almost every industry from aerospace to medicine." [13]

2.1 Klassifizierung polymerer Werkstoffe

Die Klassifizierung polymerer Werkstoffe in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste erfolgt anhand der Molekülstruktur und des temperaturabhängig mechanischen Verhaltens. Der Vernetzungsgrad der einzelnen Makromolekülketten ist maßgebend für die mechanischen Eigenschaften und somit Grundlage der Klassenzuordnung. Diese können grundlegend, entsprechend Abbildung 1, drei verschiedene Anordnungen ausbilden. [14]

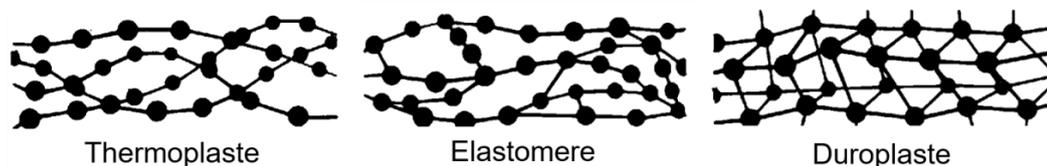


Abbildung 1: Molekülstruktur von Thermoplasten, Elastomeren und Duroplasten (Eigene Darstellung basierend auf [15])

Thermoplast

Thermoplaste weisen unvernetzte, vorwiegend lineare Molekülketten auf. Diese sind nur durch geringe physikalische Bindungen miteinander verkettet. Man unterscheidet zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten. Bei teilkristallinen Thermoplasten lagern Makromoleküle in bestimmten Bereichen parallel zueinander. Dies ermöglicht die Entstehung von seitlichen Verzweigungen der Polymerketten. Bei amorphen Thermoplasten hingegen liegen die einzelnen Molekülketten völlig regellos ineinander verknäult vor. [16, 17]

2 Grundlagen der Elastomere

Die teilweise vorliegenden physikalischen Wechselwirkungen können durch entsprechende Temperaturerhöhung überwunden werden und somit sind Thermoplaste bei Temperatureinwirkung wiederholt plastisch verformbar. Beim Erreichen der Glasübergangstemperatur, welche die Temperatur beschreibt bei der ein Festkörper von einem starren in einen elastischen Zustand übergeht, beginnen Thermoplaste zu schmelzen. Thermoplaste sind sowohl löslich als auch quellbar. Die Löslichkeit sinkt jedoch mit zunehmendem Polymerisationsgrad. [16, 17]

Abbildung 2 zeigt, dass die im belasteten Zustand temperaturbedingte Verformung auch bei Thermoplasten nach vollkommener Entlastung bestehen bleibt. Entsprechend ist die Rückverformung in den Ausgangszustand bei konstanter Temperatur nicht mehr möglich. Sie sind in verschiedensten Einsatzbereichen wie Verpackungsfolien oder optischen Datenträgern vertreten. [16 – 18]

Duroplast

Duroplaste (auch unter der Bezeichnung Duromere bekannt) bestehen aus durch Hauptvalenzen vernetzte Molekülketten. Die Vernetzung ist engmaschig, dreidimensional und amorph. Sie weisen sowohl eine hohe Oberflächenhärte als auch eine hohe Formstabilität auf. Aufgrund ihrer räumlich dichten Vernetzung sind diese bis zur Zersetzung nicht verformbar (Abbildung 2). Jene tritt erst bei sehr hohen Temperaturen ($> 150\text{ °C}$) auf. Innerhalb ihrer Anwendungstemperatur weisen Duroplaste einen spröden und glasartigen Zustand auf. Schäden infolge mechanischer Beanspruchung zeigen sich daher in Form von Rissen oder Sprüngen im Werkstoff. Im Gegensatz zu den Thermoplasten und Elastomeren besitzen Duroplaste keinen Glasübergangsbereich. Dieser beschreibt den Temperaturbereich in denen das Polymer die größte Verformungsfähigkeit aufweist. Eine besondere Eigenschaft von Duroplaste ist, dass sie keine Reaktion bei Lösungsmitteln oder Weichmachern aufweisen. Typische Einsatzbereiche sind hier Ummantelung von elektronischen Bauteilen und hitzebeständige Artikel bei Küchenwaren. [16, 19]

Elastomer

Elastomere bestehen aus weitmaschig durch Hauptvalenzen vernetzten Molekülketten. Wie bei Duroplaste sind Elastomere durch kovalente Bindungen zwischen den einzelnen Molekülen miteinander verkettet. Jedoch weisen die Vernetzungspunkte eine deutlich geringere Dichte auf. Durch die Änderung der Dichte an Quervernetzungen kann die Steifigkeit des Werkstoffs variiert werden. Diese Vernetzung ermöglicht eine ausgeprägte Elastizität und hohe dynamische Festigkeit, denn die Glasübergangstemperatur

2.2 Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung von Elastomeren

liegt bei Elastomeren unterhalb der Einsatztemperatur. Deshalb sind Elastomere formfest, weisen jedoch ein elastisches Verhalten auf. Diese Werkstoffeigenschaft ermöglicht es ihnen, selbst nach hoher Zug- und Druckbelastung, in den Ausgangszustand zurückzukehren (Rückstellvermögen) und finden auch bei Raumtemperatur nach Verformung wieder in ihre ursprüngliche Gestalt zurück (Abbildung 2). Elastomere sind gegenüber Lösungsmittel nicht löslich, jedoch weisen sie häufig ein Quellverhalten auf, da sich Lösungsmittel zwischen die Molekülketten einlagern. Da Elastomere ihr zähelastisches Verhalten auch über einen weiten Temperaturbereich beibehalten, finden sie vor allem als Federungselemente wie Baulager und Fahrzeugreifen Anwendung. [16 – 18]

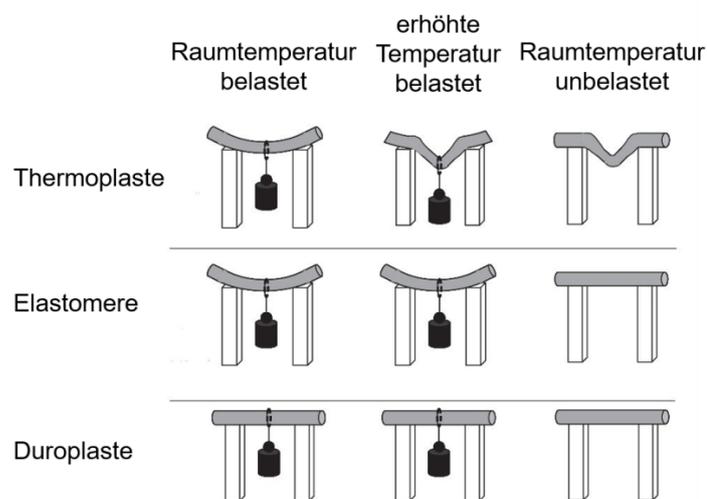


Abbildung 2: Prinzipielles Verhalten polymerer Werkstoffe auf variable Belastung und Temperatur (Eigene Darstellung basierend auf [14])

Aufgrund der charakteristischen Eigenschaften von Elastomeren sind diese prädestiniert für den Einsatz im Bauwesen im Allgemeinen und im Körperschallschutz im Speziellen. Deshalb wird im Weiteren nur auf die Herstellung und Charakteristika von Elastomeren eingegangen.

2.2 Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung von Elastomeren

Zur Herstellung technisch nutzbarer Elastomer-Erzeugnisse bedarf es der Zugabe einer komplexen Vielfalt an Mischkomponenten, wie beispielsweise Füllstoffe, Weichmacher und Treibmittel. Die Zusammensetzung der elastomeren Werkstoffe wird entsprechend der projektspezifischen Anforderungen für jede Anwendung individuell abgestimmt.

Die Addition von Diolen, wie Glykol, und Diisocyanate führt zu linearen Polyurethanen (Abbildung 4). Für die Herstellung von weitmaschig vernetzten Elastomeren werden Diisocyanate und zweiwertige Alkohole mit wenigen dreiwertigen Alkoholen benötigt. Die Eigenschaften von PUR können je nach Vernetzungsgrad und ausgewählten Ausgangskomponenten vielfältig variiert werden. [17, 21]

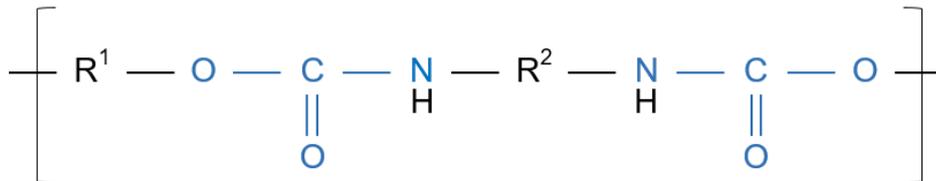


Abbildung 4: Urethan-Gruppe (blau) mit R¹ als Diol und R² als Diisocyanat (Eigene Darstellung basierend auf [22])

Für die Verarbeitung von PUR zu Endprodukten existieren verschiedenste formgebende Verfahren. Diese sind unter anderem Spritzgießen, Extrusion, Kalandrieren und Schäumen [5]. Da im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich PUR-Elastomere als Prüfkörper verwendet wurden, welche entweder durch den Prozess des Schäumens oder Spritzgießens hergestellt werden, wird lediglich auf diese zwei Arten der Verarbeitung näher eingegangen.

Gießen bzw. Spritzgießen

Beim Verfahren des Gießens bzw. Spritzgießens werden die flüssigen Reaktionskomponenten in einer Transportschnecke thermisch geschmolzen und anschließend unter Druck durch eine Düse in die Spritzform gepresst (Abbildung 5). Nach Erstarren werden die Fertigteile aus den Formen genommen und bei einer Temperatur von 90 – 110 °C für 10 bis 20 Stunden gelagert. Hierbei wird die Vernetzung vollendet. Insbesondere zur Massenproduktion eignet sich das Spritzgießverfahren. [21]

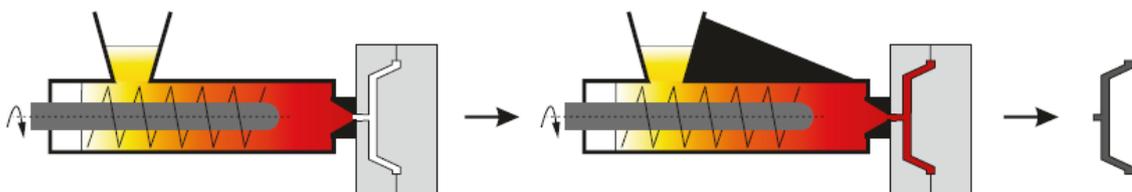


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Produktion von PUR im Spritzgießverfahren [21]

Schäumen

Das Aufschäumen von Polyurethan kommt durch die Zugabe von Wasser zustande. Dieses reagiert mit einem Teil des Isocyanat zu Carbamidsäure, welche wiederum unter Abspaltung von Kohlendioxid zu Amin zerfällt. Dieses reagiert mit einer weiteren Isocyanatgruppe zu einem Polyharnstoff. Daher führt die Freisetzung von Kohlendioxid nicht zu einem Abbruch der Polymerisation. Das abgespaltene Kohlendioxid schäumt die noch weiche Reaktionsmasse auf, wodurch sich der PUR-Schaum bildet (Abbildung 6). Das entstehende Raumgewicht des produzierenden PUR-Schaums kann durch die Menge an zugegebenen Wasser variiert werden. [23]

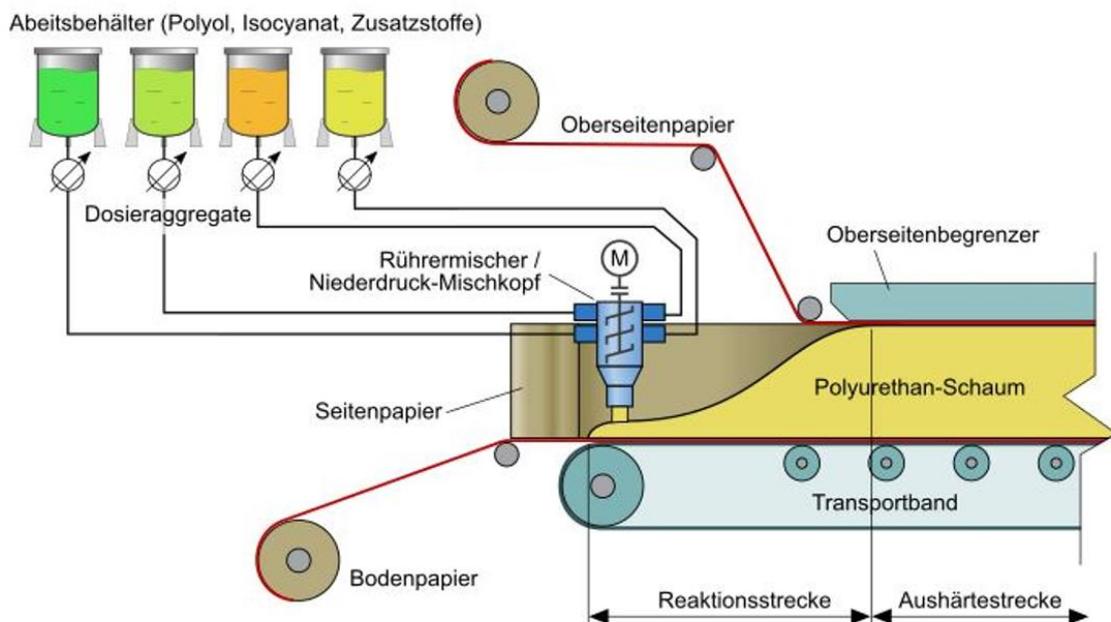


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Produktion von PUR-Schaum [23]

2.3 Rheologisches Verhalten von Elastomeren

Das rheologische Verhalten zahlreicher Materialien kann mit ideal elastischen und plastischen Körpern beziehungsweise idealen Flüssigkeiten im Belastungsbereich hinreichend genau angenähert werden. Beide ideale Modelle beschreiben ein theoretisches Konzept, das bestimmte ideale Eigenschaften ausweist. Die ideale Flüssigkeit ist reibungsfrei, inkompressible, kontinuierlich und überträgt Impulse ohne Verluste. Dagegen weist der ideale elastische Körper Eigenschaften wie Elastizität, Linearität und Reversibilität auf. Ein idealer plastischer Körper zeigt bei Spannung unterhalb der Fließgrenze keine Deformationen auf und verformt sich bei Überschreitung irreversibel. Die Reaktion

vieler Werkstoffs auf mechanische Belastungen lassen sich hieraus direkt ableiten. Definitionsgemäß folgen ideal elastische Körper dem Hooke'schen Gesetz und zeigen einen proportionalen Zusammenhang zwischen einwirkenden Kräften und Verformung beziehungsweise zwischen Spannungen und Dehnung. Beispielhaft hierfür ist das Verhalten von Stahl, der sich bei Zugbeanspruchung innerhalb der Streckgrenze unmittelbar ausdehnt und bei Entlastung reversibel rückverformt. Dieses Werkstoffverhalten wird in der Rheologie als Feder dargestellt. Flüssigkeiten reagieren im Gegensatz dazu auf einwirkende Lasten verzögert, da eine Scherung zwischen den Schichten entsteht. Dieser Widerstand gegen Scherung, ausgelöst durch intermolekulare Kräfte, wird als Viskosität definiert und weist bei idealen Flüssigkeiten (Newtonsche Flüssigkeit) einen konstanten Wert auf. Dieses Werkstoffverhalten wird in der Rheologie mit einem Dämpfersymbol abgebildet. Plastische Verformungen bleiben nach der Entlastung bestehen. Welche wiederum mit dem Reibungsklotz (St.-Venant-Element) in der Rheologie dargestellt werden. [17, 24, 25]

Elastomere weichen in ihrem rheologischen Verhalten im Gebrauchsbereich wesentlich von dem einer idealen Flüssigkeit oder eines ideal elastischen Körpers ab. Das Verhalten liegt zwischen den beiden rein idealen Modellen. Bei niedrigen Temperaturen oder sehr schneller Belastung zeigen Elastomere ein elastisches Verhalten, bei hohen Temperaturen und langsamer Belastung hingegen verhalten sie sich viskos. Dieses Verhalten wird als Viskoelastizität bezeichnet. Signifikant hierfür ist eine Kombination aus elastischem (reversiblem) und plastischem (irreversiblen) Verhalten. Zur Veranschaulichung des Werkstoffverhaltens ist die Betrachtung der Reaktion der Makromolekülketten auf eine variable Lasteinwirkung hilfreich. Dabei erfolgt durch steigende Belastung zunächst eine reversible Ausrichtung der im unbelasteten Zustand verknäulten Ketten entlang der aufgetragenen Kraft. Diese kann bis zu einer werkstoffabhängigen Maximallast von den Ketten reversibel aufgenommen werden. Bei weiterem Lastanstieg folgt die Streckung beziehungsweise Stauchung der vernetzten Ketten. Dieser Vorgang führt zu Reibungsverlusten infolge der Scherung aneinander abgleitender Makromoleküle und bewirkt damit plastische, irreversible Verformungen. [14]

Grundlegend wirken bei Elastomeren innere Kräfte den äußeren, deformierenden Belastungen entgegen. Abhängig von der Belastung treten diverse Deformationsmechanismen auf, die in Abbildung 7 dargestellt sind. Liegen die einwirkenden Kräfte im Bereich des elastischen Verhaltens, verfügen Elastomere bei Entlastung über die Fähigkeit zur reversiblen Rückverformung in den Ausgangszustand. [26] Dabei handelt es sich um

2 Grundlagen der Elastomere

eine rein energieelastische Deformation, die vom Elastizitätsmodul des Elastomers abhängt [17]. Die werkstoffspezifischen Werte dieses Moduls werden anhand der jeweiligen Einsenkung bei unterschiedlichen Belastungen bestimmt. Hierbei existiert kein linearer Zusammenhang zwischen Belastung und Einsenkung beziehungsweise Spannung und Verformung, wodurch kein konstanter Elastizitätsmodul angenommen werden kann. [27].

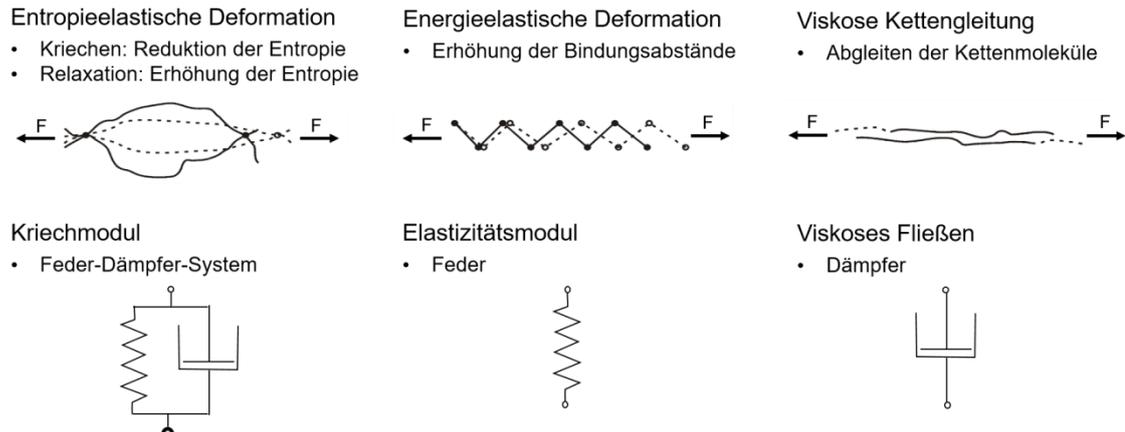


Abbildung 7: Verschiedene Deformationsmechanismen (oben) und deren zugehörig rheologischen Darstellungen (unten) (Eigene Darstellung basierend auf [17])

Das hohe Maß an möglicher elastischer Verformung beruht auf der räumlich weitmaschigen Vernetzung und der starken Verknäulung der Makromolekülketten. Die weite Maschung ermöglicht eine gewisse Beweglichkeit, die von den wenigen Vernetzungsstellen eingeschränkt wird. Trotz der geringen Vernetzungsdichte können große Rückstellkräfte mobilisiert und somit hohe Verformungswiderstände erreicht werden. Erst bei großer Krafteinwirkung werden plastische Verformungen erreicht. [14] Somit bewirken große Deformationen die Überschreitung der maximal elastisch mobilisierbaren Rückstellkräfte, wodurch viskoses Fließen eintritt. Dabei gleiten die gestreckten Makromolekülketten aneinander ab. Die viskosen Deformationsanteile sind irreversibel und bleiben nach der Entlastung bestehen. [6]

Zudem besitzen Elastomere eine geringe Neigung zum Kriechen [2]. Diese wird als entropieelastische Deformation bezeichnet und deren Ausmaß hängt hauptsächlich von der Belastungsdauer ab. Der Kriechmodul wird als zeitabhängige Verformung unter konstanter Druckbelastung definiert. Abbildung 8 verdeutlicht das auftretende viskoelastische Werkstoffverhalten. Die zunächst rein elastische Verformung geht beim Strecken der Makromolekülketten mit zunehmender Belastungsdauer kontinuierlich in eine plastische

Fließverformung über. Dies geht schließlich in ein viskoses Fließen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit über. Unmittelbar bei Entlastung geht der komplette, elastische Deformationsanteil zurück. Wohingegen die Relaxationszeit der plastischen Verformung erheblich von der Temperatur beeinflusst wird. Je geringer die Temperatur, desto länger dauert die Kriecherholung an. [14] Der irreversible Teil der Verformung wird als Druckverformungsrest bezeichnet [6].

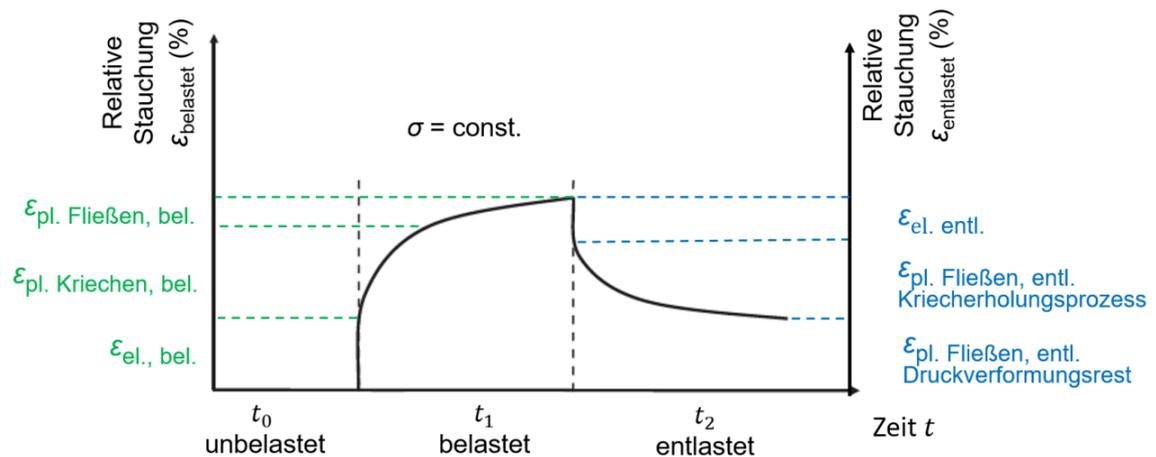


Abbildung 8: Exemplarisches Verhalten polymerer Werkstoffe bei Be- und Entlastung (Eigene Darstellung basierend auf [14])

In Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit nimmt der Elastizitätsmodul bei belastungsinduziertem Kriechen beziehungsweise Fließen ab. Rheologisch veranschaulicht wird das viskoelastische Werkstoffverhalten mit einem Feder-Dämpfer-System. [17] Dieselbe rheologische Anordnung findet sich beispielsweise ebenfalls bei Stoßdämpfern von Automobilen wieder.

Das Verhalten unter Belastung ist stark vom Werkstoff abhängig. So ist beispielsweise Vollgummi ein inkompressibler Werkstoff. Er weist damit eine Querdehnzahl von $\mu = 0,5$ auf. Dies bedeutet, dass sich Prüfkörper aus diesem Werkstoff volumengleich verformen. [28, 29] Bei anderen elastomeren Werkstoffen wie PUR sinkt die Querdehnzahl mit steigendem Luftporenanteil. Da hier der Werkstoff volumenkompressibel ist, nimmt die Querdehnung ab. Abbildung 9 zeigt die Verformung eines Prüfkörpers unter quasi-statischer Druckbelastung.

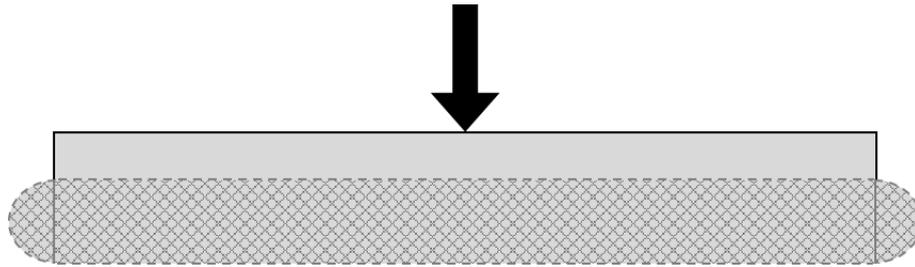


Abbildung 9: Verformung eines Elastomers unter Druckbelastung (Eigene Darstellung basierend auf [18])

Die Prüfergebnisse hängen stark von den Abmessungen des Prüfkörpers ab, da das Verhältnis zwischen belasteter Fläche zur frei wölbenden Fläche entscheidend ist. Dieses Verhältnis wird mit dem Formfaktor S beschrieben. Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis der Grundfläche – der gedrückten und unverformten Lagerfläche – zur frei verformbaren Mantelfläche und berechnet sich bei einer rechteckigen Grundfläche wie folgt [19]:

$$S = \frac{L \cdot B}{2h \cdot (L + B)} \quad (2-1)$$

Abbildung 10 verdeutlicht obenstehende Formel anhand einer bildlichen Darstellung eines Quaders. Ein Prüfkörper mit Abmessungen von 300 mm x 300 mm x 25,0 mm und ein Weiterer mit 150 mm x 150 mm x 12,5 mm erzielen jeweils einen Formfaktor von 2. Somit sind bei gleichem Formfaktor unterschiedliche Abmessungen der Prüfkörper möglich.

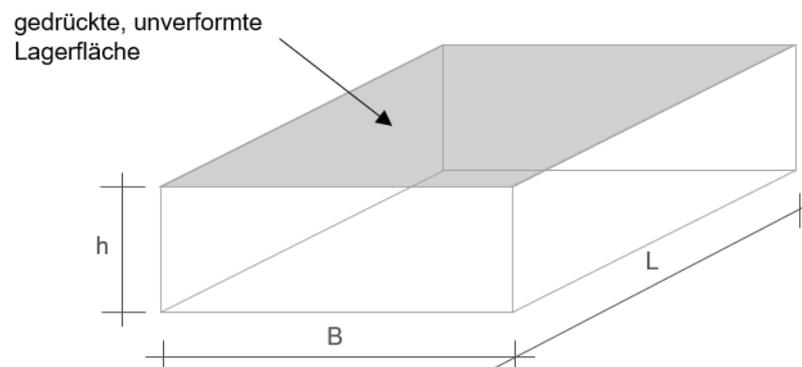


Abbildung 10: Bildliche Darstellung zu Formel (2-1) (Eigene Darstellung basierend auf [30])

Der Formfaktor kann einen starken Einfluss auf die vertikale und horizontale Steifigkeit und die damit verbundene Dämpfung haben. Der Einfluss auf die genannten Eigenschaften nimmt mit größer werdendem Formfaktor ab. [31]

2.4 Thermische Charakteristika

Grundsätzlich ist das Verformungsverhalten von Elastomeren unter Last stark temperaturabhängig [17]. Abbildung 11 zeigt die Molekülanordnung von Elastomeren im unbelasteten und belasteten Zustand. Zu Beginn liegen die Makromolekülketten infolge der Drehbarkeit um die Vernetzungsstellen in einer verknäulten, regellosen Anordnung vor. Diesen Zustand bezeichnet man als Entropie. Bei Lastaufbringung kommt es zu einer Ausrichtung beziehungsweise Streckung der Ketten. Als Folge der Streckung erhöht sich die Systementropie und Wärme wird an die Umgebung abgegeben. Nach der Entlastung streben Elastomere erneut einen Zustand größerer Unordnung an. Dieses Verhalten wird als Entropieelastizität bezeichnet. Ursächlich hierfür ist das Bestreben thermodynamischer Systeme einen Zustand maximaler Entropie zu erreichen. Bei der Entlastung wird Wärme aus der Umgebung absorbiert. Somit steigt bei äußerer Wärmezufuhr die Entropie im belasteten Zustand an. Das Zusammenziehen gestreckter Kautschuk-Makromolekülketten bei Erwärmung wird als Gough-Joule-Effekt beschrieben. [14] Die Besonderheit des Werkstoffverhaltens kann am Beispiel eines freihängenden Elastomerstreifens verdeutlicht werden. Während sich ein unbelasteter Streifen bei Erwärmung gemäß dem Ausdehnungskoeffizienten ausdehnt, ziehen sich belastete zusammen. Voraussetzung des Gough-Joule-Effekts bei Elastomeren ist die Dehnung vor der Wärmezufuhr. [6]

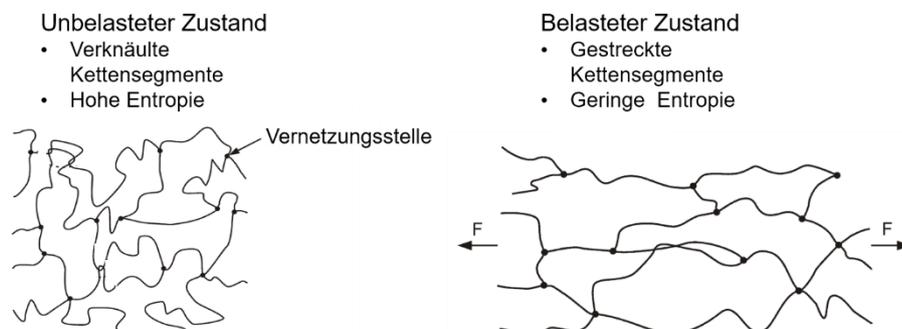


Abbildung 11: Molekülstruktur von Elastomeren im unbelasteten und belasteten Zustand (Eigene Darstellung basierend auf [32])

Abbildung 12 zeigt die temperaturabhängigen Zustände polymerer Werkstoffe, welche in die drei Bereiche energieelastisch, entropieelastisch und viskose Schmelze eingeteilt werden. Der Kälterichtwert T_R dient als Abgrenzungskriterium zwischen energieelastischem und entropieelastischem Bereich, der als Wendepunkt des Kurvenverlaufs definiert ist [14]. Dieser variiert je nach Werkstoff. Der in der Abbildung grau hervorgehobene

2 Grundlagen der Elastomere

Gebrauchstemperaturbereich von Elastomeren liegt je nach Mischungszusammensetzung näherungsweise bei - 40 °C bis + 100 °C. [2]

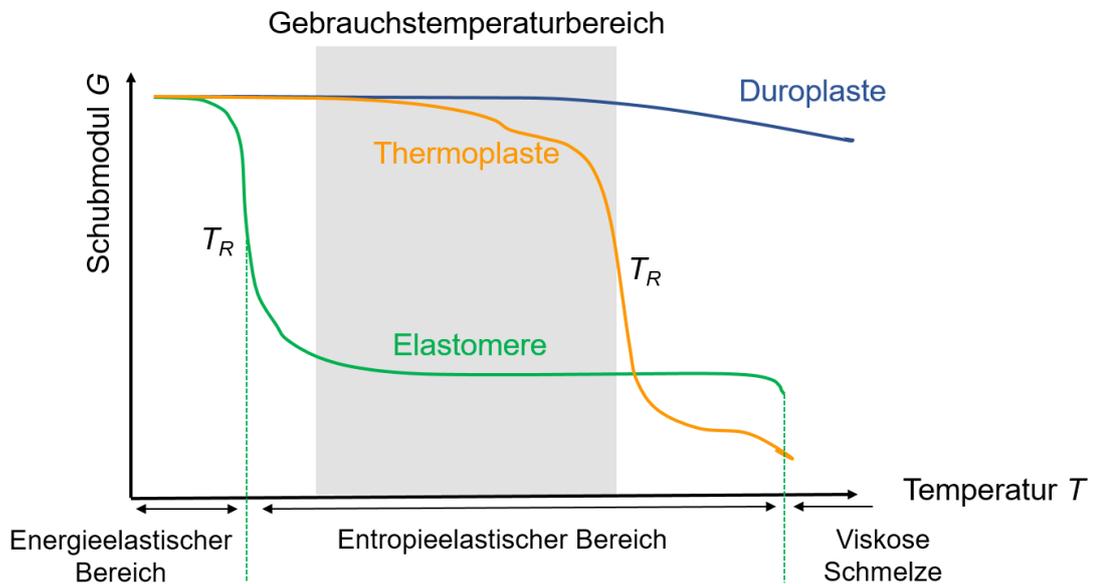


Abbildung 12: Qualitative Schubmodulkurven und Gebrauchstemperaturbereich polymerer Werkstoffe (Eigene Darstellung basierend auf [14])

Bei Temperaturen deutlich unterhalb von 0 °C liegen anfänglich alle Polymere im energieelastischen Zustand vor. Die Werkstoffbeschaffenheit wird als glasartig spröde bezeichnet. Folglich treten hohe Widerstandskräfte gegenüber mechanischer Verformung auf. [14] Allerdings besteht in diesem Zustand die akute Gefahr eines Sprödbruchs aufgrund von Biegung und Schlagbeanspruchung [27].

Die Werkstoffeigenschaften von Elastomeren ändern sich mit steigenden Temperaturen signifikant. Hierbei tauen die quasi-eingefrorenen, amorph angeordneten Ketten langsam auf, wodurch sich die einzelnen Ketten leichter gegeneinander verschieben beziehungsweise strecken lassen. Dementsprechend fällt im Übergangsbereich zwischen energie- und entropieelastischem Zustand der Schub- und Elastizitätsmodul stark ab. Elastomere weisen nach dem Übergang ein ausgeprägt viskoelastisches Verhalten auf, welches essenziell für die gummielastischen Eigenschaften und somit die praktische Nutzbarkeit ist. Bei Betrachtung des Schubmodulverlaufs fällt auf, dass die Kurve im entropieelastischen Bereich ein breites Plateau besitzt. Dieses ist besonders praxisrelevant, da es konstante Werkstoffeigenschaften über den kompletten Temperaturanwen-

dungsbereich ermöglicht. Mit Zugabe spezieller Weichmacher kann der Glasübergangsbereich hin zu tieferen Temperaturen verschoben werden. Somit kann eine Nutzung auch bei sehr tiefen Temperaturen realisiert werden. [14]

Bei kurzzeitiger Überhitzung treten keinerlei Schäden auf und die mechanischen Eigenschaften bleiben uneingeschränkt erhalten. Irreversible, strukturelle Schäden folgen lediglich bei langanhaltend thermischer Überbeanspruchung. Eine dauerhaft starke Erhitzung über den Gebrauchstemperaturbereich hinaus führt zu Zersetzung und Oxidation des Werkstoffs. Dabei gilt folgender Zusammenhang: Je höher die Temperatur, desto rascher die strukturelle Zersetzung. Diese wird als viskose Schmelze bezeichnet. [6, 27]

Um den dauerhaft wechselnden Belastungen Stand zu halten, müssen Elastomere eine ausreichend dynamische Belastbarkeit vorweisen. Hierbei lässt sich die Verformung in einen reversibel elastischen und einen irreversibel plastischen Anteil aufteilen. Letzterer verursacht eine durch Reibung induzierte Energieumwandlung in Wärme, die aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Elastomeren nur langsam abgegeben werden kann. Demnach erfolgt bei andauernder dynamischer Belastung eine Aufheizung des Elastomers. Abhängig von Dauer, Höhe, Geometrie und Werkstoffzusammensetzung des Elastomers kommt es entweder zu einem thermischen Gleichgewicht oder es setzt die sogenannte „Zermürbung“ ein, die den thermischen Abbau der Molekülketten beschreibt. [6, 14]

3 Wissenschaft und Stand der Praxis

Insbesondere im städtischen Bereich sind freie und verfügbare Flächen knapp und stellen eine wachsende Herausforderung dar. Die steigende Nachfrage nach Gebäuden und Verkehrsinfrastrukturen führt dazu, dass diese zunehmend dichter beieinanderliegen. Dies hat zur Folge, dass Lärm und Erschütterungen verstärkt auftreten und Maßnahmen zur Minimierung dieser Auswirkungen erforderlich sind. In diesem Zusammenhang können elastische Lagerungen eine wirksame Lösung bieten, um Emissionen und Erschütterungen zu reduzieren. Durch den Einsatz solcher elastischer Lagerungen wird es oft erst möglich, Gebäude und Verkehrsanlagen in solch beengten städtischen Umgebungen zu realisieren.

3.1 Grundlagen des Körperschalls

Körperschall bezieht sich auf Schallwellen, die sich durch feste Materialien wie Wände, Böden oder andere Objekte ausbreiten. Durch beispielsweise das Vorbeifahren von Zügen werden Schwingungen angeregt, die über den Oberbau in den Untergrund abgeleitet werden und sich im Boden ausbreiten. Von dort können die Schwingungen auf benachbarte Gebäude übertragen werden. Sie können von Menschen als spürbare Erschütterung wahrgenommen werden. Im Bereich des Eisenbahnwesens weisen diese einen Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 80 Hz auf. Zusätzlich können von den schwingenden Bauteilen, wie beispielsweise Wände oder Decken, auch Schwingungen in die umgebende Luft abgegeben werden. Diese bezeichnet man als sekundärer Luftschall und kann von Menschen in einen Frequenzbereich von 16 – 250 Hz hörbar wahrgenommen werden. Für alle Schwingungen eines Festkörpers, die sowohl als Erschütterungen als auch als sekundärer Luftschall wahrgenommen werden können, wird der Begriff Körperschall verwendet. [33] Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung von Erzeugung und Immission von Körperschall durch Schienenverkehr.

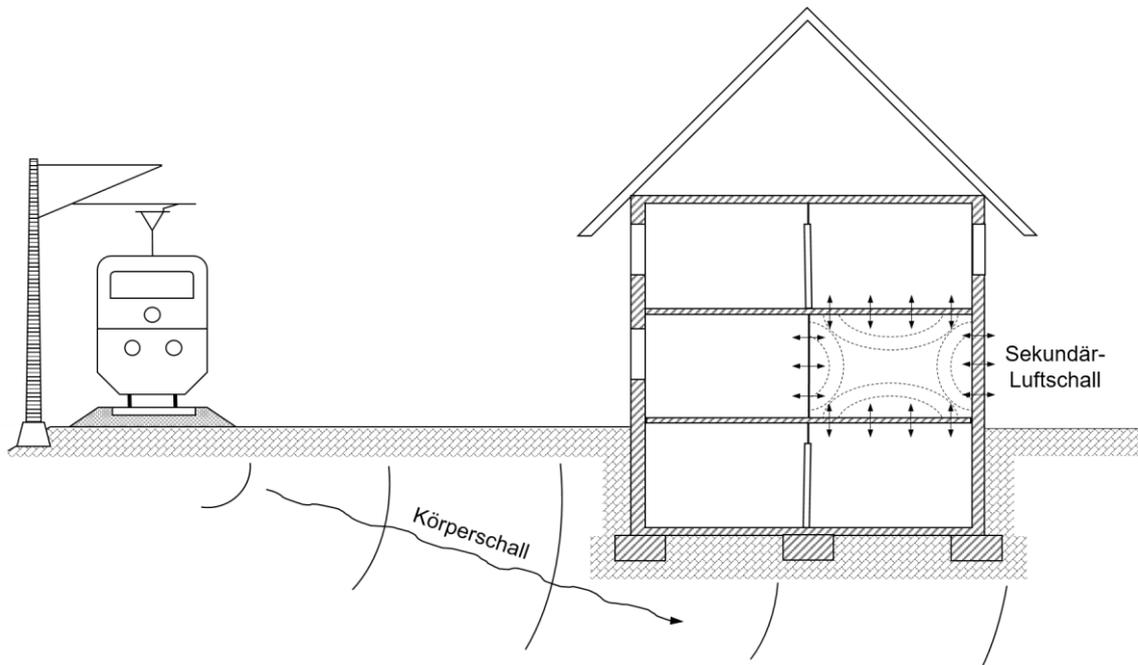


Abbildung 13: Schematische Darstellung von Körperschallerzeugung und -immission (Eigene Darstellung basierend auf [33])

Die wichtigste Kenngröße für die Betrachtung von Körperschall ist der Schwingschnellepegel. Die Berechnung des Schwingschnellepegels erfolgt anhand nachstehender Formel [34]:

$$L_v = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} \quad (3-1)$$

Der Schwingschnellepegel L_v wird zum einen für die quantitative Beschreibung des Körperschalls in schwingenden Gebäudeteilen verwendet. Zum anderen dient er auch der messtechnischen oder rechnerischen Wirksamkeitsermittlung von Schutzmaßnahmen. [33]

In Abbildung 14 ist ein beispielhafter Verlauf der effektiven Schwinggeschwindigkeiten über die Frequenz aufgetragen. Die Fläche unter der Kurve repräsentiert dabei den Energieeintrag in den Oberbau. [35] Daraus kann der folgende Zusammenhang hergestellt werden: Je höher die Schwinggeschwindigkeit, desto ausgeprägter die Körperschallanregung.

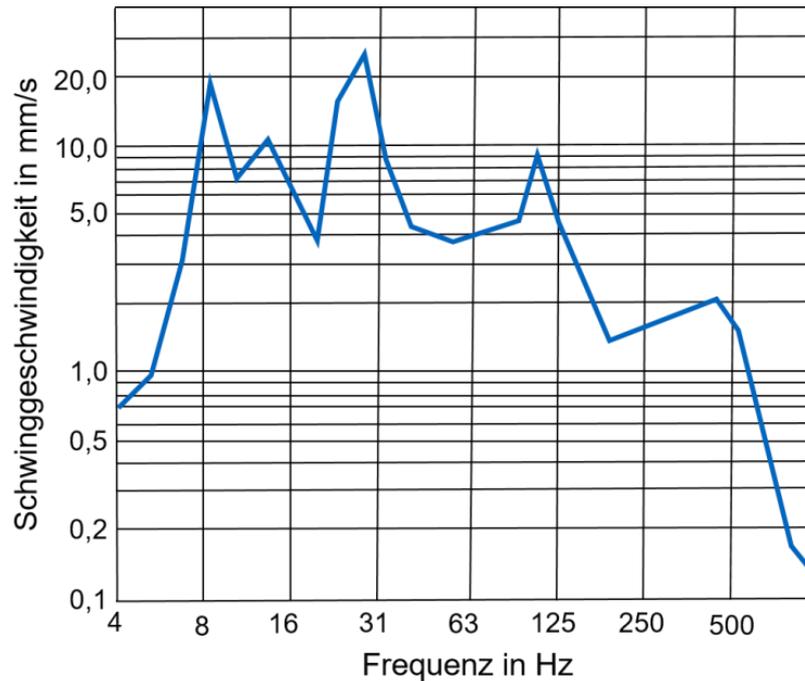


Abbildung 14: Terzspektrum der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten im Schotter bei Überfahrt eines ICE mit 250 km/h (Eigene Darstellung basierend auf [35])

3.1.1 Ursachen und Effekte der Körperschallanregung im Schienenverkehr

Der durch den Betrieb von Schienenverkehrsanlagen verursachter Körperschall wird in Form von Wellen über feste und flüssige Medien im Boden weitergeleitet [2]. Hierbei nehmen die Wellenamplituden wegen der Werkstoffdämpfung im Boden mit zunehmender Ausbreitungsentfernung ab [4]. Folglich sollte der Abstand zwischen Immissions- und Emissionsort möglichst maximiert werden. Dies stellt sich in der Realität, insbesondere in urbanen Räumen, als schwer umsetzbar dar. Deswegen ist dort der Einsatz elastischer Komponenten zur Schwingungsentkopplung unabdingbar. Infolge der Körperschalleinleitung in ein elastisches Bauteil ist über Dämpfung beziehungsweise Dämmung eine Abminderung der Schwinggeschwindigkeit in bestimmten Frequenzbereichen erreichbar. Während bei dämpfenden Medien die Amplitude infolge Dissipation verringert wird, reflektiert die Dämmung einen gewissen Anteil der eintretenden Schwingungsenergie vor der weiteren Ausbreitung. [4]

Bei einem frisch gewarteten Schienenfahrzeug, welches über ein kurz zuvor gestopft und geschliffenes Gleis fährt, entstehen nur geringe dynamische Zusatzkräfte und Erschütterungen. Jedoch treten in der Regel zwischen den Wartungsintervallen gewisse

Verschleißerscheinungen sowohl an Fahrzeug und Verkehrsweg auf, die direkten Einfluss auf den emittierten Körperschallpegel haben. [2] Zur genauen Ursachenfindung einer Erregerfrequenz ist eine differenzierte Betrachtung verschiedener Anregungsmechanismen notwendig. Ausgewählte Mechanismen werden nachfolgend beschrieben:

Rad- und Schienen-Imperfektionen

Durch Inhomogenitäten, Werkstoff- und Ausführungsfehler sowie Überbeanspruchung von Bauteilen können Verschleißerscheinungen am Fahrzeug und Oberbau entstehen. Diese ziehen, in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie der Fahrgeschwindigkeit, des Raddurchmessers und der Gleissteifigkeit, Körperschallanregungen mit einer entsprechenden Frequenz nach sich. Die beispielsweise durch eine Unwucht oder Exzentrizität hervorgerufene Rundlaufabweichung des Rades zwingt die Achse beziehungsweise das Drehgestell zu einer Auf- und Abbewegung pro Umdrehung. Im Falle eines ovalen Rades wird die Achse an dieser Seite zu zwei Hebungen und Senkungen je Radumdrehung angeregt. Dementsprechend verdoppelt sich die erzeugte Frequenz im Vergleich zu einem runden Rad. Für die Intensität der Anregung ist die unabgefederte Radsatzmasse, die direkt an die Schiene gekoppelt ist, entscheidend. Dabei gilt folgender Zusammenhang: Je größer die unabgefederte Radsatzmasse, desto höher die Emissionsintensität. Während bei Raddefekten die Emissionsquelle stetig entlang der Fahrstrecke auftritt, kommt es durch Inhomogenität im Untergrund oder Schienenfehler zu lokalen Anregungen. Mögliche Ursachen hierfür sind Schweißstöße, Übergangsbereiche im Untergrund und ungleichmäßige Setzungen. [2, 36]

Parametrische Anregungen

Wechselhafte Auflagerbedingungen von Schwellen führen zu ungleichmäßigen Elastizitäten [4]. Eine solche Inhomogenität erfordert zur Behebung meistens eine Bearbeitung des Gleises mit einer Gleisstopf- beziehungsweise Bettungsreinigungsmaschine. Kleine Störstellen hingegen lassen sich mit Einzelhandstopfungen beheben. [37]

Die erwähnten Mechanismen der Körperschallanregung führen zur dynamischen Anregung des Oberbaus mit einer bestimmten Frequenz, der sogenannten Erregerfrequenz.

3.1.2 Eigenfrequenz elastisch gelagerter Systeme

Prinzipiell ist eine Reduktion der Körperschallanregung anzustreben. Hinsichtlich der Effektivität zur Schallisolation liegt der Hauptfokus auf elastisch gelagerten Systemen. [4] Deren charakteristische Kenngröße repräsentiert die Eigenfrequenz. Diese wird als jene Frequenz definiert, mit der ein schwingungsfähiges System nach Anregung frei ausschwingt. Erfolgt die Anregung mit einer Erregerfrequenz nahe der Eigenfrequenz können durch auftretende Resonanzen starke Erschütterungen erzeugt werden. [2] Die theoretische Eigenfrequenz lässt sich mit folgender Formel berechnen [38]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-2)$$

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta z} \quad (3-3)$$

Die Steifigkeit k eines elastischen Elements ist gemäß Formel (3-3) als Steigung der Federkennlinie definiert. Für Werkstoffe mit nichtlinearen Federkennlinien zeigt die Formel (3-2) die Notwendigkeit der Definition eines gültigen Lastenbereichs. Dieser richtet sich nach dem Kraft-Einsenkungsverlauf des jeweiligen Elastomers. Das Frequenzverhältnis der Erregungsfrequenz zur Eigenfrequenz wird mit η bezeichnet. Für eine optimale Systemabstimmung ist eine konstante beziehungsweise sinkende Eigenfrequenz notwendig. Denn erst ab einem Frequenzverhältnis von $\eta > \sqrt{2}$ des schwingenden Systems wirken den Erregerkräften die Massenkräfte entgegen. Erst dann tritt eine Schwingungsisolierung auf. Je tiefer die Eigenfrequenz der Maßnahme abgestimmt werden kann, desto effektiver die Einfügungsdämmung. [2]

Die Formeln (3-2) und (3-3) zeigen für den Bereich des Eisenbahnbereiches, dass die Reduktion der Oberbau-Eigenfrequenz mit Erhöhung der Masse oder der Einfederung erreicht werden kann. Entsprechend bieten tief liegend angeordnete elastische Elemente die Möglichkeit zur Erhöhung der Oberbaumasse des schwingenden Systems [4]. Der Einsatz von weichen elastischen Elementen mit geringer Steifigkeit führt zu einer höheren Gesamteinfederung des Systems und folglich zu einer tieferen Abstimmfrequenz. Begrenzt wird die Einfederung durch die maximal zulässigen Schienenverformungen. Zusätzlich reagiert das Elastomer auf die bei der Zugüberfahrt maßgebende unabgefe-

derte Radsatzmasse mit einer dynamischen Versteifung. [2] Um eine Überbeanspruchung der elastischen Elemente zu vermeiden, sollte die Einfederung, die unter dem Lastfall "Verkehrslast" auftritt, höchstens das 1,5 bis 2,0-fache der Einfederung unter Eigengewicht z betragen [4].

3.2 Anwendungen im Bauwesen

Im Vergleich zu weiteren am Bau verwendeten Werkstoffen weisen Elastomere unübliche Werkstoffeigenschaften auf. In der Regel werden linearelastische Werkstoffe mit geringer Verformung wie Beton und Stahl genutzt. Diese Werkstoffe weisen einen hohen E-Modul auf, wodurch große Lasten nur geringe Verformungen bewirken. Im Gegensatz dazu besteht bei Elastomeren kein linearer Zusammenhang zwischen Spannungen und Verformungen und eine schadenfreie Aufnahme großer Verformungen möglich ist. Bei der Planung, Auslegung und Montage von Baustoffen ist mit besonderer Sorgfalt vorzugehen, um den grundlegenden Ansprüchen des Werkstoffs gerecht zu werden. So sind bei der Lagerbemessung nicht nur die primären Kräfte, wie Vertikalkräfte aus Eigengewicht und Auflasten sowie mögliche Horizontalkräfte beispielsweise aus Winddruck oder Bremskräften, sondern auch Widerstände wie Deformations- und Gleitwiderstand zu berücksichtigen. Diese lassen sich oftmals nicht exakt quantifizieren, wodurch eine verallgemeinerte Berücksichtigung in den Sicherheitsbeiwerten erforderlich ist. Zusätzlich erfordern Lager einen hochpräzisen Einbau, da Ausführungsmängel zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion und Beständigkeit führen können. [26]

3.2.1 Baulager

Aufgrund der Fähigkeit von Elastomeren Kräfte, Verschiebungen und Verdrehungen dauerhaft aufnehmen und schadenfrei ableiten zu können, sind sie in der Anwendung als Baulager unerlässlich. Eine Überbelastung der beteiligten Bauteile kann somit vermieden werden. Besonders anschaulich kann die Notwendigkeit von Baulagern am Beispiel eines Betonfertigteils gezeigt werden. Wird ein Fertigteil direkt ohne Lagerung auf ein bestehendes Bauteil aufgelegt, ist infolgedessen von wiederholter Anregung über äußere Einflüsse, wie Verkehrslasten, mit einer Schädigung durch Kantenabplatzungen zu rechnen. Die Überbeanspruchung der angrenzenden Bauteile kann durch die ausgeprägt elastische Eigenschaft von Elastomeren vermieden werden. Hierbei werden Quer-

und Spaltzugkräfte gleichmäßig in das Elastomer eingeleitet, sowie Lastspitzen abgeschwächt und über den Querschnitt verteilt. Hohe Quer- und Spaltzugkräfte, die hierbei auf das belastete Elastomer einwirken, müssen über entsprechende Bewehrung aufgenommen werden. [2]

3.2.2 Brückenlager

Bei Brückenbauten erfolgt die Übertragung der Last vom Überbau auf die Lager, von dort auf das Widerlager bzw. Pfeiler und abschließend in die Gründung. Das Lager nimmt hierbei eine zentrale Rolle durch die Aufnahme von Kippungen in Längs- und Querrichtung, Verschiebungen sowie Verdrehungen um alle drei Achsen ein. Hierfür besonders geeignet sind bewehrte und unbewehrte Elastomerlager, welche die einwirkenden Kräfte durch elastische Verformungen zwängungsfrei an das Widerlager bzw. Pfeiler übertragen. [39] In bewehrten Elastomerlagern sind Stahlbleche eingearbeitet, welche die Druckfestigkeit erhöhen und demzufolge die Kompressibilität herabsetzen. Zusätzlich werden dadurch die auf das Elastomer einwirkende Zugkräfte reduziert. Zur Gewährleistung der Wirksamkeit des Lagers müssen uneingeschränkte Verformungen zwischen den angrenzenden Bauteilen möglich sein. [26]

Das in Abbildung 15 links dargestellte Rollenlager ermöglicht große, zwängungsfreie Bewegungen zwischen Überbau und Widerlager bzw. Pfeiler [26]. Im Vergleich zu bewehrten Elastomerlagern können diese größere Bewegungen aufnehmen. Allerdings ist der Wartungsaufwand bei Rollenlager erheblich höher, da diese in direktem Kontakt mit äußeren Umwelteinflüssen stehen. [40] Hingegen stellt bei bewehrten Elastomeren die Überdeckung einen konstruktiven Korrosionsschutz dar. Mit einer Kombination aus Elastomerlager und zusätzlicher Gleitschicht kann die eingeschränkte Bewegungsfähigkeit verbessert werden (Abbildung 15 rechts). Hierbei werden größere Bewegungen infolge der gegeneinander abgleitenden Grenzflächen übertragen. [26]

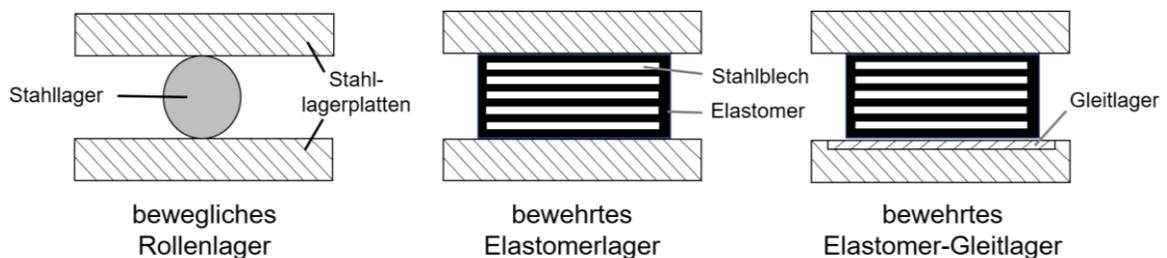


Abbildung 15: Konstruktive Ausführung verschiedener Brückenlagerungen (Eigene Darstellung basierend auf [26])

Eine möglichst planparallele Bauausführung der Bauwerksflächen ist essenziell, damit Verdrehungen, die auf exzentrischen Lasteinleitungen in das Lager beruhen, auszuschließen sind. [26] Zudem spielt die Haftreibung zwischen Bauwerk und Elastomerlager eine bedeutende Rolle, da diese für die Übertragung der Schubkräfte verantwortlich ist und sich somit entscheidend auf das Tragverhalten auswirkt. Bestimmt wird der maßgebende Reibungsbeiwert von verschiedenen Einflussgrößen. Diese sind zum einen die Oberflächenbeschaffenheit, die möglichst glatt und eben sein sollte, sodass keine punktuell hohen, durch Spitzen in der Textur verursachten Auflagerpressungen entstehen. Zum anderen gilt es die Gleitsicherheit bei kleiner Auflagerpressung durch Verankerungen sicherzustellen. Zudem stellen nicht schubfeste Werkstoffe beziehungsweise Stoffe an den Reibflächen eine Gefährdung dar. Diese verhindern die vollflächige Übertragung der Schubkräfte. Der Haftungsverlust kann neben einer mangelhaften Bauausführung auch von Weichmacher- und Ozonschutzwachsausbildungen an der Oberfläche des Elastomers verursacht werden. [26]

3.2.3 Eisenbahn-Oberbau

Im Eisenbahnwesen wirken bei Zugüberfahrten hohe dynamische Kräfte auf die Gleiskonstruktion. Neben der Lastabtragung durch die Oberbaukonstruktion in den darunterliegenden Untergrund sind Lärm- und Erschütterungsschutzmaßnahmen zur Emissionsminderung erforderlich.

Eine Einteilung der Oberbauformen kann grundlegend in zwei Bauarten erfolgen. Einerseits der klassische Schotteroberbau, bei dem die hohen Achslasten von der Schotterbettung aufgenommen werden und andererseits die schotterlose Feste Fahrbahn aus gebundenen und ungebundenen Tragschichten. Die Schotterbauweise ist die am häufigsten ausgeführte Oberbauform. Allerdings führen hohe dynamische Beanspruchungen, aufgrund hoher Fahrgeschwindigkeiten, zu einer räumlichen Umlagerung und starken Abnutzung der Schotterkörner. Dies führt zur Abnahme der Gleislagequalität durch die ungleichmäßige Setzung des Gleises. Um auch die bei höheren Fahrgeschwindigkeiten erforderliche höhere Lagegenauigkeit gewährleisten zu können, sind verkürzte Wartungsintervalle notwendig. Angesichts der dauerhaft stabilen Gleislage werden Feste Fahrbahn-Konstruktionen besonders im Hochgeschwindigkeitsbereich bevorzugt. [41, 42]

Die Schienen werden bei beiden Konstruktionen über ein Klemmsystem elastisch fixiert. Dies erfolgt im Schotteroberbau an den Schwellen und bei der Festen Fahrbahn an den

Stützpunkten. Die elastische Schieneneinfederung begünstigt die Reduktion der Oberbauanregung. [42] Grundsätzlich erfolgt die Schwingungsanregung des Oberbaus durch den Abrollvorgang des Rades auf der Schiene [4]. In Form von Luft- oder Körperschall werden die dadurch verursachten Einwirkungen in angrenzende Gebäude übertragen. Beim oberirdischen Schienenverkehr breitet sich der Schall von der Quelle hauptsächlich als Primärluftschall aus. Hierbei entstehen Unter- beziehungsweise Überdrucke, die dem atmosphärischen Druck überlagert sind. Es gilt folgender Zusammenhang: Je größer die Luftdruckschwankung, desto lauter das Geräusch und höher die Schallintensität. Wohingegen bei unterirdischen Verkehrswegen Schwingungen in Form von Körperschall über feste und flüssige Medien übertragen werden. Daraus resultiert eine Anregung von schwingungsfähigen Systemen über entsprechende Strukturen im Boden. [2, 4]

Effektive und wirtschaftliche Emissionspegelminderungen können mit Hilfe von technischen Maßnahmen am Oberbau erzielt werden [4]. Ausgewählte Maßnahmen des Körperschallschutzes mit elastischen Elementen werden nachfolgend beschrieben:

Elastische Schwellenbesohlung

Auf die Unterseite von Betonschwellen kann bei der Fertigung eine Sohle aus polymeren Werkstoffen aufgebracht werden (Abbildung 16). Diese vergrößert die Auflagefläche der Schwelle auf den Schottersteinen aufgrund ihrer elastischen Eigenschaften. Entsprechend folgt eine bessere Verzahnung zwischen Schotter und Schwelle, welche den Querverschiebewiderstand der Schwelle erhöht und somit die Lagestabilität optimiert. Darüber hinaus werden die Schottersteine aufgrund der größeren Auflagerfläche geschont und Beschädigungen an der Betonschwelle durch reduzierte Punktlasten vermieden. Zum Einsatz kommen Schwellenbesohlungen vor allem bei Hochgeschwindigkeitsstrecken und auf Strecken mit hohen Achslasten. Da die Montage bereits in den Schwellenwerken erfolgt, sind auf der Baustelle keine weiteren Arbeiten außer dem Einbau erforderlich. [41, 43]



Abbildung 16: Schwellenbesohlung einer Betonschwelle [44]

Die Schwellenbesohlung kann zur Minderung von Körperschallemissionen verwendet werden. So zeigen Schwellenbesohlungen eine hohe Wirksamkeit zur Reduzierung des Sekundärluftschalls. [4, 44]

Für die Darstellung der Wirkung der Schutzmaßnahme wird im Weiteren das frequenzabhängige Einfügungsdämm-Maß ΔL_e verwendet. Dieses ergibt sich aus der Differenz der Körperschall-Terz-Schnellespektren mit und ohne Minderungsmaßnahme. Negative Einfügungsdämmung bedeutet, dass der Pegel verstärkt wird, wohingegen positive Werte sich reduzierend auswirken. [33]

Die in Abbildung 17 aufgetragene Einfügungsdämmung stellt ein Beispiel für die Verwendung von Schwellenbesohlung dar. Die eingezeichneten Erschütterung- und Sekundärluftschallbereich sind exemplarisch und sind von vielen Faktoren wie beispielsweise dem Gebäude abhängig.

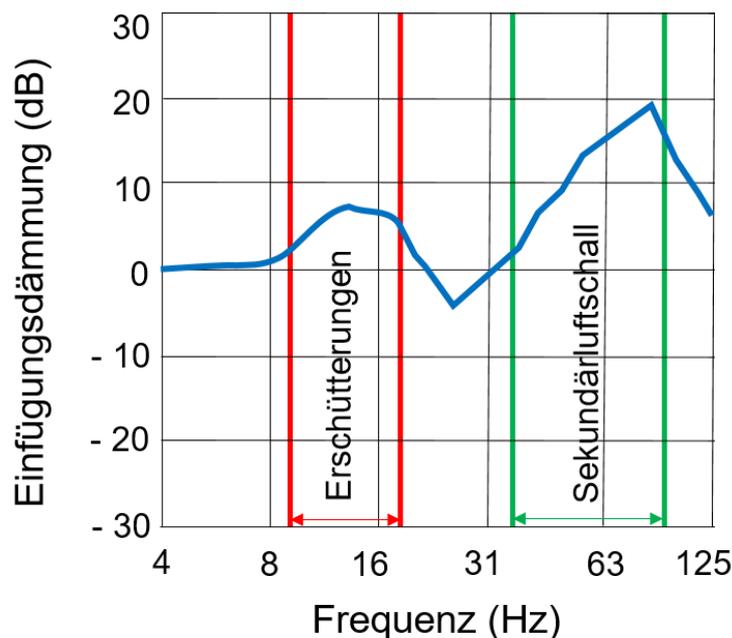


Abbildung 17: Beispielhafte Einfügungsdämmung einer Schwellenbesohlung (Eigene Darstellung basierend auf [33])

Unterschottermatte (USM)

Die USM wird baulich als elastische Schicht zwischen Unterbau und Schotter angeordnet (Abbildung 18). Aufgrund der baulich tiefliegenden Anordnung und der somit hohen Auflast aus Schotter und Fahrbahnkonstruktion bildet sich ein elastisches System aus. [4] Vorteile bei der Anwendung ergeben sich aus einer einfachen Verlegung und

Befahrbarkeit mit schwerem Gerät sowie der Eignung zur Nachrüstung auf Bestandsstrecken. [43] Somit sind auch nachträgliche Reduktionen des Sekundärluftschalls und geringere Schotterbeanspruchungen realisierbar [2].



Abbildung 18: Schematischer Aufbau eines Gleisbetts mit eingebrachter USM [45]

USM gewährleisten eine nahezu konstante Eigenfrequenz über einen breiten Lastenbereich. Je nach verwendetem Werkstoff können zunächst hohe Einfederungen durch das Systemgewicht erzielt werden. [2] Darüber hinaus aktivieren Verkehrslasten eine breitere Auflagefläche des Systems. Abbildung 19 zeigt die exemplarische Einfügungsdämmung einer USM über die Frequenz der Erregungsschwingung aufgetragen. Im dargestellten Beispiel findet die Einfügungsdämmung ab einer Frequenz von $f_0 \cdot \sqrt{2} = 32$ Hz statt. Unterhalb der Nulllinie werden die Pegel verstärkt und oberhalb reduziert. [33]

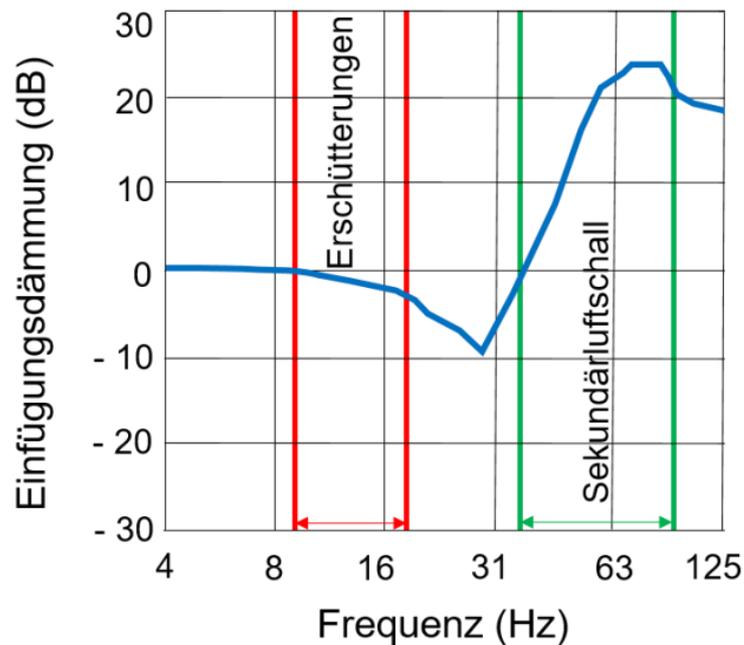


Abbildung 19: Beispielhafte Einfügungsdämmung einer USM (Eigene Darstellung basierend auf [33])

Masse-Feder-System (MFS)

Beim MFS wird der gesamte Oberbau über Federelemente, die als Einzel-, Streifen- oder Flächenlager angeordnet sind, elastisch gelagert (Abbildung 20). Somit kann eine hoch-effiziente Schwingungsisolierung realisiert werden. Diese ist in der baulichen Ausführung mit hohem Aufwand verbunden, bietet jedoch in der Anwendung hochwirksamen Schutz vor Erschütterungen und Sekundärluftschall. Eine Verringerung der Eigenfrequenz des MFS lässt sich durch die Erhöhung der Masse, die beispielsweise durch eine Vergrößerung der Bauhöhe des Oberbaus erfolgt, erzielen. Diese ist notwendig, um unterhalb der zu isolierenden Anregungsfrequenz von $f_0 \cdot \sqrt{2}$ von naheliegenden Gebäuden mit Holzdecken und Stahlträgerdecken zu bleiben. Hierfür sind bei jeder Baumaßnahme die Randbedingungen zu prüfen und daraus resultierende individuelle Systemdimensionierungen festzulegen. Die Einzelfalllösungen richten sich nach Randbedingungen, wie dem Übertragungsweg, dem Abstand der umliegenden Bebauung, der Eigenfrequenz im Immissionssystem sowie den Fahrzeug- und Trassierungsparametern. Beispielsweise eignet sich die Ausführung als Einzel-Fertigteiltröge, aufgrund der Annäherung der Anregung durch die Achsfolge an die Eigenfrequenz mit steigender Geschwindigkeit, lediglich bei geringen Geschwindigkeiten (< 80 km/h). Folglich sind für höhere Radsatzkräfte und Geschwindigkeiten lange biegesteife Tragplatten (> 8 m) notwendig. [4]



Abbildung 20: Aufbau eines Flächenlagers (links), Streifenlagers (mittig) und Einzellagers (rechts) [46]

Abbildung 21 verbildlicht die Funktionsweise eines MFS. Die Masse aus Betonplatte und Gleistragplatte schwingt über einem, an den Untergrund gekoppelten, Feder-Dämpfer-Element. Während die Feder ein elastisches Element repräsentiert, steht der parallel geschaltete Dämpfer stellvertretend für die Werkstoffdämpfung. [2] Die Überfahrt eines Zugs bewirkt eine dynamische Erregung der Masse, welcher die Dämpfungskraft der Feder entgegen steht [47].

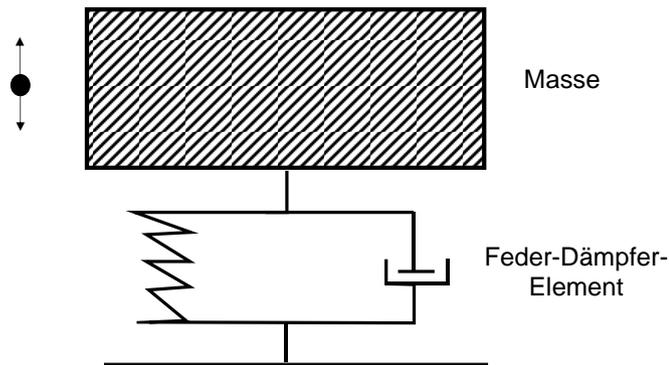


Abbildung 21: Vereinfachtes Ein-Massen-Schwinger-Modell eines MFS (Eigene Darstellung basierend auf [4])

Für die Abschätzung der Eigenfrequenz des MFS wird lediglich die vertikale Translationsbewegung betrachtet, wofür ein 1-D-Modell ausreicht. Durch eine Vereinfachung der Formel (3-2) lässt sich die Eigenfrequenz wie folgt bestimmen:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \approx \frac{5}{\sqrt{z}} \quad (3-4)$$

Dabei wird die Einstellung der Eigenfrequenz über die Parameter Masse m und Federsteifigkeit k bestimmt. Daraus resultiert, dass je höher die schwingende Masse beziehungsweise je geringer die Federziffer gewählt wird, desto höher ist die Einsenkung z und umso niedriger ist die Eigenfrequenz. Durch die tieffrequente Systemausbildung können sowohl Erschütterungen als auch Sekundärluftschall effektiv isoliert werden. [4] Das zur Veranschaulichung in Abbildung 22 abgebildete MFS besitzt eine Eigenfrequenz von $f_0 = 8$ Hz. Die Isolierwirkung setzt ab $f_0 \cdot \sqrt{2} = 11,3$ Hz ein [2]. Bei Gebäuden mit niederfrequent schwingenden Bauelementen ist jedoch eine Reduktion der Systemfrequenz auf 5 - 7 Hz erforderlich, da es ansonsten zu einer resonanten Erschütterungsanregung kommen könnte. Eine tieffrequente Systemabstimmung kann hauptsächlich mit einer hohen Masse erreicht werden. Allerdings steigen dadurch die Bauhöhe und die Baukosten deutlich an. [4]

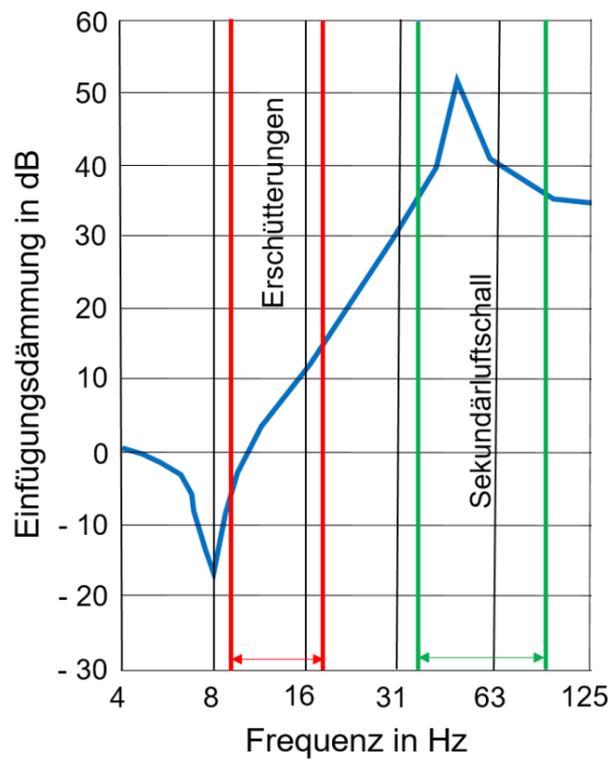


Abbildung 22: Beispielhafte Einfügungsdämmung eines MFS (Eigene Darstellung basierend auf [48, 33])

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden elastische Elemente, die Bestandteile von Schwellenbesohlungen, USM und MFS sind, prüftechnisch untersucht. Dies erfolgt werkstoff- und nicht anwendungsbezogen.

4 Prüfparameter

Werkstoffe können auf viele verschiedene Eigenschaften geprüft werden. Grundsätzlich wird hierbei zwischen den mechanischen und den werkstoffspezifischen Eigenschaften unterschieden. Letztere beziehen sich auf das Verhalten des Werkstoffs unter äußeren Einflüssen. Diese sind beispielsweise Temperatur, Wasser oder chemische Stoffe. Bei den meisten dieser Prüfungen wird der Prüfkörper zerstört oder weist danach veränderte Werkstoffeigenschaften auf. Bei den Prüfungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften wird das Verhalten des Prüfkörpers auf statische und dynamische Beanspruchungen untersucht. Hierbei hat die Dimensionierung des Prüfkörpers maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse.

4.1 Prüfverfahren

Der wichtigste Indikator für die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren ist die Steifigkeit bzw. der Bettungsmodul.

4.1.1 Ermittlung der statischen Kennwerte

Die Steifigkeit eines Körpers gibt dessen Widerstand gegenüber einer durch äußere Belastung hervorgerufene Verformung an. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Belastung und der elastischen Verformung eines Körpers. Viele verschiedene Faktoren, darunter die Temperatur, der Werkstoff und auch die Geometrie, haben Einfluss auf die Steifigkeit. Es können verschiedene Steifigkeiten wie Biegesteifigkeit oder Dehnsteifigkeit eines Prüfkörpers bestimmt werden. In diesem Fall wird die Ermittlung einer Federkonstante durchgeführt. Diese bezieht sich auf die absolute Längenänderung Δd unter einem bestimmten Kraftbereich ΔF und wird auch als Sekantensteifigkeit bezeichnet. [49, 50] Die Federsteifigkeit wird als Steigung der Federkennlinie abgelesen. Hat die Federkennlinie einen linearen Verlauf so ist die Federsteifigkeit konstant. Abbildung 23 zeigt eine exemplarische Federkennlinie und die Ermittlung der Sekantensteifigkeit.

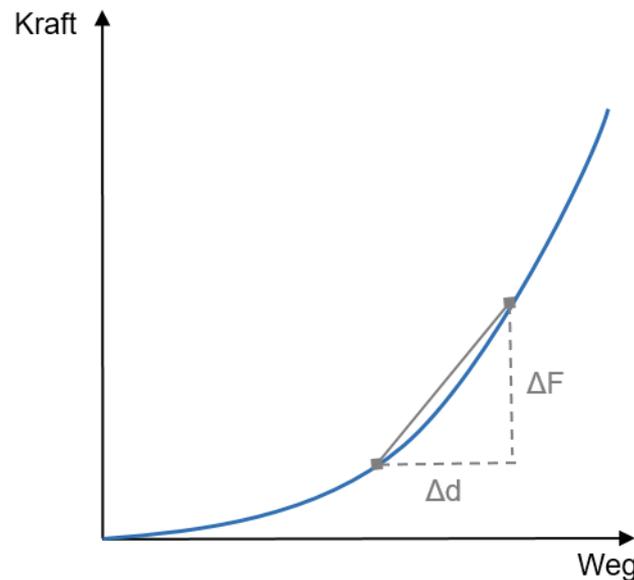


Abbildung 23: Sekantensteifigkeit

Das Prüfverfahren zur Ermittlung der statischen Steifigkeiten (k_{stat}) und den daraus resultierenden statischen Bettungsmoduln (C_{stat}) für Elastomere wird mitunter in der DIN EN 17282:2020 sowie DIN EN 17682:2023 beschrieben. Hierbei wird eine Kraft senkrecht auf den Prüfkörper aufgebracht und dessen Einsenkung gemessen. Dieses Prüfverfahren dient zur Evaluation der statischen Einfederung unter Betriebsbelastung. [10, 11]

Für eine homogene Lastaufbringung bei den quasi-statischen Versuchen, wurde zu Beginn die Standardbe- und entlastungsgeschwindigkeit auf $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$ festgelegt. Diese entspricht auch der vorgegebenen Prüfgeschwindigkeit gemäß den Normen DIN EN 17282:2020 sowie DIN EN 17682:2023. Für das statische Prüfverfahren wurden drei kraftgesteuerte Lastzyklen angesetzt. Diese bestehen aus je einer Belastung bis zur maximalen Prüflast F_{max} und anschließender Entlastung bis F_{min} ohne Pause zwischen den jeweiligen Lastzyklen. Die Auswertung erfolgt am dritten Belastungszyklus. Die Datenerfassung erfolgt mit einer Messrate von 10 Hz. Im Anschluss erfolgt eine einminütige Haltepause bei F_{min} nach der die Prüfung zur Ermittlung des dynamischen Bettungsmoduls erfolgte.

Mittels der Datenauswertung können die statischen Steifigkeiten (k_{stat}) sowie die daraus abgeleiteten statischen Bettungsmoduln (C_{stat}) berechnet werden. Dies erfolgt basierend auf den nachfolgenden Gleichungen [11]:

$$k_{\text{stat}} = \frac{F_1 - F_{\text{min}}}{d_1 - d_{\text{min}}} = \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (4-1)$$

$$C_{\text{stat}} = \frac{k_{\text{stat}}}{A} \quad (4-2)$$

4.1.2 Ermittlung der niederfrequenten dynamischen Kennwerte

Bei einer Zugüberfahrt verformen sich die Schienen entsprechend der resultierenden Biegeelastizität von Schiene, Schwelle und Unterlage. Anhand des frequenzabhängigen Kennwerts $C_{\text{NF,dyn}}$ kann die niederfrequente Biegeverformung der Schiene unter der bewegten Achslast approximiert werden. [51] Die Methodik zur Bestimmung der frequenzabhängigen, niederfrequenten dynamischen Steifigkeiten ($k_{\text{NF,dyn}}$) und der hieraus abgeleiteten niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln ($C_{\text{NF,dyn}}$) orientiert sich an der DIN EN 17282:2020 sowie DIN EN 17682:2023.

Eine zyklische Kraft wird über einen Prüfzylinder senkrecht zum Prüfkörper bei der festgelegten Frequenz aufgebracht. Die Belastung erfolgt durch eine harmonische, sinusförmige Lasteinleitung zwischen der minimalen Prüflast (F_{min}) und der maximalen Prüflast (F_1), die der oberen Auswertlast des statischen Bettungsmoduls entspricht. Für die Vergleichbarkeit zwischen den statischen und dynamischen Bettungsmoduln sind die Auswertelasten für beide Bestimmungen identisch. Dies ist für die in Kapitel 4.1.3 erklärte niederfrequente dynamische Versteifung notwendig. Für die Datenaufzeichnung der dynamischen Prüfung wird eine mindestens 20-fache Messfrequenz zur Prüffrequenz gewählt. Zu Beginn des ebenfalls kraftgesteuerten Prüfverfahrens ist eine Einschwingzeit von 10 s vorgesehen. Diese ist notwendig, um den Prüfkörper vor der Messwertaufnahme möglichst homogen zu belasten. Dadurch werden, gemäß Kapitel 2.4, die Makromolekülketten gestreckt, sodass alle Verbindungen die Belastungen mittragen. Die Einschwingzeit stellt zusätzlich sicher, dass die Prüfmaschine eine harmonische Schwingung zwischen den gewünschten Kraftpegeln ansteuert. Anschließend wird die Datenerfassung über zehn vollständige Schwingungszyklen durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der frequenzabhängigen Aufnahmedauer und Zyklenerfassung

f in Hz	Messdauer in s	Messstart (Zyklusnummern)
5	2	51–60
10	1	101–110
20	0,5	201–210

Mittels der Datenauswertung können die niederfrequenten dynamischen Steifigkeiten (k_{dyn}) und die niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln (C_{dyn}) ermittelt werden. Diese können anhand der folgenden Gleichungen berechnet werden [11]:

$$k_{\text{dyn}} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} \frac{F_1 - F_{\text{min}}}{d_1 - d_{\text{min}}} \quad (4-3)$$

$$C_{\text{dyn}} = \frac{k_{\text{dyn}}}{A} \quad (4-4)$$

Grundsätzlich muss zwischen einer statischen und einer dynamischen Belastung unterschieden werden. Für die Berechnung des statischen sowie dynamischen Belastungsbereichs wurden die folgenden Festlegungen getroffen:

- Statische Maximalbelastung: maximal zulässige Druckspannungsbeanspruchung gemäß Datenblatt des Herstellers
- Statische Minimalbelastung: 0,01 N/mm²
- Statische obere Auswertelast/Dynamische Maximalbelastung: 80 % der statischen Maximalbelastung
- Dynamische Minimalbelastung: 0,01 N/mm²

4.1.3 Niederfrequente dynamische Versteifung

Die Kenngröße der niederfrequenten dynamischen Versteifung $\kappa_{\text{NF,dyn}}(10 \text{ Hz})$ wird herangezogen, um die Funktionsweise elastischer Werkstoffe bei dynamischer Beanspruchung beurteilen zu können [2]. Die Berechnung der Kenngröße ist nur zweckmäßig, wenn sowohl $C_{(\text{NF,dyn})}(10 \text{ Hz})$ als auch C_{stat} am selben Prüfkörper geprüft werden und die

Auswertung im identischen Kraftbereich erfolgt. Die niederfrequente dynamische Versteifung wird wie folgt bestimmt [51]:

$$\kappa_{\text{NF,dyn}}(10 \text{ Hz}) = \frac{C_{\text{NF,dyn}}(10 \text{ Hz})}{C_{\text{stat}}} \quad (4-5)$$

Ziel der Werkstoffhersteller ist es, die Werkstoffe dahingehend zu optimieren, dass dynamische und statische Steifigkeitswerte möglichst wenig voneinander abweichen [52]. Somit können gemäß Formel (3-2) eine niedrige Systemabstimmfrequenz sowie ein effektiver Erschütterungs- und Sekundärluftschallschutz gewährleistet werden. Als Beispiel dient die Überfahrt eines Zugs über ein MFS. Dabei steigt einerseits das Systemgewicht entsprechend der unabgefederten Radsatzmasse an und andererseits tritt infolge der dynamischen Beanspruchung eine Systemversteifung auf. Damit nun die Systemeigenfrequenz nicht ansteigt, ist eine Begrenzung der Federziffer erforderlich.

In der Literatur wird für klassische Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)-Elastomere meist von einem maximal zulässig dynamischen Versteifungsfaktor von 1,5 gesprochen. Dieser Wert des Versteifungsfaktors beruht auf dem für Erschütterungsschutzmaßnahmen prädestinierten Naturkautschuk. Die im Rahmen der Arbeit erprobten Polyurethan-Elastomere weisen der Literatur zufolge einen Versteifungsfaktor zwischen 1,1–1,2 auf. Der Wert gilt nur für die niederfrequente dynamische Versteifung $\kappa_{\text{NF,dyn}}(10 \text{ Hz})$, da sich mit abweichenden Prüffrequenzen oder Erregeramplituden die dynamischen Bettungsmoduln ändern. [52, 53]

4.1.4 Ermittlung der höherfrequent dynamischen Kennwerte

Anhand der höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln kann die körperschalldämmende Wirkung von USM und MFS eruiert werden. Die Größenordnung der Kenngröße wirkt sich unmittelbar auf das schwingungsdynamische Verhalten des elastisch gelagerten Oberbaus aus. [51] Bei USM prägen die höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln ($C_{\text{HF,dyn}}$) die Systemeigenfrequenz und bei MFS wird diese zur Bestimmung der Abstimmfrequenz herangezogen. [10, 51]

Im Vergleich zur ausschließlich kraftgesteuerten, niederfrequenten dynamischen Prüfung wird bei der dynamisch höherfrequenten Prüfung auf ein aus Kraft und Weg kombiniertes Prüfprogramm zurückgegriffen. Ausgehend von einer Vorlast wird der Prüfkör-

per weggesteuert mit einer frequenzabhängigen, harmonischen Schwingamplitude an-
geregt. Diese erfolgt mit einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude von 7 mm/s. Als Ein-
gangsparameter für die Berechnung dienen der Schwinggeschwindigkeitspegel von
100 dB_v sowie die Fühlbarkeitsschwelle von $5 \cdot 10^{-5}$ mm/s. [10, 51]

$$v = 10^{\frac{L_v}{20}} \cdot v_0 \cdot \sqrt{2} \quad (4-6)$$

Zudem stellt die obige Gleichung lediglich eine Approximation des sinusförmigen Belas-
tungsverlaufs dar. Der Abstand zwischen der stetigen Gleichverteilung und den Extrem-
werten wird über den Faktor $\sqrt{2}$ berücksichtigt.

Auf Basis der ermitteltem konstanten Schwinggeschwindigkeitsamplitude kann mit fol-
gender Gleichung die frequenzabhängige Bewegungsamplitude aus Tabelle 3 ermittelt
werden:

$$u(f_i) = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot f_i} \quad (4-7)$$

Tabelle 3: Übersicht der frequenzabhängigen Schwingamplituden

f in Hz	Schwingamplitude u in mm
5	0,225
10	0,113
20	0,056

Die Zyklenerfassung erfolgt kongruent zu 4.1.2. Anschließend wird das identische Vor-
gehen für zwei weitere Vorlasten wiederholt. Dementsprechend werden für jeden Prüf-
körper bei drei Vorlasten und drei Frequenzen insgesamt neun höherfrequent dynami-
sche Bettungsmoduln analog zu Formel (4-4) bestimmt.

Die Vorlasten sind immer projektspezifisch. Diese ergeben sich aus Minimalbelastung, der Betriebsbelastung und der Höchstbelastung des jeweiligen Einsatzortes. Für diese durchgeführten Versuche wurden die Vorlasten analog zu Kapitel 4.1.2 wie folgt definiert:

- $\sigma_{v,1}$ entspricht der doppelten dynamischen Minimalbelastung: 0,02 N/mm²
- $\sigma_{v,2}$ entspricht dem Mittelwert zwischen minimaler und maximaler dynamischer Belastung
- $\sigma_{v,3}$ entspricht der dynamischen Maximalbelastung

4.2 Messtechnik und Prüfmaschinen

Um eine Beeinflussung der Messergebnisse infolge unterschiedlicher Prüfeinrichtungen zu minimieren, wurden die für die durchgeführten Laborversuche verwendeten Prüfmaschinen auf zwei beschränkt. Es wurde mit folgenden Geräten gearbeitet:

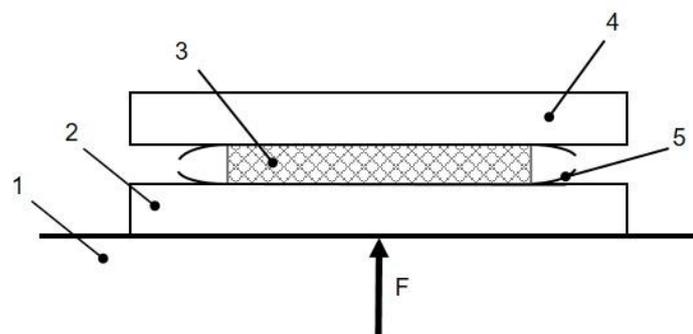
- Universalprüfmaschine 200 kN – Wolpert: Die Prüfmaschine des Fabrikats Wolpert 200 kN verfügt über einen servo-hydraulischen Antrieb mit integrierter Kraftmessdose. Die Regelung erfolgt über eine Cube Steuerung der Firma Zwick-Roell.
- Universalprüfmaschine 85 kN – HUS: Die Prüfmaschine verfügt ebenfalls über einen servo-hydraulischen Antrieb und eine Kraftmessdose, die in der Maschine integriert ist. Die Maschinensteuerung erfolgt über einen Digitalregler des Typs Hydrowin.
- Externe Induktivwegaufnehmer – HBM WA 20 mm: Die induktiven Wegaufnehmer sind außen an der Maschine montiert. Diese mechanischen Bewegungssensoren ermöglichen die Messung von Wegänderungen durch Veränderung der Induktivität einer Spule. [54]

Die in den durchgeführten Versuchen verwendeten Kraftaufnehmer stimmen mit Klasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1 überein [55]. Die verwendeten Wegaufnehmer entsprechen der Klasse 1 nach DIN EN ISO 9513 [56].

4.3 Prüfaufbau

Der Prüfaufbau orientiert sich an den Angaben in der DIN EN 17282:2020 und DIN EN 17682:2021. Der Prüfkörper wird vollflächig zwischen die Lastplatten platziert. Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, können elastomere Werkstoffe, je nach Raumdichte, eine hohe Querdehnzahl besitzen. Mit dieser geht eine Ausbreitung des Werkstoffs senkrecht zur Belastungsrichtung einher. Um eine potenzielle Beeinflussung der Querausdehnung durch Oberflächenunebenheiten der Prüfplatten zu vermeiden, kommen Schleifleinen zum Einsatz. Für jeden Prüfkörper werden zwei neue Schleifleinen der Körnung K240 zwischen Elastomer und Prüfplatte verwendet. Dies sorgt für eine homogene Prüfumgebung für jeden einzelnen Prüfkörper.

Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt einen schemenhaften Aufbau der Prüfung.



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|--|
| 1 | nicht verformbares Auflager | 4 | obere Lastplatte |
| 2 | untere Lastplatte | 5 | Schleifleinen (Schleifseite in Kontakt mit Prüfkörper) |
| 3 | Prüfkörper | | |

Abbildung 24: Schemenhafter Prüfaufbau (eigene Darstellung basierend auf [11])

Die Platzierung des Prüfkörpers erfolgt mittig auf der unteren Lastplatte, um einer ungleichen Lastverteilung und auch ein Kippen des Prüfkörpers während der Prüfung zu vermeiden. Die externen Induktivwegaufnehmer werden an den vier Ecken der Lastplatten positioniert. Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt den beispielhaften Prüfaufbau in einer der verwendeten Prüfmaschinen mit den prüfungsrelevanten Komponenten.

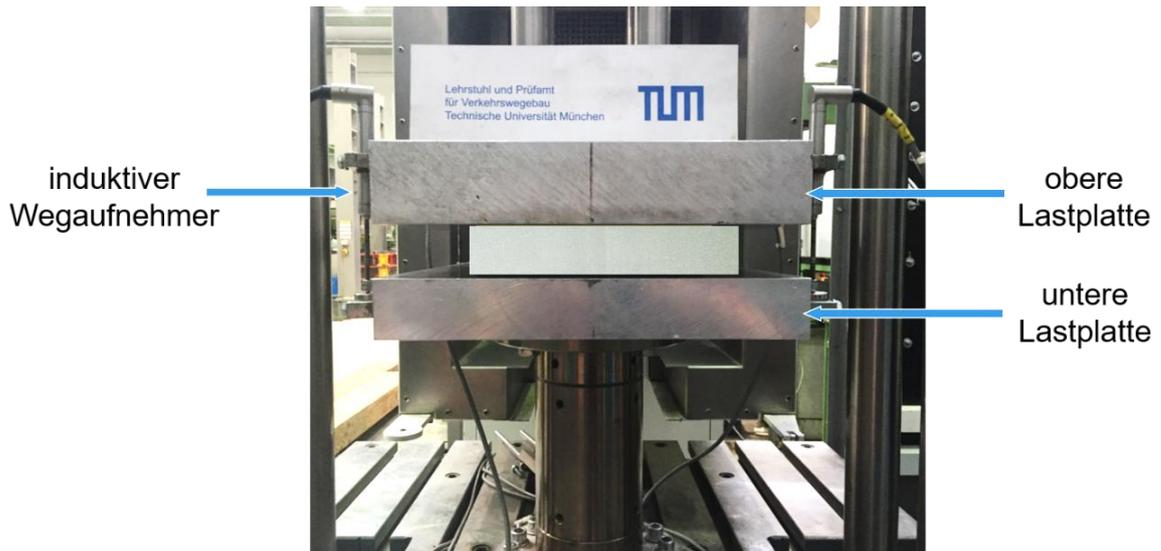


Abbildung 25: Prüfkörper im eingebauten Zustand inklusive beider Schleifleinen

Hinsichtlich der Prüfeinrichtung ist zu beachten, dass sämtliche Bauteile der Geräte als auch die Prüfkörper vor Beginn der Prüfung in einer geregelten Temperatur vorliegen. Sowohl die DIN EN 17682:2023 als auch die DIN EN 17282:2020 geben eine Temperatur von $23 (\pm 5)^\circ\text{C}$ vor. Im Prüflabor wurden während aller Versuche ein Temperaturbereich von $20 - 26^\circ\text{C}$ eingehalten. Die Prüfkörper wurden durchgehend in einer klimatisierten Umgebung aufbewahrt und auch die Prüfeinrichtung unterlag konstanten Temperaturbedingungen vorzufinden.

4.4 Messunsicherheiten

Messunsicherheiten sind Maße für die Ungenauigkeit oder den Grad der Unsicherheit, die mit einer Messung verbunden sind. Da Messungen immer mit Fehlern behaftet sind, ist es wichtig, die Unsicherheit einer Messung anzugeben, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der gemessenen Werte zu quantifizieren. Es wird zwischen zwei grundlegenden Fehlertypen unterschieden. Systematische Messfehler und zufällige Messfehler sind zwei Arten von Fehlern, die in Messungen auftreten können. Der Hauptunterschied zwischen ihnen liegt in ihrer Art des Auftretens.

Ein systematischer Messfehler ist ein Fehler, der in einer Messung aufgrund einer systematischen Abweichung von der wahren Messgröße auftritt. Dieser Fehler ist konsistent und wiederholbar und tritt jedes Mal auf, wenn die Messung unter denselben Bedingungen durchgeführt wird. Systematische Fehler können verschiedene Ursachen haben,

wie beispielsweise eine fehlerhafte Kalibrierung von Messgeräten, ungenaue Messskalen oder externe Einflüsse. Da systematische Fehler wiederholbar sind, können sie durch Anpassungen oder Korrekturen behoben werden, um die Genauigkeit der Messung zu verbessern. Im Gegensatz dazu ist ein zufälliger Messfehler ein Fehler, der aufgrund von zufälligen und nicht vorhersehbaren Einflüssen auftritt. Diese Art von Fehler kann bei wiederholten Messungen variieren, selbst wenn sie unter denselben Bedingungen durchgeführt werden. Zufällige Fehler können beispielsweise durch Messgeräte mit begrenzter Präzision, Umgebungseinflüsse oder unkontrollierte Variablen verursacht werden. Da zufällige Fehler nicht systematisch sind, gleichen sich ihre Auswirkungen bei einer ausreichend großen Anzahl von Messungen tendenziell aus. [57, 58]

Der Umgang mit systematischen und zufälligen Fehlern erfordert unterschiedliche Ansätze. Systematische Fehler können durch Kalibrierung, Justierung oder Verwendung geeigneter Messverfahren reduziert oder eliminiert werden. Zufällige Fehler können durch statistische Methoden wie Mittelwertbildung über mehrere Messungen reduziert werden, wodurch der Einfluss von zufälligen Variationen verringert wird.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Messungengenauigkeit der Ergebnisse so gering wie möglich zu halten. Es wurde darauf geachtet, systematische Messfehler zu minimieren, indem alle verwendeten Messsysteme kalibriert wurden und Genauigkeitsklassen verwendet wurden, die sogar besser sind als nach Norm gefordert. Dadurch wird eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit der Messungen sichergestellt. Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Reduzierung des Einflusses der Prüfplatten auf den Prüfkörper. Dies wurde durch die Verwendung von immer neuen Schleifleinen erreicht, um eine möglichst geringe Beeinflussung der Ergebnisse zu gewährleisten.

Um mögliche Messfehler, die trotz aller ergriffenen Maßnahmen auftreten können, abzuschätzen, wurde eine Betrachtung der Messungengenauigkeit durchgeführt. Dabei wurden die Prüfkörper mit der höchsten und der niedrigsten Steifigkeit ausgewählt, da in diesen Extremfällen die größten Abweichungen zu erwarten sind. Für den Werkstoff M02 wurde eine maximale Messungengenauigkeit von 1,7 % ermittelt, während für M10 eine maximale Messungengenauigkeit von 2,6 % festgestellt wurde. Diese Werte geben an, welche Messfehler durch den verwendeten Prüfaufbau auftreten kann. Detaillierte Berechnungen hierzu können der Anlage A.1 entnommen werden.

Um auch zufällige Fehler zu reduzieren und eine aussagekräftige Datengrundlage zu schaffen, wurden die Ergebnisse anhand einer großen Prüfkörpermenge ermittelt. Insgesamt wurden über 860 Prüfkörper geprüft, um eine hohe statistische Signifikanz zu gewährleisten und eine verlässliche Auswertung der Ergebnisse zu ermöglichen. Durch diese umfangreichen Maßnahmen zur Messgenauigkeit, Kalibrierung der Messsysteme, Minimierung von systematischen und zufälligen Fehlern sowie die Verwendung einer großen Prüfkörpermenge wird eine solide Basis für valide und zuverlässige Ergebnisse geschaffen, die für die weiteren Analysen und Schlussfolgerungen der Forschungsarbeit herangezogen werden können.

Da es bekannter Weise bei jeglicher Messung zu Abweichungen kommt, ist auch in den deutschen Normen zur Prüfung von elastomeren Werkstoffen ein Toleranzbereich für die zulässige Streuung der Messwerte angegeben. Dieser beträgt 15 % gemäß der DIN 45673-7:2010. Die zu erarbeitenden Optimierungsansätze dürfen für eine gültige Anwendbarkeit nicht zu Abweichungen führen, die außerhalb dieses Toleranzbereiches liegen.

4.5 Prüfkörper und Prüfwerkstoffe

Für die Laborversuche werden Prüfkörper aus unterschiedlichen Werkstoffen und Dimensionen verwendet.

Bei den verwendeten Prüfkörpern handelt es sich um PUR-Elastomere aus Polyurethan, die besonders zur Schwingungsdämpfung geeignet sind [2]. Diese Elastomere wurden gewählt, da sie einer der häufigsten und vielseitig eingesetzten Elastomertypen im Verkehrswegebau sind. Sie können in einem breiten Spektrum an Steifigkeiten hergestellt werden. Für die Kategorisierung der selektierten Werkstoffe ist der vom Hersteller angegebene statisch zulässige Druckspannungsbereich entscheidend. Dabei gilt folgender Zusammenhang: Je größer der maximal zulässig statische Einsatzbereich, desto höher sind die erlaubten Lasteinwirkungen und Werkstoffsteifigkeiten. Die Steifigkeit des Erzeugnisses wird primär vom Verhältnis weicher zu harter Segmente in der Makromolekülkette bestimmt. Aufgrund der sich daraus anbietenden, flexiblen Steifigkeitseinstellung kann eine überaus hohe Einsatzbandbreite abgedeckt werden.

Die für die Laboruntersuchung ausgewählten Prüfwerkstoffe lassen sich auf Grundlage der Porenstruktur in zwei Klassen einteilen. Es gibt zum einen die Werkstoffe mit einem

gemischtzelligen Aufbau, der aus offenen und geschlossenen Zellen besteht. Dabei bildet sich gemäß der Rezeptzusammensetzung eine elastische Matrix mit hoher bis mittlerer Hohlraumdichte aus [17]. Dementsprechend ist die Nutzbarkeit auf Anwendungen mit sehr geringer bis mittlerer Druckspannungsbeanspruchung (bis ca. 1,2 N/mm²) beschränkt [59]. Zum anderen verfügen die weiteren Werkstoffe über eine geschlossenzellige Porenstruktur. Diese ermöglicht die schadenfreie Aufnahme hoher dynamischer Lasten [60].

Hierbei werden im Rahmen einer Familienprüfung einzelne Werkstoffe als Stützstellen zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens geprüft. Für Werkstoffe mit intermediären Festigkeiten kann das Verhalten mittels Interpolation ausreichend genau prognostiziert werden. Die Werkstoffe M01 bis M04 besitzen einen gemischtzelligen Aufbau und bilden die Stützstellen für insgesamt zehn Werkstofftypen. Die Werkstoffe M05 bis M010 haben eine geschlossenzellige Porenstruktur und repräsentieren die Stützstellen für acht Werkstofftypen. Die geprüften Prüfkörper stellen eine Auswahl an Werkstoffen dar. Die maximalen Druckspannungen nach Angabe des Herstellers sind für alle Werkstoffe in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Diese geben die Obergrenze des statischen Einsatzbereichs für stationäre Belastungen an. Innerhalb dieses Bereiches können Elastomere die elastischen Eigenschaften dauerhaft aufrechterhalten. [61]

Tabelle 4: Prüflasten für alle verwendeten Werkstoffe

Gemischtzellige PUR-Elastomere		Geschlossenzellige PUR-Elastomere	
Bezeichnung	Max. statische Druckspannung in (N/mm ²)	Bezeichnung	Max. statische Druckspannung in N/mm ²
M01	0,018	M05	0,075
M02	0,028	M06	0,350
M03	0,220	M07	0,750
M04	1,200	M08	1,500
		M09	3,000
		M10	6,000

Die Prüfkörper liegen in vier verschiedenen Dicken (12,5 mm, 25,0 mm, 37,5 mm und 50,0 mm) vor. Bis einschließlich der Werkstoffdicke 25,0 mm werden die Prüfkörper einschichtig hergestellt. Die Dicken 37,5 mm und 50,0 mm werden aus einer 12,5 mm und

4 Prüfparameter

einer 25,0 mm bzw. zwei 25,0 mm Proben zusammengeklebt (Abbildung 26). Inwieweit die Verklebung Einfluss auf die Messergebnisse hat wird im Kapitel 5.1.4 behandelt.

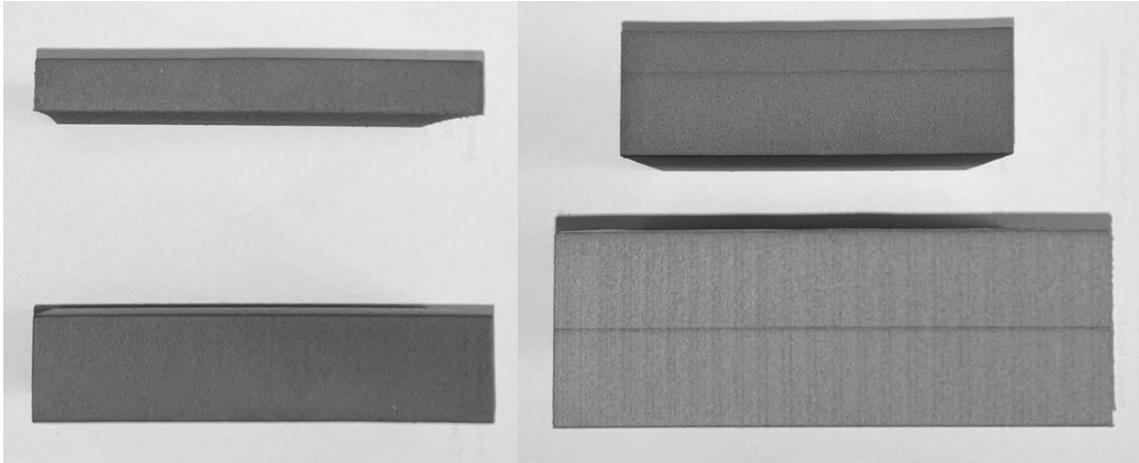


Abbildung 26: Querschnitte der verwendeten Prüfkörperdicken im einschichtigen Zustand mit $h = 25,0$ mm und $h = 12,5$ mm (links) und im verklebten Zustand mit $h = 37,5$ mm und $h = 50,0$ mm (rechts)

Durch den Herstellungsprozess bedingt, liegen die Prüfkörper grundsätzlich mit einer sogenannten Gießhaut auf einer Seite vor. Prüfkörper ab einer Dicke von 37,5 mm werden so verklebt, dass sie ebenfalls auf einer Seite eine Gießhaut aufweisen. Einzelne Prüfkörper der Dicke 12,5 mm weisen eine raue Oberfläche auf. Ursache hierfür ist das Spalten des Werkstoffs im Herstellungsprozess, um die vorgegebene Dicke zu erreichen. Abbildung 27 zeigt exemplarisch zwei Prüfkörper des selben Werkstoffs jedoch einmal mit der Oberfläche nach dem Spaltvorgang und einmal mit der produktionsbedingten Gießhaut. Der mögliche Einfluss der unterschiedlichen Oberflächen wird im folgenden Kapitel 5.1.1 untersucht.

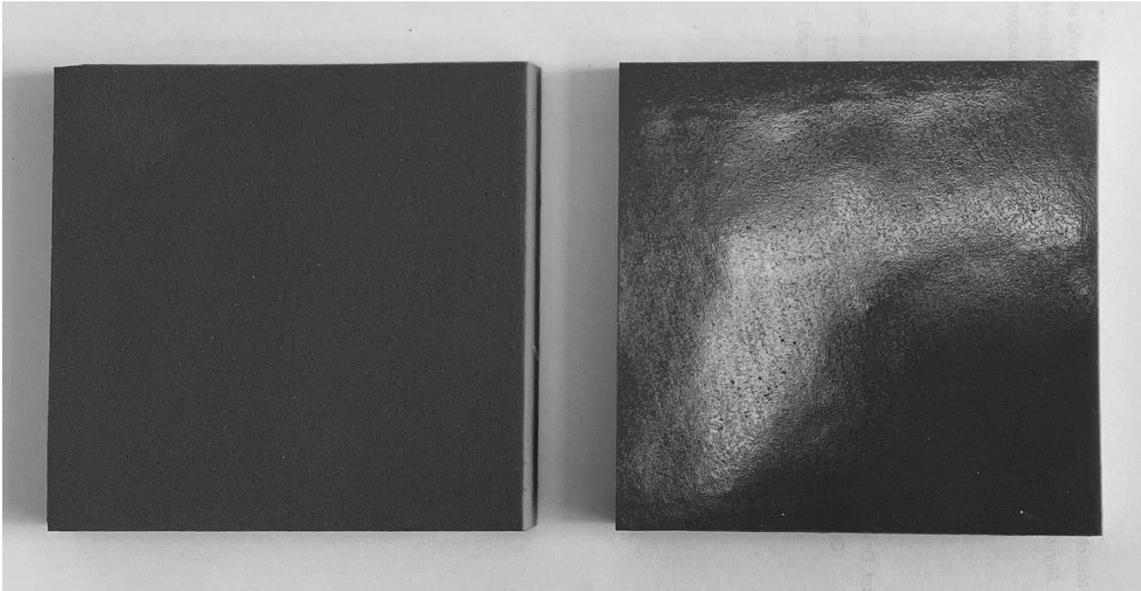


Abbildung 27: Prüfkörper mit rauer Oberfläche (links) und glatter Gießhaut (rechts)

Um verschiedene Formfaktoren mit der identischen Prüfkörperdicke zu generieren, werden die Prüfkörper nach der Messwerterfassung beim jeweiligen Formfaktor auf das nächstkleinere Maß zugeschnitten. Dazu werden zunächst mit einem Anschlagwinkel die neuen Grundflächenmaße auf dem Prüfkörper angezeichnet. Der nachfolgende Zugschnitt des Elastomers erfolgte durch eine Bandsäge. Diese erzeugt einen parallel zur Anschlagausrichtung geraden Schnitt. Alle Prüfwerkstoffe konnten mit einer Zielmaßabweichung von maximal 2 mm zugeschnitten werden. Diese Genauigkeit ist vollkommen ausreichend, da das Istmaß bei der Berechnung des Formfaktors direkte Berücksichtigung findet und in dieser Größenordnung nur geringfügige Abweichungen vom Zielwert verursacht.

5 Laborversuche

Für die Ermittlung von Ergebnissen wurden Laborversuche an allen aufgelisteten Werkstoffen durchgeführt. Diese fanden am Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München statt.

Der vorrangige Zweck, welcher den durchgeführten Laborversuchen zugrunde liegt, besteht darin, eine überaus umfangreiche und umfassende Datenbasis zu generieren. Diese soll als solide Grundlage dienen, um mögliche Optimierungsansätze aufzudecken. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf dem Zusammenhang zwischen dem Bettungsmodul und der spezifischen Geometrie des Prüfkörpers. Um jedoch sicherzustellen, dass eine solche Interpretation gewährleistet werden kann, müssen weitere mögliche Einflussfaktoren auf die ermittelten Ergebnisse ausgeschlossen werden. Durch den Prüfaufbau, der im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, werden bereits einige messtechnische Einflüsse minimiert. Dennoch werden die verschiedenen Auswirkungen, die durch den spezifischen Prüfkörper selbst, den verwendeten Werkstoff, sowie den genauen Ablauf des Prüfprozesses entstehen können, detailliert untersucht und bewertet. Dies geschieht im Rahmen einer Vielzahl von Versuchen, die gezielt durchgeführt werden, um eine äußerst gründliche und umfassende Analyse dieser potenziellen Einflussfaktoren zu ermöglichen.

5.1 Prüfkörper- und werkstoffbedingte Einflüsse

Einflüsse auf die Bettungsmodulbestimmung können je nach Werkstoff und Prüfkörperbeschaffenheit variieren. Um die diese zu identifizieren und zu quantifizieren, werden sie im Folgenden eingehend untersucht.

5.1.1 Oberflächenbeschaffenheit

Zielsetzung

Um prüfkörperbedingte Einflüsse auf die Ergebnisse des Bettungsmoduls so minimal wie möglich zu halten, sollen Prüfkörper mit möglichst identischen Eigenschaften wie Schichtaufbau und Oberflächenstruktur geprüft werden. Bei genauerer Betrachtung der zu untersuchenden Prüfkörper konnten bei Werkstoff M03 Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit festgestellt werden. Um die Auswirkung der Oberflächenbeschaffenheit auf die Prüfergebnisse bestimmen zu können, werden Versuche an

Prüfkörpern aus gleichem Werkstoff aber mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten durchgeführt.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Prüfkörper des Werkstoffs M03 können nach zwei Oberflächenbeschaffenheiten unterschieden werden. Zum einen liegen Prüfkörper mit der sogenannten Gießhaut vor und zum anderen haben einzelne Prüfkörper eine raue Oberfläche, die durch das Spaltverfahren entstehen. Es werden jeweils sechs Prüfkörper mit entsprechenden Oberflächeneigenschaften geprüft. Jeder Prüfkörper wird in vier verschiedenen Formfaktoren geprüft. Die Beeinflussung der Oberfläche auf die Bettungsmoduln wird mit Hilfe von 48 Prüfkörpern ermittelt. Alle Messergebnisse sind in Anlage A.2 dargestellt.

Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 5 und Abbildung 28 zeigen die Mittelwerte der statischen Bettungsmodulwerte der Dicke 12,5 mm aus jeweils sechs Einzelwerten pro Formfaktor für den Werkstoff M03 auf.

Tabelle 5: Mittelwerte der Bettungsmoduln von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften

S	statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3		Abweichung
	glatt	rau	
2,0	0,1553	0,1924	24 %
3,0	0,1635	0,2015	23 %
4,4	0,1682	0,2045	22 %
6,0	0,1705	0,2044	20 %

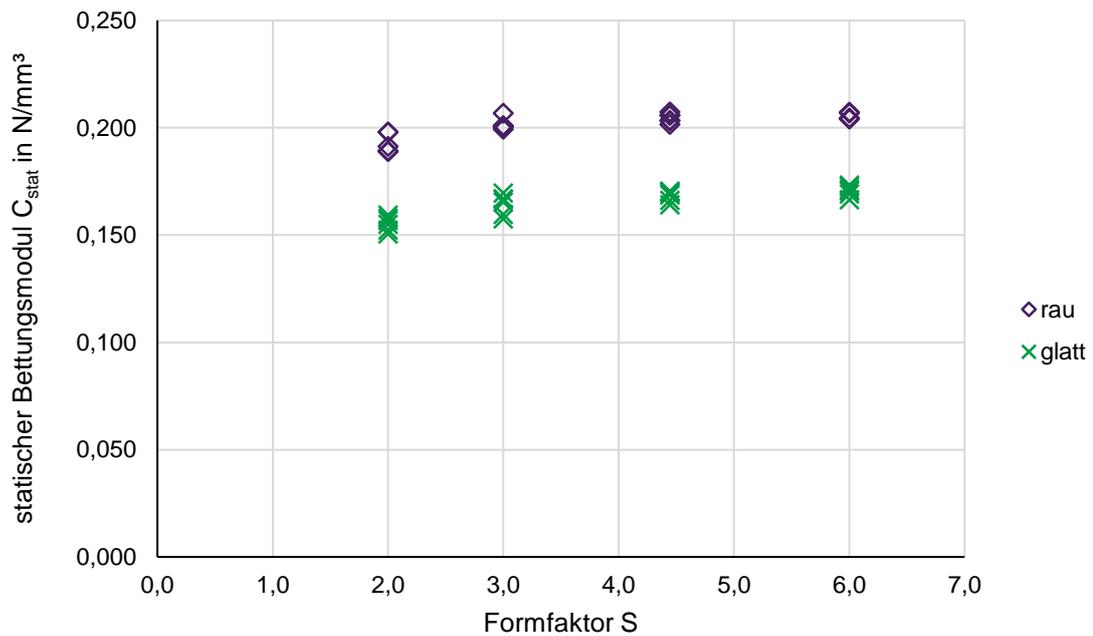


Abbildung 28: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Bettungsmodul C_{stat} beim Werkstoff M03

Es lässt sich erkennen, dass eine raue Oberfläche mit einer höheren Steifigkeit einhergeht. Dies kann dadurch begründet werden, dass sich Prüfkörper mit einer rauen Oberfläche während der Prüfung besser mit den Schleifleinen verzahnen und somit stärker in ihrer Querdehnung gehindert werden. Prüfkörper mit einer glatten Oberfläche (mit Gießhaut) weisen deshalb geringere Bettungsmoduln auf. Die Verwendung von Schleifleinen ist jedoch essenziell, um für alle Prüfkörper identische Prüfbedingungen bezüglich der Kontaktfläche zwischen Prüfkörper und Prüfplatte zu schaffen. Unabhängig von den untersuchten Formfaktoren zeigt sich ein nahezu gleichbleibendes Verhältnis in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheiten. Diese Erkenntnis wird zusätzlich durch die Regressionsgleichungen belegt, die beide Oberflächeneigenschaften betrachten. Abbildung 29 veranschaulicht die nahezu identische Steigung der beiden Regressionsfunktionen. Daraus lässt sich ableiten, dass beide Regressionslinien einen ähnlichen Verlauf haben und im betrachteten Bereich einen annähernd konstanten Abstand haben.

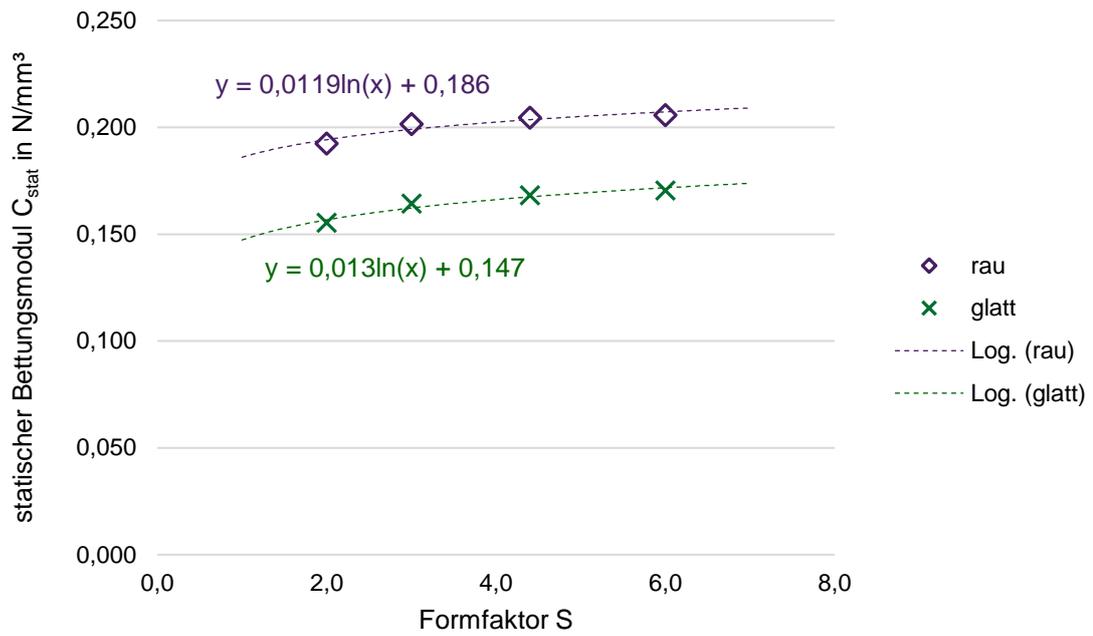


Abbildung 29: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln und Regressionsfunktion

Zusätzlich zu den statischen Werten werden auch die dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz und 10 Hz bestimmt (siehe Anlage A.2). Diese verhalten sich analog zu den statischen Bettungsmoduln. Dies kann mit dem gleichbleibenden Versteifungsfaktor zwischen 1,2 und 1,3 bestätigt werden (Abbildung 30).

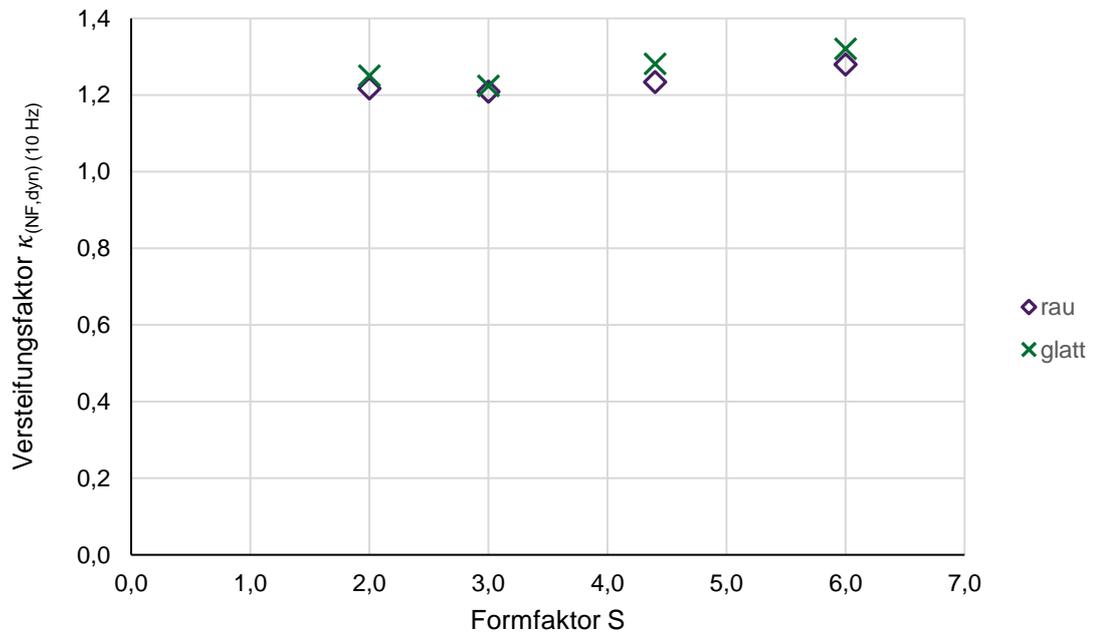


Abbildung 30: Versteifungsfaktor $K_{(NF,dyn)}(10\text{ Hz})$

5 Laborversuche

Tabelle 6 zeigt, dass die Abweichungen der dynamischen Werte im ähnlichen Prozentbereich wie die statischen Werte sind, weisen jedoch durchgehend geringere Werte auf als diese.

Tabelle 6: Prozentuale Abweichung der Bettungsmoduln von Prüfkörper mit rauher Oberfläche zu glatter Oberfläche

S	Abweichung		
	C _{stat}	C _{dyn,5Hz}	C _{dyn,10Hz}
2,0	24 %	21 %	21 %
3,0	23 %	22 %	21 %
4,4	22 %	18 %	17 %
6,0	20 %	18 %	16 %

Um Einflüsse durch die Oberflächeneigenschaften auf den Bettungsmodul zu vermeiden, muss bei den Prüfungen klar zwischen den beiden untersuchten Fällen differenziert werden. Da für weitere Prüfungen zu wenig Prüfkörper mit rauher Oberfläche vorliegen, werden für die hier im Weiteren durchgeführten Prüfungen nur Prüfkörper mit Gießhaut verwendet. Da solche unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften auch nur bei der Hälfte der Prüfkörper, die aus dem Spaltprozess kommen, entstehen, sind Prüfkörper mit Gießhaut der Regelfall. Somit repräsentieren die weiteruntersuchten Prüfkörper mit glatter Oberfläche einen deutlich größeren Anteil der produzierten Werkstoffe.

5.1.2 Prüfkörperwiederverwendung

Zielsetzung

Es wird untersucht, ob für jede Einzelprüfung neue Prüfkörper verwendet werden müssen oder ob diese wiederverwendet werden können. Im späteren Verlauf werden Prüfkörper untersucht, die eine Verklebung aufweisen. Um den Einfluss dieser zu untersuchen, werden auch Prüfkörper ohne Verklebung zu der entsprechenden Dicke aufeinander gestapelt. Wenn diese wiederverwendet werden können, würde dies zu Werkstoffeinsparungen für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche von bis zu 60 % führen. Zwischen den Prüfungen, bei denen dieselben Prüfkörper verwendet werden, liegen mindestens 24 Stunden. Insgesamt wurden 288 Messergebnisse ermittelt.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche werden an jeweils 42 Prüfkörpern aus zwei unterschiedlichen Werkstoffen (M03 und M08) durchgeführt.

Bei der ersten Versuchsreihe werden ausschließlich homogene Prüfkörper der Dicke 12,5 mm verwendet, die für die Dicken 25,0 mm, 37,5 mm und 50,0 mm aufeinandergestapelt werden. Dabei werden für jede Einzelprüfung unbeanspruchte Prüfkörper verwendet. Anschließend wird eine weitere Versuchsreihe mit ausschließlich Prüfkörpern der Dicke 12,5 mm durchgeführt. Hierfür werden diese für die einzelnen Prüfungen jedoch wiederverwendet. Für die zweite Versuchsreihe wird ein Prüfkörper der Dicke 12,5 mm zunächst allein geprüft. Alle 24 Stunden wird die Dicke um einen weiteren Prüfkörper erhöht, ohne die vorhandenen auszuwechseln. Somit wird pro Formfaktor der erste Prüfkörper insgesamt viermal geprüft, der zweite dreimal, der dritte zweimal und der vierte nur einmal. Alle ermittelten Messwerte können der Anlage A.3 entnommen werden.

Ergebnisse

In Tabelle 7 sind die Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für verschiedene Formfaktoren und Werkstoffe aufgeführt. Die Mittelwerte wurden aus jeweils sechs Einzelwerten berechnet. Es zeigt sich, dass die maximalen Abweichungen bei M03 unter 5 % und bei M08 lediglich bei 1 % liegen. Es lässt sich keine direkte Korrelation zwischen den Abweichungen und den unterschiedlichen Schichthöhen erkennen. Dies bedeutet, dass die Abweichungen in den Bettungsmoduln nicht auf die Variationen in den Schichthöhen zurückzuführen sind.

5 Laborversuche

Tabelle 7: Ergebnisse der Bettungsmoduln von neuen bzw. wiederverwendeten Prüfkörpern

		statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
		M03			
Dicke h in mm		12,5	25	37,5	50
neu		0,1703	0,0989	0,0678	0,0479
wiederverwendet		0,1704	0,0951	0,0644	0,0467
Abweichung		0,1 %	3,8 %	4,9 %	2,5 %
		M08			
Dicke h		12,5	25	37,5	50
neu		0,9912	0,4800	0,2891	0,1973
wiederverwendet		0,9873	0,4749	0,2900	0,1975
Abweichung		0,4 %	1,0 %	0,3 %	0,1 %

Wie grafisch in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt ist, kann nur eine geringe Abweichung des statischen Bettungsmoduls bei beiden Versuchsreihen erkannt werden.

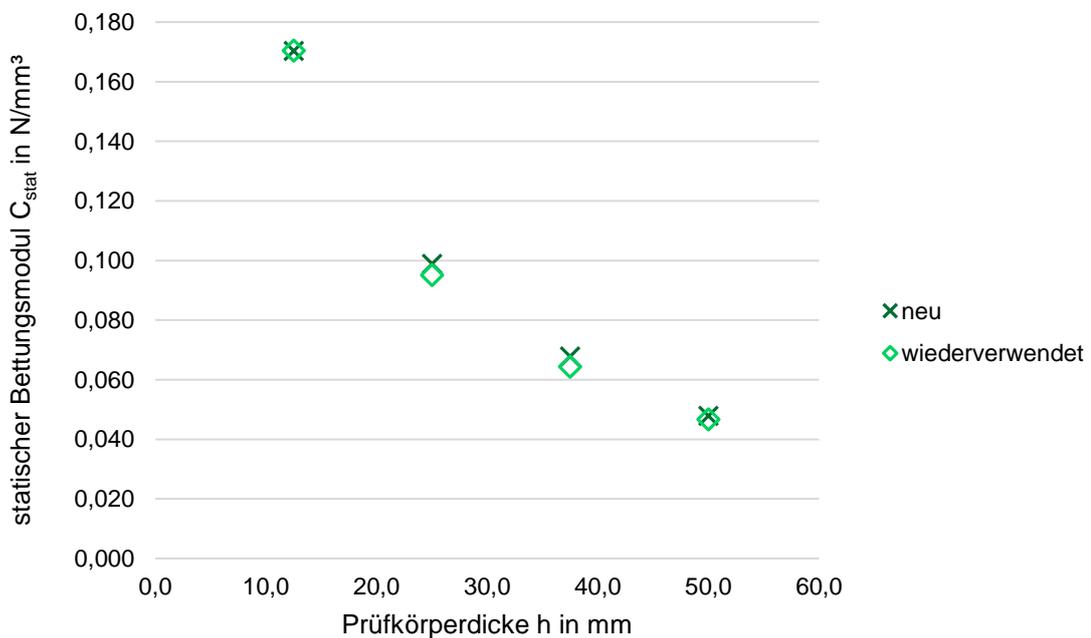


Abbildung 31: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M03

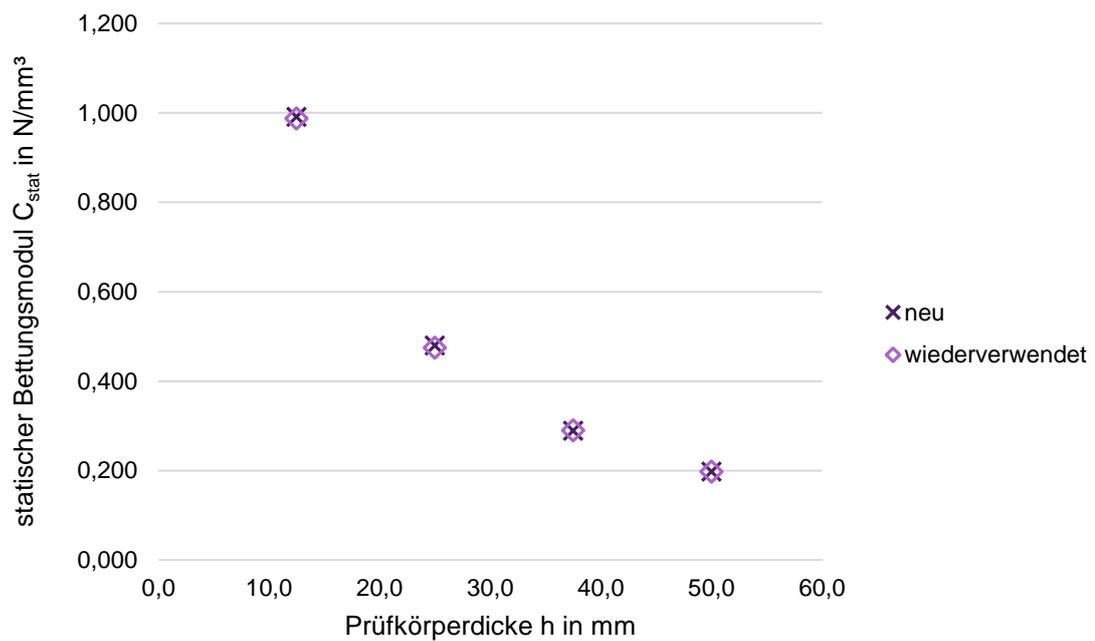


Abbildung 32: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M08

Die niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz und 10 Hz zeigen ein ähnliches Verhalten wie die statischen Bettungsmoduln. Beim Werkstoff M03 beträgt die maximale Abweichung 4,0 % und beim Werkstoff M08 liegt sie bei 1,9 %. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die dynamische Steifigkeit der Werkstoffe im niederfrequenten Bereich weitgehend konstant ist. Diese Erkenntnis wird zusätzlich durch die konstante niederfrequente dynamische Versteifung im Bereich von 1,2 bis 1,3 bestätigt.

Die Mittelwerte der Ergebnisse der niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln für M03 und M08 sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Diese Grafiken zeigen die gemittelten Werte für die jeweiligen Frequenzen und veranschaulichen die Unterschiede zwischen den Werkstoffen.

5 Laborversuche

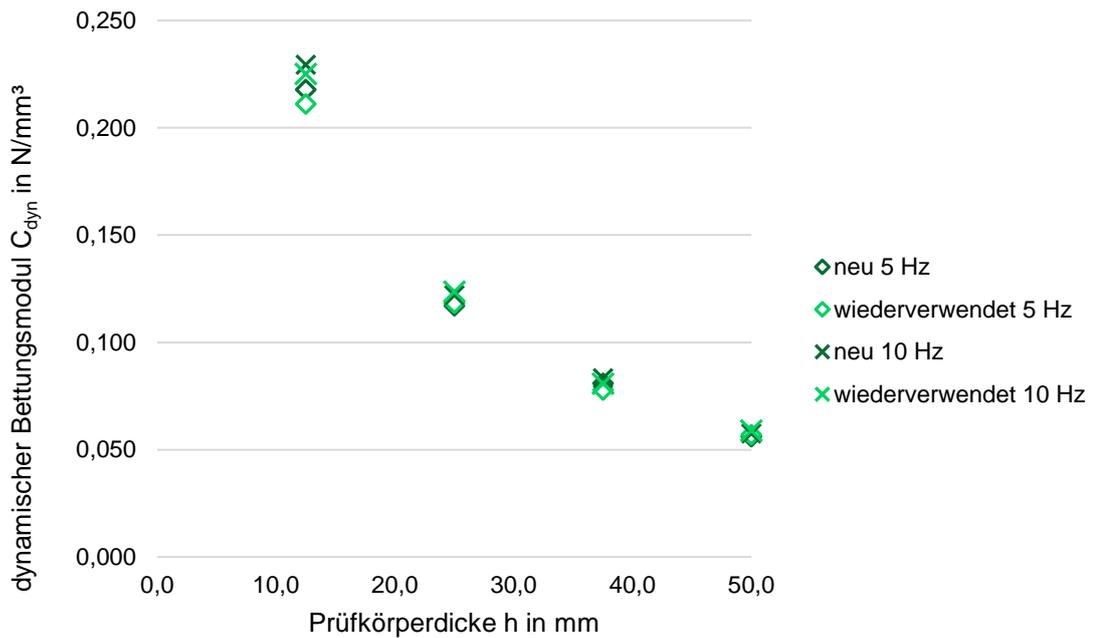


Abbildung 33: Vergleich des niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduls C_{dyn} bei 5 Hz und 10 Hz von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M03

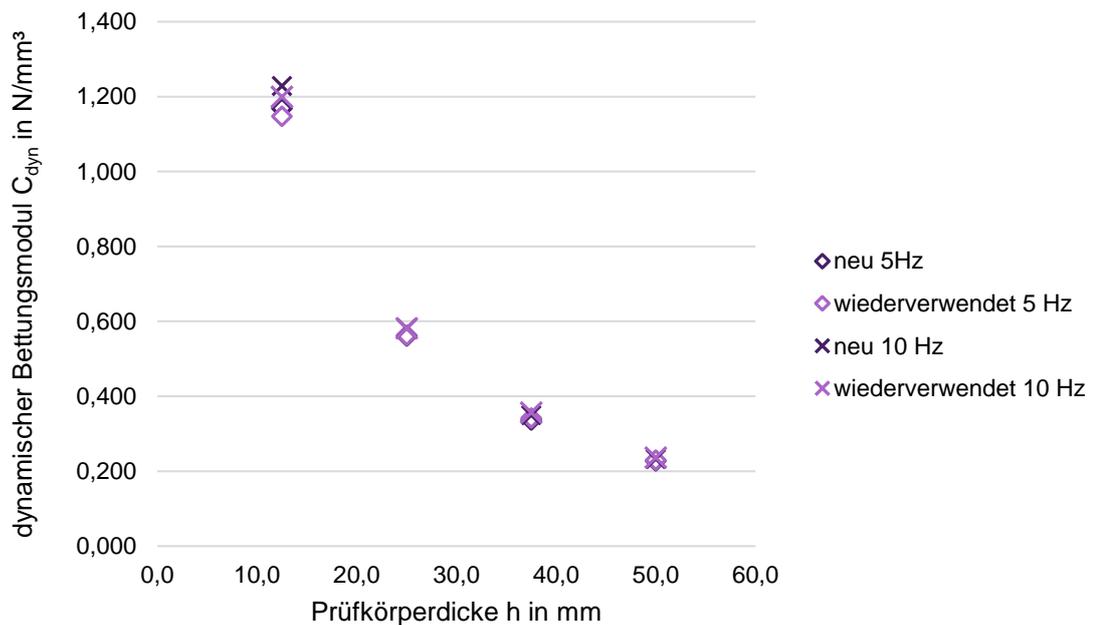


Abbildung 34: Vergleich des niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduls C_{dyn} bei 5 Hz und 10 Hz von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M08

Somit werden für alle weiteren Prüfungen im Rahmen dieser Arbeit, wo es möglich ist, die wiederverwendeten Prüfkörper genutzt. Durch das Heranziehen der wiederverwendeten Prüfkörper in allen weiteren Prüfungen wird sichergestellt, dass konsistente und

vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, während gleichzeitig die verfügbaren Ressourcen optimal genutzt werden.

5.1.3 Prüfkörpergeometrie

Zielsetzung

Dass die Dimensionen von elastomeren Prüfkörpern einen Einfluss auf die mechanischen Messergebnisse haben, ist bereits bekannt. Deshalb wird zur Vergleichbarkeit oft der Formfaktor herangezogen. Jedoch gibt dieser alleine zu wenig Information über die Geometrie des Prüfkörpers an, denn der identische Formfaktor kann über verschiedene Prüfkörpergeometrien erreicht werden. Somit weisen Prüfkörper mit den Maßen 150 mm x 150 mm x 12,5 mm und 300 mm x 100 mm x 12,5 mm sowie 300 mm x 300 mm x 25,0 mm den identischen Formfaktor 3,0 auf. Jedoch haben diese nachweislich nicht die gleichen Bettungsmoduln, denn ein Prüfkörper mit größerer Prüfkörperdicke weist immer einen geringeren Bettungsmodul auf. Hierbei stellt sich noch die Frage, in wieweit das Seitenverhältnis der Grundfläche des Prüfkörpers einen Einfluss auf die Ergebnisse nimmt.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche werden an jeweils mindestens drei Prüfkörpern aus acht unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt (M02 – M06, M08 – M10). Die Prüfkörper weisen dabei Dicken von 12,5 mm und 25,0 mm auf. Alle Prüfkörper wurden in mindestens drei unterschiedlichen Formfaktoren geprüft. Inwieweit die Form der Grundfläche und der Formfaktor Einfluss auf den Bettungsmodul haben, wird anhand von über 267 Prüfkörpern analysiert. Alle verwendeten Messergebnisse sind in Anlage A.4 aufgeführt.

Ergebnisse

Es wurden Prüfkörper desselben Werkstoffs mit unterschiedlichen Grundflächengeometrien geprüft. Das Seitenverhältnis zwischen Länge und Breite weist eine Bandbreite von 1:1 bis 1:6 auf.

Da selten bei beiden Geometrien ein Messwert bei demselben Formfaktor vorliegt, wurde pro Werkstoff aus den Mittelwerten der einzelnen Prüfkörper eine Regressionsfunktion mit Hilfe der Software IBM SPSS® Statistics gebildet. Mit Hilfe deren Gleichungen konnten die Werte des Bettungsmoduls bei den entsprechenden Formfaktoren bestimmt werden. Um die Aussagekraft der Trendlinie zu bestätigen, wurde für jede der

5 Laborversuche

Gleichungen das Bestimmtheitsmaß R^2 bestimmt. Dieses dient als Kennzahl der Regressionsanalyse und gibt an, wie die ermittelten Messwerte zu einem Modell passen. Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 basiert auf der Analyse der Residuen, die die Differenz zwischen den beobachteten Werten der abhängigen Variable und den vorhergesagten Werten darstellen. Je höher der Wert, umso besser ist die Vorhersage. Das Bestimmtheitsmaß kann maximal den Wert 1 annehmen. [62] Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes wurden ebenfalls mit Hilfe der Software IBM SPSS® Statistics durchgeführt. Die Bestimmtheitsmaße der ermittelten Gleichungen für alle Werkstoffe liegen bei einem hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2 \geq 0,91$ für den ermittelten Bereich. Exemplarisch sind die ermittelten Gleichungen und Bestimmtheitsmaße für den Werkstoff M03 in Abbildung 35 dargestellt.

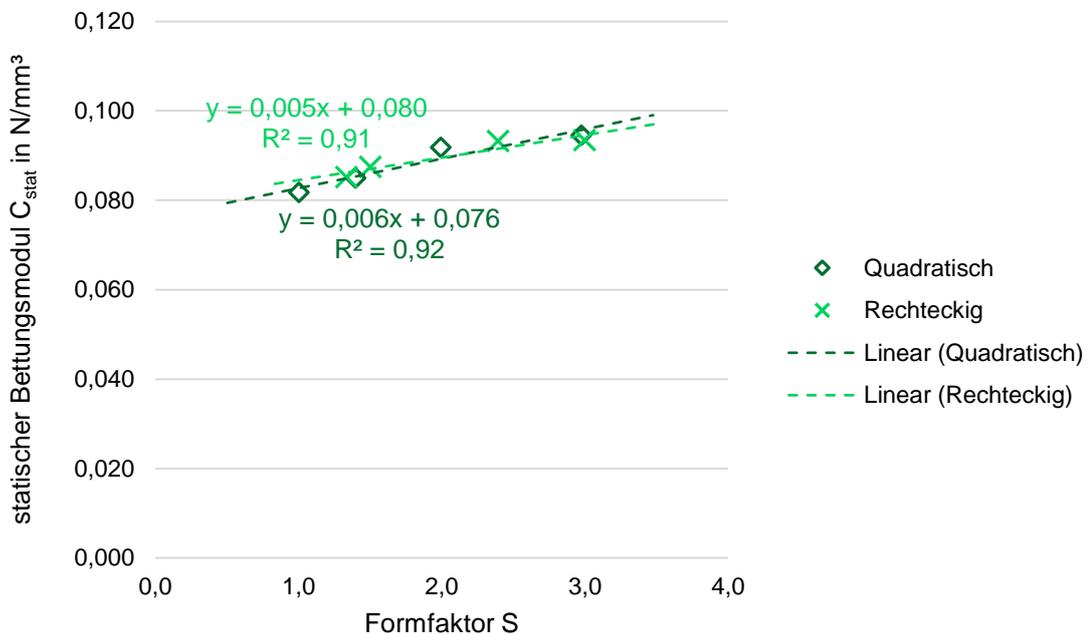


Abbildung 35: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M03 mit $h = 25,0 \text{ mm}$

Die Tabelle 8 zeigt die Abweichung des statischen Bettungsmoduls eines rechteckigen Prüfkörpers zu einem quadratischen Prüfkörper beim selben Formfaktor mit identischer Prüfkörperdicke von 25,0 mm. Die ermittelten Bettungsmoduln, die Geometrien der geprüften Prüfkörper sowie die weiteren grafischen Darstellungen aller untersuchten Werkstoffe können Anlage A.4 entnommen werden.

Tabelle 8: Abweichung des statischen Bettungsmoduls bei quadratischer und rechteckiger Grundfläche

M02		M03		M04	
S	Abweichung	S	Abweichung	S	Abweichung
1,5	1,9 %	1,5	2,2 %	1,0	3,3 %
2,0	1,9 %	2,0	0,2 %	1,5	0,0 %
3,0	1,8 %	3,0	1,5 %	2,0	2,6 %
M05		M06		M08	
S	Abweichung	S	Abweichung	S	Abweichung
1,5	4,1 %	1,5	1,9 %	1,0	3,3 %
2,0	3,5 %	2,0	2,3 %	1,5	3,5 %
3,0	2,4 %	3,0	3,1 %	2,0	3,7 %
M09		M10			
S	Abweichung	S	Abweichung		
0,8	1,9 %	0,8	1,0 %		
1,0	0,4 %	1,0	1,6 %		
1,2	0,8 %	1,2	3,5 %		

Durch die geringen Abweichungen von maximal 4,1 % können die Bettungsmodulwerte für die unterschiedlichen Grundflächenformen als gleichwertig betrachtet werden.

Mit den Werten der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz und 10 Hz wurde analog vorgegangen (Anlage A.4). Auch hier konnte ein hohes Bestimmtheitsmaß der Regression von $R^2 > 0,92$ erreicht werden. Die Abweichungen liegen im ähnlichen Prozentbereich wie bei den statischen Bettungsmoduln. Die maximale Abweichung beträgt sowohl bei 5 Hz als auch bei 10 Hz einen Wert von 5,6 %. Diese Werte traten bei den Werkstoffen M04 und M10 auf. Die ermittelte niederfrequente dynamische Versteifung lag für alle Werkstoffe zwischen 1,1 und 1,3.

Dass diese Erkenntnisse auch auf andere Prüfkörperdicken zutreffen, zeigen Abbildung 36 und Abbildung 37. Diese stellen exemplarisch die Ergebnisse des statischen Bettungsmoduls und der dynamischen Bettungsmoduln bei 10 Hz vom Werkstoff M08 mit rechteckiger und quadratischer Grundflächengeometrie für die Prüfkörperdicke

5 Laborversuche

$h = 12,5 \text{ mm}$ grafisch dar. Der fast identische Verlauf der Regressionsfunktionen unterstreicht die Gleichwertigkeit der Ergebnisse.

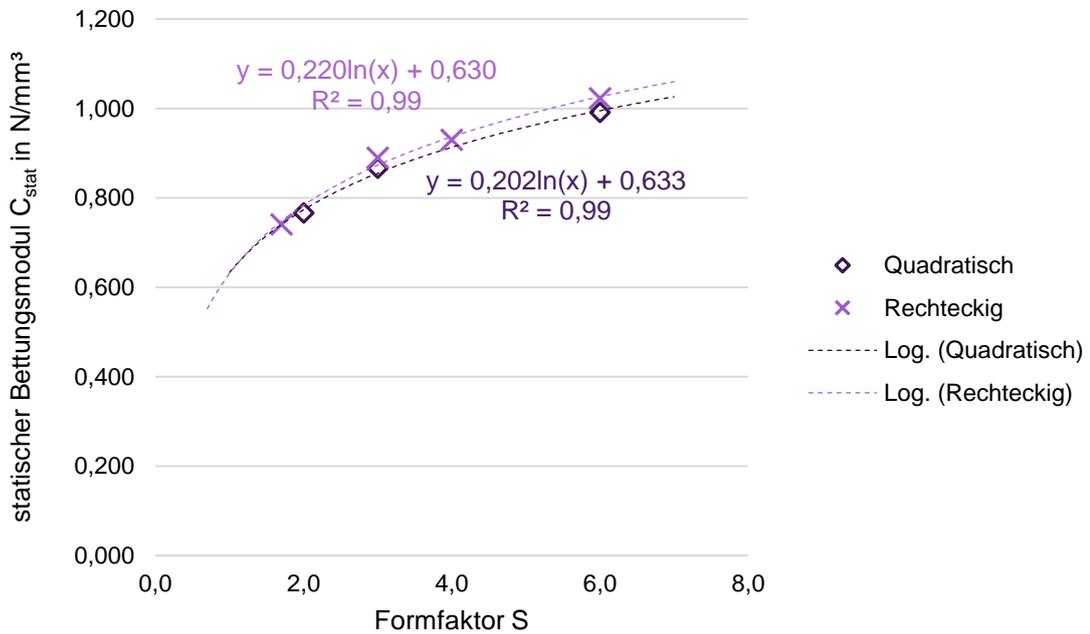


Abbildung 36: Vergleich der gemessenen statischen Bettungsmodulwerte bei Prüfkörpern mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08 mit Regressionsverlauf

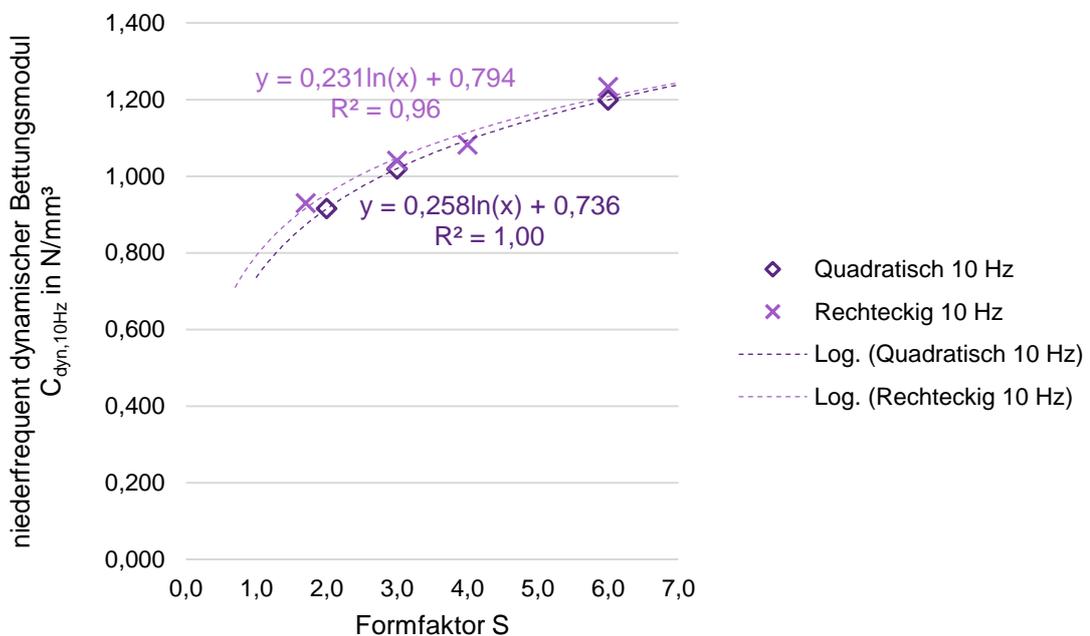


Abbildung 37: Vergleich der dynamischen Bettungsmoduln bei 10 Hz für Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08

Zusätzlich ist die ermittelte niederfrequente dynamische Versteifung für den Werkstoff M08 in Abbildung 38 abgebildet.

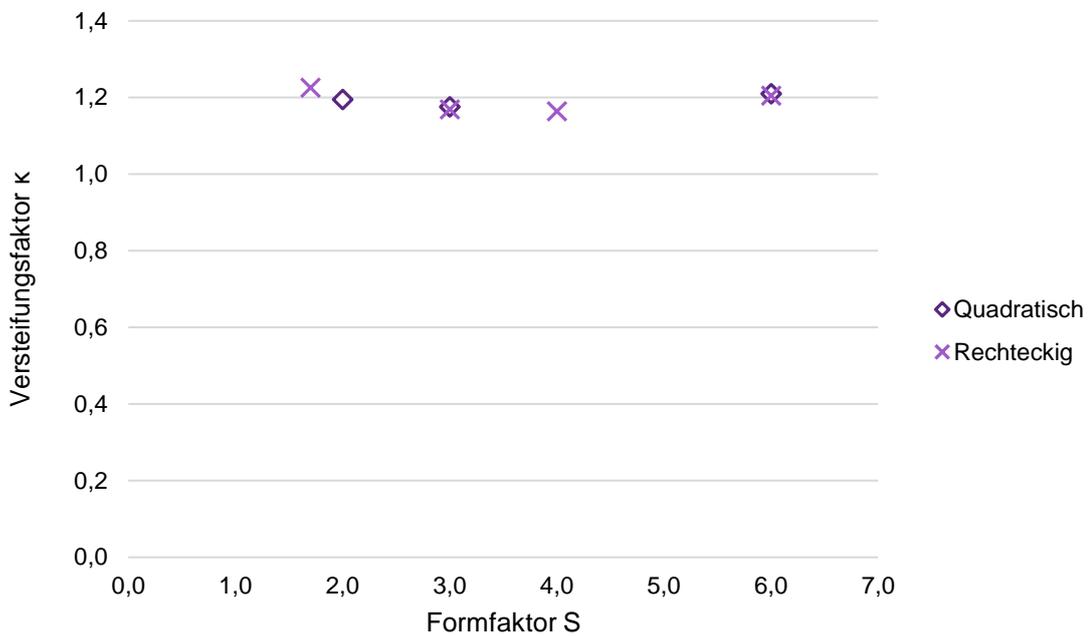


Abbildung 38: Niederfrequente dynamische Versteifung für quadratische und rechteckige Grundflächen von Werkstoff M08

Ebenfalls wurden die höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln bei drei Vorlasten und drei Frequenzen bestimmt. Für 20 Hz ist dies exemplarisch für Werkstoff M08 in Abbildung 39 abgebildet.

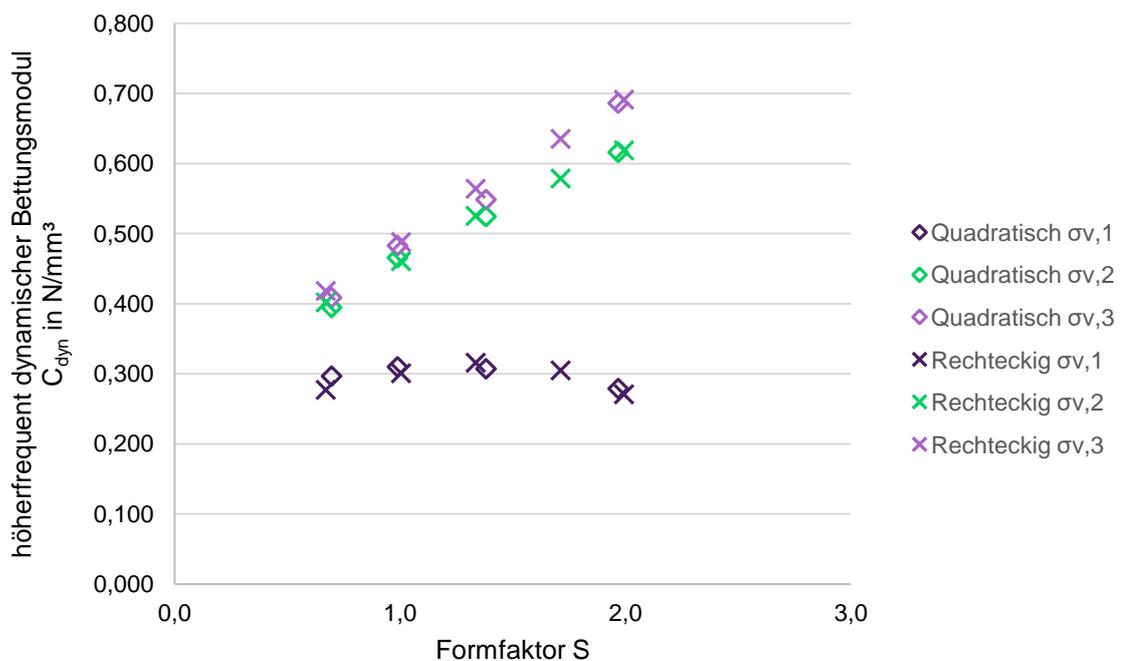


Abbildung 39: Vergleich der höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln bei 20 Hz für Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08

Obwohl die Ergebnisse für die Vorlast $\sigma_{v,1}$ sowohl bei den Prüfkörpern mit rechteckiger als auch mit quadratischer Grundfläche einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen, weicht dieser doch sehr von den anderen beiden Vorlasten ab. Dieses Phänomen ist bei fast allen Prüfwerkstoffen zu beobachten. Es lässt darauf schließen, dass die in Kapitel 4.1.4 beschriebene Vorlast $\sigma_{v,1}$ zu gering angesetzt wurde. Es kann dadurch zu einem Kontaktverlust der Prüfmaschine mit dem Prüfkörper kommen, da die Einsenkung bei der Vorlast geringer ist als die angefahrte Schwingamplitude. Aus diesem Grund kommt es zu teilweise nicht verwendbaren Messergebnissen für die Vorlast $\sigma_{v,1}$.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den bisherigen Versuchen haben gezeigt, dass die Bettungsmodulwerte von Prüfkörpern mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche als gleichwertig betrachtet werden können. Die Unterschiede zwischen den beiden Formen sind vernachlässigbar und haben keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Bettungsmodulwerte. Deshalb werden in den folgenden Versuchen die Bettungsmodulwerte von Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche gleichwertig verwendet.

Es kann eine zusätzliche Beobachtung gemacht werden. Betrachtet man die verschiedenen Prüfwerkstoffe bei gleicher Prüfkörperdicke über die Formfaktoren hinweg, wird deutlich, dass dessen Einfluss stark mit dem steigenden Raumgewicht zunimmt (Abbildung 40). Dies wird durch die Abhängigkeit der Bettungsmoduln in Bezug auf die Formfaktoren ersichtlich. Bei den steiferen Werkstoffen liegt ein fast linearer Verlauf der Bettungsmoduln vor, während bei den weicheren Werkstoffen ein deutliches Abflachen bei größer werdenden Formfaktoren vorhanden ist, sodass hier ein logarithmischer Verlauf zu erkennen ist. Dieses Verhalten ist exemplarisch für die Werkstoffe M03 und M08 in Abbildung 40 dargestellt. Die Auswertung erfolgte bei den beiden Werkstoffen, weil bei diesen die Prüfkörpern in allen vier Dicken vorlagen und mit den meisten Formfaktoren geprüft werden konnten.

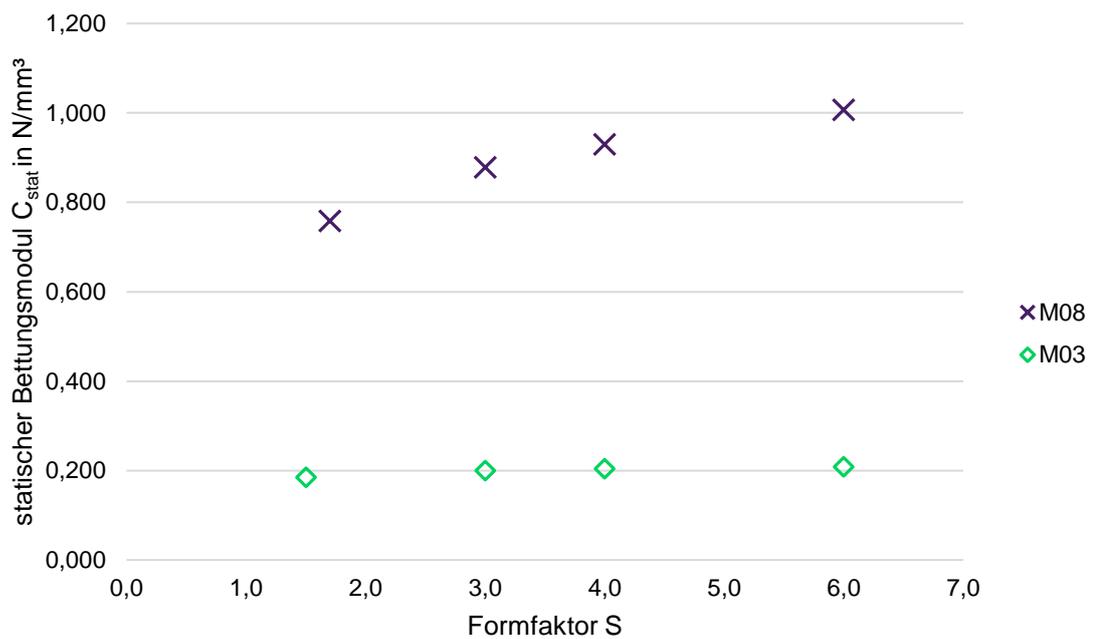


Abbildung 40: Verlauf des statischen Bettungsmoduls C_{stat} in Abhängigkeit des Formfaktor S für die Werkstoffe M03 und M08

Exemplarisch sind hier für die Werkstoffe M03 und M08 die statischen Bettungsmoduln und niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz sowie ihre prozentuale Veränderung über die Formfaktoren für die Prüfkörperdicke von $h = 12,5 \text{ mm}$ in Tabelle 9 aufgelistet.

5 Laborversuche

Tabelle 9: Statischer und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul und prozentuale Veränderung für die Werkstoffe M03 und M08 für $h = 12,5 \text{ mm}$

M03				
S	C_{stat} in N/mm^3	Veränderung	$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$ in N/mm^3	Veränderung
6,0	0,2085	-	0,2491	-
3,0	0,1992	4,5 %	0,2349	5,7 %
1,5	0,1875	10,1 %	0,2258	9,3 %
M08				
S	C_{stat} in N/mm^3	Veränderung	$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$ in N/mm^3	Veränderung
6,0	1,0149	-	1,1678	-
3,0	0,8842	12,9 %	0,9874	15,4 %
1,5	0,4045	24,5 %	0,4608	25,0 %

Sowohl beim statischen wie auch beim niederfrequenten dynamischen Bettungsmodul sind die prozentualen Unterschiede zwischen den verschiedenen Werkstoffen deutlich zu erkennen. Es zeigt sich, dass der Formfaktor bei steifen Werkstoffen eine deutlich wichtigere Rolle bezüglich des mechanischen Verhaltens hat als bei weichen. Bei Werkstoffen mit geringem Raumgewicht haben große Formfaktoren kaum mehr Einfluss auf die Bettungsmoduln. Bei den untersuchten Prüfkörpern liegen die Änderungen der Bettungsmodulwerte zwischen dem Formfaktor 1,5 und 3 bei den gemischtzelligen Werkstoffen bis M03 und bei den geschlossenzelligen Werkstoffen bis M05 bei unter 10 %. Mit den für die Laborversuche zur Verfügung stehenden Werkstoffen liegen nicht genug Daten für Werkstoffe mit geringerem Raumgewicht vor, um eine genaue Quantifizierung bezüglich des Verhältnisses zwischen Raumdicke und Einfluss des Formfaktors vorzunehmen. Für eine präzise Aussage sollten weitere Versuchsreihen mit der Bestimmung des Bettungsmoduls mit dem Fokus auf Werkstoffen mit geringer Raumdicke durchgeführt werden.

5.1.4 Verklebung und Verbund

Zielsetzung

Um den Einfluss der Verklebung der Prüfkörper auf den Bettungsmodul bestimmen zu können, werden Versuche an unterschiedlichen Schichtaufbauten durchgeführt. Im Falle der Prüfkörper mit einer Dicke von 25,0 mm wird der Unterschied zwischen dem einschichtigen Zustand und jeweils zwei gestapelten Prüfkörper der Dicke 12,5 mm untersucht. Die verklebten Prüfkörper werden mit Prüfkörpern der Dicke 12,5 mm und 25,0 mm, die für die gleiche Dicke aufeinandergestapelt werden, verglichen. Es wird darauf geachtet, dass der Aufbau der einzelnen Dicken identisch ist. Somit besteht ein Prüfkörper der Dicke 37,5 mm aus einem jeweils 12,5 mm und 25,0 mm dicken und ein Prüfkörper der Dicke 50,0 mm besteht aus zwei 25,0 mm dicken Prüfkörpern.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche werden an zwei unterschiedlichen Werkstoffen (M03, M08) an jeweils mindestens vier Prüfkörpern pro Formfaktor durchgeführt. Insgesamt werden für die Analyse des Einflusses der Verklebung die Messergebnisse von 236 Prüfkörper herangezogen. Alle Bettungsmodulwerte sind Anlage A.5 zu entnehmen.

Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der einschichtigen Prüfkörper betrachtet. Es lässt sich feststellen, dass die einschichtigen Prüfkörper durchgängig steifer sind als die gestapelten. Als Auflistung hierfür dient die Tabelle 10, welche die Mittelwerte aus den jeweils sechs Einzelwerten der statischen Messergebnisse der Prüfkörperdicke 25,0 mm über alle ermittelten Formfaktoren aufführt. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 41 die Einzelwerte der statischen Bettungsmoduln vom Werkstoff M03 abgebildet.

5 Laborversuche

Tabelle 10: Mittelwerte des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08 für einschichtige Prüfkörper

S	statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
	M03		M08	
	einschichtig	nicht verklebt	einschichtig	nicht verklebt
	25,0 mm			
1,0	0,0921	0,0817	0,3319	0,3220
1,5	0,0988	0,0890	0,3969	0,3829
2,0	0,1023	0,0929	0,4396	0,4256
3,0	0,1052	0,0951	0,4924	0,4749

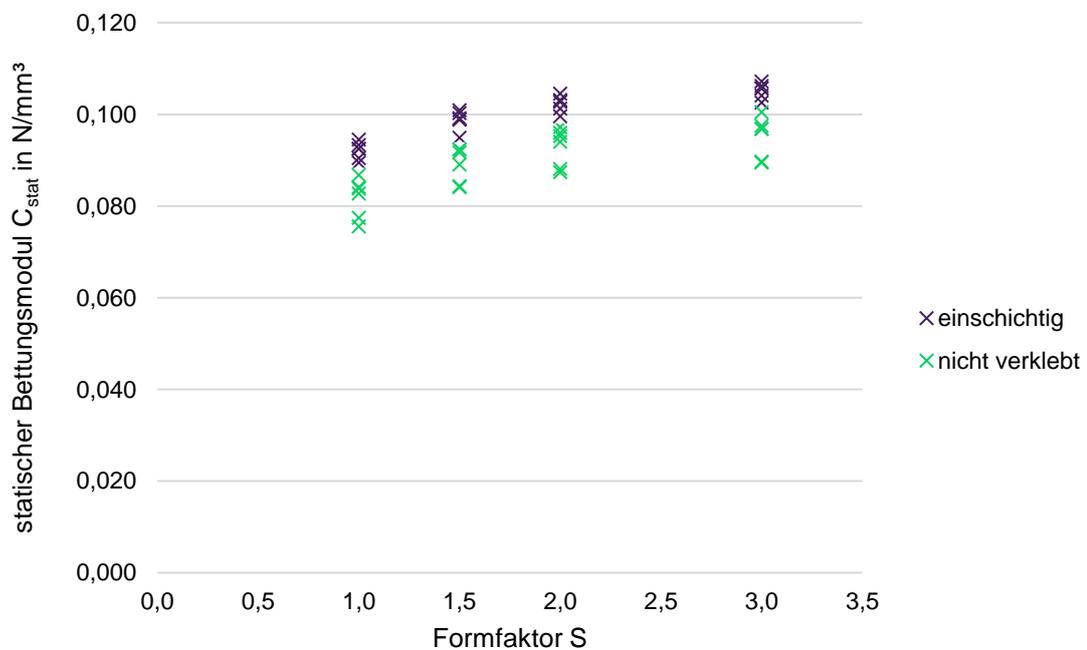


Abbildung 41: Einzelmessergebnisse der statischen Bettungsmoduln vom Werkstoff M03

Bei den Prüfkörpern im verklebten Zustand lässt sich erkennen, dass diese durchgängig steifer sind, als die nicht verklebten. Dies kann auch der Tabelle 11 entnommen werden. Diese zeigt die Mittelwerte der jeweils sechs Einzelwerte der statischen Bettungsmoduln der beiden Prüfkörperdicken. Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen zusätzlich die grafische Darstellung der Messergebnisse für alle drei Prüfkörperdicken.

5.1 Prüfkörper- und werkstoffbedingte Einflüsse

Tabelle 11: Mittelwerte des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08 für verklebte und nicht verklebte Prüfkörper

S	statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
	M03		M08	
	verklebt	nicht verklebt	verklebt	nicht verklebt
	37,5 mm			
0,7	0,0577	0,0525	0,2096	0,1865
1,0	0,0639	0,0570	0,2554	0,2230
1,3	0,0682	0,0605	0,3012	0,2583
2,0	0,0703	0,0605	0,3369	0,2861
	50,0 mm			
0,8	0,0461	0,0393	0,1736	0,1388
1,0	0,0491	0,0426	0,2078	0,1606
1,5	0,0522	0,0443	0,2506	0,1929

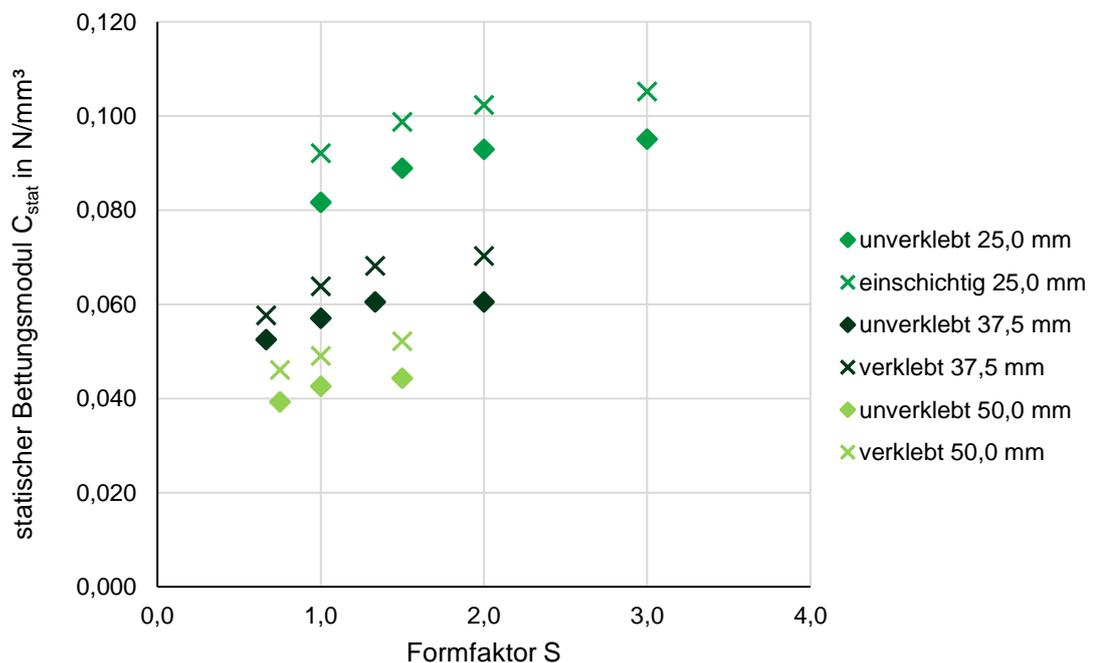


Abbildung 42: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten/einschichtigen und nicht verklebten Prüfkörpern – M03

5 Laborversuche

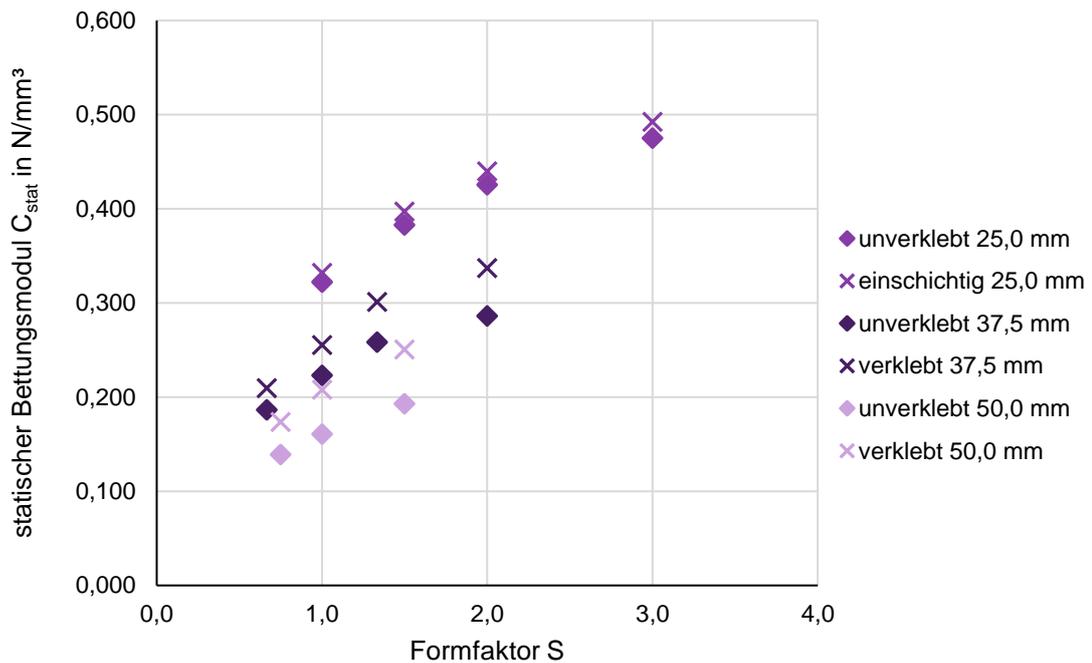


Abbildung 43: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten/einschichtigen und nicht verklebten Prüfkörpern – M08

Um die Unterschiede zwischen den jeweiligen Verbundzuständen zu verdeutlichen, sind in Tabelle 12 die prozentualen Abweichungen der Mittelwerte (Tabelle 10 und Tabelle 11) der verklebten beziehungsweise einschichtigen Prüfkörper zu den nicht verklebten berechnet.

Tabelle 12: Abweichung der Mittelwerte vom verklebten/einschichtigen zum nicht verklebten Zustand des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08

	M03	M08		M03	M08
S	25,0 mm		S	37,5 mm	
1,0	12,7 %	3,1 %	0,7	9,8 %	12,4 %
1,5	11,1 %	3,7 %	1,0	11,9 %	14,5 %
2,0	10,1 %	3,3 %	1,3	12,7 %	16,6 %
3,0	10,6 %	3,7 %	2,0	16,2 %	17,7 %
	50,0 mm				
0,8	17,3 %	25,0 %			
1,0	15,2 %	29,4 %			
1,5	17,8 %	29,9 %			

Bei den einschichtigen Prüfkörpern ist der Unterschied zu den gestapelten Prüfkörpern bei Werkstoff M03 prozentual größer als bei M08. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Raumdichten erklären. Bei den einschichtigen Prüfkörpern der Dicke 25,0 mm findet eine gleichmäßige Kraftübertragung statt. Bei den gestapelten Prüfkörpern ist durch das lose Aufeinanderstapeln eine Störstelle für die Kraftübertragung vorhanden. Durch das geringe Raumgewicht von M03 und die damit verbundene höhere Volumenkompressibilität wird zunächst einer der beiden gestapelten Prüfkörper komprimiert, bevor die Belastung den zweiten Prüfkörper komprimiert. Dadurch kommt es bei Werkstoffen mit geringer Raumdichte zu größeren Abweichungen.

Im Gegensatz dazu wirkt sich die Verklebung deutlich stärker auf den Bettungsmodul von Werkstoff M08 aus. Da es sich hierbei um einen geschlossenzelligen und deutlich steiferen Werkstoff handelt, hat die größere Behinderung der Querdehnung durch die Verklebung einen höheren Einfluss auf den Bettungsmodul. Bei den verklebten Prüfkörpern steigt die Abweichung mit steigendem Formfaktor bei gleicher Prüfkörperdicke. Dies ist die Folge der größeren Prüfkörpergrundfläche und die damit einhergehende größere Fläche der Verklebung. Dies zeigt auch deutlich bei Betrachtung der Regressionsgleichungen für M08. In Abbildung 44 sind die Verläufe der Regression über die Mittelwerte und die wachsenden Abweichungen mit steigendem Formfaktor grafisch dargestellt.

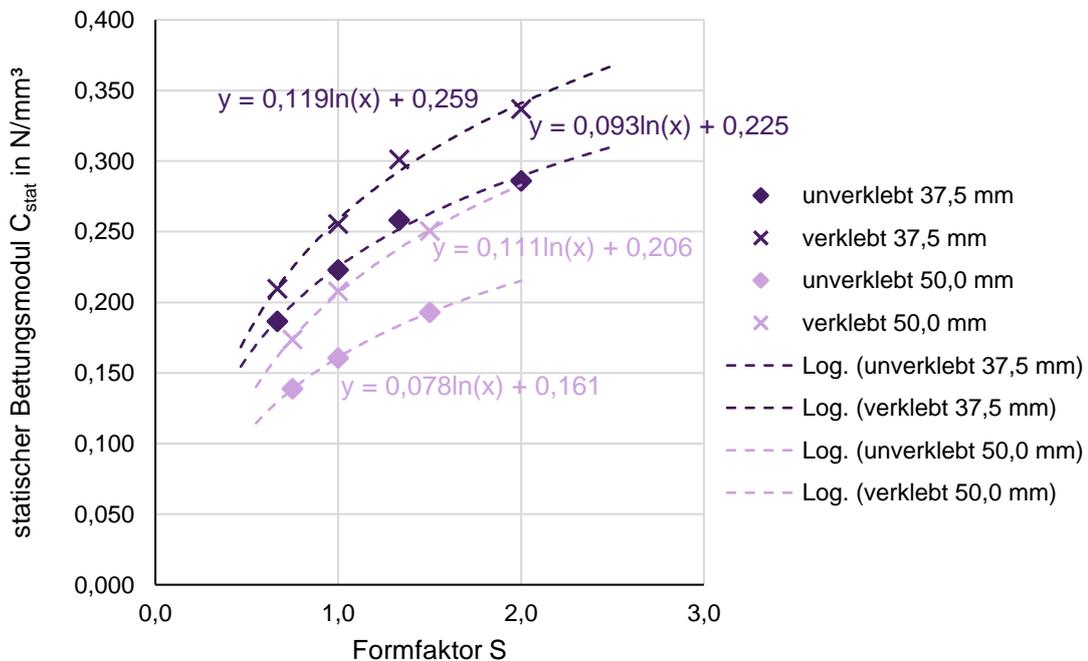


Abbildung 44: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten und nicht verklebten Prüfkörpern – M08 mit Regressionsverläufen $R^2 \geq 0,99$

5 Laborversuche

Die ermittelten Werte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz verhalten sich analog zu den statischen (Anlage A.5). Die Abweichungen befinden sich im gleichen Prozentbereich. Die ermittelten Mittelwerte aus jeweils sechs Einzelwerten des dynamischen Bettungsmoduls bei 5 Hz und die entsprechenden Abweichungen der einschichtigen bzw. verklebten zu den nicht verklebten Prüfkörpern sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Mittelwerte des dynamischen Bettungsmoduls bei 5 Hz von M03 und M08 für alle Verbundstypen

statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3						
M03			M08			
	nicht verklebt	einschichtig / verklebt	Abweichungen	nicht verklebt	einschichtig / verklebt	Abweichungen
S	25,0 mm					
1,0	0,1075	0,0970	10,8 %	0,3787	0,3623	4,5 %
1,5	0,1108	0,1021	8,5 %	0,4592	0,4431	3,6 %
2,0	0,1188	0,1104	7,6 %	0,5131	0,4870	5,4 %
3,0	0,1261	0,1182	6,7 %	0,5826	0,5628	3,5 %
	37,5 mm					
0,7	0,0668	n.v.	-	0,2371	0,2170	9,3 %
1,0	0,0716	n.v.	-	0,2946	0,2552	15,4 %
1,3	0,0791	0,0705	12,2 %	0,3474	0,2908	19,5 %
2,0	0,0822	0,0693	18,7 %	0,3931	0,3260	20,6 %
	50,0 mm					
0,8	0,0524	n.v.	-	0,1978	0,1578	25,4 %
1,0	0,0541	0,0499	8,5 %	0,2397	0,1852	29,4 %
1,5	0,0611	0,0522	17,1 %	0,2911	0,2210	31,7 %

Neben den bereits diskutierten Unterschieden in den Bettungsmodulwerten zwischen den verschiedenen Verbundstypen gibt es weitere Beobachtungen in Bezug auf die Streuung der Messergebnisse. Insbesondere ist zu erkennen, dass die Bettungsmodulwerte der verklebten Prüfkörper eine höhere Konsistenz und eine geringere Streuung beim Werkstoff M03 aufweisen. Im Gegensatz dazu weist der Werkstoff M08 aufgrund

seiner höheren Eigensteifigkeit bereits von Natur aus eine geringere prozentuale Streuung auf. Die Verklebung der Prüfkörper hat in diesem Fall keinen signifikanten Einfluss auf die Streuung der Messergebnisse. Als Verdeutlichung dient Tabelle 14, die die maximale prozentuale Abweichung vom Median in Abhängigkeit des Formfaktors aufzeigt.

Tabelle 14: Maximale, prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls C_{stat} vom Median in Anhängigkeit des Formfaktors für $h = 50,0 \text{ mm}$

S	Maximale, prozentuale Abweichung vom Median					
	Werkstoff M03			Werkstoff M08		
	0,7	1,0	1,5	0,7	1,0	1,5
nicht verklebt	2,8 %	3,1 %	1,6 %	1,5 %	0,9 %	1,3 %
verklebt	1,9 %	1,3 %	1,8 %	1,7 %	0,8 %	1,5 %

Abbildung 45 und Abbildung 46 welche über die geprüften Formfaktoren hinweg die statistischen Messergebnisse der Bettungsmoduln bei einer Prüfkörperdicke von $50,0 \text{ mm}$ aufzeigen, stellen die oben aufgeführte Aussage grafisch dar.

M03, $d = 50 \text{ mm}$, nicht verklebt

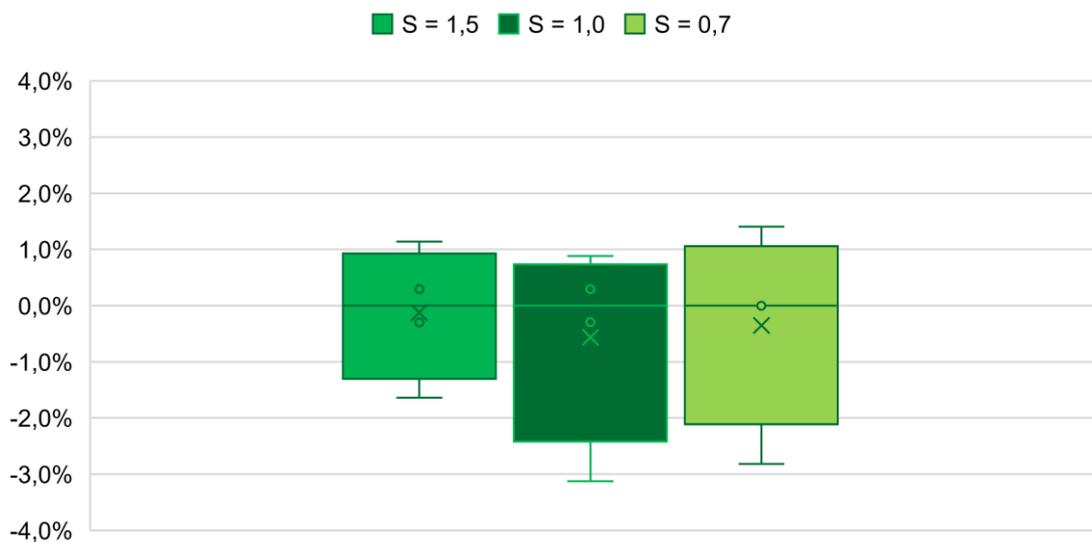


Abbildung 45: Streuung des Bettungsmoduls C_{stat} um den Median bei Werkstoff M03 – nicht verklebt für $h = 50,0 \text{ mm}$

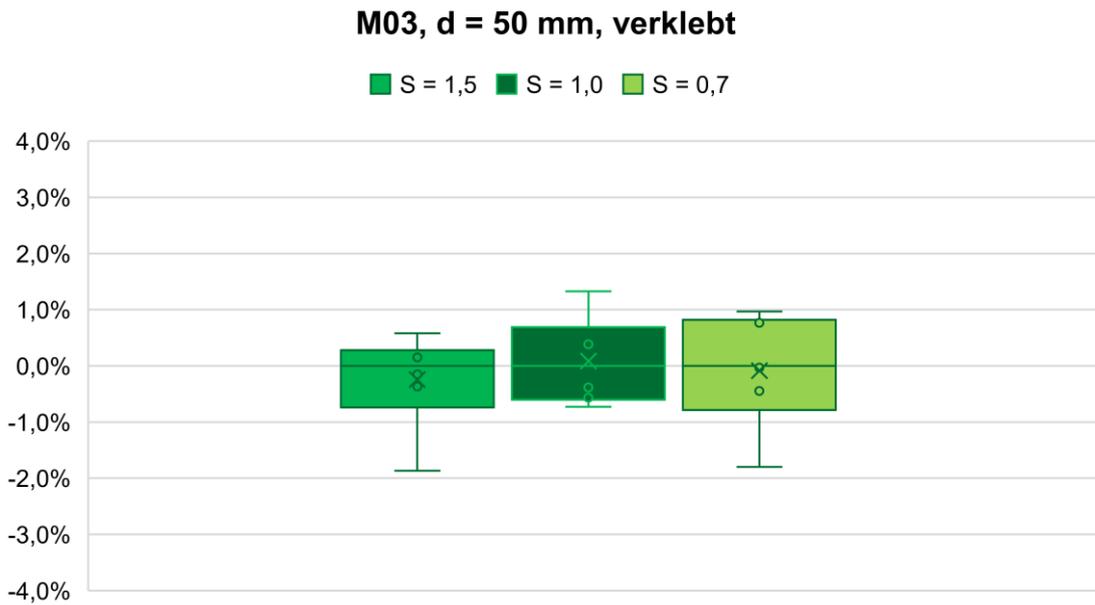


Abbildung 46: Streuung des Bettungsmoduls C_{stat} um den Median bei Werkstoff M03 – verklebt für $h = 50,0$ mm

In den beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der nicht verklebten Prüfkörpern über alle Formfaktoren hinweg eine größere Spannweite und folglich Streuung aufweisen. Beispielsweise ist bei Formfaktor 1 die Spannweite der nicht verklebten Prüfkörper doppelt so groß wie bei den verklebten Prüfkörpern. Demnach zeigen die verklebten Prüfkörper vom Werkstoff M03 eine höhere Homogenität auf. Die dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz weisen den gleichen Trend auf wie die statischen Werte. Die Abweichungen vom Median liegen bei allen Prüfkörperdicken und Formfaktoren im gleichen Prozentbereich (Anlage A.5). Auch wenn die Abweichungen geringe Prozentwerte aufweisen, so handelt es sich hierbei um einen systematischen Einfluss, der sich konstant über alle Formfaktoren hinweg zeigt. Systematische Einflüsse können und sollten durch Differenzierung, in diesem Fall des Verbundtypes, vermieden werden.

Zusammenfassend ist die getrennte Betrachtung der Ergebnisse von verklebten und nicht verklebten Prüfkörpern eine wichtige und sinnvolle Vorgehensweise, um die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu maximieren. Diese Herangehensweise ermöglicht eine differenzierte Analyse, eine detailliertere Bewertung und ein umfassenderes Verständnis des Bettungsverhaltens und der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe. Aufgrund dessen werden für alle Versuche die Ergebnisse

von verklebten bzw. einschichtigen und nicht verklebten Prüfkörpern getrennt voneinander betrachtet.

5.1.5 Prüfwerkstoff

Zielsetzung

Wie bereits im Kapitel 5.1.4 analysiert, spielt der Werkstoff eine große Rolle bezüglich der Streuung der Ergebnisse. Um möglichst aussagkräftige Analysen erarbeiten zu können, sollten die vorliegenden Prüfergebnisse eine möglichst hohe Homogenität aufweisen. Um diese zu quantifizieren, wurden für alle untersuchten Werkstoffe eine Kerndichteschätzung durchgeführt.

Dabei wird eine stetige Dichtefunktion zur Abschätzung der Verteilung aufgetragen [63]. Dafür werden die prozentualen Abweichungen der Bettungsmoduln der formgleichen Prüfkörper vom Median ermittelt. Der Median wird dem Mittelwert vorgezogen, da Ausreißer bei der kleinen Stichprobenmenge zu einer signifikanten Änderung des Mittelwerts führen können. Der Wert des Integrals der Dichtefunktion beträgt stets 1, da die Kurve die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Werte repräsentiert.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche werden an jeweils mindestens drei Prüfkörpern pro Formfaktor aus allen zehn unterschiedlichen Werkstoffe (M01 – M10) durchgeführt. Es werden Prüfkörper der Dicke 12,5 mm, 25,0 mm und 37,5 mm verwendet. Insgesamt werden für die Analyse der Homogenität der Prüfwerkstoffe Messergebnisse von über 500 Prüfkörpern herangezogen. Die Werte für alle dargestellten Abbildungen sind der Anlage A.6 zu entnehmen.

Ergebnisse

Um eine umfassende Einschätzung der Streuung innerhalb eines Werkstoffes zu erhalten, wird für jeden Werkstoff eine Kerndichteschätzung erstellt. Dabei werden die Einzelwerte für formgleiche Prüfkörper ermittelt und anschließend zu einer Funktion zusammengefasst. In Tabelle 15 und Tabelle 16 werden alle maximalen bzw. minimalen gemessenen Bettungsmoduln und die prozentuale Abweichung vom Median sowohl im statischen als auch im dynamischen Bereich zusammengefasst.

5 Laborversuche

Tabelle 15: Maximalen bzw. minimalen gemessenen Bettungsmoduln C_{stat} und $C_{dyn,5Hz}$ und die prozentuale Abweichung vom Median

Werkstoff	h in mm	S	min./max. C_{stat} in N/mm^3	Median in N/mm^3	Abwei- chung
M01	12,5	6,0	0,0323	0,0356	9,1 %
M02	25,0	1,3	0,0050	0,0055	8,9 %
M03	37,5	0,7	0,0478	0,0507	5,9 %
M04	25,0	2,0	0,4220	0,3925	7,5 %
M05	25,0	3,0	0,0348	0,0367	5,0 %
M06	25,0	3,0	0,1268	0,1499	15,4 %
M07	12,5	6,0	0,5357	0,5113	4,8 %
M08	37,5	0,7	0,1950	0,2100	7,1 %
M09	25,0	0,5	0,6160	0,6640	7,2 %
M10	25,0	0,7	1,0959	1,0755	2,3 %
Werkstoff	h in mm	S	min./max. $C_{dyn,5Hz}$ in N/mm^3	Median in N/mm^3	Abwei- chung
M02	25,0	3,0	0,0124	0,0116	6,4 %
M03	25,0	1,5	0,1070	0,1103	3,0 %
M04	25,0	2,0	0,4821	0,4551	5,9 %
M05	25,0	1,3	0,0359	0,0376	4,5 %
M06	25,0	3,0	0,1395	0,1613	13,5 %
M07	12,5	6,0	0,5816	0,5574	4,3 %
M08	37,5	0,7	0,2163	0,2333	7,3 %
M09	37,5	1,3	0,8302	0,7764	6,9 %
M10	25,0	1,2	1,7074	1,6884	4,2 %

5.1 Prüfkörper- und werkstoffbedingte Einflüsse

Tabelle 16: Maximalen bzw. minimalen gemessenen Bettungsmoduln $C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$ und $C_{\text{dyn},20\text{Hz}}$ und die prozentuale Abweichung vom Median

Werkstoff	h in mm	S	min./max. $C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$ in N/mm^3	Median in N/mm^3	Abwei- chung
M02	25,0	3,0	0,0145	0,0132	9,8 %
M03	25,0	1,3	0,1120	0,1149	2,6 %
M04	25,0	2,0	0,4989	0,4725	5,6 %
M05	37,5	0,7	0,0236	0,0246	3,9 %
M06	25,0	3,0	0,1432	0,1644	12,9 %
M08	37,5	0,7	0,2199	0,2379	7,5 %
M09	25,0	0,7	1,1361	1,2018	5,5 %
M10	25,0	0,7	1,1376	1,1855	4,0 %
Werkstoff	h in mm	S	min./max. $C_{\text{dyn},20\text{Hz}}$ in N/mm^3	Median in N/mm^3	Abwei- chung
M02	25,0	3,0	0,0169	0,0156	7,9 %
M03	37,5	0,7	0,0717	0,0701	2,3 %
M04	25,0	2,0	0,5113	0,4937	3,6 %
M05	25,0	1,5	0,0391	0,0380	2,9 %
M06	25,0	3,0	0,1525	0,1672	8,8 %
M08	37,5	0,7	0,2237	0,2427	7,8 %
M09	25,0	0,7	1,1553	1,2720	9,2 %
M10	12,5	1,0	2,6276	2,6679	1,5 %

In Tabelle 17 sind alle maximalen prozentualen Abweichungen der Bettungsmoduln vom Median sowohl statisch wie auch dynamisch bei 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz zusammengefasst. Diese prozentualen Abweichungen geben Aufschluss über die Bandbreite der Unterschiede in den Bettungsmoduln im Vergleich zum Medianwert. Sie dienen als Indikator für die mögliche Streuung der Werte.

Tabelle 17: Maximale prozentuale Abweichung der Bettungsmoduln vom Median

Werkstoff	C_{stat}	$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	$C_{\text{dyn},20\text{Hz}}$
M01	9,1 %	n.v.	n.v.	n.v.
M02	8,9 %	6,2 %	9,8 %	7,9 %
M03	5,9 %	3,0 %	2,6 %	2,1 %
M04	7,5 %	5,9 %	5,6 %	3,6 %
M05	5,0 %	4,3 %	3,9 %	2,9 %
M06	15,4 %	13,5 %	12,9 %	8,8 %
M07	2,9 %	4,3 %	n.v.	n.v.
M08	7,1 %	7,3 %	7,5 %	7,8 %
M09	7,2 %	4,7 %	5,5 %	9,2 %
M10	2,2 %	4,2 %	2,7 %	1,5 %

Exemplarisch sind die Kerndichteabschätzungen für die Werkstoffe M04 und M10 in Abbildung 47 und Abbildung 48 abgebildet. Die Abbildungen zeigen deutlich die hohe Dichte im Bereich des Medians, was darauf hinweist, dass die meisten Messwerte in der Nähe des Medianwerts konzentriert sind. Dies und die geringe Bandbreite deuten auf eine geringe Streuung und eine relativ homogene Verteilung der Kerndichte hin. Da die Fläche unter der Kurve nach Definition immer 1 ergibt, erhöht sich die Dichte im Bereich des Medians mit einer kleineren Bandbreite. Die jeweiligen maximalen Abweichungen vom Median aus Tabelle 17 sind in den Abbildungen markiert. Alle weiteren Darstellungen sowohl der statischen wie niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln können der Anlage A.6 entnommen werden.

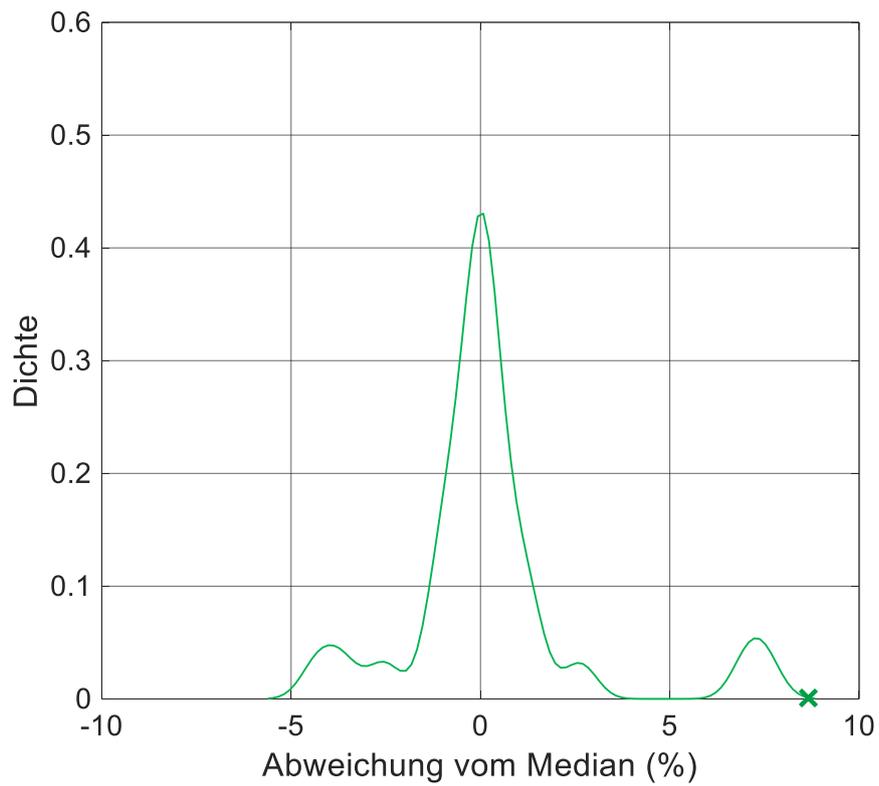


Abbildung 47: Kerndichteschätzung des Werkstoffs M04

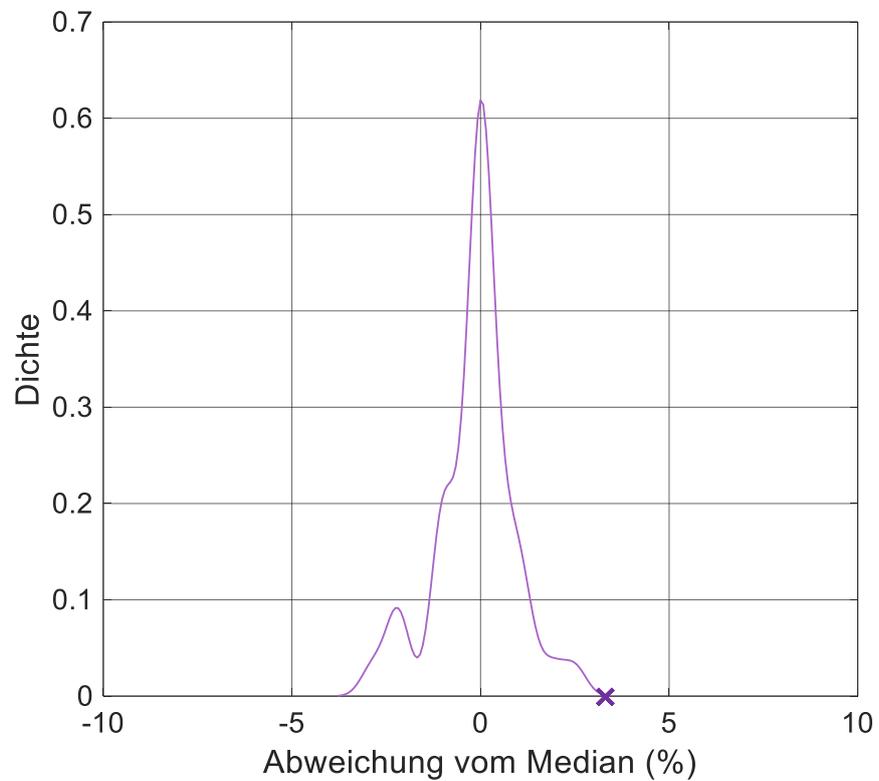


Abbildung 48: Kerndichteschätzung des Werkstoffs M10

5 Laborversuche

Das identische Verfahren wurde auch bei den Werten der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz angewandt. Hier wird ein analoges Verhalten zu den statischen Werten detektiert. Auch zwischen den unterschiedlichen Frequenzen ist das gleiche Verhalten zu erkennen. In Abbildung 49 ist dies exemplarisch an Werkstoff M03 dargestellt.

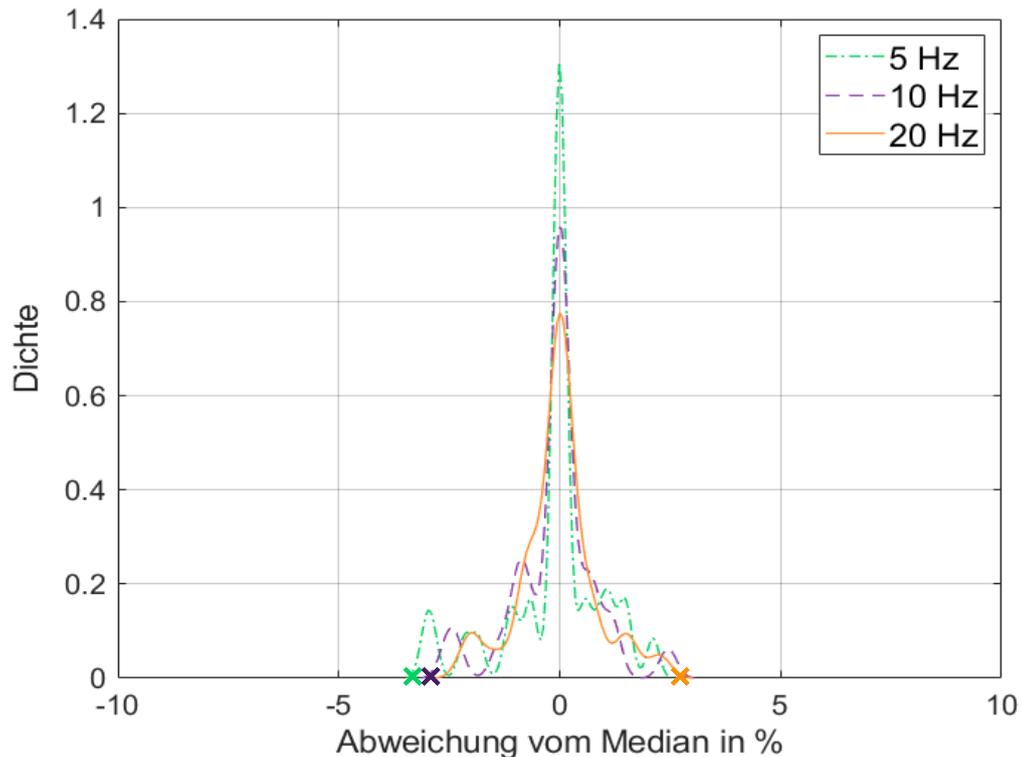


Abbildung 49: Kerndichteschätzung der dynamischen Bettungsmoduln für Werkstoff M03

Bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 17 fällt auf, dass alle Werkstoffe Abweichungen von $< 10\%$ aufweisen, mit Ausnahme des Werkstoffs M06. Durch genauere Analyse der einzelnen Bettungsmodulwerte dieses Werkstoffs lässt sich erkennen, dass alle hohen Abweichungen bei einem Prüfkörper gemessen wurden. Bei der Untersuchung des Prüfkörpers konnten Oberflächenunebenheiten entdeckt werden. Für diese wird das Lichtspaltverfahren angewendet [64]. Dabei erfolgt die Prüfung der Planheit mit einem Präzisions-Haarlineal. Abbildung 50 verdeutlicht die Funktionsweise. Das Licht, das unterhalb der Kante des Haarlineals hervortritt, zeigt, dass es sich hierbei um eine konkave Oberfläche des Prüfkörpers handelt.

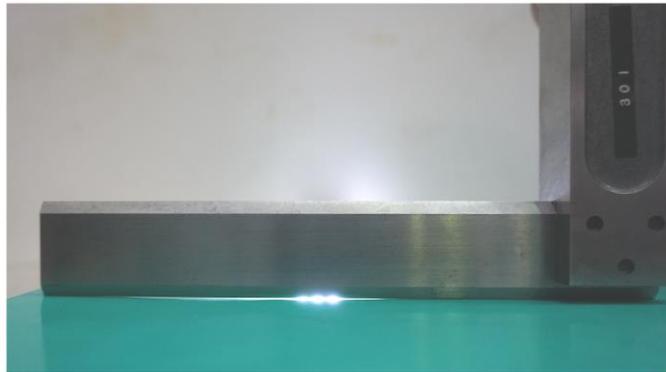


Abbildung 50: Aufgesetzter Haarwinkel auf der Oberseite des Prüfkörpers des Werkstoffs M06

Das Verfahren ist einfach durchführbar und dient als Indikator für Ungleichmäßigkeiten der Prüfkörperdicke. Zusätzlich wurde noch die Verifizierung der Prüfkörperdicke mit Messungen an gleichmäßig über die Grundfläche verteilten Punkten durchgeführt (Abbildung 51).

Referenz	+ 0,00	- 0,07	- 0,17
- 0,30	- 0,32	- 0,22	- 0,21
- 0,26	- 0,26	- 0,23	- 0,18
- 0,26	- 0,41	- 0,24	- 0,33

Abbildung 51: Messpunkteraster am Prüfkörper für ermittelte Höhenwerte in mm, bezogen auf die Referenzhöhe für den Werkstoff M06

Bei Betrachtung des Prüfkörpers des Werkstoffs M06 fällt auf, dass die Dicke über die gesamte Grundfläche hinweg Unterschiede aufweist. Besonders gut ersichtlich wird die Ungleichmäßigkeit der Prüfkörperdicke an den Ergebnissen des höherfrequent dynamischen Bettungsmoduls. Die hohen auftretenden Abweichungen sind bei allen drei Frequenzen nur bei der Vorlast $\sigma_{v,1}$ vorhanden. Alle weiteren Abweichungen bei den anderen Vorlasten liegen bei unter 10 %. Durch die geringe Krafteinwirkung bei der Vorlast $\sigma_{v,1}$ kommt es nicht zu einer vollständigen Verdrückung der Unebenheiten und die Krafteinwirkung wird nicht gleichmäßig auf die gesamte Oberfläche des Prüfkörpers

5 Laborversuche

übertragen. In Folge dessen kommt es zu deutlich geringeren Werten des Bettungsmoduls. In Abbildung 52 ist die Kerndichteabschätzung für den Werkstoff M06 inklusive der hohen Abweichungen des unebenen Prüfkörpers sichtbar.

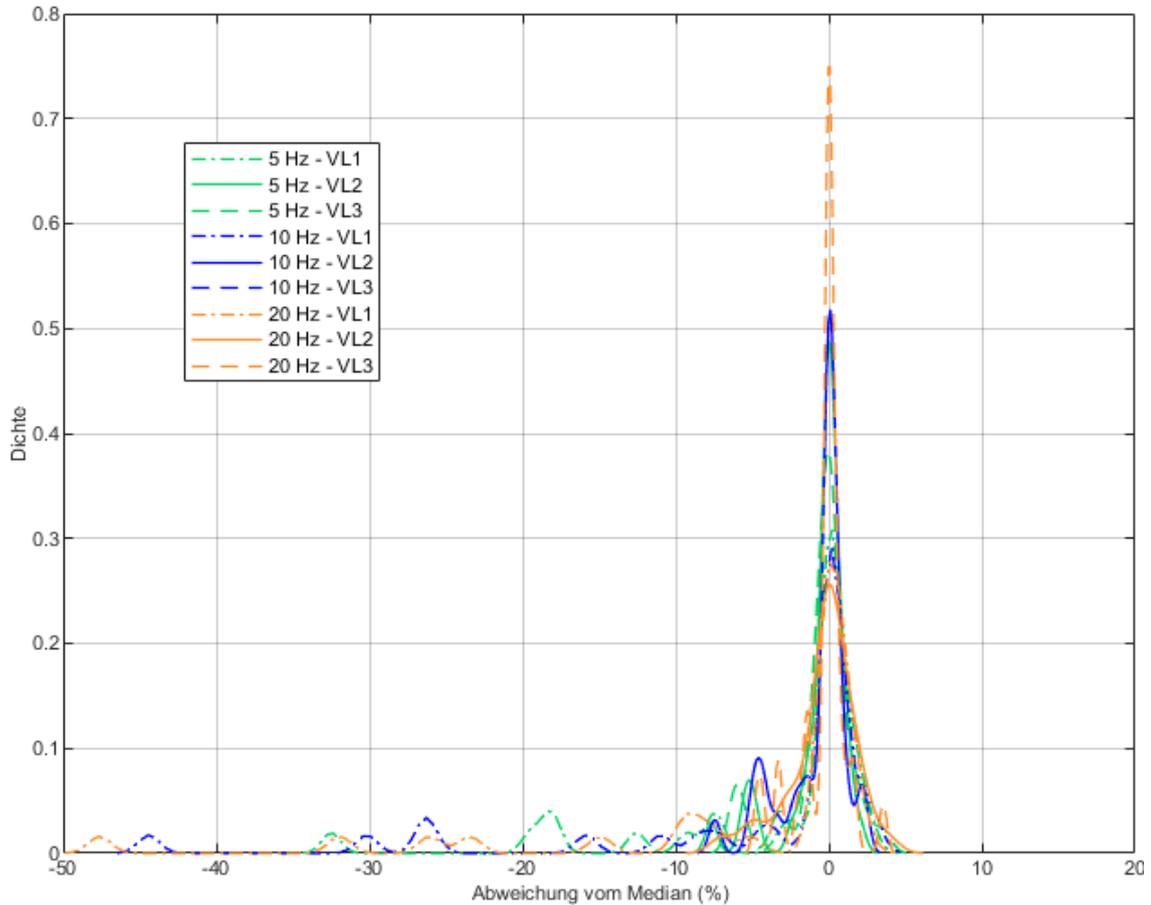


Abbildung 52: Kerndichteschätzung der höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln für Werkstoff M06

Aus diesen Gründen werden die Werte dieses Prüfkörpers nicht für weitere Analysen verwendet. Nach Eliminierung der Bettungsmodulergebnisse dieses Prüfkörpers aus der Wertemenge sinken die maximalen Abweichungen von Werkstoff M06 deutlich. Die Werte beim statischen Bettungsmodul liegen bei unter 3 %, beim niederfrequent dynamischen Bettungsmodul bei unter 4 % und bei höherfrequent dynamischen Bettungsmodul bei unter 6 %.

Aufgrund der analysierten Daten kann von hoher Homogenität der Messwerte bei jedem der untersuchten Werkstoffe ausgegangen werden. Somit werden nach Eliminierung der Werte des einen Prüfkörpers von Werkstoff M06 alle weiteren ermittelten Werte für die Analysen verwendet.

5.2 Prüfablaufbedingte Einflüsse

Zusätzlich zu den Werkstoffen und Prüfkörpern können auch Einflüsse auf den Bettungsmodul durch das Prüfprozedere entstehen. Durch die Verwendung von ausschließlich kalibrierter und geeigneter Messtechnik und Prüfmaschinen (Kapitel 4.2) können Einflüsse diesbezüglich minimiert werden. Jedoch stellt sich zusätzlich die Frage inwieweit festgelegte Parameter des Prüfablaufes Einfluss auf die Messergebnisse haben. Deshalb werden einige Parameter des Prüfungsablaufes und mögliche Änderungen untersucht.

5.2.1 Belastungszyklen

Zielsetzung

Bei Beginn der Versuchsdurchführungen war die Deutsche Norm DIN 45673-7:2010 für elastische Elemente von Masse-Feder-Systemen gültig. Seit dem März 2023 gilt die Europäische Norm DIN EN 17682:2023 für die Prüfung von Masse-Feder-Systemen. Bezüglich der Versuchsdurchführung sind die beiden Normen fast identisch. Jedoch liegt ein entscheidender Unterschied in der Anzahl der statischen Belastungszyklen vor. In der DIN EN 17682:2023 werden insgesamt fünf Belastungszyklen anstatt der bisherigen drei durchgeführt und die Auswertung des statischen Bettungsmoduls erfolgt am fünften Belastungszyklus. [10]

Es werden Versuche durchgeführt, um zu ermitteln, inwieweit diese Anhebung der Belastungszyklen einen Einfluss auf den Bettungsmodul haben. Hierfür erfolgt die Ermittlung des statischen Bettungsmoduls mit fünf Belastungszyklen. Es wird jeweils ein Wert für den Bettungsmodul aus dem dritten und fünften Belastungszyklus bestimmt und miteinander verglichen.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche werden an vier unterschiedlichen Werkstoffen (M01, M03, M07, M08) mit jeweils mindestens drei Prüfkörpern pro Formfaktor durchgeführt. Die Prüfkörper weisen dabei Dicken von 12,5 mm und 25,0 mm im einschichtigen Zustand und eine Dicke von 37,5 mm und 50,0 mm mit einer Verklebung auf. Insgesamt wurden dafür Versuche an 64 Prüfkörper durchgeführt. Alle Messergebnisse können Anlage A.7 entnommen werden.

5 Laborversuche

Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die Mittelwerte der jeweiligen statischen Bettungsmoduln der verschiedenen Werkstoffe bei unterschiedlichen Prüfkörperformaten. Alle Prüfkörper werden mit fünf Belastungszyklen belastet. Die Auswertung erfolgt jeweils am dritten und am fünften Belastungszyklus. Zusätzlich sind die einzelnen Abweichungen der Ergebnisse vom fünften Belastungszyklus zum dritten Belastungszyklus aufgelistet. Durch die Durchführung aller Belastungszyklen mit der identischen Einbausituation für jeden Prüfkörper können Einflüsse durch den Einbau ausgeschlossen werden.

Tabelle 18: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln der Werkstoffe M01 und M03 bei unterschiedlichen Prüfkörperformaten bei Belastungszyklus drei und fünf und Abweichungen

	statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3	
	M01	M03
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm	300 mm x 300 mm x 37,5 mm
$C_{stat,3}$	0,0345	0,0605
$C_{stat,5}$	0,0343	0,0605
Abweichung	0,5 %	0,0 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm	300 mm x 300 mm x 50,0 mm
$C_{stat,3}$	0,0186	0,0443
$C_{stat,5}$	0,0187	0,0440
Abweichung	0,8 %	0,7 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm	250 mm x 200 mm x 37,5 mm
$C_{stat,3}$	0,0132	0,0605
$C_{stat,5}$	0,0132	0,0604
Abweichung	0,0 %	0,2 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm	200 mm x 200 mm x 50,0 mm
$C_{stat,3}$	0,0098	0,0426
$C_{stat,5}$	0,0097	0,0425
Abweichung	0,9 %	0,1 %

Tabelle 19: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln der Werkstoffe M07 und M08 bei unterschiedlichen Prüfkörperformaten bei Belastungszyklus drei und fünf

	M07	M08
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm	300 mm x 300 mm x 37,5 mm
$C_{stat,3}$	0,5126	0,2861
$C_{stat,5}$	0,5137	0,2857
Abweichung	0,2 %	0,1 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm	300 mm x 300 mm x 50,0 mm
$C_{stat,3}$	0,2666	0,1929
$C_{stat,5}$	0,2670	0,1927
Abweichung	0,2 %	0,1 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm	250 mm x 200 mm x 37,5 mm
$C_{stat,3}$	0,1723	0,2583
$C_{stat,5}$	0,1723	0,2584
Abweichung	0,0 %	0,0 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm	200 mm x 200 mm x 50,0 mm
$C_{stat,3}$	0,1212	0,1606
$C_{stat,5}$	0,1212	0,1607
Abweichung	0,0 %	0,0 %

Exemplarisch zeigen Abbildung 53 und Abbildung 54 die einzelnen statistischen Bettungsmodulwerte, die am dritten und fünften Belastungszyklus für die Werkstoffe M01 und M07, ermittelt wurden.

5 Laborversuche

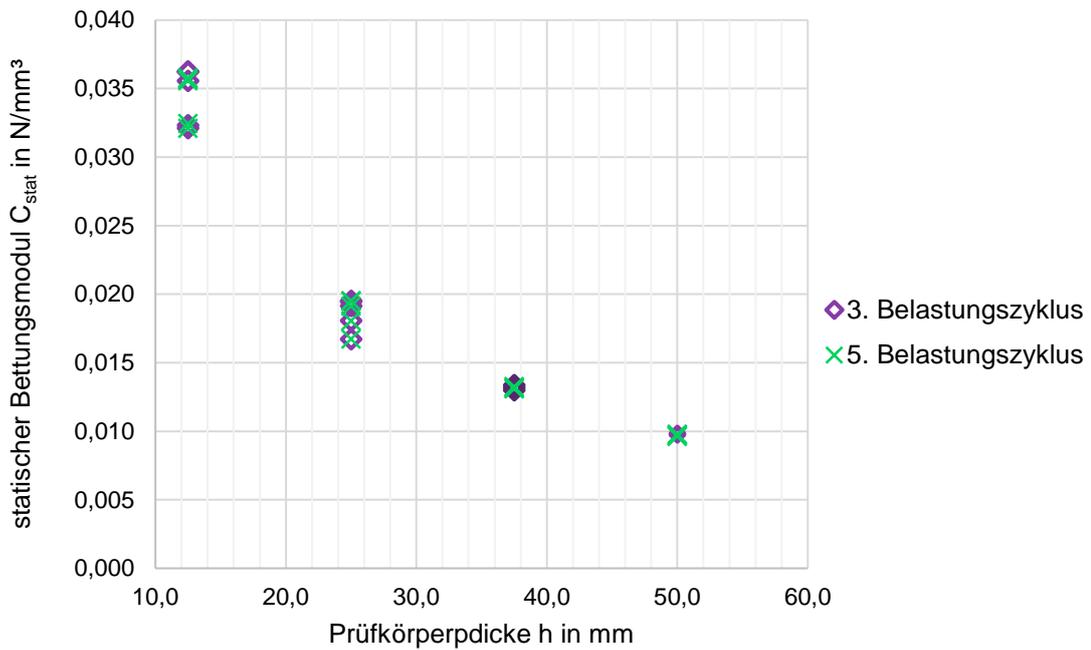


Abbildung 53: Statischer Bettungsmodul C_{stat} , ermittelt am dritten und fünften Belastungszyklus für Werkstoff M01

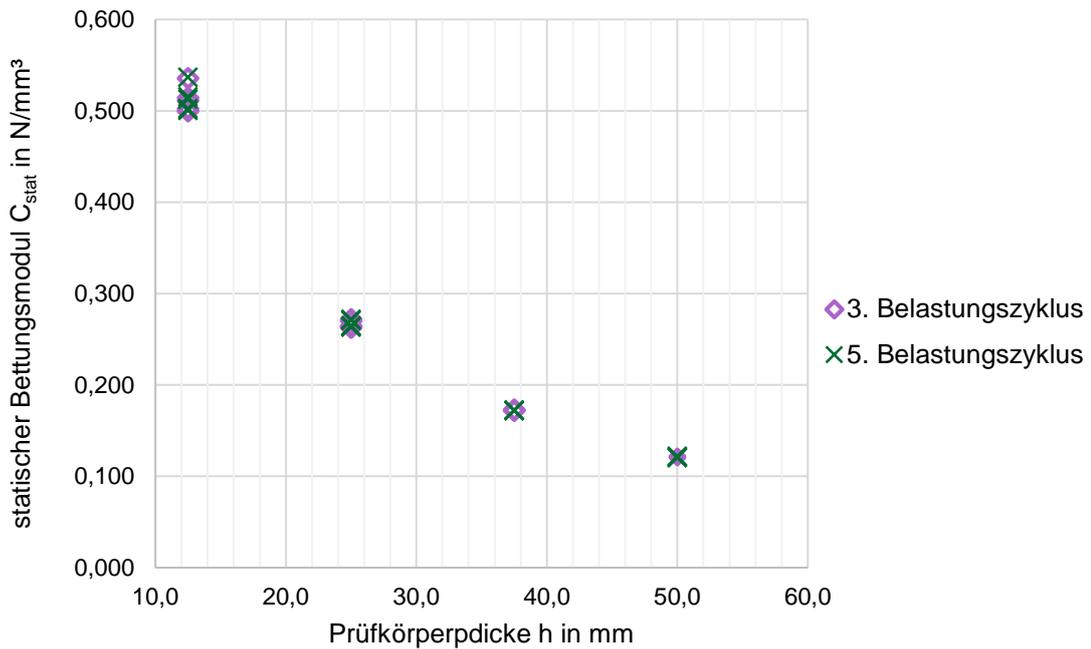


Abbildung 54: Statischer Bettungsmodul C_{stat} , ermittelt am dritten und fünften Belastungszyklus für Werkstoff M07

Die analysierten Daten zeigen, dass die Unterschiede zwischen der Auswertung aus dem dritten und dem fünften Belastungszyklus minimal sind. Bei allen Werkstoffen und Formfaktoren liegen die Abweichungen der Mittelwerte bei weniger als 1 %. Dies deutet

darauf hin, dass die Werte im dritten Belastungszyklus eine repräsentative und konsistente Darstellung des statischen Bettungsmoduls liefern.

Basierend auf den Erkenntnissen, die aus diesen Versuchen gewonnen wurden, wird daher beschlossen, die Werte für alle statischen Bettungsmoduln aus dem dritten Belastungszyklus zu ermitteln. Diese Entscheidung basiert auf der geringen Variation und der hohen Übereinstimmung der Messergebnisse in diesem spezifischen Belastungszyklus.

5.2.2 Belastungsgeschwindigkeit

Zielsetzung

Sowohl in der DIN 45673-7:2010 als auch der DIN EN 17682:2023 ist die Geschwindigkeit für die Zunahme der Pressung für Flächenlager auf 0,01 (N/mm²)/s festgelegt. Somit nimmt nur die Größe des Prüfkörpers Einfluss auf die absolute Prüfgeschwindigkeit. Bei der vorgegebene Prüfkörpergröße von 300 mm x 300 mm ergibt sich für Flächenlager jedes beliebigen elastomeren Werkstoffs eine Belastungsgeschwindigkeit von 0,9 kN/s. Die anzufahrende Oberlast wird für jedes Projekt spezifisch festgelegt. Mit steigender Raumdichte des jeweiligen Werkstoffs steigt auch die mögliche Oberlast an.

Die festgelegte Prüfgeschwindigkeit führt zu zwei grundlegenden Problemen. Zum einen führen geringe anzufahrende Oberlasten zu einer großen maschinentechnischen Herausforderung, da ein Belastungszyklus innerhalb weniger Sekunden stattfinden muss. Hingegen steigt bei hohen Oberlasten die Prüfungsdauer deutlich an, sodass ein Belastungszyklus mehrere Minuten in Anspruch nehmen kann.

Inwieweit die Prüfgeschwindigkeit Einfluss auf den Bettungsmodul hat, wurde anhand von vier verschiedenen Geschwindigkeiten analysiert. Die Prüfungen wurden an denselben Prüfkörpern bei halber, einfacher, doppelter und dreifacher Geschwindigkeit durchgeführt.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Die Versuche wurden an vier unterschiedlichen Werkstoffen (M01, M03, M07, M08) mit jeweils mindestens drei Prüfkörpern pro Formfaktor durchgeführt. Um eine mögliche Änderung mit verändertem Formfaktor sowohl über die Prüfkörperdicke als auch Grundfläche feststellen zu können, werden die Prüfkörper, abweichend von der Norm, in unter-

schiedlichen Formaten geprüft. Die Prüfkörper vom Werkstoff M01 und M07 wiesen dabei vier verschiedene Dicken von 12,5 mm, 25,0 mm, 37,5 mm und 50,0 mm und eine Grundfläche von 300 mm x 300 mm auf. Die Prüfkörper der Werkstoffe M03 und M08 wiesen die beiden Dicken 37,5 mm und 50,0 mm auf und wurden mit drei unterschiedlichen Grundflächengrößen geprüft. Alle Prüfkörper waren einschichtig bzw. verklebt.

Da beim Werkstoff M01 bei einer Grundflächengröße von 90.000 mm² ein Be- und Entlastungszyklus nur 3,6 Sekunden dauert, wurden hier die Prüfungen nur bei halber und einfacher Geschwindigkeit durchgeführt. Für die Auswertungen wurden die Messergebnisse von 154 Prüfkörpern herangezogen. Alle Messergebnisse können Anlage A.8 entnommen werden.

Ergebnisse

In den vorliegenden Daten in Tabelle 20 und Tabelle 21 wurden die Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für die verschiedenen Werkstoffe bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten und Prüfkörpergeometrien erfasst. Zwischen den einzelnen Prüfungen desselben Prüfkörpers wurde eine Mindestwartezeit von 24 Stunden eingehalten.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass die Prüfgeschwindigkeit nur einen geringfügigen Einfluss auf den statischen Bettungsmodul aufweist. Die Abweichungen der gemessenen Werte im Vergleich zur Normalgeschwindigkeit liegen alle unterhalb bei maximal 3,9 %. Dies deutet darauf hin, dass sich der statische Bettungsmodul bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten nur unwesentlich verändert.

Es lässt sich aus den vorliegenden Daten kein klarer schematischer Zusammenhang zwischen der Prüfgeschwindigkeit und anderen Eigenschaften wie der Werkstoffdichte oder der Steifigkeit ableiten. Die gemessenen Werte zeigen keine konsistente Beziehung, die darauf hinweisen würde, dass die Prüfgeschwindigkeit einen vorhersagbaren Einfluss auf diese Eigenschaften hat.

Tabelle 20: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für die alle untersuchten Prüfkörpergeometrien der verschiedenen Werkstoffe M01 und M03 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit

	M01		M03			
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm		300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,0331	0,0345	0,0600	0,0605	0,0613	0,0614
Abweichung	3,9 %	-	0,9 %	-	1,3 %	1,5 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm		300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,0181	0,0186	0,0437	0,0443	0,0452	0,0453
Abweichung	2,4 %	-	1,5 %	-	2,0 %	2,3 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm		250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,0127	0,0132	0,0595	0,0605	0,0613	0,0618
Abweichung	3,8 %	-	1,6 %	-	1,4 %	2,2 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm		200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,0098	0,0098	0,0419	0,0426	0,0432	0,0436
Abweichung	0,3 %	-	1,6 %	-	1,3 %	2,4 %

5 Laborversuche

Tabelle 21: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für die alle untersuchten Prüfkörpergeometrien der verschiedenen Werkstoffe M07 und M08 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit

M07				
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,5247	0,5126	0,5286	0,5134
Abweichung	2,4 %	-	3,1 %	0,1 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,2727	0,2666	0,2744	0,2675
Abweichung	2,3 %	-	3,0 %	0,4 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,1754	0,1723	0,1763	0,1743
Abweichung	1,8 %	-	2,3 %	1,2 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,1208	0,1212	0,1233	0,1220
Abweichung	0,3 %	-	1,8 %	0,7 %
M08				
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,2877	0,2861	0,2883	0,2911
Abweichung	0,5 %	-	0,8 %	1,7 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,1931	0,1929	0,1937	0,1954
Abweichung	0,1 %	-	0,4 %	1,3 %
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$C_{stat,3}$	0,2608	0,2583	0,2642	0,2650
Abweichung	0,9 %	-	2,3 %	2,6 %
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$C_{stat,3}$	0,1631	0,1606	0,1657	0,1665
Abweichung	1,6 %	-	3,2 %	3,6 %

Betrachtet man die Abweichung der Bettungsmodulwerte innerhalb eines Werkstoffs zeigt sich, dass diese größer sind als die Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Abbildung 55 zeigt zur Veranschaulichung die Streuung der Bettungsmoduln exemplarisch am Werkstoff M07.

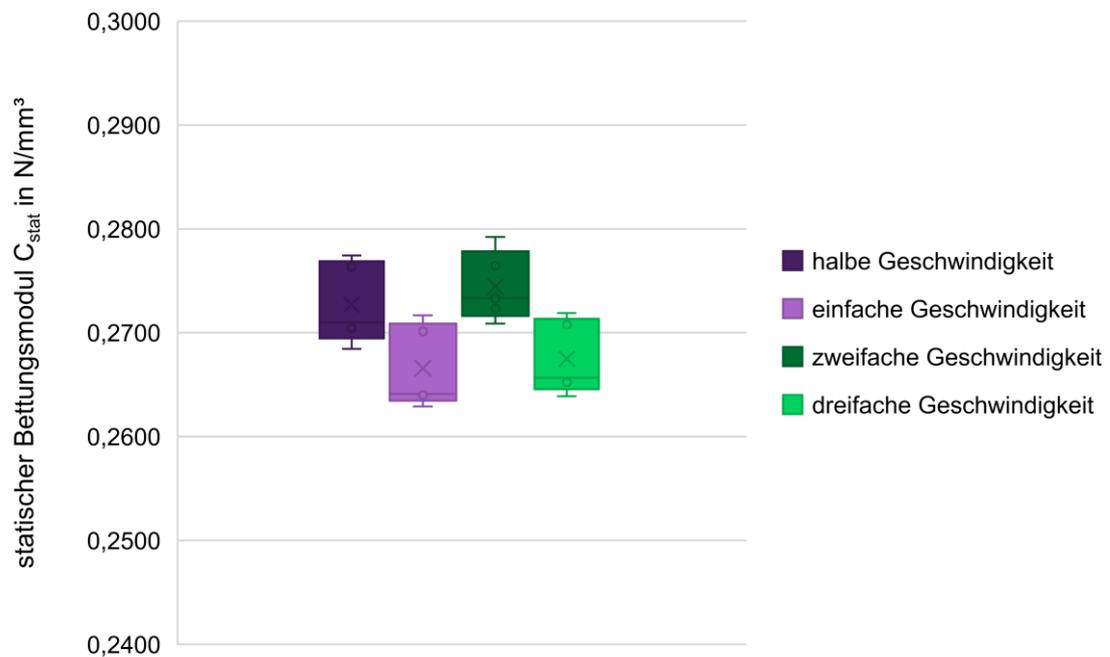


Abbildung 55: Streuung der statischen Bettungsmodulwerte um den Median bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten für den Werkstoff M07 für eine Prüfkörperdimension von 300 mm x 300 mm x 25,0 mm

Somit sind die auftretenden Abweichungen der Bettungsmoduln auf die Prüfkörper und den nicht identischen Prüfeinbau zurückzuführen und steht nicht im direkten Zusammenhang zur Prüfgeschwindigkeit.

Wie in den Normen für die Prüfung von elastischen Komponenten, die DIN EN 17682:2023, DIN EN 17282:2020 oder die DIN EN 16730:2016 festgelegt ist, wird der dynamische Bettungsmodul mit einer Belastungspause von 60 Sekunden im Anschluss an den statischen Bettungsmodul ermittelt. Um einen möglichen Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die dynamischen Bettungsmoduln zu erfassen, wurden diese ebenfalls für jede Geschwindigkeit erfasst. In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die Mittelwerte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz vom Werkstoff M03, M07 und M08 aufgeführt.

5 Laborversuche

Tabelle 22: Mittelwerte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz der Werkstoffe M03 und M07 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des dynamischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit

M03				
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,0727	0,0693	0,0721	0,0723
Änderung	0,9 %	-	0,1 %	0,3 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,0519	0,0522	0,0532	0,0520
Änderung	0,5 %	-	1,9 %	0,3 %
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,0703	0,0705	0,0707	0,0704
Änderung	0,2 %	-	0,3 %	0,1 %
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,0499	0,0499	0,0503	0,0499
Änderung	0,1 %	-	0,8 %	0,1 %
M07				
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,5676	0,5574	0,5672	0,5543
Änderung	1,8 %	-	1,8 %	0,6 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,2922	0,2846	0,2909	0,2852
Änderung	2,7 %	-	2,2 %	0,2 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,1871	0,1839	0,1868	0,1838
Änderung	1,7 %	-	1,6 %	0,1 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,1292	0,1301	0,1313	0,1297
Änderung	0,6 %	-	0,9 %	0,3 %

Tabelle 23: Mittelwerte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz des Werkstoffs M08 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des dynamischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit

M08				
Geschwindigkeit	0,5-fach	1-fach	2-fach	3-fach
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,3353	0,3260	0,3342	0,3320
Änderung	2,8 %	-	2,5 %	1,8 %
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,2253	0,2210	0,2279	0,2243
Änderung	1,9 %	-	3,1 %	1,5 %
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,2947	0,2958	0,2976	0,2991
Änderung	0,4 %	-	0,6 %	1,1 %
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$C_{dyn,5Hz}$	0,1874	0,1852	0,1872	0,1878
Änderung	1,2 %	-	1,1 %	1,4 %

Aus diesen Werten geht hervor, dass die Prüfgeschwindigkeit keinen erkennbaren Einfluss auf die dynamischen Bettungsmoduln hat. Wie in den Tabellen zu sehen ist, liegen alle Abweichungen im Vergleich zur Normalgeschwindigkeit bei maximal 3,1 %. Auch lässt sich kein schematischer Zusammenhang zwischen der Prüfgeschwindigkeit und der Werkstoffdichte oder der Steifigkeit erkennen.

Durch die Analyse der Daten kann geschlossen werden, dass die Prüfgeschwindigkeit im untersuchten Rahmen keinen nennenswerten Einfluss auf die Bettungsmodulwerte hat. Deshalb ist eine Anpassung der Prüfgeschwindigkeit nach anzufahrenden Oberlasten zu empfehlen.

5.3 Werkstofffunktion

Zielsetzung

Sowohl in der DIN 45673-7:2010 als auch der DIN EN 17682:2023 ist die Prüfkörpergröße für Flächenlager auf 300 mm x 300 mm x Einbaudicke festgelegt. Dies soll das Vergleichen von Versuchsergebnissen unterschiedlicher Werkstoffe von verschiedenen Herstellern vereinfachen und beispielsweise bei Ausschreibungen einen besseren Überblick gewährleisten. Jedoch ist es fraglich, ob für Eigenüberwachungen und Rückstellmuster diese vorgegebene Geometrie notwendig ist. Anhand der vorliegenden Daten wird für jeden Werkstoff eine mathematische Funktion herausgearbeitet, auf deren Basis der Bettungsmodul eines Prüfkörpers mit beliebiger Geometrie berechnet werden kann.

Prüfwerkstoff und Prüfkörper

Es werden alle ermittelten Versuchswerte für jeden der 10 Werkstoffe (M01 – M10) in den jeweils vorliegenden Dicken von 12,5 mm, 25,0 mm, 37,5 mm und 50,0 mm verwendet. Pro Formfaktor und Dicke liegen Werte von mindestens drei Prüfkörpern vor. Da für einige Werkstoffe nur Prüfkörper mit zwei unterschiedlichen Dicken vorliegen, konnte hier keine dickenabhängige Funktion hergeleitet werden. In diesem Fall wird jeweils eine Funktion für jede vorliegende Dicke pro Werkstoff angegeben.

Ergebnisse

Diese Vorgehensweise wird exemplarisch am Werkstoff M08 dargestellt, da für diesen Werkstoff die meisten Bettungsmodulwerte vorliegen. Insgesamt werden für die Herleitung der Funktion für den Werkstoff M08 Messergebnisse von 90 Prüfkörpern herangezogen. Die Funktionen der weiteren Werkstoffe können der Anlage A.9 entnommen werden. Für die Herleitung der mathematischen Funktion werden in einem ersten Schritt alle vorliegenden Messergebnisse für den Werkstoff M08 zusammengefasst und jeweils in dem einschichtigen/verklebten und unverklebten Zustand unterschieden. In Abbildung 56 sind die gesamten Messergebnisse für den statischen Bettungsmodul über alle geprüften Formfaktoren im einschichtigen/verklebten Zustand dargestellt.

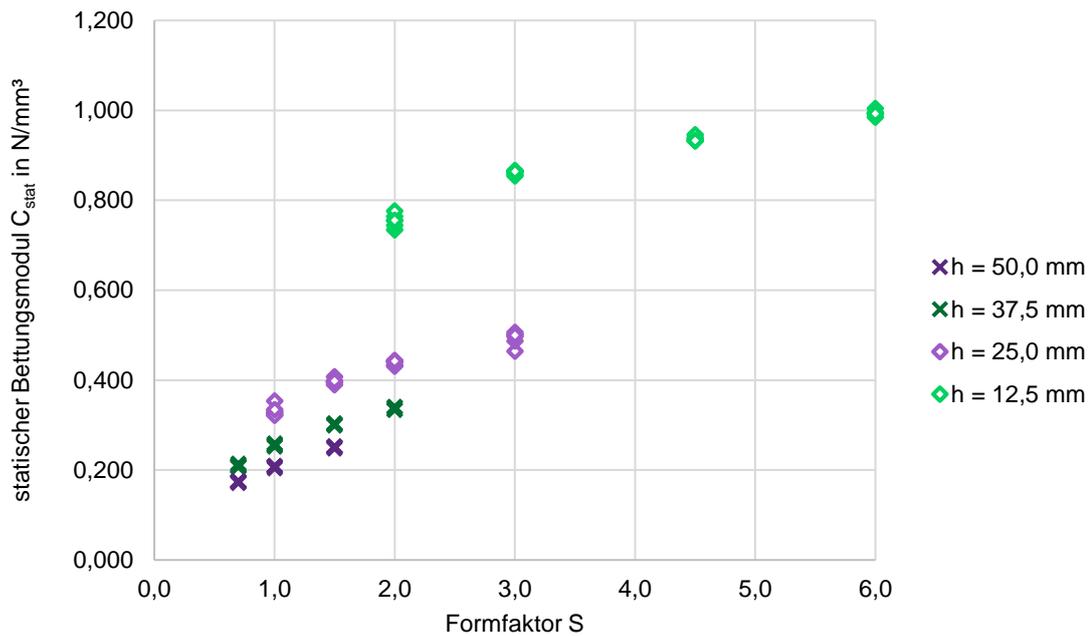


Abbildung 56: Statischer Bettungsmodul Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt

In einem nächsten Schritt wird über alle vier Prüfkörperdicken jeweils eine Regressionsfunktion mit Hilfe der Softwareprogramms IBM SPSS® Statistics gebildet. Hierfür werden über die einzelnen Messergebnisse Mittelwerte der jeweiligen Dicke über die Formfaktoren gebildet und diese in einem Diagramm aufgetragen. Danach wird anhand dieser Mittelwerte die Regressionsfunktion berechnet. Das höchste Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,99$ konnte mit einer logarithmischen Funktion für den ausgewählten Bereich von $S = 0,7$ bis $S = 6,0$ erzielt werden. Nachfolgender Abbildung 57 können die bestimmten Funktionen entnommen werden. Anhand der Verläufe der einzelnen Regressionsfunktionen ist eine starke Parallelität der Verläufe zu erkennen. Dies lässt vermuten, dass das Herleiten einer mathematischen Gleichung für einen Werkstoff realisierbar ist.

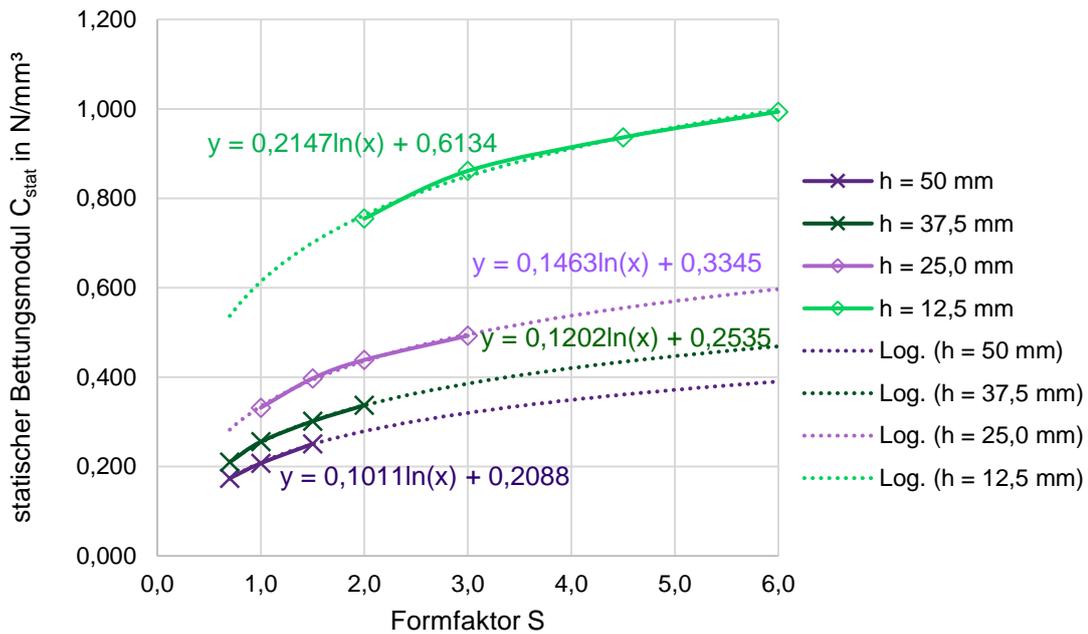


Abbildung 57: Regressionsfunktion der statischen Bettungsmodulwerte vom Werkstoff M08 über alle Prüfkörperdicken – einschichtig/verklebt

Aufgrund der begrenzt vorliegenden Prüfkörperanzahl konnten bei einigen Formfaktoren die Bettungsmoduln nur bei bestimmten Prüfkörperdicken ermittelt werden. Um jedoch eine größere Datenbasis zu erhalten, werden weitere Bettungsmodulwerte durch Extrapolation generiert. Diese beruht auf den ermittelten Funktionsgleichungen und erfolgte für jede Prüfkörperdicke individuell. Somit liegen für alle sieben geprüften Formfaktoren Werte für die vier Prüfkörperdicken vor. Die Werte können Anlage A. 9. 1 entnommen werden.

Alle Funktionen weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Somit werden in einem nächsten Schritt aus den ermittelten und berechneten Bettungsmoduln die Mittelwerte der Bettungsmoduln über die Prüfkörperdicke für jeden Formfaktor gebildet \overline{C}_h . Anschließend werden die Mittelwerte der Bettungsmoduln bezogen auf die Probendicke von 25,0 mm zueinander ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 24). Diese Referenzdicke von 25,0 mm wurde ausgewählt, da sie die am häufigsten produzierte Dicke ist und alle anderen Prüfkörperdicken durch Spalten oder Verkleben aus dieser entstehen.

$$Q = \frac{\overline{C}_h}{C_{25,0}} \quad (5-1)$$

Tabelle 24: Werte zur Berechnung des Faktors Q

h in mm	\bar{C}_h in N/mm ³	Q
12,5	0,7709	1,74
25,0	0,4418	1,00
37,5	0,3417	0,77
50,0	0,2830	0,64

Das Verhältnis des sich hieraus ergebenden Faktors, der im Weiteren Q genannt wird, kann mit einer Potenzfunktion annäherungsweise beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß der angenäherten Potenzfunktion liegt bei $R^2 > 0,99$ für die ausgewählten Prüfkörperdicken. Da die Funktionsverläufe in Abbildung 57 der unterschiedlichen Prüfkörperdicken einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen, wird in einem nächsten Schritt geprüft, ob die Näherung mit dem Faktor Q schon für eine Berechnung ausreicht. Hierfür werden die gemessenen Werte und die anhand der Trendlinien und dem Faktor Q berechneten Werte verglichen. Die verwendete Formel mit dem farblich hinterlegten Faktor Q lautet:

$$C_{\text{stat},M08,v} = 10,64 \cdot h^{-0,723} \cdot (0,1463 \cdot \ln(S) + 0,3345) \quad (5-2)$$

Abbildung 58 zeigt grafisch die Funktionsverläufe der berechneten und gemessenen Werte für alle Prüfkörperdicken.

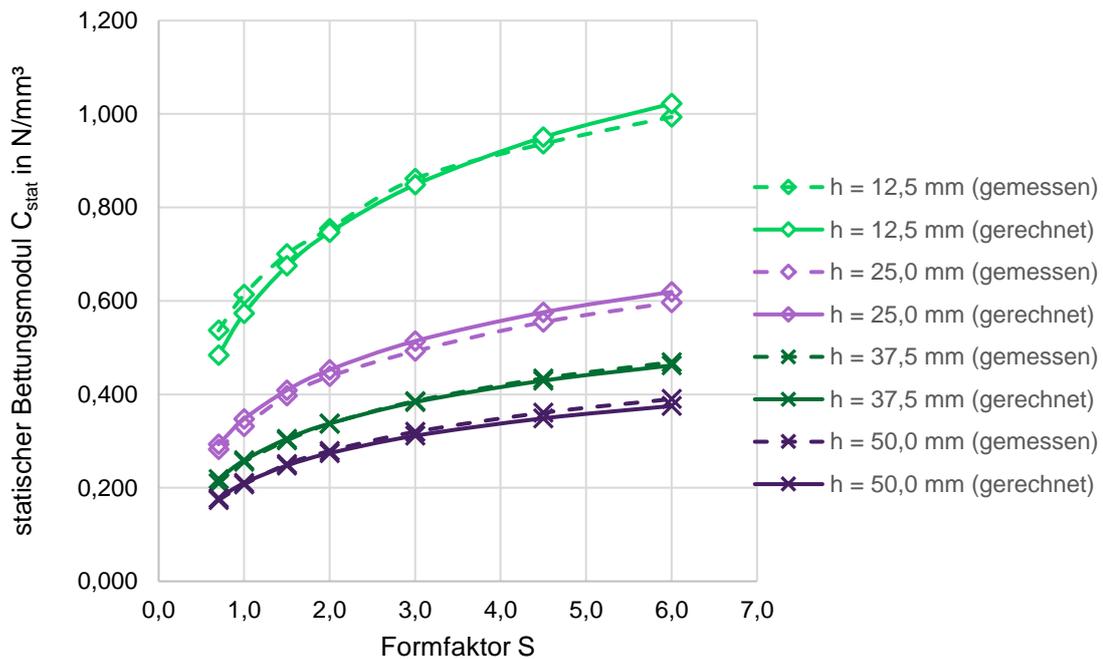


Abbildung 58: Vergleich der statischen Funktionsverläufe der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels des Faktors Q – einschichtig/verklebt

Bei den Prüfkörperdicken 25,0 mm, 37,5 mm und 50,0 mm ist eine große Übereinstimmung der Werte zu verzeichnen. Jedoch kommt es zu großen Abweichungen bei der Prüfkörperdicke von 12,5 mm. Hier liegen Abweichungen von knapp 10 % vor (Anlage A. 9. 3). Um eine verbesserte Funktionsgleichung zu entwickeln und genauere Berechnungen für den Bettungsmodul bei verschiedenen Prüfkörperdicken zu ermöglichen, ist es daher notwendig, die Annäherungsfunktion anzupassen. Somit werden in einem nächsten Schritt die bestehenden Gleichungen überarbeitet, um die spezifischen Abweichungen bei der Prüfkörperdicke von 12,5 mm besser zu berücksichtigen und in die Berechnungen einzubeziehen.

Es wird jeweils ein zusätzlicher Faktor für die Krümmung und für den y-Achsenabschnitt eingeführt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird der Referenzwert für die Probendicke auf 25,0 mm festgelegt. Anschließend werden die Werte der Krümmung (t_h) und des y-Achsenabschnitts (n_h) der einzelnen Funktionen der Prüfkörperdicken erneut in Bezug auf diesen Referenzwert gesetzt. Diese Werte können den angegebenen Funktionsgleichungen in Abbildung 57 entnommen werden und sind in Tabelle 25 aufgelistet.

$$t = \frac{t_h}{t_{25,0}} \quad (5-3)$$

$$n = \frac{n_h}{n_{25,0}} \quad (5-4)$$

Tabelle 25: Werte zur Berechnung der Faktoren t und m

h in mm	t_h	t	n_h	n
12,5	0,6134	1,83	0,2147	1,47
25,0	0,3345	1,00	0,1463	1,00
37,5	0,2535	0,76	0,1202	0,82
50,0	0,2088	0,62	0,1011	0,69

In den nachfolgenden Abbildungen werden der Verlauf des Faktors "t", der den y-Achsenabschnitt repräsentiert, und der Faktor "n" für die Krümmung für den Werkstoff M08 im einschichtigen/verklebten Zustand dargestellt. Diese Abbildungen visualisieren die Beziehung zwischen den Prüfkörperdicken und den Faktoren "t" und "n".

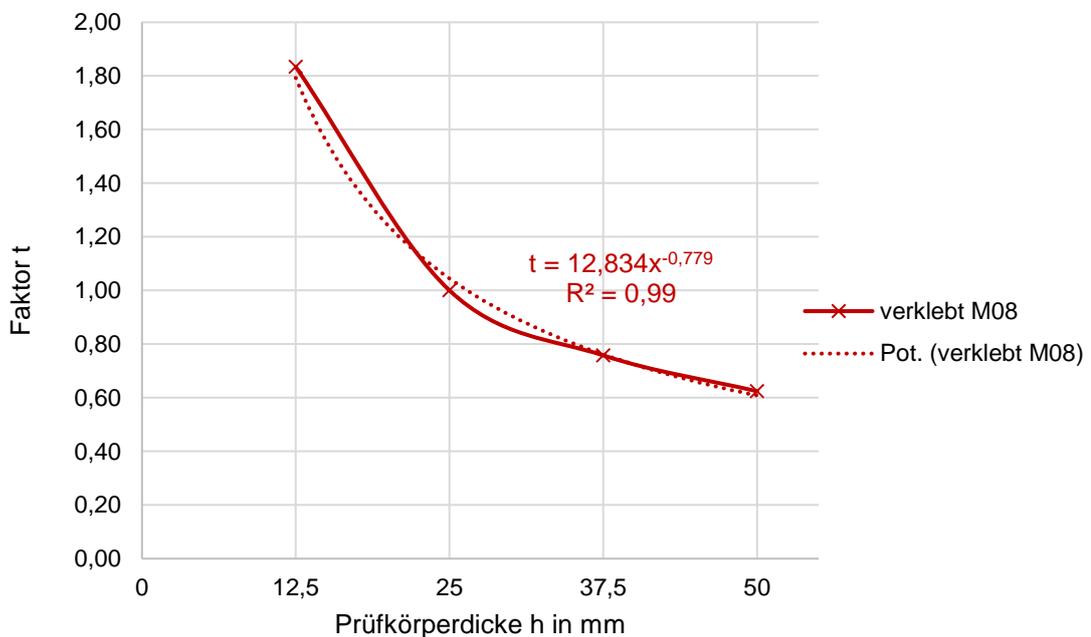


Abbildung 59: Verlauf Faktor t in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für M08 – einschichtig/verklebt

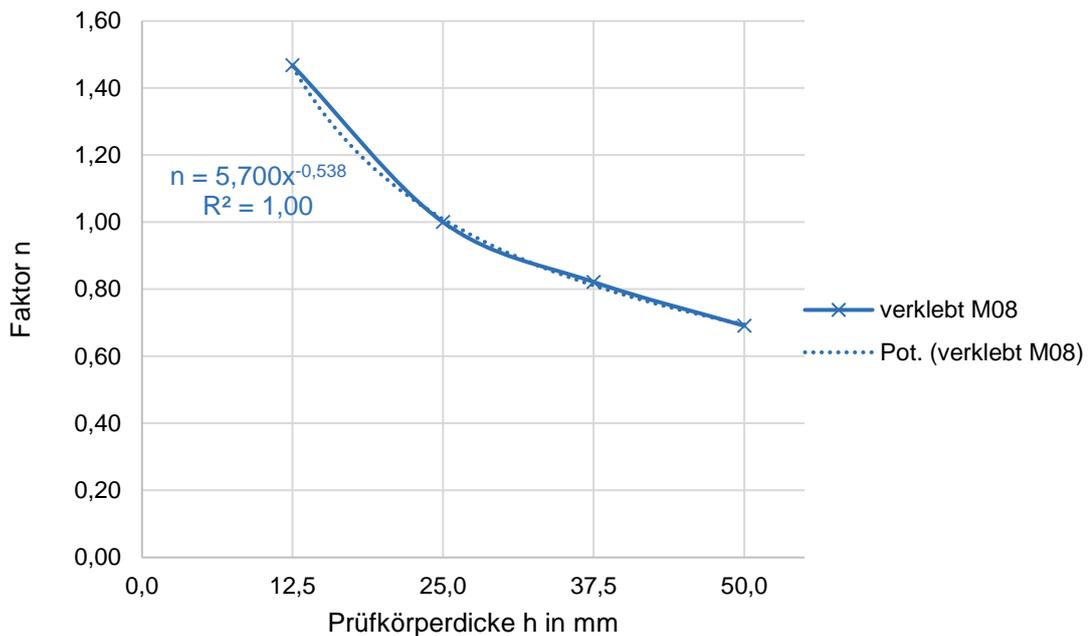


Abbildung 60: Verlauf Faktor n in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für M08 – einschichtig/verklebt

Anhand der bisher ermittelten Faktoren lässt sich nun eine resultierende Gleichung bilden. Diese lautet für den Werkstoff M08 im verklebten Zustand mit Faktor n (blau) und Faktor t (rot) wie folgt:

$$C_{\text{stat,M08,v}} = (5,700 \cdot h^{-0,538} \cdot 0,1463) \cdot \ln(S) + 12,834 \cdot h^{-0,779} \cdot 0,3345 \quad (5-5)$$

Die neu berechneten Werte für die Formfaktoren nach Formel (5-5) werden mit den ursprünglichen Messwerten verglichen, um die prozentualen Abweichungen zu bestimmen. In Tabelle 26 werden diese prozentualen Abweichungen aufgelistet. Darüber hinaus werden in Abbildung 61 die Verläufe der berechneten und gemessenen Werte für jeden einzelnen Formfaktor grafisch dargestellt. Die Einzelwerte können Anlage A. 9. 4 und Anlage A. 9. 5 entnommen werden.

Tabelle 26: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/verklebt unter Berücksichtigung von Faktor t und n für C_{stat}

S	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7	2,4 %	5,2 %	1,5 %	3,5 %
1,0	2,2 %	5,5 %	0,2 %	1,6 %
1,5	1,9 %	3,2 %	0,6 %	2,2 %
2,0	0,8 %	3,1 %	0,1 %	1,6 %
3,0	3,0 %	4,0 %	0,0 %	1,4 %
4,5	1,5 %	3,1 %	0,2 %	1,2 %
6,0	1,0 %	2,9 %	0,3 %	1,0 %

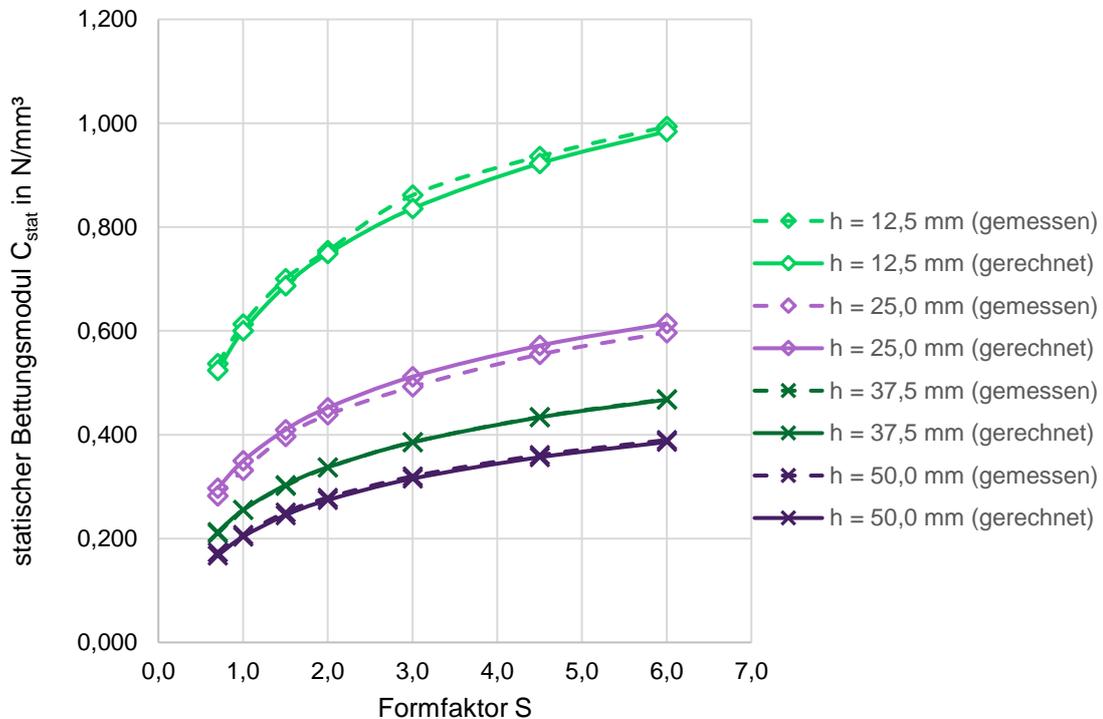


Abbildung 61: Vergleich der statischen Funktionsverläufe der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels der Potenzfunktionen des Faktors t und n für Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt

Durch die Anpassung der Formel konnten die Abweichungen für die Prüfkörperdicke von 12,5 mm erheblich reduziert werden, was zu einer verbesserten Genauigkeit der Berechnung führte. Bei der Analyse der prozentualen Abweichungen fällt auf, dass hauptsächlich bei den kleinen Formfaktoren etwas größere Abweichungen auftreten. Dennoch sind

5 Laborversuche

die Abweichungen bei den anderen Formfaktoren größtenteils gering und liegen bei weniger als 2 %. Dies deutet darauf hin, dass das überarbeitete Modell insgesamt eine hohe Genauigkeit aufweist.

Analog zu diesem Vorgehen wurden für die Frequenzen 5 Hz und 10 Hz ebenfalls jeweils eine Funktion hergeleitet.

$$C_{\text{dyn},5\text{Hz},\text{M08},v} = (6,604 \cdot h^{-0,584} \cdot 0,1827) \cdot \ln(S) + 11,158 \cdot h^{-0,739} \cdot 0,3813 \quad (5-6)$$

$$C_{\text{dyn},10\text{Hz},\text{M08},v} = (8,190 \cdot h^{-0,650} \cdot 0,1945) \cdot \ln(S) + 10,396 \cdot h^{-0,720} \cdot 0,3935 \quad (5-7)$$

Hier liegen die Abweichungen im gleichen Prozentbereich wie die Werte des statischen Bettungsmoduls. Exemplarisch sind in Tabelle 27 die prozentuale Abweichungen der berechneten Werte (Formel (5-6)) zu den gemessenen Werten für $C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$ aufgelistet und in Abbildung 62 grafisch dargestellt. Die berechneten und gemessenen Einzelwerte für 5 Hz und 10 Hz, können Anlage A. 9. 4 und Anlage A. 9. 5 entnommen werden.

Tabelle 27: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/verklebt unter Berücksichtigung von Faktor t und n für $C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$

S	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7	2,0 %	3,9 %	1,4 %	2,7 %
1,0	1,7 %	3,7 %	0,8 %	1,4 %
1,5	1,5 %	2,1 %	1,1 %	1,7 %
2,0	1,6 %	3,4 %	0,1 %	1,4 %
3,0	2,0 %	2,4 %	0,0 %	1,1 %
4,5	1,1 %	2,3 %	0,0 %	1,0 %
6,0	2,3 %	2,2 %	0,1 %	0,9 %

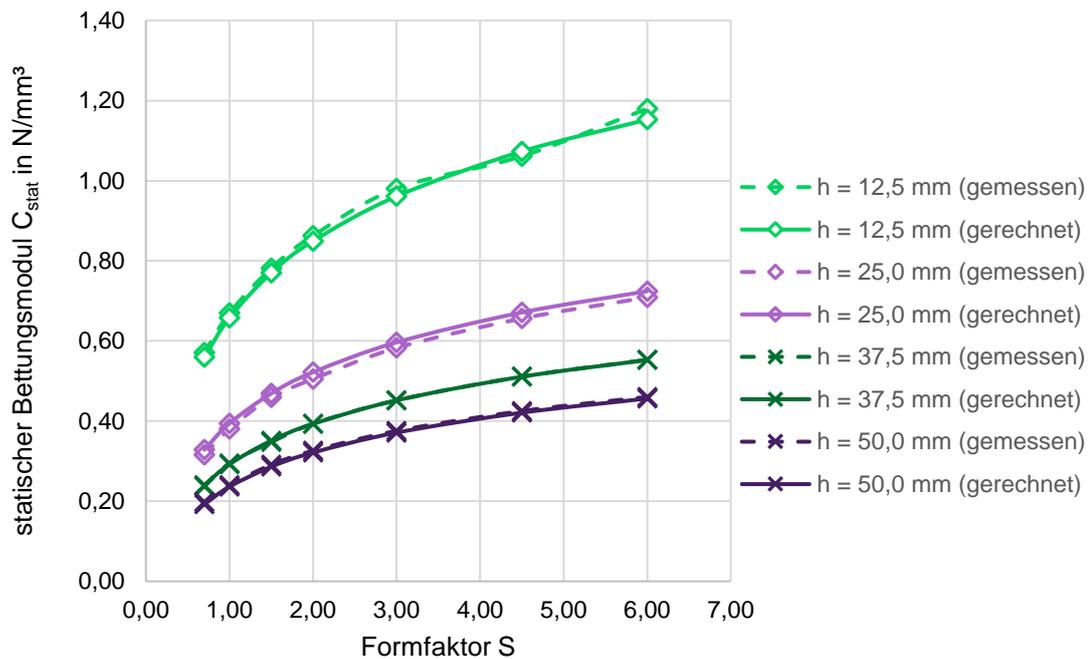


Abbildung 62: Vergleich der dynamischen Funktionsverläufe für 5 Hz der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels der Potenzfunktionen des Faktors t und n für Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt

In einem letzten Schritt wird überprüft, ob es möglich ist, aus der Formel für den verklebten Zustand auch die Werte für den unverklebten Zustand zu berechnen. Wie bereits aus den Ergebnissen von Kapitel 5.1.4 ersichtlich wurde, liegt ein größtenteils gleichbleibendes Verhältnis zwischen einschichtig/verklebt ($\overline{C_{h,v}}$) und nicht verklebt ($\overline{C_{h,uv}}$) über alle Formfaktoren vor. Deshalb wird ein zusätzlicher Faktor V eingeführt, der nur bei den Prüfkörpern im unverklebten Zustand verwendet wird. Dieser Faktor gilt unabhängig vom Formfaktor und ist nur von der Prüfkörperdicke abhängig (Tabelle 28).

$$V = \frac{\overline{C_{h,uv}}}{\overline{C_{h,v}}} \quad (5-8)$$

5 Laborversuche

Tabelle 28: Werte zur Berechnung des Faktors V

h in mm	$\overline{C}_{h,uv}$ in N/mm ³	$\overline{C}_{h,v}$ in N/mm ³	V
12,5	0,7709	0,7709	1,00
25,0	0,4272	0,4418	0,97
37,5	0,2900	0,3417	0,85
50,0	0,2152	0,2830	0,76

Das Verhältnis der Bettungsmodulwerte zwischen einschichtigen/verklebten und nicht verklebten Prüfkörpern weist einen nahezu linearen Verlauf auf (Abbildung 63).

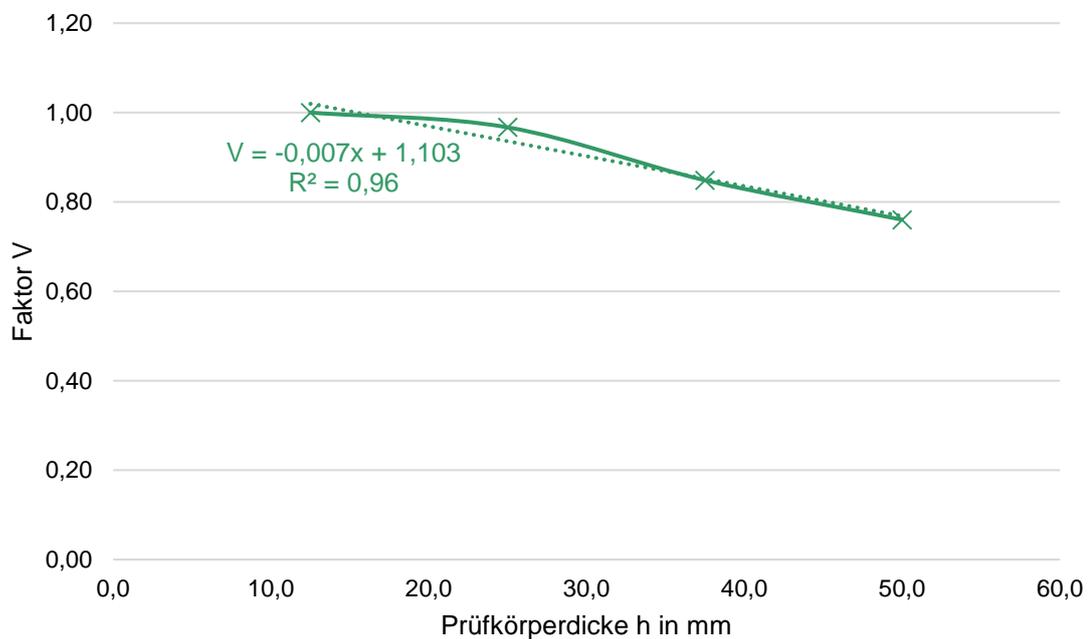


Abbildung 63: Verlauf Faktor v in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für Werkstoff M08

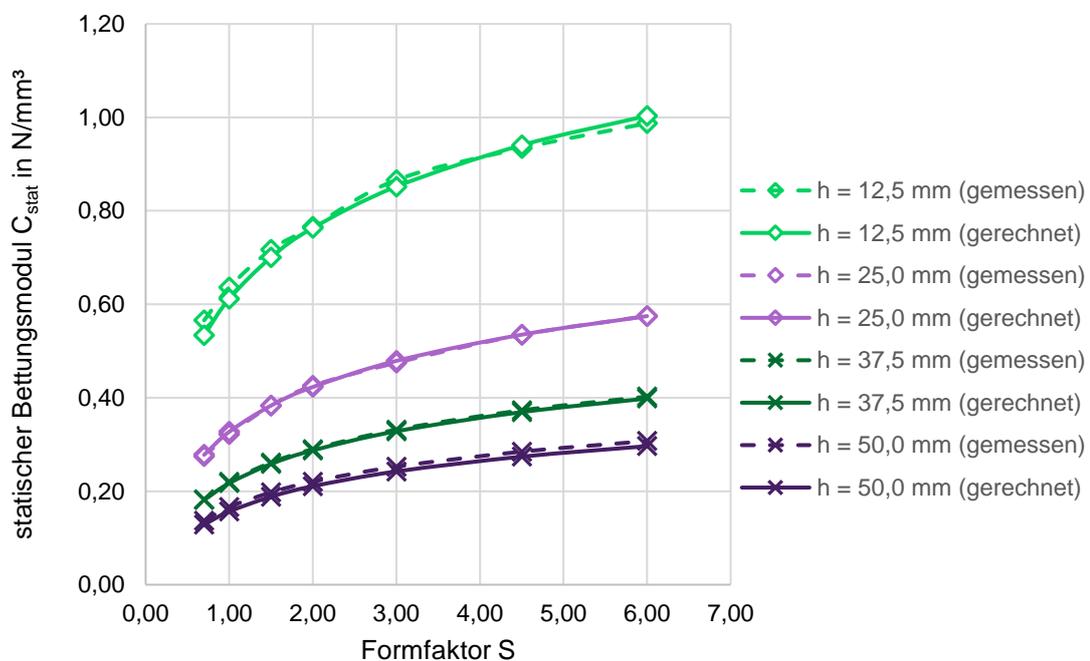
Die sich daraus ergebene Funktionsgleichung mit Faktor V (grün) lautet:

$$C_{\text{stat},M08,uv} = (-0,007 \cdot h + 1,103) \cdot (5,700 \cdot h^{-0,538} \cdot 0,1463) \cdot \ln(S) + 12,834 \cdot h^{-0,779} \cdot 0,3345 \quad (5-9)$$

Die prozentualen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten, die sich aus Formel (5-9) ergeben, welche alle relevanten Faktoren n, t und v berücksichtigt, sind in Tabelle 29 aufgeführt. In Abbildung 64 sind jeweils beide Funktionsverläufe für alle untersuchten Prüfkörperdicken dargestellt.

Tabelle 29: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/unverklebt unter Berücksichtigung der Gleichung (5-9)

S	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7	4,8 %	1,6 %	0,7 %	6,5 %
1,0	2,7 %	2,5 %	1,0 %	5,9 %
1,5	0,7 %	1,3 %	0,3 %	4,4 %
2,0	1,4 %	0,7 %	0,0 %	4,1 %
3,0	0,3 %	2,4 %	0,0 %	3,5 %
4,5	2,9 %	1,7 %	0,2 %	3,1 %
6,0	4,0 %	1,7 %	0,2 %	2,9 %

Abbildung 64: Vergleich Funktionsverläufe basierend auf den gemessenen und berechneten Werten des statischen Bettungsmodul C_{stat} für Werkstoff M08, unverklebt

Auch hier ist zu erkennen, dass die größten Abweichungen meist bei den kleinen Formfaktoren ≤ 1 auftreten. Ansonsten ist eine große Übereinstimmung der Werte vorhanden.

Es zeigt sich, dass durch die ermittelte Funktion die Bettungsmodulwerte für den Werkstoff mit einer hohen Genauigkeit berechnet werden können. Dies lässt sich auch auf alle weiteren untersuchten Werkstoffe erweitern. Durch den Vergleich der einzelnen Funktionen der verschiedenen Werkstoffe kann das Verhältnis zwischen der Funktion und der jeweiligen Raumdicke beschrieben werden. In Abbildung 65 ist exemplarisch

5 Laborversuche

der Zusammenhang zwischen dem berechneten statischen Bettungsmodul und Raumgewicht für die untersuchten, gemischtzelligen Werkstoffe für einen Prüfkörper mit den Maßen 300 mm x 300 mm x 25,0 mm dargestellt. Das Verhalten ist mit einem Regressionspolynom zweiten Grades näherungsweise beschrieben.

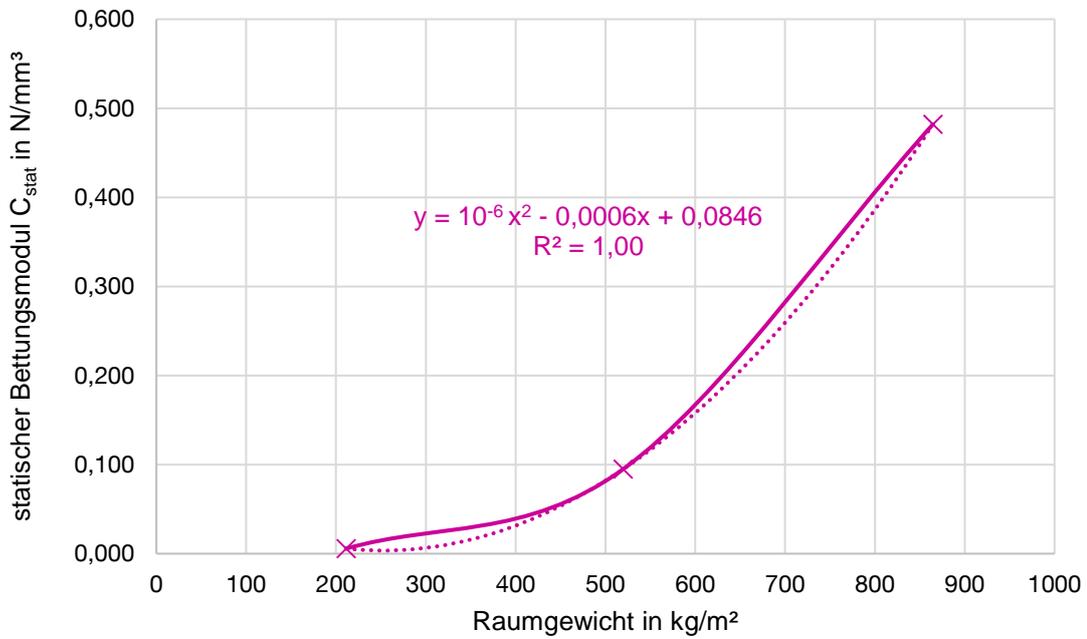


Abbildung 65: Verhalten zwischen ermittelter Werkstofffunktion und Raumdichte bei einem Prüfkörper mit den Dimensionen 300 mm x 300 mm x 25,0 mm für gemischtzellige Werkstoffe

Durch das hohe Bestimmtheitsmaß zeigt sich, dass der entsprechende Bettungsmodul bzw. die Werkstofffunktion hinreichend genau für weitere PUR-Werkstoffe anhand der vorhandenen Werkstofffunktionen ermitteln werden. Dies unterstreicht zusätzlich die hohe Aussagekraft der Familienprüfung und die Übertragbarkeit der ermittelten Funktionen und Aussagen für alle zwischen den geprüften Stützstellen liegenden Werkstoffen. Eine Erweiterung auf andere PUR-Elastomere sollte mit wenigen durchgeführten Tastversuchen bestätigt werden.

6 Einordnung und Interpretation der Ergebnisse

Um eine möglichst große Datengrundlage für die Analyse und Bewertung der Ergebnisse zu erreichen, wurden insgesamt über 5.300 Bettungsmoduln ermittelt. Außerdem wurden die Prüfungen an zehn unterschiedlichen Werkstoffen aus zwei verschiedenen Werkstoffklassen durchgeführt. Die Bandbreite der untersuchten Werkstoffe ermöglicht es, die gewonnenen Erkenntnisse auch auf nicht geprüfte Werkstoffe derselben Werkstoffklassen, die im Rahmen von Familienprüfungen zwischen den untersuchten Stützstellen-Werkstoffen liegen, zu übertragen.

6.1 Bewertung der prüfkörper- und werkstoffbedingten Einflüsse

Die durchgeführten Versuchsreihen haben unterschiedliche Einflüsse auf den Bettungsmodul, bedingt durch den Prüfkörper und den Werkstoff, aufgezeigt. Dabei konnten die nachfolgenden Einflüsse analysiert und quantifiziert werden.

6.1.1 Oberflächenbeschaffenheit

Bei dem untersuchten Werkstoff M03 wurden verschiedene Prüfkörper verwendet, um die Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften auf den Bettungsmodul zu untersuchen. Es stellte sich heraus, dass die Prüfkörper mit einer rauen Oberfläche im Vergleich zu den Prüfkörpern mit einer glatten Gießhaut um bis zu 24 % höhere Bettungsmoduln aufweisen. Diese Beobachtung kann auf das Querdehnungsverhalten des Elastomers zurückgeführt werden. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, stehen Steifigkeit und Querdehnung in direkter Abhängigkeit zueinander. Die Prüfkörper ohne eine Gießhaut verzahnen sich während der Prüfung mehr mit den Schleifleinen und werden dadurch sukzessiv in ihrer Querdehnung gehindert. Dies führte zu einem Anstieg der Steifigkeitswerte bei den Prüfkörpern mit dieser speziellen Oberflächenbeschaffenheit.

Deshalb ist es wichtig die Oberflächeneigenschaften der Prüfkörper bei der Beschreibung und Dokumentation der Untersuchungsergebnisse zu berücksichtigen. Eine genaue Angabe der Oberflächenbeschaffenheit sollte daher immer Bestandteil des Prüfprotokolls sein. Da es sich hierbei um eine systemische Beeinflussung des Bettungsmoduls handelt, die durch den Prüfkörper hervorgerufen wird, können die dadurch entste-

henden Abweichungen vermieden werden. Deshalb ist es ratsam, auch bei der Qualitätsüberwachung zwischen verschiedenen Oberflächeneigenschaften zu differenzieren, um genaue und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Die aktuelle Ausgabe der Norm DIN EN 17682:2023 gibt an, dass die Verwendung von Schleifleinen zur Bestimmung der Bettungsmoduln nur noch mit "falls notwendig" angegeben ist und nicht mehr zwingend vorgeschrieben wird. Jedoch haben die durchgeführten Versuche gezeigt, welchen deutlichen Einfluss die Rauheit der Oberfläche auf die Ergebnisse haben kann. Insbesondere mit zunehmender Raumdichte des Prüfkörpers nimmt dieser Einfluss weiter zu. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wäre es daher sinnvoll, in der Norm eine verbindliche Vorgabe zur zwingenden Verwendung eines definierten Schleifleinens zur Bestimmung der Bettungsmoduln festzulegen. Dadurch könnte sichergestellt werden, dass die Prüfkörper unter standardisierten Bedingungen getestet werden und die Ergebnisse aussagekräftig und reproduzierbar sind.

6.1.2 Prüfkörperwiederverwendung

Als Vorbereitung für die spätere Analyse zur Verklebung der Werkstoffe wurde zunächst besonderes Augenmerk auf die gestapelten Prüfkörper gelegt. Dabei wurden nur geringe Abweichungen zwischen den Prüfungen von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern festgestellt, was darauf schließen lässt, dass es nicht zwingend erforderlich ist, immer neue Prüfkörper zu verwenden. Der Einfluss des einmaligen Prüfens der Bettungsmoduln kann daher vernachlässigt werden. Den bereits verwendeten Prüfkörpern wurde eine Erholungsphase von mindestens 24 Stunden gewährt.

Diese Erkenntnis spielt bei mehreren Aspekten, insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeit, eine bedeutende Rolle. Durch die Möglichkeit, wiederverwendete Prüfkörper einzusetzen, kann zukünftig auf einen größeren Probenumfang verzichtet werden. Dies reduziert nicht nur den Ressourcenverbrauch, sondern auch die Kosten für die Beschaffung neuer Prüfkörper. Gleichzeitig trägt es zur Effizienzsteigerung bei, da weniger Zeit und Aufwand für die Herstellung neuer Prüfkörper aufgewendet werden müssen.

In den durchgeführten Versuchen lag der Fokus auf der Prüfung der Wiederverwendbarkeit unverklebter Prüfkörper. Dabei wurde jeder Prüfkörper höchstens viermal dem Prüfprozedere unterzogen. Es stellt sich die Frage, wie oft ein Prüfkörper die Prüfung durchlaufen kann, ohne dass dies Auswirkungen auf das Bettungsmodul hat. Des Weiteren ist

von Interesse, ob eine Erholungsphase von mindestens 24 Stunden erforderlich ist und ob die Wiederverwendbarkeit auch nach einer längeren Zeitspanne der Lagerung gegeben ist. Diese Fragen bieten vielversprechende Ansatzpunkte, die durch weitere Forschungsarbeiten eruiert und analysiert werden sollten. Durch eine vertiefte Untersuchung dieser Aspekte könnten Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl die Anzahl der Durchläufe erhöhen als auch eine langfristige Wiederverwendbarkeit ermöglichen. Die Ergebnisse dieser zukünftigen Forschungsarbeit wären nicht nur für die Optimierung der Prüfkörpernutzung und die Ressourcenschonung von Bedeutung, sondern auch für die Weiterentwicklung und Anpassung von Industriestandards im Bereich der Wiederverwendbarkeit von Werkstoffen und Bauelementen.

Zusammenfassend bieten die eruierten Fragestellungen und Analyseansätze ein spannendes Forschungsfeld, das weiter erforscht werden sollte. Die Erkenntnisse könnten sowohl praktische Anwendungen als auch theoretisches Wissen zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Prüfkörpern liefern und somit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren und ressourcenschonenderen Zukunft leisten.

6.1.3 Prüfkörpergeometrie

Die Berücksichtigung des Formfaktors spielt eine entscheidende Rolle bei den Prüfungen von Elastomeren, da er die Grundlage für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bildet. Es ist jedoch von Interesse zu untersuchen, welchen Einfluss das Verhältnis der Seitenlängen der Grundfläche des Prüfkörpers auf die Ergebnisse hat. Um diese Frage zu beantworten, wurden umfangreiche Versuche durchgeführt, die gezeigt haben, dass die Geometrie der Grundfläche nur einen geringfügigen Einfluss auf die Bettungsmoduln hat. Diese Erkenntnis wurde für Seitenverhältnisse im Bereich von 1:1 bis 1:6 nachgewiesen. Daraus kann geschlossen werden, dass sowohl eine quadratische als auch eine rechteckige Grundform des Prüfkörpers mit gleicher Fläche gleichermaßen zur Ermittlung der Bettungsmoduln herangezogen werden können. Diese Erkenntnis eröffnet die Möglichkeit einer deutlich größeren Auswahl an Prüfkörpergeometrien für Prüfungen. Durch die Vielfalt der verfügbaren Geometrien können verschiedene Aspekte optimiert werden, insbesondere in Bezug auf die Logistik, beispielsweise bei der Lagerung von Rückstellmustern. Eine breitere Auswahl an Prüfkörpergeometrien kann zu einer Optimierung der logistischen Abläufe beitragen und somit zu einer effizienteren Durchführung von Prüfungen verhelfen. Darüber hinaus ermöglicht die Anwendung verschiedener

Geometrien eine umfassendere Charakterisierung von Elastomeren und trägt zur Erweiterung des Wissens über ihre mechanischen Eigenschaften bei.

Zusätzlich lassen die ermittelten Bettungsmoduln den unterschiedlich großen Einfluss des Formfaktors auf die verschiedenen Werkstoffe erkennen. Je höher der Porenanteil in einem Elastomer ist, desto volumenkompressibler ist dieser. Somit sinkt der Einfluss des Formfaktors bei Werkstoffen mit geringem Raumgewicht. Je geringer das Raumgewicht ist, desto schneller nähern sich die Bettungsmodulwerte über die Formfaktoren einem logarithmischen Verlauf an. Somit flacht der Verlauf der Bettungsmodulwerte mit steigendem Formfaktor immer weiter ab und kann als fast gleichbleibend beschrieben werden. Dies ist gleichermaßen bei den statischen und den niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduln zu beobachten. Dies lässt darauf schließen, dass die Werkstoffzusammensetzung und die innere Struktur des Elastomers eine entscheidende Rolle für den Einfluss des Formfaktors spielen. Es ist daher ratsam, bei der Analyse und Interpretation der Bettungsmodulwerte auch die spezifischen Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs zu berücksichtigen. Es ist anzumerken, dass die Laborversuche derzeit nicht ausreichend Daten für Werkstoffe mit geringerem Raumgewicht hervorbrachten, um eine detaillierte Analyse durchzuführen. Die Durchführung weiterer Versuchsreihen, die speziell auf Werkstoffe mit geringer Raumdichte ausgerichtet sind, würde es ermöglichen, präzisere Aussagen über das Verhältnis zwischen Raumdichte und dem Einfluss des Formfaktors auf das Bettungsmodul zu machen.

Aufgrund der begrenzten Aussagekraft über den Bettungsmodul und die unterschiedlichen Auswirkungen auf verschiedene Werkstoffe ist die Verwendung des Formfaktors als alleiniger Indikator für eine Vergleichbarkeit fragwürdig. Der Formfaktor kann nur in Verbindung mit Angaben zur Elastomerdicke und nur für Werkstoffe mit mittlerer bis hoher Raumdichte sinnvoll eingesetzt werden. Bei Werkstoffen mit niedriger Raumdichte oder anderen besonderen Eigenschaften müssen zusätzliche Parameter und Kriterien berücksichtigt werden, um eine aussagekräftige Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Insgesamt verdeutlichen die Untersuchungsergebnisse, dass der Formfaktor allein keine ausreichende Grundlage für die Vergleichbarkeit der Bettungsmodulwerte von verschiedenen Werkstoffen darstellt. Es ist wichtig neben dem Formfaktor auch andere relevante Faktoren wie Werkstoffzusammensetzung, Raumdichte und mechanische Eigenschaften zu berücksichtigen, um aussagekräftige und verlässliche Ergebnisse zu erzielen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bisherigen Versuche gezeigt haben, dass die Bettungsmodulwerte von Prüfkörpern mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche als gleichwertig betrachtet werden können. Diese Erkenntnis erleichtert die Versuchsplanung und -durchführung, erhöht die Flexibilität und Effizienz bei der Verwendung von vorhandenen Prüfkörpern und ermöglicht zuverlässige Vergleiche der Ergebnisse. Die Verwendung des Formfaktors als alleiniger Indikator für die Vergleichbarkeit des Bettungsmoduls verschiedener Werkstoffe ist nicht ausreichend.

6.1.4 Verklebung und Verbund

Der Verbundzustand der Prüfkörper spielt eine zusätzliche Rolle bei den Bettungsmoduln. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass nicht verbundene Prüfkörper einen geringeren Bettungsmodul aufweisen. Bei einschichtigen Prüfkörpern ist eine gleichmäßige Kraftabtragung der Hauptgrund für höhere Bettungsmodulwerte. Bei verklebten Prüfkörpern kommt zusätzlich die Behinderung der Querdehnung durch die Verklebung hinzu. Mit zunehmender Grundfläche des Prüfkörpers steigen auch die prozentualen Abweichungen der verschiedenen Schichtaufbauten, was auf die größere Klebefläche zurückzuführen ist. Darüber hinaus führt eine zunehmende Beeinflussung durch die Verklebung zu steigenden Bettungsmodulwerten. Dieses Verhalten ist auf die Eigenschaften des Werkstoffs zurückzuführen, denn je steifer der Werkstoff ist, desto mehr arbeitet er bei Belastung über die Querdehnung. Diese wird jedoch durch die Verklebung teilweise behindert, was bei steiferen Werkstoffen zu einem stärkeren Einfluss der Verklebung auf die Bettungsmoduln führt. Dieser Effekt zeigt sich sowohl bei den statischen als auch bei den dynamischen Bettungsmoduln. Aufgrund des signifikanten Unterschieds in den Bettungsmodulwerten durch die Verklebung ist es von großer Bedeutung, dass untersuchte Prüfkörper für verlässliche Prüfergebnisse stets den gleichen Schichtaufbau aufweisen, der dem spezifischen Einbau des Projekts entspricht. Dies gewährleistet eine konsistente Vergleichbarkeit der Ergebnisse und stellt sicher, dass die Auswirkungen der Verklebung angemessen berücksichtigt werden.

Eine konsistente und standardisierte Verklebung gewährleistet vergleichbare Ergebnisse und ermöglicht eine präzise Beurteilung der Bettungsmoduln. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen verdeutlichen die Bedeutung der richtigen Verbundkonfiguration für die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Prüfungen im Zusammenhang mit Bettungsmoduln. Um ein umfassendes Verständnis des Einflusses der Verklebung auf die Bettungsmoduln zu erlangen, sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden,

die verschiedene Werkstoffe, Verklebungstechniken und Schichtaufbauten berücksichtigen. Dies würde dazu beitragen, spezifische Richtlinien und Empfehlungen für die Verwendung von verklebten Prüfkörpern bei der Bewertung von Bettungsmoduln zu entwickeln. Eine verbesserte Kenntnis dieser Zusammenhänge ermöglicht es, eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Zusammenfassend zeigen die Versuchsergebnisse, dass der Verbundzustand der Prüfkörper einen großen Einfluss auf den Bettungsmodul hat. Da es sich hierbei um eine systemische Beeinflussung handelt, die durch den Prüfkörper induziert wird, können die dadurch entstehenden Abweichungen vermieden werden. Deshalb ist es wichtig, zwischen den verschiedenen Verbundzuständen zu differenzieren, um genaue und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Es ist wichtig, konsistente Schichtaufbauten für verlässliche Ergebnisse zu verwenden und die Auswirkungen der Verklebung angemessen zu berücksichtigen.

6.1.5 Prüfwerkstoff

Um den Einfluss der untersuchten Werkstoffe auf die Bettungsmodulwerte zu ermitteln, wurde für jeden Werkstoff eine Kerndichteabschätzung durchgeführt. Diese Abschätzung ermöglichte es, Abweichungen der Werte vom Median zu bestimmen und somit eine Aussage über die spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe zu treffen. Bei allen untersuchten Werkstoffen wurden Abweichungen vom Median von weniger als 10 % festgestellt. Es ist erwähnenswert, dass sich die Werte der statischen und dynamischen Bettungsmoduln analog zueinander verhielten, was auf eine konsistente Bewertung der Werkstoffe hindeutet. Besonders bemerkenswert ist, dass bei einigen Kerndichtabschätzungen der dynamischen Bettungsmoduln eine maximale Spitze bei einer Dichte oberhalb von 1 festgestellt wurde (siehe Kapitel 5.1.5, Abbildung 49). Dieser Wert ist möglich da die Breite des Peaks am Median sehr gering ist, welches wiederum für eine geringe Streuung spricht. Diese Beobachtung spricht für eine hohe Konsistenz und Homogenität der Bettungsmodulwerte.

Die Auswertung der Bettungsmodulwerte ergab, dass alle untersuchten Werkstoffe einer hohen homogenen Verteilung folgten. Das bedeutet, dass die Bettungsmodulwerte innerhalb einer engen Bandbreite lagen und somit eine hohe Konsistenz und Zuverlässigkeit aufwiesen. Diese Erkenntnis ist von großer Bedeutung, da sie darauf hindeutet, dass bei einer derart homogenen Verteilung eine Reduzierung des Prüfkörperumfangs möglich ist, ohne dabei die Reliabilität der Ergebnisse zu beeinträchtigen. Diese Erkenntnis

hat Auswirkungen nicht nur auf den Umfang der Prüfkörper für Überwachungs- und Qualitätskontrollzwecke, sondern auch auf die Anforderungen an Rückstellmuster. Die zuverlässige Homogenität der Bettungsmodulwerte legt nahe, dass eine kleinere Stichprobengröße ausreichen könnte, um repräsentative Ergebnisse zu erzielen, ohne die Zuverlässigkeit der Analyse zu gefährden. Dies kann zu einer effizienteren Durchführung von Werkstoffprüfungen und einer Optimierung der Ressourcen führen, ohne die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kerndichteabschätzungen der Bettungsmodulwerte eine hohe Homogenität und Konsistenz der untersuchten Werkstoffe zeigten. Dies ermöglicht eine präzisere Bewertung und eröffnet Möglichkeiten zur Optimierung der Prüfkörperumfänge und Ressourcenallokation bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Diese Erkenntnisse haben sowohl praktische als auch wirtschaftliche Auswirkungen auf die Werkstoffprüfungen und Qualitätskontrollverfahren im Zusammenhang mit den untersuchten Werkstoffen. Dies ist besonders relevant für Unternehmen, die regelmäßig Prüfungen durchführen und eine große Anzahl von Prüfkörpern verwalten müssen. Durch die Reduzierung des Prüfkörperumfangs können Lagerkapazitäten effizienter genutzt werden und logistische Abläufe verbessert werden. Zusätzlich zu den genannten Vorteilen trägt die Reduzierung des Prüfkörperumfangs auch zu einer nachhaltigeren Vorgehensweise bei. Durch die Einsparung von Werkstoffen und Ressourcen wird der ökologische Fußabdruck der Prüfverfahren verringert. Die Erkenntnisse aus dieser Untersuchung liefern somit einen Beitrag zur Entwicklung effizienterer und umweltfreundlicherer Prüfmethoden für Elastomere.

6.2 Bewertung der prüfablaufbedingten Einflüsse

Prüfparameter sind wesentliche Vorgaben, die in den entsprechenden Normen festgelegt sind, um standardisierte und vergleichbare Prüfungen durchzuführen. Sie definieren die Rahmenbedingungen für die Bewertung des Bettungsmoduls und ermöglichen eine einheitliche Basis für die Ergebnisinterpretation. Dennoch stellt sich die Frage, inwieweit diese Prüfparameter einen entscheidenden Einfluss auf den Bettungsmodul haben und ob mögliche Anpassungen vorgenommen werden können, um die Prüfverfahren weiter zu optimieren. Um diese Frage zu beantworten, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, in denen verschiedene Prüfparameter systematisch variiert und ihre Auswirkungen auf den Bettungsmodul analysiert und bewertet wurden.

6.2.1 Belastungszyklen

Durch die Einführung der europäischen Normen im Bereich der Elastomerprüfungen kommt es zu einigen Änderungen im Prüfungsablauf. Eine entscheidende Änderung besteht aus der Erhöhung der Belastungszyklen des statischen Bettungsmoduls. Somit erfolgt nach den europäischen Normen die Auswertung am fünften und nicht, wie in den vorherigen deutschen Normen, am dritten Belastungszyklus. Um zu analysieren, ob die Erhöhung einen Einfluss auf den Wert des statischen Bettungsmoduls hat, wurden Versuche mit der entsprechenden Anzahl an Belastungszyklen durchgeführt. Um den Einfluss durch andere Aspekte so minimal wie möglich zu halten, wurden die Werte für den dritten und fünften Belastungszyklus an identischen Prüfkörpern ermittelt.

Bei allen untersuchten Werkstoffen konnten nur minimale Abweichungen des statischen Bettungsmoduls ermittelt werden. Diese lagen bei unter 1 %. Somit ist eindeutig erkennbar, dass die Erhöhung der Belastungszyklen von drei auf fünf keinen Einfluss auf den statischen Bettungsmodul hat. In Anbetracht von steigenden Energie- und Prüfungskosten ist eine Reduzierung der Prüfungsdauer erstrebenswert. Die Durchführung der Prüfung des statischen Bettungsmoduls mit nur drei Belastungszyklen reduziert die Prüfungsdauer um über 33 %. Eine Reduzierung auf unter drei Belastungszyklen ist nicht zielführend, da bei einigen Werkstoffen erst nach dem zweiten Belastungszyklus ein konstanter Bettungsmodulwert auftritt. Eine Prüfungsdurchführung mit drei statischen Belastungszyklen ist für eine verlässliche Aussage über die Bettungsmoduln vollkommen ausreichend.

Insgesamt zeigt sich, dass eine Überarbeitung der Normen im Bereich der Elastomerprüfungen eine Verbesserung der Prüfpraxis mit sich bringen würde. Die Wahl des dritten Belastungszyklus als Grundlage für die Ermittlung der statischen Bettungsmodulwerte erfolgt aus verschiedenen Gründen. Zum einen bietet dieser Belastungszyklus eine ausreichende Anzahl von Messungen, um eine statistisch aussagekräftige Basis zu schaffen. Zum anderen haben die Daten gezeigt, dass die Werte im dritten Belastungszyklus eine hohe Stabilität und Konsistenz aufweisen, was auf eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hindeutet. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Normen und Prüfverfahren auf Grundlage solcher Erkenntnisse kann dazu beitragen, die Qualitätssicherung und Produktentwicklung im Bereich der Elastomerprüfungen weiter zu verbessern.

6.2.2 Belastungsgeschwindigkeit

Sowohl in den deutschen als auch in den europäischen Normen ist die Belastungsgeschwindigkeit für die Bestimmung des statischen Bettungsmoduls auf $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$ festgelegt. Folglich beeinflusst nur die Dimension des Prüfkörpers die Prüfgeschwindigkeit. Dies führt zu einem großen Unterschied in der Länge der Prüfungsdauer. Um den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Bettungsmoduln zu ermitteln, wurden Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Diese waren die vorgegebene Normgeschwindigkeit von $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$, als auch die Hälfte, das Zweifache und Dreifache dieser. Nach jeder Ermittlung des statischen Bettungsmoduls bei der entsprechenden Geschwindigkeit wurde der dynamische Bettungsmodul bei 5 Hz bestimmt, um auch hier den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit analysieren zu können.

Die durchgeführten Versuche ergaben keinen signifikanten Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die statischen oder dynamischen Bettungsmoduln. Die Variierung der Geschwindigkeiten führte zu keinen wesentlichen Veränderungen in den gemessenen Werten. Die maximalen ermittelten Abweichungen durch die geänderten Prüfgeschwindigkeiten lag bei 3,9 %. Dies zeigt, dass die Prüfgeschwindigkeit für die Bestimmung des Bettungsmoduls an die anzuwendenden Lastbedingungen angepasst werden kann. Die Anpassung der Prüfgeschwindigkeit sollte nicht nur von der Größe des Prüfkörpers abhängen, sondern auch von den spezifischen Lasten, die auf das Elastomer wirken. Es ist wichtig zu beachten, dass die Prüfgeschwindigkeit nicht wahllos verändert werden sollte, sondern auf Basis fundierter Erkenntnisse und Erfahrungen angepasst werden muss. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche legen jedoch nahe, dass eine flexiblere Anpassung der Prüfgeschwindigkeit möglich ist, um die Prüfungsdauer entsprechend den tatsächlichen Belastungen anzupassen. Diese Erkenntnis kann zu einer effizienteren und genaueren Charakterisierung der Elastomere führen und somit den Anforderungen der Industrie besser gerecht werden.

Weiterführende Untersuchungen und umfangreichere Datensätze insbesondere mit anderen elastomeren Werkstoffen und mehreren Geschwindigkeitsabstufungen, können dazu beitragen, den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit genauer zu quantifizieren und mögliche Auswirkungen auf spezifische Werkstoffe oder Anwendungen zu verstehen. Eine breitere Auswahl an Werkstoffen ermöglicht eine umfassendere Analyse der Prüfgeschwindigkeitsabhängigkeit und kann Aufschluss darüber geben, ob bestimmte Werkstoffe empfindlicher auf Veränderungen der Prüfgeschwindigkeit reagieren als andere. Dies kann wertvolle Informationen für die Werkstoffauswahl und die Anpassung von

Prüfverfahren liefern, um optimale Leistung und Zuverlässigkeit sicherzustellen. Darüber hinaus ist es wichtig, verschiedene Geschwindigkeitsabstufungen zu untersuchen, um den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit in einem breiteren Bereich zu erfassen. Durch die Analyse eines breiten Geschwindigkeitsspektrums können spezifische Zusammenhänge und Tendenzen identifiziert werden, um eine fundierte Auswahl der Prüfgeschwindigkeit für spezifische Anwendungen zu ermöglichen.

Eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Normen und Prüfverfahren auf Grundlage solcher Erkenntnisse kann dazu beitragen, die Qualitätssicherung und Produktentwicklung im Bereich der Elastomerprüfungen weiter zu verbessern.

6.3 Bewertung der Werkstofffunktion

In den verschiedenen Normen, die die Prüfung von Elastomeren regeln, sind die Abmessungen der Prüfkörper festgelegt. Diese Vorgaben dienen hauptsächlich der Vergleichbarkeit von Messwerten und Prüfergebnissen. Allerdings sind mit den festen Maßen einige Probleme verbunden. Zum Beispiel führen die vorgegebenen Abmessungen zu einem hohen Verschnitt- und Abfallaufkommen, insbesondere bei der Herstellung mit einer Bandgießanlage. In solchen Fällen müssen die Prüfkörper aus deutlich längeren Bahnen geschnitten werden, was zu einem ineffizienten Verbrauch vom Werkstoff führt. Zudem erfordern die festen Maße viel Platz für die Aufbewahrung von Rückstellmustern. Vor dem Hintergrund von Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung ist es daher sowohl sinnvoll als auch notwendig, die Abmessungen der Prüfkörper variabler zu gestalten.

Durch die Einführung flexiblerer Prüfkörperdimensionen könnten verschiedene Vorteile erzielt werden. Zum einen ließe sich der Werkstoffverbrauch deutlich reduzieren, da die Prüfkörper gezielter aus den verfügbaren Werkstoff zugeschnitten werden könnten. Dies würde zu einer effizienteren Nutzung der Ressourcen und einer Verringerung des Verschnitts führen. Zum anderen könnten durch variabelere Abmessungen auch die Kosten für die Herstellung der Prüfkörper gesenkt werden. Die Anpassung der Prüfkörperdimensionen an die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten der jeweiligen Produktionsverfahren könnte zu einer optimierten Nutzung der vorhandenen Produktionsmittel führen. Ein weiterer Aspekt, der bei der Flexibilisierung der Prüfkörperdimensionen berücksichtigt werden sollte, ist die Lagerung von Rückstellmustern. Rückstellmuster werden häufig verwendet, um die Qualität und Eigenschaften von Elastomeren im Laufe der Zeit zu überwachen. Bei festen Prüfkörperabmessungen ist ein erheblicher Platzbedarf

für die Aufbewahrung dieser Muster erforderlich. Durch die Anpassung der Prüfkörperdimensionen könnte dieser reduziert werden, was zu einer effizienteren Nutzung von Lagerflächen führt. Je nach Anwendungsbereich und spezifischen Anforderungen könnten die Prüfkörper entsprechend angepasst werden, um präzisere und aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen. Dies würde die Validität und Vergleichbarkeit der Messwerte weiter verbessern. Insgesamt ist die Einführung variabler Prüfkörperdimensionen ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigeren und effizienteren Prüfung von Elastomeren. Durch die Anpassung der Abmessungen an die tatsächlichen Bedürfnisse der Produktion und Lagerung sowie an die spezifischen Prüfbedingungen können Ressourcen geschont, Kosten gesenkt und die Qualität der Prüfergebnisse verbessert werden.

Deshalb wurde eine Funktionsgleichung für jeden untersuchten Werkstoff ermittelt, mit welcher der Bettungsmodul eines Prüfkörpers beliebiger geometrischer Dimensionen hinreichend genau berechnet werden kann. Hierfür wurden aus den vorhandenen Daten unter Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse Funktionsgleichungen für jede geprüfte Dicke und Schichtaufbau ermittelt. Die hohe, erreichte Genauigkeit der berechneten Werte zu den gemessenen Werten konnte durch hohe Bestimmtheitsmaße von $R^2 > 0,98$ erreicht werden. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass es für die untersuchten Werkstoffe möglich ist, sowohl die statischen als auch dynamischen Bettungsmodul eines Prüfkörpers beliebiger geometrischer Dimensionierungen mit hoher Präzision zu berechnen. Darüber hinaus ermöglicht der Zusammenhang zwischen dem Raumgewicht der Werkstoffe und den ermittelten Funktionen eine Erweiterung des Ansatzes auf andere PUR-Elastomere. Um die Anwendbarkeit der ermittelten Funktion auf weiteren PUR-Elastomeren und elastomeren Werkstoffen mit ähnlichen Eigenschaften zu bestätigen, müssen Tastversuche mit diesen Werkstoffen durchgeführt werden.

Die Berechnung des Bettungsmoduls anhand der Funktionsgleichungen bietet verschiedene Vorteile. Sie ermöglicht eine effiziente und zeitsparende Methode zur Ermittlung der Bettungsmodulwerte, da keine umfangreichen und aufwendigen experimentellen Versuche mehr erforderlich sind. Stattdessen können die Funktionsgleichungen verwendet werden, um die Ergebnisse vorherzusagen. Dies ist besonders relevant in Industrie- und Forschungsumgebungen, in denen eine schnelle und zuverlässige Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften von großer Bedeutung ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ermittelten Funktionsgleichungen eine zuverlässige Methode bieten, um den Bettungsmodul von Prüfkörpern mit unterschiedli-

chen geometrischen Dimensionen für die untersuchten Werkstoffe präzise zu berechnen. Dieser Ansatz ermöglicht eine effiziente und genaue Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften und bietet Potenzial für eine Erweiterung auf andere verwandte Werkstoffe. Zukünftige Untersuchungen und Tests mit weiteren Werkstoffen können dazu beitragen, die Anwendbarkeit dieser Methode zu bestätigen und ihre Reichweite auf verschiedene industrielle Anwendungen auszudehnen.

Durch diese Erkenntnis sind viel mehr Freiheiten in der Gestaltung der Prüfkörperdimensionen möglich. Vor allem im Bereich der Güteüberwachung und Rückstellmuster kann es zu deutlichen Einsparungen an Werkstoffverschnitt und -abfall führen. Beispielsweise durch die Prüfung und Lagerung von Prüfkörpern mit den Maßen 150 mm x 150 mm im Vergleich zu den in der Norm geforderten Prüfkörpern mit 300 mm x 300 mm können 75 % an Werkstoff und Lagerfläche gespart werden. Falls es jedoch zu Nachprüfungen und Kontrollen an dem Prüfkörper kommt, kann nach der Bestimmung der Bettungsmoduln an der vorhandenen Größe dieser auch für andere Dimensionen, wie beispielsweise die Originalgröße im Einbau, berechnet werden. Dies ermöglicht eine effiziente und präzise Bewertung der Werkstoffeigenschaften, ohne dass zusätzliche Prüfkörper mit spezifischen Dimensionen hergestellt werden müssen.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die mathematische Gleichung auf empirisch ermittelten Werten basiert. Für noch verlässlichere Aussagen sind große Datenbanken mit einer ausreichenden Datenmenge hilfreich. Diese stehen vor allem den produzierenden Unternehmen durch Eigenüberwachung und Qualitätsmanagement zur Verfügung. Somit haben diese die besten Voraussetzungen, um noch aussagekräftigere Berechnungen auf Basis des vorgestellten Verfahrens zu erstellen.

Die Möglichkeit, den Bettungsmodul für Prüfkörper mit variablen geometrischen Dimensionen berechnen zu können, bietet erhebliche Vorteile für die Industrie. Es ermöglicht eine effizientere Nutzung von Ressourcen, reduziert den Werkstoffverschnitt und verbessert die Nachhaltigkeit. Darüber hinaus trägt es zur Kosteneinsparung bei, da weniger Prüfkörper hergestellt und gelagert werden müssen. Die präzise Berechnung des Bettungsmoduls auf Basis der ermittelten Funktionsgleichungen ermöglicht eine zuverlässige Qualitätskontrolle und unterstützt Unternehmen dabei, hochwertige Produkte herzustellen und gleichzeitig die Umweltauswirkungen zu minimieren.

Insgesamt eröffnen die ermittelten Funktionsgleichungen und das vorgestellte Verfahren eine vielversprechende Perspektive für die Industrie, um die Prüfkörperdimensionen fle-

xibler zu gestalten und gleichzeitig die Qualitätssicherung zu optimieren. Weitere Forschung und Datensammlung in diesem Bereich können dazu beitragen, die Anwendbarkeit des Verfahrens auf eine breitere Palette von Werkstoffen und Anwendungen zu erweitern und die Effizienz und Genauigkeit der Berechnungen weiter zu verbessern.

7 Optimierungsansätze

Aus den analysierten Messwerten der Laborversuche unter Berücksichtigung der untersuchten Einflüsse konnten einige Ansätze für eine mögliche Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit von elastomeren Werkstoffen erarbeitet werden. Die Änderungsvorschläge beziehen sich auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe. Inwieweit eine Erweiterung auf andere PUR-Elastomere und elastomere Werkstoff möglich ist, muss durch weitere Versuchsreihen untersucht werden.

7.1 Prüfkörper

Als neues Maß für die Prüfkörpergrundfläche wird der Vorschlag von 300 mm x 100 mm gemacht. Durch diese Reduzierung der Abmessungen lässt sich eine Werkstoffeinsparung von 67 % pro Prüfkörper erzielen. Es wurde festgestellt, dass eine größere Seitenlänge als 300 mm nicht sinnvoll ist, da die aktuellen Prüfmaschinen auf das bisherige Standardmaß von 300 mm x 300 mm ausgelegt sind. Bei einer Vergrößerung der Seitenlänge des Prüfkörpers würden die Prüfmaschinen teilweise nicht mehr effizient genutzt werden können. Gleiches gilt auch für eine weitere Verkleinerung der Prüfkörpergrundfläche. Eine solche Verkleinerung würde zu signifikant geringeren Lasten führen, die außerhalb des kalibrierten Messbereichs der Prüfmaschinen liegen könnten. Es ist daher wichtig, ein ausgewogenes Maß für die Prüfkörpergrundfläche zu finden, das sowohl eine effiziente Nutzung der Prüfmaschinen ermöglicht als auch genaue Messergebnisse liefert.

Das Maß wurde auch aufgrund des kleinsten möglichen Formfaktors gewählt. Wie nachgewiesen wurde, steigt mit kleiner werdendem Formfaktor der Einfluss auf den Bettungsmodul. Für alle untersuchten Werkstoffe lag der Formfaktor bei $S \geq 0,5$ und die ermittelten Werkstofffunktionen wurden nur bis zu diesem Bereich verifiziert. Damit die Reliabilität der berechneten Werte gegeben ist, wurde das Maß 300 mm x 100 mm gewählt. Hier ist der Formfaktor bei einer maximalen untersuchten Prüfkörperdicke von 50,0 mm bei 0,75. Durch die sorgfältige Berücksichtigung des Formfaktors und die Festlegung des Maßes von 300 mm x 100 mm konnten verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Die Ergebnisse können daher als zuverlässige Grundlage für weitere Analysen und Anwendungen dienen. Die Festlegung dieser Abmessungen ermöglicht eine genaue Charakterisierung der Werkstoffe und trägt dazu bei, fundierte Entscheidungen im Bereich der Werkstoffprüfung und -anwendung zu treffen.

Die Implementierung dieser neuen Prüfkörperdimensionen erfordert Anpassungen in den Normen und Prüfverfahren. Es ist wichtig, dass alle relevanten Interessengruppen und Industriepartner eng zusammenarbeiten, um einheitliche Standards festzulegen und die Umstellung auf die neuen Abmessungen reibungslos zu gestalten. Durch diese Maßnahme können erhebliche Vorteile hinsichtlich Ressourcenschonung, Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit im Bereich der elastomeren Werkstoffe erzielt werden.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Werkstofffunktion ist nicht nur auf die untersuchten PUR-Elastomere beschränkt, sondern kann auch auf andere PUR-Elastomere angewandt werden. Der Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Funktion ermöglicht es, Funktionen für Werkstoffe zu bestimmen, die sich zwischen den geprüften Stützstellenwerkstoffen befinden, ohne zusätzliche Versuche durchzuführen. Auf diese Weise kann anhand von Familienprüfungen eine ausreichend präzise Datengrundlage geschaffen werden, um Messdaten und Berechnungsfunktionen auf weitere Werkstoffe zu übertragen. Die Anwendung des beschriebenen Vorgehens auf weitere PUR-Elastomere eröffnet neue Möglichkeiten in der Werkstoffcharakterisierung. Indem der Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Funktion genutzt wird, können auch für Werkstoffe, die nicht direkt in den Versuchsreihen untersucht wurden, genaue und verlässliche Funktionen bestimmt werden. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung vorhandener Daten und erhöht die Effektivität der Werkstoffanalyse.

Die Verwendung von Familienprüfungen erweist sich als äußerst nützlich, um die Datengrundlage zu erweitern und weitere Werkstoffe zu erfassen. Durch die Übertragung der ermittelten Messdaten und Berechnungsfunktionen auf diese Werkstoffe kann Zeit und Ressourcen gespart werden, da zusätzliche Versuche vermieden werden können. Dies ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Charakterisierung von Werkstoffen innerhalb derselben Werkstofffamilie.

Aufgrund der hohen Homogenität der Bettungsmodulwerte bei den untersuchten Werkstoffen besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Rückstellmuster für eventuelle Nachprüfungen erheblich zu reduzieren. Diese Erkenntnis basiert auf der Tatsache, dass die einzelnen Prüfkörper nur eine geringe Streuung aufweisen und somit als repräsentative Stichprobe für die gesamte Charge angesehen werden können. Die hohe Homogenität der Bettungsmodulwerte stellt eine wichtige Erkenntnis dar, die eine effizientere und kostensparende Durchführung von Nachprüfungen ermöglicht. Durch die Reduzierung der Rückstellmuster auf nur ein Exemplar wird der Zeitaufwand für die Prüfung erheblich

verringert, ohne dabei die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Diese Erkenntnis hat weitreichende Auswirkungen auf die praktische Anwendung und Qualitätskontrolle von Werkstoffen. Eine Reduzierung der Anzahl der Rückstellmuster führt zu Zeit- und Kosteneinsparungen, ohne die Qualitätssicherung zu gefährden. Gleichzeitig ermöglicht sie eine effizientere Prüfung und eine schnellere Bewertung der Werkstoffeigenschaften. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass die Entscheidung, die Anzahl der Rückstellmuster auf eins zu reduzieren, sorgfältig und unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen und Risiken getroffen werden sollte. Eine gründliche Analyse der vorhandenen Daten und eine Bewertung der Homogenität der Bettungsmodule sind unerlässlich, um sicherzustellen, dass die gewählte Vorgehensweise zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse liefert.

7.2 Prüfverfahren

Vorgegebene Prüfparameter, die durch aktuelle Normen definiert sind, spielen eine entscheidende Rolle bei der Durchführung normgerechter Prüfungen. Allerdings stoßen viele dieser Parameter in der Praxis auf Schwierigkeiten und sind mit hohen Kosten verbunden, sowohl in Bezug auf den Energieverbrauch als auch den Zeitaufwand. Insbesondere im Bereich der Eigenüberwachung, in dem eine hohe Anzahl von Prüfungen während der Produktion durchgeführt werden müssen, ist eine dringende Änderung der Parameter erforderlich. Die bestehenden Normen wurden entwickelt, um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Prüfergebnissen sicherzustellen. Sie dienen als Referenz für die Qualitätssicherung und ermöglichen den Austausch von Daten zwischen verschiedenen Parteien. Eine der Herausforderungen besteht darin, dass die aktuellen Prüfparameter zu einem hohen Energieverbrauch und Zeitaufwand führen. Dies kann zu erheblichen Kosten für Unternehmen führen insbesondere, wenn Prüfungen in großem Umfang durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus können längere Prüfdauern zu Verzögerungen in der Produktion führen und die Effizienz beeinträchtigen. Im Bereich der Eigenüberwachung, bei dem kontinuierlich Werte generiert werden, sind die aktuellen Prüfparameter besonders problematisch. Wenn die vorgegebenen Parameter nicht den tatsächlichen Bedürfnissen und Möglichkeiten entsprechen, kann dies zu einem hohen Aufwand und finanziellen Belastungen führen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist es erforderlich, die Prüfparameter an die tatsächlichen Gegebenheiten anzupassen. Dabei sollte ein Gleichgewicht zwischen den Anforderungen der Normen und den praktischen Bedürfnissen gefunden werden. Die Überarbeitung der Prüfparameter sollte darauf abzielen, die Durchführungsdauer zu reduzieren, den Energieverbrauch zu minimieren und die Effizienz zu steigern.

Durch die Änderungen, die mit der Einführung der europäischen Normen im Bereich der Elastomerprüfungen einhergehen, kommt es zu einer deutlichen Verlängerung der Prüfungsdauer bei der Bestimmung des statischen Bettungsmoduls. Da dieser nun beim fünften, statt wie bisher beim dritten Belastungszyklus ermittelt werden muss, verlängert sich die Gesamtdauer um 66 %. Wie nachgewiesen wurde, ist kein Unterschied zwischen den Bettungsmoduln, die am dritten und fünften Belastungszyklus ermittelt wurde, vorhanden. Das bedeutet, dass es für die Qualitätsüberwachung vollkommen ausreichend ist, den Bettungsmodul mit nur drei Belastungszyklen zu bestimmen. Dieser Erkenntnis folgend wäre es sinnvoll, bei der nächsten Überarbeitung der europäischen Normen die Anzahl der Belastungszyklen für die Ermittlung des statischen Bettungsmoduls auf drei zu reduzieren.

Insgesamt bietet die Reduzierung der Belastungszyklen eine vielversprechende Möglichkeit, die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Elastomerprüfungen zu verbessern, ohne die Qualität zu beeinträchtigen. Indem die Prüfungsdauer optimiert wird, können Unternehmen effektiver arbeiten und gleichzeitig die Anforderungen der Qualitätsüberwachung erfüllen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der im Zusammenhang mit dem Prüfungsablauf untersucht wurde, ist die Prüfgeschwindigkeit. Gemäß den geltenden Normen im Bereich der Elastomerprüfung ist für die Bestimmung des Bettungsmoduls eine Prüfgeschwindigkeit von $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$ festgelegt. Die absolute Geschwindigkeit wird unabhängig von der Art des Werkstoffs verwendet und ist allein von der Größe des Prüfkörpers abhängig. Die Einhaltung der vorgegebenen Prüfgeschwindigkeit führt jedoch zu erheblichen Unterschieden in der Prüfungsdauer, insbesondere bei extrem niedrigen oder hohen Prüflasten. Dies stellt sowohl in Bezug auf den Energieverbrauch als auch den Zeitaufwand eine Herausforderung dar. Daher besteht die Notwendigkeit, die Belastungsgeschwindigkeit für die Bestimmung des statischen Bettungsmoduls zu ändern. Im Rahmen von Untersuchungen wurde die Auswirkung von Änderungen der Prüfgeschwindigkeit auf die ermittelten Bettungsmodulwerte analysiert. Dabei wurden verschiedene Geschwindigkeiten getestet, darunter die vorgegebene Normgeschwindigkeit von $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$,

aber auch die Hälfte, das Doppelte und das Dreifache dieser Geschwindigkeit. Es stellte sich heraus, dass weder bei einer Halbierung noch bei einer Verdreifachung der Normgeschwindigkeit eine signifikante Beeinflussung der Bettungsmodulwerte festgestellt wurde. Dies zeigt, dass eine Änderung der Prüfgeschwindigkeit keine negativen Auswirkungen auf die Bestimmung des Bettungsmoduls hat. Die Erkenntnis, dass die Prüfgeschwindigkeit keine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Bettungsmodulwerte spielt, ist von großer Bedeutung. Dies ermöglicht es, die Prüfungsdauer flexibler zu gestalten und an die spezifischen Anforderungen anzupassen, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Insgesamt bietet die Flexibilisierung der Prüfgeschwindigkeit eine Möglichkeit, die Effizienz der Elastomerprüfung zu verbessern, indem die Prüfungsdauer an die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen angepasst wird. Durch eine angemessene Auswahl der Prüfgeschwindigkeit können Unternehmen ihre Ressourcen effizienter nutzen und gleichzeitig die erforderlichen Qualitätsstandards erfüllen. Die Berücksichtigung dieser Aspekte bei der Entwicklung oder Überarbeitung von Normen im Bereich der Elastomerprüfung ist entscheidend, um praxisorientierte und nachhaltige Lösungen zu schaffen.

Um lange Prüfungsdauern zu verkürzen und gleichzeitig sehr kurze Prüfungsdauern maschinentechnisch zu vereinfachen, ist es erforderlich, die Prüfgeschwindigkeit nicht nur von der Größe des Prüfkörpers, sondern auch von der anzufahrenden Oberlast abhängig zu machen. Eine individuelle Anpassung der Prüfgeschwindigkeit basierend auf der Oberlast ermöglicht eine effizientere Handhabung und optimierte Prüfzeiten. Um dies zu erreichen, werden Werkstoffe je nach ihrer Oberlast in verschiedene Gruppen eingeteilt, für die spezifische Prüfgeschwindigkeiten festgelegt sind.

In Tabelle 30 sind diese Gruppierungen mit den entsprechenden Prüfgeschwindigkeiten dargestellt. Diese Einteilung bietet eine praktische Orientierung und ermöglicht es, die Prüfdauer innerhalb eines angemessenen Bereichs zu begrenzen. Durch die Festlegung spezifischer Prüfgeschwindigkeiten für verschiedene Oberlastbereiche können Unternehmen ihre Prüfverfahren optimieren und die erforderlichen Prüfzeiten besser kontrollieren.

Tabelle 30: Einteilung der Prüfgeschwindigkeit nach maximaler angefahrener Oberlast

Bis zur maximalen statischen Belastung in N/mm ²	Prüfgeschwindigkeit in (N/mm ²)/s	Maximale Prüfungsdauer pro Belastungszyklus in s
0,05	0,005	10
0,50	0,010	50
1,00	0,020	50
2,00	0,030	67

Diese differenzierte Vorgehensweise basierend auf der Oberlast ermöglicht es, die Prüfungsdauer an die spezifischen Anforderungen jedes Werkstoffs anzupassen. Werkstoffe mit höheren Oberlasten erfordern in der Regel längere Prüfzeiten, während bei Werkstoffen mit niedrigeren Oberlasten kürzere Prüfzeiten ausreichen. Die Berücksichtigung der anzufahrenden Oberlast bei der Festlegung der Prüfgeschwindigkeit bietet einen praktischen Ansatz, um die Prüfungsdauer zu optimieren und den Anforderungen der verschiedenen Werkstoffe gerecht zu werden. Durch die Umsetzung dieser Maßnahme können Unternehmen Zeit und Ressourcen einsparen, indem sie effizientere Prüfverfahren etablieren und gleichzeitig die erforderliche Prüfgenauigkeit beibehalten. Es ist wichtig zu betonen, dass die Einteilung in Gruppen und die Festlegung der Prüfgeschwindigkeiten auf einer gründlichen Analyse und Bewertung basieren sollten. Eine umfassende Untersuchung der Werkstoffeigenschaften und der anzufahrenden Oberlasten ist entscheidend, um genaue und zuverlässige Prüfgeschwindigkeiten festzulegen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Prüfungen praxisnah sind und qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern.

Insgesamt ermöglicht die Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit von der Prüfkörpergröße und der anzufahrenden Oberlast eine individuelle Anpassung der Prüfverfahren im Bereich der Elastomerprüfung. Dies trägt zu einer erhöhten Effizienz, Kosteneinsparungen und einer verbesserten Qualitätssicherung bei. Die kontinuierliche Überarbeitung und Aktualisierung der Normen unter Berücksichtigung dieser Faktoren ist wichtig, um die aktuellen Anforderungen der Industrie zu erfüllen und praxisgerechte Lösungen zu schaffen.

7.3 Angepasstes Prüfprozedere

Insgesamt tragen die Analyse und Bewertung der Prüfparameter dazu bei, das Verständnis für den Einfluss dieser Parameter auf den Bettungsmodul zu vertiefen und die Qualität der Prüfverfahren weiter zu verbessern. Durch eine kontinuierliche Überprüfung und gegebenenfalls notwendige Anpassungen der Normvorgaben können zuverlässigere und aussagekräftigere Messergebnisse erzielt werden, die eine solide Grundlage für die Bewertung und Vergleichbarkeit von Bettungsmodulwerten bieten. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Normen und Prüfverfahren auf Basis aktueller Erkenntnisse und Erfahrungen trägt zur Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung in der Elastomerindustrie bei. Die Überarbeitung der Normen ist ein iterativer Prozess, der auf einer kontinuierlichen Zusammenarbeit zwischen Experten, Normungsgremien und der Industrie basiert. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Praxis sowie aktuelle Forschungsergebnisse sollten in die Überarbeitung einfließen, um sicherzustellen, dass die Normen den aktuellen Anforderungen gerecht werden und den neuesten Stand der Technik widerspiegeln.

Insgesamt zeigen die in Tabelle 31 zusammengefassten Optimierungsansätze, dass eine Anpassung des Prüfverfahrens zur Bestimmung des Bettungsmoduls eine Vielzahl von Aspekten umfasst. Durch die Berücksichtigung dieser Optimierungsansätze in einer Überarbeitung der Normen kann das Prüfverfahren verbessert und an die aktuellen Anforderungen und Erkenntnisse angepasst werden.

Tabelle 31: Zusammenfassung der Optimierungsansätze und ihre positiven Auswirkungen

Prüfmerkmal	Optimierungsansatz	Auswirkungen
Prüfkörper:	Unterscheidung in Prüfkörpereigenschaften wie beispielsweise Oberflächenbeschaffenheit, Verklebung, etc.	Homogene Prüfkörper, Reduzierung äußerer Einflüsse auf das Messergebnis
Prüfkörpermaße:	300 mm x 100 mm x Einbaudicke	Reduzierung des Werkstoffverbrauches und -verschnittes, Reduzierung der notwendigen Lagerkapazitäten
Art der Lasteinwirkung:	vertikal, zwischen zwei ebenen Lastplatten mit jeweils zwischengelegten Schleifleinen der Körnung 240	Homogene Prüfbedingungen, Reduzierung äußerer Einflüsse auf das Messergebnis
Be- und Entlastungsgeschwindigkeit:	kontinuierlich, entsprechend der anzufahrenden Maximallast, siehe Tabelle 30	Reduzierung der Prüfdauer, Erhöhung der Prüfkapazität
Anzahl der Lastzyklen:	drei	Reduzierung der Prüfdauer und Erhöhung der Prüfkapazität

Durch die vorgeschlagenen Änderungen kann es auch zu Abweichungen der Bettungsmodulwerte im Vergleich zu dem standardisierten Prüfverfahren kommen. Die Größe dieser Abweichungen hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe, die angewandten Prüfverfahren und die durchgeführten Anpassungen. Wie groß diese im ungünstigsten Fall sein können, wurde im Folgendem für Werkstoff M03 und M08 bestimmt. Als Basis wurde ein Prüfkörper mit den Dimensionen 100 mm x 300 mm x 50,0 mm gewählt. Dies begründet sich auf die vorgeschlagene Prüfkörperfläche (siehe Kapitel 7.1) und dem kleinsten untersuchten Formfaktor,

bei dem meist die größten Abweichungen auftreten. Wenn für den exakten Formfaktor keine ermittelten Werte vorliegen, werden die des nächstliegenden Formfaktors gewählt.

Für beide Werkstoffe wird eine identische Vorgehensweise durchgeführt. Da als Prüfkörperdimension die Maße 100 mm x 300 mm x 50,0 mm gewählt werden, wird zunächst der Einfluss der geänderten Grundflächengeometrie berücksichtigt (siehe 5.1.3, Abbildung 35 und Anlage A.4, Abbildung A. 4. 5). Als nächstes werden die Einflüsse aus dem optimierten Prüfverfahren betrachtet. Diese beinhalten die Lastzyklenanzahl von drei (siehe Kapitel 5.2.1, Tabelle 18 und Tabelle 19) und die angepasste Prüfgeschwindigkeit nach entsprechender anzufahrender Oberlast (siehe Kapitel 5.2.2, Tabelle 21). Danach folgt die erste Differenzierung der Prüfkörpereigenschaften. Es wird nach Verbundzustand unterschieden. Bei den gespalteten ($h = 12,5$ mm) oder unverklebten Prüfkörpern wird in weiteren Schritten die Oberfläche und die eventuelle Wiederverwendbarkeit abgefragt (siehe Kapitel 5.1.2, Tabelle 7). Bei einem einschichtigen mit $h = 25,0$ mm oder verklebten Prüfkörper muss keine weitere Unterscheidung vorgenommen werden, da hier weder unterschiedliche Oberflächeneigenschaften vorliegen, noch wiederverwendete Prüfkörper verwendet werden. Die berechneten Einzelwerte der Abweichungen sowie das Ergebnis der Aufsummierung können der Abbildung 66 und Abbildung 67 entnommen werden.

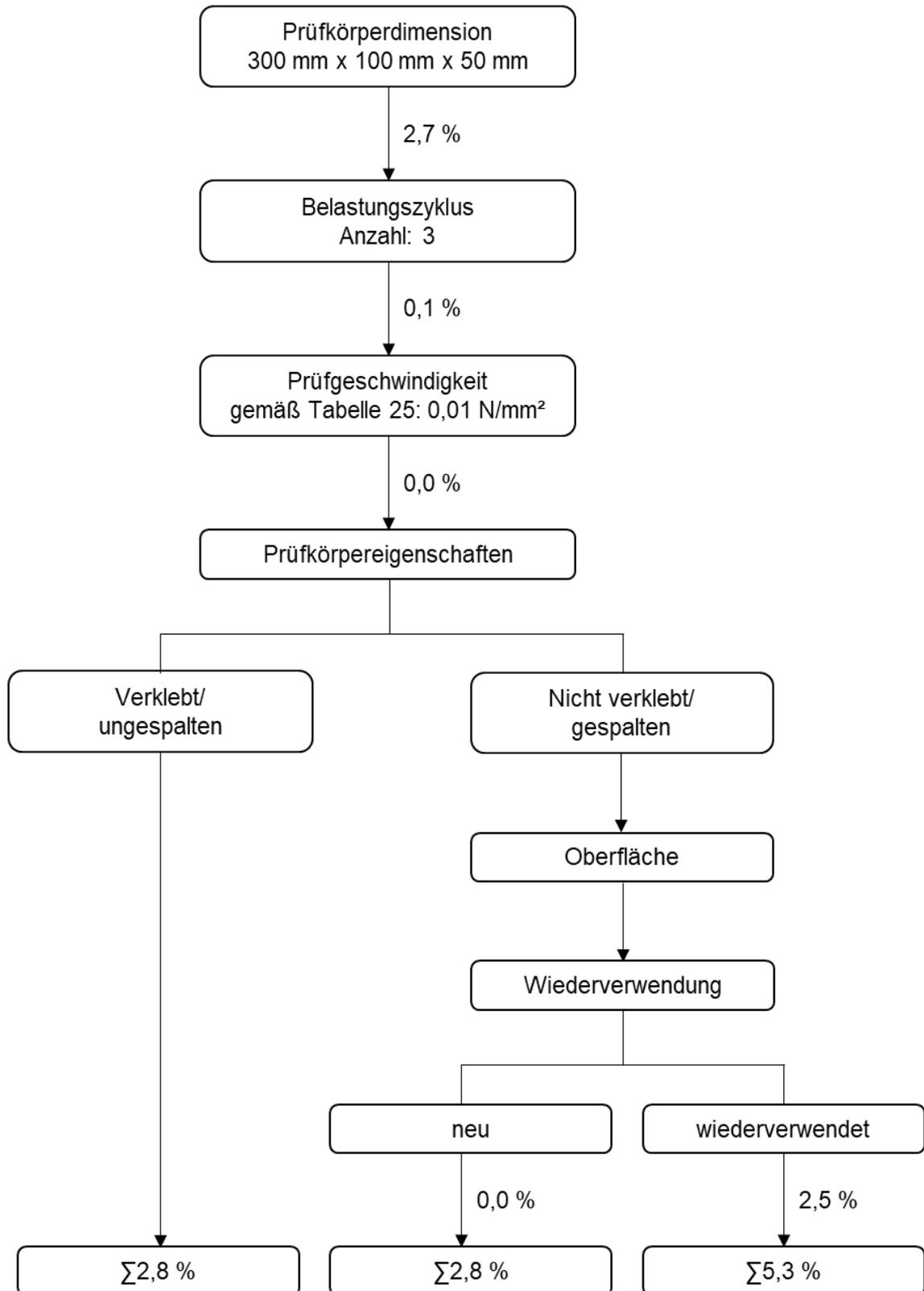


Abbildung 66: Aufstellung der verschiedenen Abweichungen bei Verwendung des optimierten Prüfverfahrens für Werkstoff M03

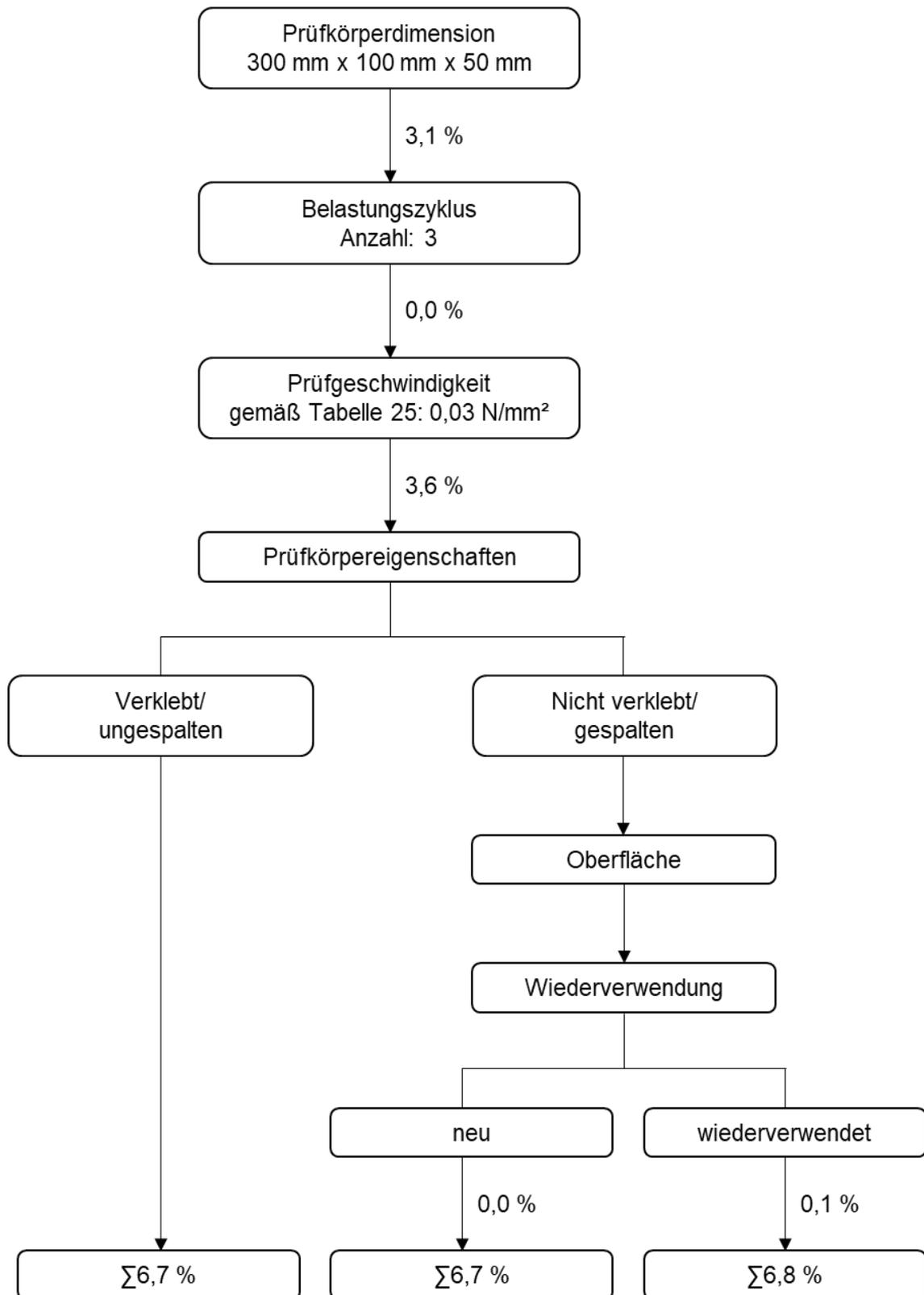


Abbildung 67: Aufstellung der verschiedenen Abweichungen bei Verwendung des optimierten Prüfverfahrens für Werkstoff M08

Da es bei der Aufsummierung um die Abweichungen zum normgemäßen Prüfverfahren geht, wurde bewusst der Einfluss des Werkstoffs nicht beachtet. Dies liegt daran, dass der Werkstoff bei beiden Prüfverfahren identisch wäre und somit keinen zusätzlichen Beitrag zu den Abweichungen leisten würde. Des Weiteren werden die Messunsicherheiten, die in Kapitel 4.4. ermittelt wurden, aus demselben Grund nicht in die Aufsummierung der Abweichungen einbezogen. Die Vernachlässigung des Werkstoffeinsatzes und der Messunsicherheiten in der Aufsummierung erleichtert die Analyse der reinen Einflüsse des geänderten Prüfverfahrens auf die Prüfkörpereigenschaften. Dies ermöglicht eine genauere Beurteilung der Effektivität und der Anpassungen, die im Rahmen des optimierten Verfahrens vorgenommen wurden.

Durch die detaillierte Auflistung wird noch einmal deutlich, wie wichtig die Differenzierung der Prüfkörper nach ihren spezifischen Eigenschaften ist. Insbesondere beim Verklebezustand der Prüfkörper wurden erhebliche Einflüsse festgestellt, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es signifikante Abweichungen bei den oben genannten Prüfkörpern gibt. Für M03 ergab sich eine Abweichung von 17,3 %, während M08 sogar eine Abweichung von 25,0 % aufwies (siehe Kapitel 5.1.4, Tabelle 12). Darüber hinaus wurde bei M03 eine zusätzliche Abweichung von mehr als 24 % aufgrund der Oberflächeneigenschaften festgestellt (siehe Kapitel 5.1.1, Tabelle 5). Diese Einflüsse weisen somit deutlich größere Werte auf als die aufsummierten Abweichungen, die durch das optimierte Prüfverfahren entstehen.

In der Norm DIN 45673-7:2010 wird ein Toleranzbereich für die Messergebnisse von 15 % angegeben. Nach einer detaillierten Betrachtung der möglichen Einflussfaktoren und der Berücksichtigung des ungünstigsten Falls ist deutlich erkennbar, dass die erarbeiteten Optimierungsansätze zu Abweichungen innerhalb dieses Toleranzbereichs führen. Selbst unter Berücksichtigung der allgemeinen Abweichungen, die durch den Prüfaufbau und die Eigenschaften des Werkstoffs entstehen, werden die vorgegebenen Toleranzen eingehalten. Diese zusätzlichen Abweichungen betragen jeweils:

Werkstoff M03:

- Messunsicherheit (siehe Kapitel 4.4): 1,7 %
- Werkstoff (siehe Kapitel 5.1.4, Tabelle 14) :
 - verklebt: 1,9 %
 - unverklebt: 2,8 %

Werkstoff M08:

- Messunsicherheit (siehe Kapitel 4.4): 2,6 %
- Werkstoff (siehe Kapitel 5.1.4, Tabelle 14):
 - verklebt: 1,7 %
 - unverklebt: 1,5 %

Die zusätzlichen Abweichungen, die durch das angepasste Prüfverfahren auftreten können, betragen maximal 4,1 % für M03 und maximal 4,3 % für M08. Dies bedeutet, dass selbst unter Berücksichtigung aller möglichen Abweichungen die Gesamtwerte maximal bei 9,4 % für M03 und bei 11,1 % für M08 liegen. Die geringen zusätzlichen Abweichungen zeigen, dass das optimierte Prüfverfahren in der Lage ist, die Werte zuverlässig und aussagekräftig zu ermitteln und eine genaue Bewertung des Prüfkörpers ermöglichen.

Die festgelegten Toleranzgrenzen dienen als Richtlinie für die Bewertung der Messergebnisse und ermöglichen eine einheitliche und standardisierte Interpretation der Daten. Sie stellen sicher, dass die ermittelten Werte innerhalb eines akzeptablen Bereichs liegen und dass die Ergebnisse mit anderen Messungen vergleichbar sind. Dies ist besonders wichtig, um objektive und fundierte Entscheidungen im Bereich der Werkstoffentwicklung, Qualitätssicherung und Anwendungsbeurteilung treffen zu können. Durch die Anwendung des angepassten Prüfverfahrens können verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden, die den Anforderungen der Norm gerecht werden.

8 Fazit und Ausblick

Durch eine steigende Urbanisierung weltweit wird das Bauwesen vor immer größere Herausforderungen gestellt. Vor allem der schwindende Abstand zwischen Bebauung und Verkehrswegen sorgt für technisch komplexe Herausforderungen. Dies wird durch die Änderung der Lärmschutzverordnung zusätzlich verstärkt. Seit der Einführung der ersten Lärmschutzverordnung vor knapp 50 Jahren wurden die festgelegten Grenzwerte für den Lärmpegel mehrfach verschärft [65]. Seit 2017 gilt in Deutschland beispielsweise ein Grenzwert von 55 dB tagsüber und 40 dB in der Nacht [66]. Dies bedeutet eine Reduzierung des erlaubten Grenzwertes über die letzten Jahrzehnte um 9 dB. Damit eine solche Verringerung erreicht werden kann, muss der Schallpegel mehr als halbiert werden.

Die Implementierung effektiver Schallschutzmaßnahmen, der Einsatz fortschrittlicher Technologien und die enge Zusammenarbeit der beteiligten Parteien sind entscheidend, um den Schutz vor Lärmbelästigung zu gewährleisten und eine angenehme Wohn- und Arbeitsumgebung für die Menschen in städtischen Gebieten zu schaffen. Um das Einhalten der Grenzwerte überhaupt zu ermöglichen, ist der Einsatz von elastomeren Werkstoffen unabdingbar. Jedoch folgen der steigenden Nachfrage auch die Herausforderungen für die Produzenten. Die große Abhängigkeit vom stetig steigenden Rohölpreis und mangelnden Lagerkapazitäten stellen Probleme dar. Die Themen Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit müssen deshalb mehr in den Fokus gerückt werden, um eine wirtschaftliche Produktion und Verwendung von Elastomeren weiterhin zu ermöglichen.

Ein wichtiger Aspekt dabei ist die dauerhafte Senkung der Produktionskosten durch den optimierten Einsatz von Werkstoffen. Dies beinhaltet nicht nur eine effiziente Werkstoffnutzung, sondern auch die Reduzierung von Werkstoffabfällen. Die logistischen Herausforderungen, wie die Lagerkapazität für Rückstellmuster, dürfen ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Es ist wichtig, effiziente Lager- und Logistikstrategien zu entwickeln, um Engpässe zu vermeiden und den Materialfluss zu optimieren. Hinzu kommt, dass es durch die Einführung der europäischen Normen für den Bereich der Elastomerprüfungen einige Veränderungen in den Prüfungsdurchführungen kommt. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Verlängerung der Prüfdauer. Dies geht mit einem Anstieg an Energieverbrauch und einem Abstieg an Prüfungskapazitäten einher. Gerade im Bereich der Eigenüberwachung und des Quantitätsmanagements ist dies eine gravierende Zunahme an Kosten.

Im Bereich der elastomeren Werkstoffe ist großes Potenzial für Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit vorhanden. In dieser Arbeit liegt der Fokus für Optimierungen auf den Prüfverfahren für die Bestimmung von mechanischen Eigenschaften von Elastomeren. Obwohl dies nur einer von vielen Bereichen im Lebenszyklus von Elastomeren darstellt, werden die vorgeschlagenen Veränderungen in diesem Bereich bereits zu erheblichen Verbesserungen für eine nachhaltige Nutzung beitragen. Diese beziehen sich zum einen auf die Prüfkörper selbst sowie den von Normen vorgegebenen Prüfablauf.

Durch die oben beschriebenen Optimierungsansätze ergeben sich mehrere Verbesserungen in den Bereichen, für die die Bestimmung der Bettungsmoduln relevant ist. Durch die Reduzierung der Fläche und die Änderung der Form der zu prüfenden und zu lagern- den Elastomeren wird sowohl der Werkstoffverschnitt als auch der Abfall deutlich verringert. Gleichzeitig ermöglicht die Anpassung der Prüfkörperdimensionen eine optimale Nutzung der Lagerkapazitäten für Rückstellmuster. Die unterschiedlichen Prüfkörperdimensionen können flexibel gestaltet werden, während die Vergleichbarkeit von verschiedenen Produkten gewährleistet bleibt. Darüber hinaus führen die Änderungen bestimmter Prüfparameter zu einer deutlichen Optimierung der Prüfungsdurchführung. Dies hat wiederum positive Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die Prüfungskapazitäten. Durch eine gezielte Anpassung der Prüfparameter können Energieeinsparungen erzielt und gleichzeitig die Kapazitäten für Prüfungen erhöht werden. Es ist wichtig anzumerken, dass alle diese Optimierungen keine Einbußen in Bezug auf die Aussagekraft oder Verwendbarkeit der Bettungsmodulwerte mit sich bringen. Die Qualität und Zuverlässigkeit der ermittelten Werte bleibt erhalten, während gleichzeitig Effizienzsteigerungen und Nachhaltigkeitsziele erreicht werden.

Die erarbeiteten Optimierungsansätze beziehen sich auf das Prüfverfahren zur Bestimmung der Steifigkeit bzw. der Bettungsmoduln. Diese sind der wichtigste Parameter, um das mechanische Verhalten von Werkstoffen zu beschreiben. Die Bestimmung der Steifigkeit bzw. des Bettungsmoduls geht mit einer sehr hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte einher. Die nachgewiesene Möglichkeit der Berechnung der Bettungsmodulwerte zeigt aufgrund der hohen Bestimmtheitsmaße ebenfalls eine hohe Übereinstimmung. Die hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte bei der Bestimmung der Steifigkeit bzw. des Bettungsmoduls ermöglicht es, präzise Aussagen über das mechanische Verhalten von Werkstoffen zu treffen. Dies ist sowohl in der Forschung als auch in der Industrie von großer Bedeutung, um Werkstoffe optimal einzusetzen und ihre Leistungsfähigkeit zu maximieren. Durch die Optimierungsansätze, die

im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, wird sichergestellt, dass die Messergebnisse zuverlässig und konsistent sind.

Vorhandene, alternative Prüfverfahren, die ebenfalls direkt oder indirekt mit der Bestimmung der Steifigkeit einhergehen, wie beispielweise die Bestimmung der Shore-Härte, liefern keine gleichwertigen Ergebnisse. Die Shore-Härte ist ein häufig verwendetes Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte von Materialien, einschließlich elastomerer Werkstoffe. Es basiert auf der Eindringtiefe eines speziellen Prüfkörpers in das zu prüfende Material und liefert einen numerischen Wert, der die Härte des Materials widerspiegelt. Obwohl die Shore-Härte in einigen Anwendungsbereichen nützliche Informationen liefern kann, ist sie nicht in der Lage, die Steifigkeit eines Materials mit der gleichen Präzision und Zuverlässigkeit, wie das hier diskutierte Prüfverfahren zu bestimmen. Ein alternatives Prüfverfahren, das vergleichbare Aussagen zur Steifigkeit elastomerer Werkstoffe liefern könnte, müsste eine Reihe von anspruchsvollen Anforderungen erfüllen. Es müsste eine hohe Homogenität der Messergebnisse gewährleisten, um konsistente und reproduzierbare Werte zu liefern. Zudem müsste es die Fähigkeit besitzen, externe Einflüsse wie Messtechnik und Werkstoffeigenschaften quantifizieren und berücksichtigen zu können, um genaue und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus sollte das alternative Verfahren auf andere nicht geprüfte Werkstoffe übertragbar sein, um seine Anwendbarkeit zu erweitern. Nach dem aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft existiert kein solches alternatives Prüfverfahren, das in der Lage ist, vergleichbare Aussagen zur Steifigkeit elastomerer Werkstoffe zu liefern. Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sind weiterhin erforderlich, um neue Ansätze und Methoden zu finden, die den Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Übertragbarkeit gerecht werden.

Deshalb ist das durchgeführte Prüfprozedere mit den vorgestellten Optimierungen als Standardverfahren für die Bestimmung der Steifigkeit anzuwenden. Dieses Prüfverfahren bietet zahlreiche Vorteile, wie dass bereits etablierte Normen und Richtlinien für die Durchführung der Versuche genutzt werden können. Dies erleichtert die Umsetzung des Verfahrens in verschiedenen Industriezweigen und sorgt für eine einheitliche Herangehensweise bei der Bestimmung der Steifigkeit von elastomeren Werkstoffen. Zusätzlich ist das angewendete Prüfverfahren nicht nur auf die untersuchten Werkstoffe beschränkt, sondern könnte auch auf andere PUR-Elastomere sowie auf andere elastomere Werkstoffe mit ähnlichen Eigenschaften angewendet werden. Dies unterstreicht

die Vielseitigkeit und Anwendbarkeit des Verfahrens in der Praxis. Durch die breite Anwendungsmöglichkeit wird eine konsistente Bewertung der Steifigkeit verschiedener elastomerer Werkstoffe ermöglicht, was wiederum die Vergleichbarkeit und den Austausch von Ergebnissen erleichtert.

In dieser Arbeit wurden erste Schritte unternommen, um Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit im Bereich elastomerer Werkstoffe zu fördern. Es wurden verschiedene Ansätze aufgezeigt, die das Potenzial haben, die Effizienz und Nachhaltigkeit der Werkstoffe weiter zu verbessern. Trotz dieser Fortschritte besteht jedoch noch viel Raum für weitere Untersuchungen und Optimierungen in diesem Bereich. Ein vielversprechender Ansatz ist die Weiterentwicklung von Prüfverfahren, um eine Wertebestimmung am gesamten Produkt zu ermöglichen und die Notwendigkeit von physischen Prüfkörpern vollständig zu eliminieren. Durch die Entwicklung neuer Prüfmethode können wertvolle Ressourcen eingespart werden, indem weniger Werkstoff für die Herstellung von Prüfkörpern benötigt wird. Gleichzeitig kann dies zu einer effizienteren Bewertung der Werkstoffeigenschaften führen, da eine umfassendere und praxisnähere Analyse des gesamten Produkts möglich ist.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Es bedarf einer vertieften Untersuchung vor allem im Bereich der Wiederverwendbarkeit von Prüfkörper, dem Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Formfaktor und die Anwendbarkeit für andere elastomere Werkstoffe. Um die Anzahl der Prüfungsdurchläufe ohne Auswirkungen auf das Bettungsmodul zu bestimmen, wäre es sinnvoll, eine größere Stichprobe von Prüfkörpern zu untersuchen und die Prüfungen über einen längeren Zeitraum durchzuführen. Durch regelmäßige Messungen und Analysen könnte festgestellt werden, ob und wann sich die Leistung der Prüfkörper verschlechtert und ob eine Erholungsphase von mindestens 24 Stunden erforderlich ist, um die optimale Funktionalität wiederherzustellen. Zusätzlich sind weitere Untersuchungen mit dem Fokus auf Werkstoffen mit geringer Raumdichte wichtig, um ein umfassenderes Verständnis für den Einfluss des Formfaktors und der Raumdichte auf das Bettungsmodul zu erlangen. Solche Untersuchungen würden zu einem tieferen Wissen über die Werkstoffeigenschaften führen und könnten die Entwicklung von Werkstoffen mit geringer Raumdichte sowie die Qualitätssicherung und Anwendungsbeurteilung in diesem Bereich verbessern. Dadurch könnte zukünftig die Bestimmung des Bettungsmoduls über eine Dichtemessung erfolgen, die im Idealfall am einzubauenden Produkt stattfinden kann und somit die Herstellung von Prüfkörpern unnötig macht. Für elastomere Werkstoffe aus derselben PUR-

Familie oder mit ähnlichem Werkstoffverhalten besteht die Möglichkeit, die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der vorgestellten Optimierungsansätze durch gezielte Tastversuche zu bestätigen. Bei anderen elastomeren Werkstoffen, die sich von der untersuchten PUR-Familie unterscheiden, sind ausgedehntere Versuchsreihen erforderlich, um die Anwendbarkeit der vorgestellten Optimierungsansätze zu überprüfen. Dennoch können auch bei diesen Werkstoffen gezielt die Aspekte der Prüfungen berücksichtigt werden, die in dieser Forschungsarbeit behandelt wurden. Hierbei kann auf die ermittelte Datenbasis und die gewonnenen Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit zurückgegriffen werden, sofern die Werkstoffe ein ähnliches Verhalten aufweisen. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse können als Ausgangspunkt dienen und eine Grundlage für die Durchführung weiterer Untersuchungen bilden. Dies ermöglicht eine Anpassung der Prüfverfahren und eine Verbesserung der Werkstoffprüfungen für verschiedene elastomere Werkstoffe.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bisherigen Fortschritte zur Ressourcenoptimierung und Nachhaltigkeit elastomerer Werkstoffe vielversprechend sind, aber weitere Untersuchungen und Optimierungen erforderlich sind. Durch die Verbesserung bestehender Prüfverfahren, die Entwicklung neuer Ansätze zur Wertebestimmung am gesamten Produkt und die ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit können bedeutende Fortschritte erzielt werden. Es ist unerlässlich, dass Forschung und Entwicklung in diesem Bereich fortgesetzt werden, um eine nachhaltigere und effizientere Nutzung elastomerer Werkstoffe zu ermöglichen und die Anforderungen an eine ressourcenschonende Produktion zu erfüllen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung*: Hintergrund: Das Zeitalter der Städte, <https://www.bmz.de/de/themen/stadtentwicklung/hintergrund-18138> [Zugriff am: 31.03.2023].
- [2] *Calenberg Ingenieure GmbH*: Erfüllung höchster Qualitätsansprüche an elastomere Lagerungstechnik im Bauwesen. Calenberg Ingenieure GmbH. Calenberg Ingenieure GmbH, Salzhemmendorf, Germany, 2014.
- [3] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*: Umweltbewusstsein in Deutschland 2020 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, 2022, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/ubs_2020_0.pdf [Zugriff am: 19.04.2023].
- [4] *Dr. -Ing. Walter Stahl*: Körperschallemissionen und Körperschallschutz bei Bahnen – Umdruck. Technische Universität München, München Ausgabe 2022.
- [5] *Dr. -Ing. Christoph Simon*: Prüfungen von Federungselementen aus Elastomer. Technische Universität München, München Ausgabe 2021.
- [6] *Nagdi, K.*: Gummi-Werkstoffe – Ein Ratgeber für Anwender; Arten, Zusammensetzung, Verarbeitung, Eigenschaften, Beständigkeiten, Anwendungen, Prüfungen, Qualitätskontrolle, Klassifizierung, Chemie. Gupta, Ratingen, 2004.
- [7] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Case Studies, <https://www.getzner.com/de/case-studies> [Zugriff am: 02.03.2023].
- [8] *Statista GmbH*: Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöl in den Jahren 1960 bis 2022, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/810/umfrage/rohloelpreisentwicklung-opec-seit-1960/> [Zugriff am: 01.03.2023].
- [9] DIN EN 17282:2020-12: DIN EN 17282:2020-12, Bahnanwendungen_ - Infrastruktur_ - Unterschottermatten; Deutsche Fassung EN_17282:2020.
- [10] DIN 45763-7:2010-08: DIN 45763-7:2010-08, Mechanische Schwingungen_ - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen_ - Teil_7: Labor-Prüfverfahren für elastische Elemente von Masse-Feder-Systemen.
- [11] DIN EN 17682:2023-03: DIN EN 17682:2023-03, Bahnanwendungen_ - Infrastruktur_ - Elastisches Element für Masse-Feder-Systeme; Deutsche Fassung EN_17682:2022.

- [12] *Statista GmbH*: Plastikmüll – Weltweite Kunststoffproduktion von 1950 bis 2021, <https://de.statista.com/themen/4645/plastikmuell/#topicOverview> [Zugriff am: 01.03.2023].
- [13] *Henry Petroski*: Engineering Materials for the 21st Century. In: Chemical Engineering News (2000).
- [14] *Abts, G.*: Einführung in die Kautschuktechnologie. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2019.
- [15] Fette, Seifen und Waschmittel, Kunststoffe, Chemie für Gymnasien Themenh. 1, Cornelsen, Berlin, 2002.
- [16] *Abts, G.*: Kunststoff-Wissen für Einsteiger – Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, Hanser eLibrary, Hanser, München, 2020.
- [17] *Baur, E.; Harsch, G.; Moneke, M.*: Werkstoff-Führer Kunststoffe – Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. Hanser, München, 2019.
- [18] *Battermann, W.*: Elastomere Federung, elastische Lagerungen – Grundlagen ingenieurmäßiger Berechnung u. Konstruktion. Von Walter Battermann u. Robert Kähler. Ernst, Berlin, München, 1982.
- [19] *Schröder, B.*: Kunststoffe für Ingenieure – Ein Überblick, Essentials, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [20] *Domininghaus, H.*: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen ; mit 240 Tabellen, VDI-Buch, Springer, Berlin, 2008.
- [21] *Ross, E.; Maile, K.*: Werkstoffkunde für Ingenieure. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [22] *Bayer, O.*: Das Di-Isocyanat-Polyadditionsverfahren (Polyurethane) – Zusammenfassende Beschreibung eines neuen Aufbauprinrips für hochmolekulare Verbindungen. In: Angewandte Chemie (1947), S. 257-288.
- [23] *Agerer, M.S.*: PUR schäumen - Verarbeitung von Polyurethan-Schaumsystemen, <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/425-pur-schaeumen> [Zugriff am: 05.05.2023].
- [24] *Mezger, T.*: Das Rheologie-Handbuch – Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern, Farbe und Lack Edition, Vincentz Network, Hannover, 2012.
- [25] *Schröder, T.*: Rheologie der Kunststoffe – Theorie und Praxis. Hanser, München, 2020.
- [26] *Eggert, H.; Grote, J.; Kauschke, W.*: Lager im Bauwesen. Ernst, Berlin, 1974.

- [27] *DuPont de Nemours International SA*: Die Gummifachsprache. DuPont de Nemours International SA, Genf, Schweiz, 1963.
- [28] *Pósfalvi, Ö.*: Über das Elastizitätsgesetz und die Poisson'sche Zahl von gummielastischen Werkstoffen, Technische Universität Budapest, 1982.
- [29] *Baaser, H.*: Wie groß sind der E-Modul und die Querkontraktionszahl von Gummi?
In: Internationale Fachzeitschrift für polymere Werkstoffe (2013), 11-12.
- [30] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Werkstoffeigenschaften und Schwingungsisolierung – Technische Informationen, 2018, <https://www.getzner.com/media/1059/download/Brochure%20Material%20Properties%20and%20Vibration%20Isolation%20DE.pdf?v=5> [Zugriff am: 10.03.2023].
- [31] *Baur, M.*: Elastomerlager und nichtlineare Standorteffekte bei Erdbebeneinwirkung, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Dissertation, 2003.
- [32] *Gotsch, F.*: Untersuchung zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder- Dämpfer-Bauteilen, TUHH Universitätsbibliothek, Dissertation, 2009.
- [33] *Müller, G.; Möser, M. (Hrsg.)*: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer-Verlag. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2004.
- [34] DIN EN ISO 3740:2019-08, Akustik_ - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen_ - Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen (ISO_3740:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_3740:2019.
- [35] *Dr. -Ing. Walter Stahl*: Vorlesung Ergänzungskurs Verkehrswegebau – Berechnung des Eisenbahnoberbaus. Technische Universität München, München Ausgabe 2019.
- [36] DIN 4150-1:2022-12: DIN 4150-1:2022-12, Erschütterungen im Bauwesen_ - Teil_1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen.
- [37] RL 825.0101: Maschinen zur gleisgebundenen Bettungsreinigung.
- [38] *Meyer, E.; Guicking, D.*: Schwingungslehre. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1974.
- [39] *Krepold, F.*: Elastomerlager für Brücken – vergleichende Bemessung nach DIN 4141 und DIN EN 1337, 2012, https://w3-mediapool.hm.edu/mediapool/media/fk02/fk02_lokal/professoren_7/seiler/120524_Platat-Bachelorarbeit-Krepold.pdf [Zugriff am: 28.02.2023].

- [40] *Mageba engineering*: Sanierung von Brückenlagern, 2019, https://www.mageba-group.com/ch/data/docs/de_CH-1996/50993/BROCHURE-Lagersanierung-ch-de.pdf?v=1.0 [Zugriff am: 09.03.2023].
- [41] *PMC Media House GmbH*: Gleisbau-Welt – System Bahn - Das Einmal Eins der Eisenbahn. PMC Rail International Academy, <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/system-bahn/das-einmal-eins-der-eisenbahn> [Zugriff am: 19.04.2021].
- [42] *PMC Media House GmbH*: Oberbauformen - Oberbau: Gleisbau-Welt. PMC Rail International Academy, 2021, <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/oberbauformen/> [Zugriff am: 07.03.2021].
- [43] *PMC Media House GmbH*: Schwingungen - Lastabtragung: Gleisbau-Welt. PMC Rail International Academy, 2021, <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/lastabtragung/schwingungen/> [Zugriff am: 19.04.2021].
- [44] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Schwellensohlen, <https://www.getzner.com/de/produkte/bahn/schwellensohlen> [Zugriff am: 16.03.2023].
- [45] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Unterschottermatten, <https://www.getzner.com/de/produkte/bahn/unterschottermatten> [Zugriff am: 16.03.2023].
- [46] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Masse-Feder-Systeme, https://www.getzner.com/de/produkte/bahn/masse-feder-systeme?gclid=EAlaIqob-ChMlqte0p8Sd-AIVV4xoCR0FLAkjEAAAYASAAEgIXqvD_BwE [Zugriff am: 16.03.2023].
- [47] *Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft*: Systemtheorie Online: Beispiel Feder-Masse-Dämpfer-System. Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, 2021.000Z, <https://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-a-zeitkontinuierliche-signale-und-systeme/zeitkontinuierliche-systeme-im-zeitbereich/beschreibung-zeitkontinuierlicher-systeme-mit-differentialgleichungen/beispiel-feder-masse-daempfer-system.html> [Zugriff am: 06.03.2023].
- [48] *Breitsamter, N.*: CityTunnel Leipzig und neuer Kaiser-Wilhelm-Tunnel. Messtechnischer Nachweis der Einfügdungsdämmung – 5. VDI-Fachtagung, Kassel, 22. und 23. April 2015. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung; VDI-Fachtagung Baudynamik, VDI-Berichte Heft 2244, VDI-Verl., Düsseldorf, 2015.
- [49] *LUMITOS AG*: Steifigkeit, <https://www.chemie.de/lexikon/Steifigkeit.html> [Zugriff am: 03.05.2023].
- [50] *Göbel, E.F.*: Gummifedern – Berechnung und Gestaltung, Konstruktionsbücher Heft 7, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1969.

- [51] DIN 45673-5:2010-08, Mechanische Schwingungen_ - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen_ - Teil_5: Labor-Prüfverfahren für Unterschottermatten.
- [52] *M. Staller, W. Schmitt, L. Condrau, D. Müller, W. Stahl*. Statische Besonderheiten aus dem Erschütterungsschutz mit Naturkautschuk-Lagern für die Wohnanlage Theresienhöhe München [online]. In: Bauingenieur, 2018, <https://esz-becker.de/wp-content/uploads/2022/06/Theresienhoehe1.pdf>.
- [53] *Martin Dietrich*: Polyurethan der perfekte Schwingungsisolierer. FILL GmbH, 18. Internationale FSK-Fachtagung Polyurethan,, 2017.
- [54] *Hottinger Brüel & Kjaer GmbH*: Wegaufnehmer – Wie funktioniert ein induktiver Wegsensor?, 2023, https://www.hbm.com/de/0236/induktive-wegsensoren-und-wegaufnehmer/?product_type_no=Wegaufnehmer.
- [55] DIN EN ISO 7500-1:2018-06: DIN EN ISO 7500-1:2018-06, Metallische Werkstoffe_ - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen_ - Teil_1: Zug- und Druckprüfmaschinen_ - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung (ISO_7500-1:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_7500-1:2018.
- [56] DIN EN ISO 9513:2013-05: DIN EN ISO 9513:2013-05, Metallische Werkstoffe_ - Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung (ISO_9513:2012+_Cor._1:2013); Deutsche Fassung EN_ISO_9513:2012.
- [57] *Kiencke, U.; Eger, R.*: Messtechnik – Systemtheorie für Elektrotechniker. Springer, Berlin, 2008.
- [58] *Bornath, T.; Walter, G.*: Messunsicherheiten - Grundlagen – Für das Physikalische Praktikum. Springer Fachmedien Wiesbaden, Essentials, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2020.
- [59] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Sylomer – Der führende Werkstoff für Schwingungsisolierung, <https://www.getzner.com/de/produkte/sylomer> [Zugriff am: 09.03.2023].
- [60] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Sylodyn – Der Werkstoff für höchste Anforderungen, https://www.getzner.com/de/produkte/sylodyn?gclid=EAlaIQobChMI6a-xwp238AIVhJ3VCh2V2gbDEAAAYASAAEgl3YfD_BwE [Zugriff am: 09.03.2023].
- [61] *Getzner Werkstoffe GmbH*: Glossar, <https://www.getzner.com/de/search?q=glossar> [Zugriff am: 05.07.2023].

- [62] *Baltes-Götz, B.*: Lineare Regressionsanalyse mit SPSS. ZIMK - Zentrum für Informations-, Medien- und Kommunikationstechnologie, 2022, <https://www.uni-trier.de/fileadmin/urt/doku/linreg/linreg.pdf> [Zugriff am: 21.03.2023].
- [63] *Klaus, B.; Zuber, V.*: Eine Einführung in R: Dichten und Verteilungsfunktionen. Universität Leipzig, 2009, <https://docplayer.org/51161681-Eine-einfuehrung-in-r-dichten-und-verteilungsfunktionen.html> [Zugriff am: 12.04.2023].
- [64] *Imkenberg, U.; Mauch, T.*: Das Lichtspaltverfahren. PRUEFMITTEL.ORG. Messgeräte, Lehren, Maßverkörperungen, Hilfsmittel, <https://www.pruefmittel.org/lichtspaltverfahren.html> [Zugriff am: 12.04.2023].
- [65] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*: Das Umweltbundesamt - 1974, <https://www.umweltbundesamt.de/1974#umweltbundesamt> [Zugriff am: 19.04.2023].
- [66] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2017.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Molekülstruktur von Thermoplasten, Elastomeren und Duroplasten (Eigene Darstellung basierend auf [15])	13
Abbildung 2: Prinzipielles Verhalten polymerer Werkstoffe auf variable Belastung und Temperatur (Eigene Darstellung basierend auf [14])	15
Abbildung 3: Polyaddition von Glykol und Diisocyanat (Eigene Darstellung basierend auf [17]).....	16
Abbildung 4: Urethan-Gruppe (blau) mit R ¹ als Diol und R ² als Diisocyanat (Eigene Darstellung basierend auf [22])	17
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Produktion von PUR im Spitzgießverfahren [21].....	17
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Produktion von PUR-Schaum [23]	18
Abbildung 7: Verschiedene Deformationsmechanismen (oben) und deren zugehörig rheologischen Darstellungen (unten) (Eigene Darstellung basierend auf [17]) ...	20
Abbildung 8: Exemplarisches Verhalten polymerer Werkstoffe bei Be- und Entlastung (Eigene Darstellung basierend auf [14])	21
Abbildung 9: Verformung eines Elastomers unter Druckbelastung (Eigene Darstellung basierend auf [18])	22
Abbildung 10: Bildliche Darstellung zu Formel (2-1) (Eigene Darstellung basierend auf [30]).....	22
Abbildung 11: Molekülstruktur von Elastomeren im unbelasteten und belasteten Zustand (Eigene Darstellung basierend auf [32])	23
Abbildung 12: Qualitative Schubmodulkurven und Gebrauchstemperaturbereich polymerer Werkstoffe (Eigene Darstellung basierend auf [14])	24
Abbildung 13: Schematische Darstellung von Körperschallerzeugung und –immission (Eigene Darstellung basierend auf [33])	27
Abbildung 14: Terzspektrum der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten im Schotter bei Überfahrt eines ICE mit 250 km/h (Eigene Darstellung basierend auf [35])	28
Abbildung 15: Konstruktive Ausführung verschiedener Brückenlagerungen (Eigene Darstellung basierend auf [26])	32

Abbildung 16: Schwellenbesohlung einer Betonschwelle [44]	34
Abbildung 17: Beispielhafte Einfügungsdämmung einer Schwellenbesohlung (Eigene Darstellung basierend auf [33])	35
Abbildung 18: Schematischer Aufbau eines Gleisbetts mit eingebrachter USM [45]....	36
Abbildung 19: Beispielhafte Einfügungsdämmung einer USM (Eigene Darstellung basierend auf [33])	36
Abbildung 20: Aufbau eines Flächenlagers (links), Streifenlagers (mittig) und Einzellagers (rechts) [46].....	37
Abbildung 21: Vereinfachtes Ein-Massen-Schwinger-Modell eines MFS (Eigene Darstellung basierend auf [4])	38
Abbildung 22: Beispielhafte Einfügungsdämmung eines MFS (Eigene Darstellung basierend auf [48, 33])	39
Abbildung 23: Sekantensteifigkeit.....	41
Abbildung 24: Schemenhafter Prüfaufbau (eigene Darstellung basierend auf [11])	47
Abbildung 25: Prüfkörper im eingebauten Zustand inklusive beider Schleifleinen.....	48
Abbildung 26: Querschnitte der verwendeten Prüfkörperdicken im einschichtigen Zustand mit $h = 25,0$ mm und $h = 12,5$ mm (links) und im verklebten Zustand mit $h = 37,5$ mm und $h = 50,0$ mm (rechts)	52
Abbildung 27: Prüfkörper mit rauher Oberfläche (links) und glatter Gießhaut (rechts) ...	53
Abbildung 28: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Bettungsmodul C_{stat} beim Werkstoff M03.....	56
Abbildung 29: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln und Regressionsfunktion ...	57
Abbildung 30: Versteifungsfaktor $K_{(NF,dyn)(10\text{ Hz})}$	57
Abbildung 31: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M03.....	60
Abbildung 32: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M08.....	61
Abbildung 33: Vergleich des niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduls C_{dyn} bei 5 Hz und 10 Hz von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M03	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 34: Vergleich des niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduls C_{dyn} bei 5 Hz und 10 Hz von neuen und wiederverwendeten Prüfkörpern bei Werkstoff M08	62
Abbildung 35: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M03 mit $h = 25,0$ mm.....	64
Abbildung 36: Vergleich der gemessenen statischen Bettungsmodulwerte bei Prüfkörpern mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08 mit Regressionsverlauf.....	66
Abbildung 37: Vergleich der dynamischen Bettungsmoduln bei 10 Hz für Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08.....	66
Abbildung 38: Niederfrequente dynamische Versteifung für quadratische und rechteckige Grundflächen von Werkstoff M08	67
Abbildung 39: Vergleich der höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln bei 20 Hz für Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08.	67
Abbildung 40: Verlauf des statischen Bettungsmoduls C_{stat} in Abhängigkeit des Formfaktor S für die Werkstoffe M03 und M08	69
Abbildung 41: Einzelmessergebnisse der statischen Bettungsmoduln vom Werkstoff M03	72
Abbildung 42: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten/einschichtigen und nicht verklebten Prüfkörpern – M03.....	73
Abbildung 43: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten/einschichtigen und nicht verklebten Prüfkörpern – M08.....	74
Abbildung 44: Vergleich des Bettungsmoduls C_{stat} von verklebten und nicht verklebten Prüfkörpern – M08 mit Regressionsverläufen $R^2 \geq 0,99$	75
Abbildung 45: Streuung des Bettungsmoduls C_{stat} um den Median bei Werkstoff M03 – nicht verklebt für $h = 50,0$ mm	77
Abbildung 46: Streuung des Bettungsmoduls C_{stat} um den Median bei Werkstoff M03 – verklebt für $h = 50,0$ mm.....	78
Abbildung 47: Kerndichteschätzung des Werkstoffs M04	83
Abbildung 48: Kerndichteschätzung des Werkstoffs M10	83

Abbildung 49: Kerndichteschätzung der dynamischen Bettungsmoduln für Werkstoff M03.....	84
Abbildung 50: Aufgesetzter Haarwinkel auf der Oberseite des Prüfkörpers des Werkstoffs M06	85
Abbildung 51: Messpunkteraster am Prüfkörper für ermittelte Höhenwerte in mm, bezogen auf die Referenzhöhe für den Werkstoff M06.....	85
Abbildung 52: Kerndichteschätzung der höherfrequent dynamischen Bettungsmoduln für Werkstoff M06.....	86
Abbildung 54: Statischer Bettungsmodul C_{stat} , ermittelt am dritten und fünften Belastungszyklus für Werkstoff M07.....	90
Abbildung 53: Statischer Bettungsmodul C_{stat} , ermittelt am dritten und fünften Belastungszyklus für Werkstoff M01.....	90
Abbildung 55: Streuung der statischen Bettungsmodulwerte um den Median bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten für den Werkstoff M07 für eine Prüfkörperdimension von 300 mm x 300 mm x 25,0 mm.....	95
Abbildung 56: Statischer Bettungsmodul Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt.....	99
Abbildung 57: Regressionsfunktion der statischen Bettungsmodulwerte vom Werkstoff M08 über alle Prüfkörperdicken – einschichtig/verklebt.....	100
Abbildung 58: Vergleich der statischen Funktionsverläufe der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels des Faktors Q – einschichtig/verklebt.....	102
Abbildung 59: Verlauf Faktor t in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für M08 – einschichtig/verklebt.....	103
Abbildung 60: Verlauf Faktor n in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für M08 – einschichtig/verklebt.....	104
Abbildung 61: Vergleich der statischen Funktionsverläufe der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels der Potenzfunktionen des Faktors t und n für Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt.....	105
Abbildung 62: Vergleich der dynamischen Funktionsverläufe für 5 Hz der gemessenen Werte mit den Berechnungen mittels der Potenzfunktionen des Faktors t und n für Werkstoff M08 – einschichtig/verklebt	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 63: Verlauf Faktor ν in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke für Werkstoff M08	108
Abbildung 64: Vergleich Funktionsverläufe basierend auf den gemessenen und berechneten Werten des statischen Bettungsmodul C_{stat} für Werkstoff M08, unverklebt	109
Abbildung 65: Verhalten zwischen ermittelter Werkstofffunktion und Raumdicke bei einem Prüfkörper mit den Dimensionen 300 mm x 300 mm x 25,0 mm für gemischtzellige Werkstoffe.....	110
Abbildung 66: Aufstellung der verschiedenen Abweichungen bei Verwendung des optimierten Prüfverfahrens für Werkstoff M03	133
Abbildung 67: Aufstellung der verschiedenen Abweichungen bei Verwendung des optimierten Prüfverfahrens für Werkstoff M08	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Häufigste Elastomertypen und ihre typischen Anwendungsgebiete [14, 20]	16
Tabelle 2: Übersicht der frequenzabhängigen Aufnahmedauer und Zyklenerfassung	43
Tabelle 3: Übersicht der frequenzabhängigen Schwingamplituden.....	45
Tabelle 4: Prüflasten für alle verwendeten Werkstoffe.....	51
Tabelle 5: Mittelwerte der Bettungsmoduln von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften	55
Tabelle 6: Prozentuale Abweichung der Bettungsmoduln von Prüfkörper mit rauer Oberfläche zu glatter Oberfläche.....	58
Tabelle 7: Ergebnisse der Bettungsmoduln von neuen bzw. wiederverwendeten Prüfkörpern	60
Tabelle 8: Abweichung des statischen Bettungsmoduls bei quadratischer und rechteckiger Grundfläche	65
Tabelle 9: Statischer und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul und prozentuale Veränderung für die Werkstoffe M03 und M08 für $h = 12,5$ mm	70
Tabelle 10: Mittelwerte des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08 für einschichtige Prüfkörper.....	72
Tabelle 11: Mittelwerte des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08 für verklebte und nicht verklebte Prüfkörper.....	73
Tabelle 12: Abweichung der Mittelwerte vom verklebten/einschichtigen zum nicht verklebten Zustand des statischen Bettungsmoduls von M03 und M08.....	74
Tabelle 13: Mittelwerte des dynamischen Bettungsmoduls bei 5 Hz von M03 und M08 für alle Verbundstypen	76
Tabelle 14: Maximale, prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls C_{stat} vom Median in Anhängigkeit des Formfaktors für $h = 50,0$ mm	77
Tabelle 15: Maximalen bzw. minimalen gemessenen Bettungsmoduln C_{stat} und $C_{dyn,5Hz}$ und die prozentuale Abweichung vom Median	80
Tabelle 16: Maximalen bzw. minimalen gemessenen Bettungsmoduln $C_{dyn,10Hz}$ und $C_{dyn,20Hz}$ und die prozentuale Abweichung vom Median.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 17: Maximale prozentuale Abweichung der Bettungsmoduln vom Median	82
Tabelle 18: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln der Werkstoffe M01 und M03 bei unterschiedlichen Prüfkörperformaten bei Belastungszyklus drei und fünf und Abweichungen.....	88
Tabelle 19: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln der Werkstoffe M07 und M08 bei unterschiedlichen Prüfkörperformaten bei Belastungszyklus drei und fünf	89
Tabelle 20: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für die alle untersuchten Prüfkörpergeometrien der verschiedenen Werkstoffe M01 und M03 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit.....	93
Tabelle 21: Mittelwerte der statischen Bettungsmoduln für die alle untersuchten Prüfkörpergeometrien der verschiedenen Werkstoffe M07 und M08 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des statischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit.....	94
Tabelle 22: Mittelwerte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz der Werkstoffe M03 und M07 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des dynamischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit	96
Tabelle 23: Mittelwerte der dynamischen Bettungsmoduln bei 5 Hz des Werkstoffs M08 bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und die prozentuale Abweichung des dynamischen Bettungsmoduls im Bezug zur Normalgeschwindigkeit.....	97
Tabelle 24: Werte zur Berechnung des Faktors Q.....	101
Tabelle 25: Werte zur Berechnung der Faktoren t und m	103
Tabelle 26: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/verklebt unter Berücksichtigung von Faktor t und n für C_{stat}	105
Tabelle 27: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/verklebt unter Berücksichtigung von Faktor t und n für $C_{dyn,5Hz}$	106
Tabelle 28: Werte zur Berechnung des Faktors V	108

Tabelle 29: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, einschichtig/unverklebt unter Berücksichtigung der Gleichung (5-9)109

Tabelle 30: Einteilung der Prüfgeschwindigkeit nach maximaler angefahrener Oberlast129

Tabelle 31: Zusammenfassung der Optimierungsansätze und ihre positiven Auswirkungen131

Anlagenverzeichnis

A.1	Messungenauigkeit nach GUM.....	157
A.2	Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften.....	161
A.3	Messergebnisse für neue und wiederverwendete Prüfkörper.....	163
A.4	Messergebnisse für Prüfkörper mit unterschiedlichen Grundflächengeometrien	167
A.5	Messergebnisse für verklebte und unverklebte Prüfkörper.....	182
A.6	Messergebnisse für die Homogenität der Prüfwerkstoffe	192
A.7	Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Belastungszyklen	203
A.8	Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten.....	207
A.9	Messergebnisse für die Werkstofffunktion	221

Anlagen

A.1 Messungenauigkeit nach GUM

Anlage A. 1. 1: Messungenauigkeit für M02

Messunsicherheitsbetrachtung

Messunsicherheit bei der Bestimmung der vertikalen Steifigkeit
 "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)"

Werkstoff		M02
Kraftdifferenz [kN]	ΔF	0,9
Wegdifferenz [mm]	Δd	12,10
Steifigkeit [kN/mm]	k_{stat}	0,07

Messunsicherheit aus der Bestimmung der Prüfkraft

verwendete Maschine: Universalprüfmaschine HUS
 Kraftmessdose: 100 kN

Klasse: **0,5**

u_k wird als rechteckverteilt angenommen: $u_{FM} = \frac{F * u_k}{\sqrt{3}}$ $u_k =$ **0,003** kN

Quelle der Unsicherheit	Symbol	Wert \pm [kN]	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor	Standardunsicherheit
Kalibrierunsicherheit	u_k	s. oben	Rechteck		0,003
Auflösung	u_{ms}	0,00225	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,001
schiefes Einbauen des Prüfkörpers (1°)	u_{aw}	0,000	normal	2	0,000
kombinierte Standardunsicherheit	u_{komb-D}		(angenommen) normal		0,003
erweiterte Standardunsicherheit	u_{Kraft}		(angenommen) normal; k=2		0,006

Messunsicherheit aus der Bestimmung des Weges:

verwendete Wegaufnehmer WA 20
 Hersteller: HBM

Klasse: **0,5**

u_k wird als rechteckverteilt angenommen: $u_{FM} = \frac{d * u_k}{\sqrt{3}}$ $u_{FM} =$ **0,035** mm

Quelle der Unsicherheit	Symbol	Wert \pm [mm]	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor	Standardunsicherheit
Kalibrierunsicherheit	u_k	s. oben	Rechteck		0,035
schiefer Einbau der Wegaufnehmer (1°)	u_{aw}	0,0018	normal	2	0,0009
kombinierte Standardunsicherheit	u_{komb-B}		(angenommen) normal		0,035
erweiterte Standardunsicherheit	u_{Weg}		(angenommen) normal; k=2		0,070

Anlagen

Ermittlung der Sensitivitätskoeffizienten:

Vertikale Steifigkeit: $k_{stat} = \frac{\Delta F}{\Delta d}$

Die Formel für u_{σ} lautet:
$$u_{komb-\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta d_{SA}}\right)^2 * u_{Weg}^2 + \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta F_{SA}}\right)^2 * u_{Kraft}^2}$$

Die Sensitivitätskoeffizienten ergeben sich wie folgt:

$$c_{WEG} = \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta d_{SA}}\right) \quad k_{SA} = \frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}} \quad f'_{(F_{SA})} = -\frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}^2} \quad c_{Weg} = 0$$

$$c_{KRAFT} = \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta F_{SA}}\right) \quad k_{SA} = \frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}} \quad f'_{(d_{SA})} = \frac{1}{d_{SA}} \quad c_{Kraft} = 0,08$$

$$u_{komb-\sigma} = 0,001$$

$$u_{\sigma} = 0,001 \quad (\text{für } k=2)$$

Die Steifigkeit beträgt:	0,1	±	1,7	[%]	(für k = 2; 95 % Vertrauensniveau)
	[kN/mm]		0,0	[kN/mm]	

Anlage A. 1. 2: Messungenauigkeit für M10

Messunsicherheitsbetrachtung**Messunsicherheit bei der Bestimmung der vertikalen Steifigkeit***"Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)"*

Werkstoff		M10
Kraftdifferenz [kN]	ΔF	133,2
Wegdifferenz [mm]	Δd	1,37
Steifigkeit [kN/mm]	k_{stat}	97,23

Messunsicherheit aus der Bestimmung der Prüfkraft

verwendete Maschine: Universalprüfmaschine Wolpert
 Kraftmessdose: 200 kN

Klasse: 1

u_K wird als rechteckverteilt angenommen:

$$u_{FM} = \frac{F * u_K}{\sqrt{3}}$$

 $u_K = 0,769$ kN

Quelle der Unsicherheit	Symbol	Wert \pm [kN]	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor	Standardunsicherheit
Kalibrierunsicherheit	u_K	s. oben	Rechteck		0,769
Auflösung	u_{ms}	0,333	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,192
schiefes Einbauen des Prüfkörpers (1°)	u_{aw}	0,020	normal	2	0,010
kombinierte Standardunsicherheit	$u_{\text{komb-D}}$		(angenommen) normal		0,793
erweiterte Standardunsicherheit	u_{Kraft}		(angenommen) normal; k=2		1,586

Messunsicherheit aus der Bestimmung des Weges:

verwendete Wegaufnehmer WA 20
 Hersteller: HBM

Klasse: 0,5

u_K wird als rechteckverteilt angenommen:

$$u_{FM} = \frac{d * u_K}{\sqrt{3}}$$

 $u_{FM} = 0,004$ mm

Quelle der Unsicherheit	Symbol	Wert \pm [mm]	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor	Standardunsicherheit
Kalibrierunsicherheit	u_K	s. oben	Rechteck		0,004
schiefes Einbauen der Wegaufnehmer (1°)	u_{aw}	0,0002	normal	2	0,0001
kombinierte Standardunsicherheit	$u_{\text{komb-B}}$		(angenommen) normal		0,004
erweiterte Standardunsicherheit	u_{Weg}		(angenommen) normal; k=2		0,008

Anlagen

Ermittlung der Sensitivitätskoeffizienten:

Vertikale Steifigkeit: $k_{stat} = \frac{\Delta F}{\Delta d}$

Die Formel für u_{σ} lautet:
$$u_{komb-\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta d_{SA}}\right)^2 * u_{Weg}^2 + \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta F_{SA}}\right)^2 * u_{Kraft}^2}$$

Die Sensitivitätskoeffizienten ergeben sich wie folgt:

$$c_{WEG} = \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta d_{SA}}\right) \quad k_{SA} = \frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}} \quad f'_{(F_{SA})} = -\frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}^2} \quad c_{Weg} = -71$$

$$c_{KRAFT} = \left(\frac{\delta k_{SA}}{\delta F_{SA}}\right) \quad k_{SA} = \frac{\Delta F_{SA}}{d_{SA}} \quad f'_{(d_{SA})} = \frac{1}{d_{SA}} \quad c_{Kraft} = 0,73$$

$$u_{komb-\sigma} = 1,286$$

$$u_{\sigma} = 2,573 \quad (\text{für } k=2)$$

Die Steifigkeit beträgt:	97,2	±	2,6	[%]	(für k = 2; 95 % Vertrauensniveau)
	[kN/mm]		2,6	[kN/mm]	

A.2 Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften

Anlage A. 2. 1: Messergebnisse für Werkstoff M03 mit Gießhaut (glatt)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	15,12	14,85	15,26	15,33	15,43	15,49
$k_{dyn,5Hz}$	18,75	18,65	18,69	18,62	19,26	19,34
$k_{dyn,10Hz}$	20,02	19,92	20,04	20,08	20,34	20,43
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89401,0
C_{stat}	0,1691	0,1664	0,1704	0,1712	0,1726	0,1727
$C_{dyn,5Hz}$	0,2097	0,2090	0,2087	0,2079	0,2154	0,2163
$C_{dyn,10Hz}$	0,2239	0,2232	0,2238	0,2242	0,2275	0,2285
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	8,15	8,29	8,47	8,49	8,43	8,38
$k_{dyn,5Hz}$	10,09	10,06	10,24	10,23	10,17	10,15
$k_{dyn,10Hz}$	10,50	10,72	10,80	10,83	10,75	10,75
A	49683,7	49875,0	49766,9	49800,1	49733,7	49683,7
C_{stat}	0,1640	0,1662	0,1702	0,1705	0,1695	0,1687
$C_{dyn,5Hz}$	0,2031	0,2017	0,2058	0,2054	0,2045	0,2043
$C_{dyn,10Hz}$	0,2113	0,2149	0,2170	0,2175	0,2162	0,2164
S	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	3,52	3,58	3,71	3,79	3,78	3,76
$k_{dyn,5Hz}$	4,27	4,24	4,22	4,25	4,3	4,26
$k_{dyn,10Hz}$	4,57	4,58	4,54	4,52	4,45	4,44
A	22350,3	22425,0	22425,0	22350,3	22650,3	22575,1
C_{stat}	0,1575	0,1596	0,1654	0,1696	0,1669	0,1666
$C_{dyn,5Hz}$	0,1910	0,1891	0,1882	0,1902	0,1898	0,1887
$C_{dyn,10Hz}$	0,2045	0,2042	0,2025	0,2022	0,1965	0,1967
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	1,51	1,58	1,54	1,56	1,58	1,51
$k_{dyn,5Hz}$	1,87	1,90	1,86	1,84	1,88	1,83
$k_{dyn,10Hz}$	1,93	1,96	1,92	1,95	1,96	1,89
A	9916,8	9916,8	9933,4	9950,1	10016,7	10033,4
C_{stat}	0,1523	0,1593	0,1550	0,1568	0,1577	0,1505
$C_{dyn,5Hz}$	0,1886	0,1916	0,1872	0,1849	0,1877	0,1824
$C_{dyn,10Hz}$	0,1946	0,1976	0,1933	0,1960	0,1957	0,1884
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Anlagen

Anlage A. 2. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 ohne Gießhaut (rau)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	18,56	18,51	18,50	18,28	18,29	18,31
k _{dyn,5Hz}	22,70	22,67	21,32	22,16	22,28	22,43
k _{dyn,10Hz}	23,66	23,68	22,59	23,42	23,54	23,60
A	89550,5	89401,0	89401,0	89550,5	89550,5	89550,5
C _{stat}	0,2073	0,2070	0,2069	0,2041	0,2042	0,2045
C _{dyn,5Hz}	0,2535	0,2536	0,2385	0,2475	0,2488	0,2505
C _{dyn,10Hz}	0,2642	0,2649	0,2527	0,2615	0,2629	0,2635
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	10,12	10,24	10,03	10,23	10,32	10,14
k _{dyn,5Hz}	11,75	12,11	11,77	12,00	12,18	11,95
k _{dyn,10Hz}	12,41	12,59	12,34	12,64	12,92	12,49
A	49766,9	49742,0	49775,3	49725,3	49775,3	49850,1
C _{stat}	0,2033	0,2059	0,2015	0,2057	0,2073	0,2034
C _{dyn,5Hz}	0,2361	0,2435	0,2365	0,2413	0,2447	0,2397
C _{dyn,10Hz}	0,2494	0,2531	0,2479	0,2542	0,2596	0,2506
S	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	4,55	4,56	4,53	4,56	4,71	4,56
k _{dyn,5Hz}	5,29	5,28	5,22	5,33	5,28	5,23
k _{dyn,10Hz}	5,51	5,58	5,55	5,54	5,59	5,44
A	22650,3	22700,4	22725,5	22700,4	22775,8	22750,7
C _{stat}	0,2009	0,2009	0,1993	0,2009	0,2068	0,2004
C _{dyn,5Hz}	0,2336	0,2326	0,2297	0,2348	0,2318	0,2299
C _{dyn,10Hz}	0,2433	0,2458	0,2442	0,2440	0,2454	0,2391
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	1,98	1,92	1,89	1,89	1,98	1,90
k _{dyn,5Hz}	2,29	2,27	2,28	2,24	2,27	2,26
k _{dyn,10Hz}	2,40	2,32	2,33	2,30	2,39	2,33
A	10000,0	10033,3	10000,0	10000,0	10000,0	10050,1
C _{stat}	0,1980	0,1914	0,1890	0,1890	0,1980	0,1891
C _{dyn,5Hz}	0,2290	0,2262	0,2280	0,2240	0,2270	0,2249
C _{dyn,10Hz}	0,2400	0,2312	0,2330	0,2300	0,2390	0,2318
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

A.3 Messergebnisse für neue und wiederverwendete Prüfkörper

Anlage A. 3. 1: Messergebnisse für Werkstoff M03 für immer neu verwendete Prüfkörper

	neu					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	15,11	14,87	15,26	15,27	15,43	15,49
$k_{dyn,5Hz}$	19,45	19,38	19,66	19,79	19,26	19,34
$k_{dyn,10Hz}$	20,43	20,43	20,73	20,81	20,34	20,43
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C_{stat}	0,1690	0,1666	0,1704	0,1705	0,1726	0,1727
$C_{dyn,5Hz}$	0,2176	0,2171	0,2195	0,2210	0,2154	0,2156
$C_{dyn,10Hz}$	0,2285	0,2289	0,2315	0,2324	0,2275	0,2278
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	9,46	8,06	8,22	9,66	9,78	7,99
$k_{dyn,5Hz}$	10,99	9,66	9,84	11,31	11,42	9,71
$k_{dyn,10Hz}$	11,42	10,12	10,27	11,72	11,84	10,19
A	90000,0	89700,0	89550,5	89401,0	89401,0	89700,0
C_{stat}	0,1051	0,0899	0,0918	0,1081	0,1094	0,0891
$C_{dyn,5Hz}$	0,1221	0,1077	0,1099	0,1265	0,1277	0,1082
$C_{dyn,10Hz}$	0,1269	0,1128	0,1147	0,1311	0,1324	0,1136
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k_{stat}	5,59	6,35	6,27	6,36	6,26	6,44
$k_{dyn,5Hz}$	6,63	7,40	7,30	7,43	7,31	7,47
$k_{dyn,10Hz}$	6,89	7,63	7,52	7,59	7,52	7,67
A	89550,5	89550,5	90000,0	89850,0	89401,0	89700,3
C_{stat}	0,0624	0,0709	0,0697	0,0708	0,0700	0,0718
$C_{dyn,5Hz}$	0,0740	0,0826	0,0811	0,0827	0,0818	0,0833
$C_{dyn,10Hz}$	0,0769	0,0852	0,0836	0,0845	0,0841	0,0855
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	4,58	4,56	3,99	3,89	4,57	4,17
$k_{dyn,5Hz}$	5,32	5,28	4,73	4,67	5,314	4,89
$k_{dyn,10Hz}$	5,44	5,41	4,85	4,80	5,45	5,00
A	89700,3	89401,0	89700,0	90000,0	89850,0	89700,3
C_{stat}	0,0511	0,0510	0,0445	0,0432	0,0509	0,0465
$C_{dyn,5Hz}$	0,0593	0,0591	0,0527	0,0519	0,0591	0,0545
$C_{dyn,10Hz}$	0,0606	0,0605	0,0541	0,0533	0,0607	0,0557

Anlagen

Anlage A. 3. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 für wiederverwendete Prüfkörper

	wiederverwendet					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	15,12	14,85	15,26	15,33	15,43	15,49
k _{dyn,5Hz}	18,75	18,65	18,69	18,62	19,26	19,34
k _{dyn,10Hz}	20,02	19,92	20,04	20,08	20,34	20,43
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C _{stat}	0,1691	0,1664	0,1704	0,1712	0,1726	0,1727
C _{dyn,5Hz}	0,2097	0,2090	0,2087	0,2079	0,2154	0,2156
C _{dyn,10Hz}	0,2239	0,2232	0,2238	0,2242	0,2275	0,2278
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	8,65	8,64	8,03	8,01	8,98	8,74
k _{dyn,5Hz}	10,70	10,74	10,11	10,14	11,05	10,72
k _{dyn,10Hz}	11,21	11,25	10,6	10,62	11,5	11,2
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C _{stat}	0,0968	0,0968	0,0897	0,0894	0,1004	0,0974
C _{dyn,5Hz}	0,1197	0,1203	0,1129	0,1132	0,1236	0,1195
C _{dyn,10Hz}	0,1254	0,1260	0,1184	0,1186	0,1286	0,1249
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	5,84	5,95	5,71	5,64	5,84	5,61
k _{dyn,5Hz}	7,09	7,23	6,86	6,88	6,98	6,68
k _{dyn,10Hz}	7,37	7,48	7,12	7,15	7,28	6,95
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C _{stat}	0,0653	0,0667	0,0638	0,0630	0,0653	0,0625
C _{dyn,5Hz}	0,0793	0,0810	0,0766	0,0768	0,0781	0,0745
C _{dyn,10Hz}	0,0824	0,0838	0,0795	0,0798	0,0814	0,0775
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k _{stat}	4,09	4,16	4,17	4,18	4,27	4,19
k _{dyn,5Hz}	4,98	5,07	5,09	5,12	5,19	5,08
k _{dyn,10Hz}	5,13	5,23	5,23	5,28	5,53	5,23
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C _{stat}	0,0457	0,0466	0,0466	0,0467	0,0478	0,0467
C _{dyn,5Hz}	0,0557	0,0568	0,0568	0,0572	0,0581	0,0566
C _{dyn,10Hz}	0,0574	0,0586	0,0584	0,0590	0,0619	0,0583

Anlage A. 3. 3: Messergebnisse für Werkstoff M08 für immer neu verwendete Prüfkörper

	neu					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	88,52	87,90	87,07	89,34	89,42	89,42
$k_{dyn,5Hz}$	105,01	104,80	103,92	104,65	104,73	104,01
$k_{dyn,10Hz}$	109,30	110,34	109,19	110,24	110,12	109,75
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C_{stat}	0,9901	0,9832	0,9739	0,9993	1,0002	1,0002
$C_{dyn,5Hz}$	1,1746	1,1722	1,1624	1,1706	1,1715	1,1634
$C_{dyn,10Hz}$	1,2226	1,2342	1,2214	1,2331	1,2318	1,2276
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	42,95	42,77	43,04	43,03	42,63	43,04
$k_{dyn,5Hz}$	50,24	50,19	50,41	50,41	49,76	50,23
$k_{dyn,10Hz}$	51,43	51,54	51,79	52,32	52,53	52,61
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C_{stat}	0,4804	0,4784	0,4814	0,4813	0,4768	0,4814
$C_{dyn,5Hz}$	0,5620	0,5614	0,5639	0,5639	0,5566	0,5619
$C_{dyn,10Hz}$	0,5753	0,5765	0,5793	0,5852	0,5876	0,5885
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k_{stat}	26,18	25,78	25,82	25,9	25,72	25,66
$k_{dyn,5Hz}$	29,73	30,37	30,54	30,38	30,03	29,95
$k_{dyn,10Hz}$	30,56	31,55	31,83	31,57	31,21	31,15
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C_{stat}	0,2928	0,2884	0,2888	0,2897	0,2877	0,2870
$C_{dyn,5Hz}$	0,3325	0,3397	0,3416	0,3398	0,3359	0,3350
$C_{dyn,10Hz}$	0,3418	0,3529	0,3560	0,3531	0,3491	0,3484
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	17,75	17,68	17,57	17,57	17,67	17,60
$k_{dyn,5Hz}$	20,80	20,38	20,24	20,28	20,29	20,19
$k_{dyn,10Hz}$	20,90	20,91	20,83	20,9	20,86	20,55
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C_{stat}	0,1985	0,1978	0,1965	0,1965	0,1976	0,1969
$C_{dyn,5Hz}$	0,2327	0,2280	0,2264	0,2268	0,2270	0,2258
$C_{dyn,10Hz}$	0,2338	0,2339	0,2330	0,2338	0,2333	0,2299

Anlagen

Anlage A. 3. 4: Messergebnisse für Werkstoff M08 für wiederverwendete Prüfkörper

	wiederverwendet					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	87,75	87,60	87,00	88,98	89,05	89,23
k _{dyn,5Hz}	102,92	102,77	101,50	103,13	102,85	102,57
k _{dyn,10Hz}	107,74	107,37	106,29	107,62	107,46	106,81
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,9815	0,9799	0,9731	0,9953	0,9961	0,9981
C _{dyn,5Hz}	1,1512	1,1495	1,1353	1,1536	1,1504	1,1473
C _{dyn,10Hz}	1,2051	1,2010	1,1889	1,2038	1,2020	1,1947
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	42,70	42,46	42,10	42,39	42,54	42,57
k _{dyn,5Hz}	49,94	49,78	50,24	50,58	50,73	50,61
k _{dyn,10Hz}	51,43	51,54	51,79	52,32	52,53	52,61
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,4776	0,4749	0,4709	0,4742	0,4758	0,4762
C _{dyn,5Hz}	0,5586	0,5568	0,5620	0,5658	0,5674	0,5661
C _{dyn,10Hz}	0,5753	0,5765	0,5793	0,5852	0,5876	0,5885
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	25,99	25,83	25,78	25,87	26,09	26,00
k _{dyn,5Hz}	30,68	30,59	30,45	30,55	30,73	30,62
k _{dyn,10Hz}	31,95	31,98	31,84	31,90	31,98	31,87
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,2907	0,2889	0,2884	0,2894	0,2918	0,2908
C _{dyn,5Hz}	0,3432	0,3422	0,3406	0,3417	0,3437	0,3425
C _{dyn,10Hz}	0,3574	0,3577	0,3561	0,3568	0,3577	0,3565
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k _{stat}	17,76	17,63	17,53	17,61	17,75	17,64
k _{dyn,5Hz}	20,62	20,56	20,43	20,49	20,53	20,50
k _{dyn,10Hz}	21,40	21,00	20,89	21,08	21,14	21,18
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,1987	0,1972	0,1961	0,1970	0,1985	0,1973
C _{dyn,5Hz}	0,2306	0,2300	0,2285	0,2292	0,2296	0,2293
C _{dyn,10Hz}	0,2394	0,2349	0,2337	0,2358	0,2365	0,2369

A.4 Messergebnisse für Prüfkörper mit unterschiedlichen Grundflächengeometrien

Anlage A. 4. 1: Messergebnisse für Werkstoff M02

Prüfkörper	M02-01	M02-02	M02-03	M02-04	M02-05	M02-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	0,49	0,49	0,51	0,53	0,53	0,52
$k_{dyn,5Hz}$	1,04	1,09	1,11	1,16	1,16	1,14
$k_{dyn,10Hz}$	1,33	1,38	1,41	1,41	1,46	1,45
$k_{dyn,20Hz}$	1,34	1,40	1,51	1,62	1,66	1,60
A	89550,5	89550,5	89550,5	90000,0	90000,0	89550,5
C_{stat}	0,0055	0,0055	0,0057	0,0059	0,0059	0,0058
$C_{dyn,5Hz}$	0,0116	0,0122	0,0124	0,0129	0,0128	0,0127
$C_{dyn,10Hz}$	0,0149	0,0154	0,0158	0,0157	0,0162	0,0162
$C_{dyn,20Hz}$	0,0150	0,0156	0,0169	0,0180	0,0185	0,0178
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	0,21	0,22	0,21	0,33	0,33	0,32
$k_{dyn,5Hz}$	0,42	0,43	0,43	0,74	0,74	0,73
$k_{dyn,10Hz}$	0,53	0,55	0,54	0,88	0,91	0,89
$k_{dyn,20Hz}$	0,64	0,65	0,64	1,01	1,03	1,00
A	40300,5	40000,0	40100,0	60150,0	60300,0	59800,0
C_{stat}	0,0052	0,0055	0,0052	0,0055	0,0055	0,0054
$C_{dyn,5Hz}$	0,0104	0,0109	0,0107	0,0124	0,0123	0,0121
$C_{dyn,10Hz}$	0,0132	0,0137	0,0135	0,0146	0,0152	0,0150
$C_{dyn,20Hz}$	0,0158	0,0162	0,0161	0,0167	0,0171	0,0167
S	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	0,10	0,10	0,10	0,15	0,16	0,16
$k_{dyn,5Hz}$	0,18	0,19	0,18	0,28	0,28	0,28
$k_{dyn,10Hz}$	0,22	0,22	0,21	0,36	0,35	0,35
$k_{dyn,20Hz}$	0,27	0,28	0,27	0,45	0,43	0,44
A	19810,5	20022,0	19740,3	30150,0	30000,0	30140,0
C_{stat}	0,0050	0,0050	0,0051	0,0050	0,0053	0,0053
$C_{dyn,5Hz}$	0,0093	0,0093	0,0093	0,0094	0,0092	0,0092
$C_{dyn,10Hz}$	0,0113	0,0108	0,0107	0,0121	0,0117	0,0116
$C_{dyn,20Hz}$	0,0138	0,0138	0,0137	0,0149	0,0145	0,0145
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5

Anlagen

Anlage A. 4. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03

Prüfkörper-ID	M03-01	M03-02	M03-03	M03-04	M03-05	M03-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	8,43	8,50	8,47	8,47	8,50	8,20
$k_{dyn,5Hz}$	10,39	10,52	10,35	10,46	10,41	10,19
$k_{dyn,10Hz}$	10,81	10,86	10,76	10,79	10,73	10,62
$k_{dyn,20Hz}$	11,30	11,33	11,26	11,27	11,69	11,51
A	89401,0	89550,5	89700,3	89401,0	90000,0	90000,0
C_{stat}	0,0943	0,0949	0,0944	0,0947	0,0944	0,0911
$C_{dyn,5Hz}$	0,1162	0,1175	0,1154	0,1170	0,1157	0,1132
$C_{dyn,10Hz}$	0,1209	0,1213	0,1200	0,1207	0,1192	0,1180
$C_{dyn,20Hz}$	0,1264	0,1265	0,1255	0,1261	0,1299	0,1279
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	3,72	3,68	3,71	5,58	5,59	5,61
$k_{dyn,5Hz}$	4,57	4,59	4,58	7,01	6,90	7,03
$k_{dyn,10Hz}$	4,76	4,76	4,79	7,29	7,20	7,29
$k_{dyn,20Hz}$	4,97	4,99	5,00	7,62	7,58	7,62
A	40200,3	40100,0	40300,5	59900,0	60100,0	60000,0
C_{stat}	0,0920	0,0918	0,0916	0,0932	0,0930	0,0935
$C_{dyn,5Hz}$	0,1138	0,1144	0,1137	0,1170	0,1149	0,1172
$C_{dyn,10Hz}$	0,1184	0,1188	0,1189	0,1217	0,1198	0,1215
$C_{dyn,20Hz}$	0,1236	0,1244	0,1241	0,1271	0,1260	0,1271
S	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,68	1,68	1,67	2,49	2,63	2,69
$k_{dyn,5Hz}$	2,11	2,12	2,10	3,19	3,29	3,32
$k_{dyn,10Hz}$	2,20	2,21	2,19	3,33	3,41	3,43
$k_{dyn,20Hz}$	2,31	2,31	2,30	3,48	3,56	3,58
A	19740,0	19670,0	19810,5	29800,3	29850,0	29650,5
C_{stat}	0,0851	0,0854	0,0843	0,0836	0,0881	0,0907
$C_{dyn,5Hz}$	0,1068	0,1078	0,1058	0,1070	0,1103	0,1119
$C_{dyn,10Hz}$	0,1115	0,1124	0,1108	0,1116	0,1143	0,1156
$C_{dyn,20Hz}$	0,1169	0,1176	0,1161	0,1166	0,1191	0,1208
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	0,84	0,82	0,83	1,66	1,76	1,67
$k_{dyn,5Hz}$	1,04	1,04	1,04	2,14	2,19	2,13
$k_{dyn,10Hz}$	1,08	1,08	1,07	2,23	2,29	2,27
$k_{dyn,20Hz}$	1,12	1,12	1,12	2,35	2,39	2,37
A	10150,5	10150,5	10150,5	19949,8	19899,0	19899,0
C_{stat}	0,0828	0,0808	0,0818	0,0832	0,0884	0,0840
$C_{dyn,5Hz}$	0,1022	0,1023	0,1021	0,1070	0,1102	0,1070
$C_{dyn,10Hz}$	0,1063	0,1068	0,1052	0,1120	0,1149	0,1141
$C_{dyn,20Hz}$	0,1106	0,1102	0,1100	0,1177	0,1200	0,1191
S	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3

Anlage A. 4. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M03-07	M03-08	M03-09	M03-10	M03-11	M03-12
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	18,56	18,51	17,99	18,28	18,09	18,31
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	22,70	22,67	21,32	22,16	22,28	22,43
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	23,66	23,68	22,59	23,42	23,54	23,60
A	89661,8	89420,3	89234,7	89607,8	89554,5	89754,9
C_{stat}	0,2073	0,2070	0,2012	0,2041	0,2020	0,2045
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,2535	0,2536	0,2385	0,2475	0,2488	0,2505
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,2642	0,2649	0,2527	0,2615	0,2629	0,2635
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	4,55	4,56	4,53	4,56	4,71	4,56
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	5,29	5,08	5,32	5,03	5,08	5,23
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	5,51	5,28	5,55	5,24	5,29	5,44
A	22636,8	22686,6	22763,8	22686,6	22753,6	22800,0
C_{stat}	0,2009	0,2009	0,1993	0,2009	0,2068	0,2004
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,2337	0,2239	0,2337	0,2217	0,2233	0,2294
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,2434	0,2327	0,2438	0,2310	0,2325	0,2386
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	1,98	1,92	1,89	1,89	1,98	1,90
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	2,32	2,27	2,28	2,24	2,30	2,26
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	2,40	2,32	2,33	2,30	2,39	2,33
A	10000,0	10052,4	10000,0	10000,0	10000,0	10052,9
C_{stat}	0,1980	0,1914	0,1890	0,1890	0,1980	0,1891
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,2320	0,2258	0,2280	0,2240	0,2300	0,2248
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,2400	0,2308	0,2330	0,2300	0,2390	0,2318
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Anlagen

Anlage A. 4. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M03-13	M03-14	M03-15	M03-16	M03-17	M03-18
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	18,85	18,72	18,64	18,5	18,88	18,64
k _{dyn,5Hz}	22,56	22,22	22,41	22,10	22,67	22,33
k _{dyn,10Hz}	23,53	23,13	23,13	23,60	23,29	23,29
A	90000,0	89850,0	89700,3	89550,5	89700,3	89550,5
C _{stat}	0,2094	0,2083	0,2078	0,2066	0,2105	0,2082
C _{dyn,5Hz}	0,2507	0,2473	0,2498	0,2468	0,2527	0,2494
C _{dyn,10Hz}	0,2614	0,2574	0,2579	0,2635	0,2596	0,2601
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	9,20	9,38	9,21	9,10	9,17	9,08
k _{dyn,5Hz}	10,74	10,86	10,82	10,67	10,75	10,65
k _{dyn,10Hz}	11,17	11,34	11,28	11,13	11,20	11,14
A	45000,0	45000,0	45000,0	45000,0	45000,0	45000,0
C _{stat}	0,2044	0,2084	0,2047	0,2022	0,2038	0,2018
C _{dyn,5Hz}	0,2387	0,2413	0,2404	0,2371	0,2389	0,2367
C _{dyn,10Hz}	0,2482	0,2520	0,2507	0,2473	0,2489	0,2476
S	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Dimensionen	300 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	6,03	6,10	5,79	5,77	5,94	5,96
k _{dyn,5Hz}	7,30	7,27	7,20	7,22	7,25	7,22
k _{dyn,10Hz}	7,61	7,69	7,77	7,68	7,57	7,51
A	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0
C _{stat}	0,2017	0,2040	0,1936	0,1930	0,1987	0,1993
C _{dyn,5Hz}	0,2441	0,2431	0,2408	0,2415	0,2425	0,2415
C _{dyn,10Hz}	0,2545	0,2572	0,2599	0,2569	0,2532	0,2512
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 50,0 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	2,75	2,84	2,77	2,73	2,77	2,79
k _{dyn,5Hz}	3,19	3,50	3,53	3,42	3,45	3,42
k _{dyn,10Hz}	3,79	3,82	3,84	3,76	3,88	3,88
A	15249,0	14950,0	14950,0	14950,0	15249,0	14950,0
C _{stat}	0,1803	0,1900	0,1853	0,1826	0,1817	0,1866
C _{dyn,5Hz}	0,2092	0,2341	0,2361	0,2288	0,2262	0,2288
C _{dyn,10Hz}	0,2485	0,2555	0,2569	0,2515	0,2544	0,2595
S	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Anlage A. 4. 3: Messergebnisse für Werkstoff M04

Prüfkörper-ID	M04-01	M04-02	M04-03	M04-04	M04-05	M04-06
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	16,51	16,31	16,42	43,85	44,11	43,58
$k_{dyn,5Hz}$	18,87	18,84	18,85	50,17	50,66	49,68
$k_{dyn,10Hz}$	19,54	19,50	19,49	51,22	51,13	51,31
$k_{dyn,20Hz}$	20,06	19,99	19,99	53,20	53,58	52,83
A	40000,0	40000,0	40000,0	89176,8	89401,0	88952,5
$C_{dyn,5Hz}$	0,4716	0,4710	0,4712	0,5626	0,5667	0,5585
$C_{dyn,10Hz}$	0,4884	0,4875	0,4873	0,5743	0,5719	0,5768
$C_{dyn,20Hz}$	0,5015	0,4998	0,4996	0,5966	0,5993	0,5939
C_{stat}	0,4128	0,4078	0,4105	0,4917	0,4934	0,4899
S	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			200 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	6,57	6,89	6,92	16,88	15,66	15,57
$k_{dyn,5Hz}$	7,92	7,87	7,92	19,29	18,16	18,04
$k_{dyn,10Hz}$	8,19	8,13	8,17	19,96	18,85	18,74
$k_{dyn,20Hz}$	8,42	8,37	8,41	20,45	19,70	19,59
A	19390,5	19460,0	19460,3	40000,0	39900,0	40100,0
C_{stat}	0,3388	0,3541	0,3556	0,4220	0,3925	0,3883
$C_{dyn,5Hz}$	0,4085	0,4044	0,4068	0,4821	0,4551	0,4500
$C_{dyn,10Hz}$	0,4225	0,4180	0,4199	0,4989	0,4725	0,4674
$C_{dyn,20Hz}$	0,4343	0,4303	0,4323	0,5113	0,4937	0,4886
S	1,4	1,4	1,4	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	3,06	3,02	3,03	11,91	11,21	11,11
$k_{dyn,5Hz}$	3,62	3,54	3,55	13,41	13,26	13,13
$k_{dyn,10Hz}$	3,72	3,66	3,67	13,84	13,80	13,70
$k_{dyn,20Hz}$	3,84	3,78	3,78	14,25	14,35	14,23
A	10150,5	10150,5	10201,0	29900,0	30124,5	30200,0
C_{stat}	0,3015	0,2975	0,2970	0,3983	0,3721	0,3679
$C_{dyn,5Hz}$	0,3565	0,3491	0,3480	0,4484	0,4401	0,4349
$C_{dyn,10Hz}$	0,3667	0,3607	0,3594	0,4630	0,4580	0,4535
$C_{dyn,20Hz}$	0,3782	0,3725	0,3705	0,4766	0,4763	0,4713
S	1,0	1,0	1,0	1,7	1,7	1,7
Dimensionen				200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}				6,95	6,84	6,77
$k_{dyn,5Hz}$				8,05	8,10	7,98
$k_{dyn,10Hz}$				8,36	8,44	8,29
$k_{dyn,20Hz}$				8,63	8,74	8,59
A				19950,0	20149,5	20100,0
C_{stat}				0,3484	0,3395	0,3368
$C_{dyn,5Hz}$				0,4033	0,4020	0,3971
$C_{dyn,10Hz}$				0,4189	0,4187	0,4127
$C_{dyn,20Hz}$				0,4327	0,4337	0,4272
S				1,3	1,4	1,3

Anlagen

Anlage A. 4. 4: Messergebnisse für Werkstoff M05

Prüfkörper-ID	M05-01	M05-02	M05-03	M05-04	M05-05	M05-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	3,35	3,36	3,42	3,35	3,30	3,10
k_{dyn,5Hz}	3,76	3,77	3,83	3,76	3,71	3,51
k_{dyn,10Hz}	3,83	3,83	3,91	3,82	3,76	3,59
k_{dyn,20Hz}	3,92	3,92	4,00	3,90	3,84	3,69
A	89700,0	90000,0	90000,0	89970,0	89970,0	88953,0
C_{stat}	0,0373	0,0373	0,0380	0,0372	0,0367	0,0348
C_{dyn,5Hz}	0,0419	0,0418	0,0426	0,0417	0,0412	0,0395
C_{dyn,10Hz}	0,0426	0,0425	0,0434	0,0424	0,0418	0,0404
C_{dyn,20Hz}	0,0437	0,0436	0,0444	0,0433	0,0427	0,0414
S	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,39	1,38	1,42	2,12	2,08	2,08
k_{dyn,5Hz}	1,61	1,62	1,64	2,45	2,40	2,39
k_{dyn,10Hz}	1,64	1,64	1,67	2,50	2,44	2,43
k_{dyn,20Hz}	1,68	1,68	1,72	2,56	2,50	2,49
A	40200,0	40300,5	40300,5	60000,0	60000,0	60600,0
C_{stat}	0,0346	0,0342	0,0352	0,0353	0,0347	0,0343
C_{dyn,5Hz}	0,0399	0,0401	0,0407	0,0408	0,0399	0,0394
C_{dyn,10Hz}	0,0407	0,0407	0,0415	0,0417	0,0406	0,0401
C_{dyn,20Hz}	0,0417	0,0418	0,0426	0,0427	0,0416	0,0411
S	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	0,63	0,63	0,65	0,97	0,93	0,97
k_{dyn,5Hz}	0,73	0,74	0,76	1,12	1,07	1,11
k_{dyn,10Hz}	0,76	0,76	0,78	1,15	1,11	1,13
k_{dyn,20Hz}	0,77	0,78	0,80	1,18	1,14	1,15
A	19530,0	19740,0	19670,0	30150,0	30000,0	30300,0
C_{stat}	0,0323	0,0319	0,0330	0,0322	0,0310	0,0320
C_{dyn,5Hz}	0,0376	0,0376	0,0387	0,0373	0,0357	0,0368
C_{dyn,10Hz}	0,0387	0,0386	0,0395	0,0381	0,0372	0,0373
C_{dyn,20Hz}	0,0396	0,0395	0,0406	0,0391	0,0380	0,0379
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	0,33	0,33	0,32			
k_{dyn,5Hz}	0,37	0,37	0,38			
k_{dyn,10Hz}	0,38	0,38	0,39			
k_{dyn,20Hz}	0,39	0,39	0,40			
A	10100,3	10100,3	10150,5			
C_{stat}	0,0327	0,0327	0,0315			
C_{dyn,5Hz}	0,0367	0,0367	0,0376			
C_{dyn,10Hz}	0,0376	0,0379	0,0387			
C_{dyn,20Hz}	0,0390	0,0390	0,0396			
S	1,0	1,0	1,0			

Anlage A. 4. 5: Messergebnisse für Werkstoff M06

Prüfkörper-ID	M06-01	M06-02	M06-03	M06-04	M06-05	M06-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k _{stat}	13,65	13,49	13,59	13,48	13,47	12,35
k _{dyn,5Hz}	14,67	14,51	14,62	14,49	14,51	12,48
k _{dyn,10Hz}	15,00	14,77	14,87	14,78	14,86	12,82
k _{dyn,20Hz}	15,28	15,06	15,14	15,03	15,12	13,66
A	90000,0	89700,3	89850,0	89850,0	89850,0	89520,2
C _{stat}	0,1517	0,1504	0,1513	0,1500	0,1499	0,1380
C _{dyn,5Hz}	0,1630	0,1618	0,1628	0,1613	0,1615	0,1395
C _{dyn,10Hz}	0,1666	0,1647	0,1655	0,1644	0,1654	0,1432
C _{dyn,20Hz}	0,1698	0,1679	0,1685	0,1672	0,1683	0,1525
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k _{stat}	5,80	5,86	5,74	8,72	8,72	7,76
k _{dyn,5Hz}	6,25	6,18	6,13	9,33	9,38	8,48
k _{dyn,10Hz}	6,38	6,26	6,25	9,50	9,55	8,68
k _{dyn,20Hz}	6,49	6,35	6,34	9,67	9,72	8,92
A	40300,5	40300,5	40200,0	60150,0	60450,0	59800,0
C _{stat}	0,1439	0,1454	0,1428	0,1450	0,1443	0,1298
C _{dyn,5Hz}	0,1550	0,1533	0,1525	0,1551	0,1552	0,1417
C _{dyn,10Hz}	0,1582	0,1554	0,1554	0,1580	0,1580	0,1451
C _{dyn,20Hz}	0,1611	0,1575	0,1578	0,1608	0,1609	0,1492
S	2,04	2,02	2,03	2,42	2,43	2,37
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k _{stat}	2,63	2,59	2,62	3,95	3,95	3,54
k _{dyn,5Hz}	2,86	2,82	2,85	4,28	4,28	3,91
k _{dyn,10Hz}	2,91	2,86	2,89	4,35	4,34	3,98
k _{dyn,20Hz}	2,96	2,91	2,93	4,43	4,41	4,06
A	19880,8	19810,5	19881,0	30150,0	30150,0	29850,0
C _{stat}	0,1323	0,1307	0,1318	0,1310	0,1310	0,1186
C _{dyn,5Hz}	0,1437	0,1421	0,1431	0,1420	0,1419	0,1310
C _{dyn,10Hz}	0,1464	0,1442	0,1452	0,1443	0,1440	0,1334
C _{dyn,20Hz}	0,1490	0,1467	0,1476	0,1470	0,1464	0,1361
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k _{stat}	1,23	1,22	1,23	2,58	2,58	2,34
k _{dyn,5Hz}	1,36	1,34	1,35	2,80	2,80	2,61
k _{dyn,10Hz}	1,38	1,36	1,37	2,84	2,84	2,67
k _{dyn,20Hz}	1,39	1,38	1,39	2,89	2,89	2,73
A	10150,5	10150,5	10150,5	20250,8	20250,8	20100,0
C _{stat}	0,1212	0,1202	0,1212	0,1274	0,1274	0,1164
C _{dyn,5Hz}	0,1342	0,1324	0,1331	0,1383	0,1383	0,1300
C _{dyn,10Hz}	0,1360	0,1341	0,1350	0,1402	0,1404	0,1327
C _{dyn,20Hz}	0,1373	0,1356	0,1367	0,1426	0,1425	0,1358
S	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,3

Anlagen

Anlage A. 4. 6: Messergebnisse für Werkstoff M08

Prüfkörper-ID	M08-01	M08-02	M08-03	M08-04	M08-05	M08-06
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			200 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	17,52	17,55	17,49	18,36	18,22	17,84
$k_{dyn,5Hz}$	19,78	19,87	19,68	20,09	20,41	19,53
$k_{dyn,10Hz}$	20,51	20,61	20,38	20,69	20,99	19,99
$k_{dyn,20Hz}$	21,17	21,50	21,46	21,57	21,67	20,66
A	39700,5	39900,0	39800,3	40000,0	39601,0	39402,0
C_{stat}	0,4413	0,4398	0,4394	0,4590	0,4601	0,4528
$C_{dyn,5Hz}$	0,4981	0,4979	0,4944	0,5022	0,5153	0,4956
$C_{dyn,10Hz}$	0,5166	0,5164	0,5120	0,5171	0,5301	0,5074
$C_{dyn,20Hz}$	0,5332	0,5389	0,5391	0,5393	0,5472	0,5243
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			200 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	7,71	7,63	7,66	13,06	13,19	12,92
$k_{dyn,5Hz}$	8,78	8,69	8,75	14,60	14,38	14,29
$k_{dyn,10Hz}$	9,07	8,94	9,01	14,97	15,56	14,61
$k_{dyn,20Hz}$	9,41	9,29	9,34	15,49	16,11	15,19
A	19810,5	19600,0	19600,0	30000,0	30024,8	29725,5
C_{stat}	0,3892	0,3893	0,3908	0,4353	0,4393	0,4346
$C_{dyn,5Hz}$	0,4432	0,4434	0,4465	0,4866	0,4789	0,4809
$C_{dyn,10Hz}$	0,4576	0,4560	0,4595	0,4990	0,5184	0,4916
$C_{dyn,20Hz}$	0,4749	0,4739	0,4767	0,5165	0,5366	0,5109
S	1,4	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	3,43	3,47	3,50	7,97	8,01	7,97
$k_{dyn,5Hz}$	3,99	4,00	4,01	9,03	9,03	8,98
$k_{dyn,10Hz}$	4,09	4,10	4,12	9,23	9,54	9,18
$k_{dyn,20Hz}$	4,22	4,24	4,24	9,52	9,80	9,43
A	10000,0	10000,0	10050,0	20000,0	19999,5	19999,5
C_{stat}	0,3430	0,3470	0,3483	0,3985	0,4005	0,3985
$C_{dyn,5Hz}$	0,3989	0,3999	0,3989	0,4515	0,4517	0,4490
$C_{dyn,10Hz}$	0,4094	0,4099	0,4100	0,4617	0,4768	0,4592
$C_{dyn,20Hz}$	0,4218	0,4236	0,4220	0,4759	0,4902	0,4715
S	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	70 mm x 70 mm x 25,0 mm			150 mm x 75 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,49	1,49	1,49	3,98	4,08	3,93
A	4935,0	4970,3	4935,0	11250,0	11250,0	11250,0
C_{stat}	0,3019	0,2998	0,3019	0,3538	0,3627	0,3493
S	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0
Dimensionen				100 mm x 50,0 mm x 25,0 mm		
k_{stat}				1,54	1,61	1,51
A				5075,3	5000,0	5000,0
C_{stat}				0,3034	0,3220	0,3020
S				0,7	0,7	0,7

Anlage A. 4. 6: Messergebnisse für Werkstoff M08 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M08-07	M08-08	M08-09	M08-10	M08-11	M08-12
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	88,52	87,90	87,07	89,34	89,42	89,42
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	102,92	102,77	101,50	103,13	102,85	102,57
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	107,74	107,37	106,29	107,62	107,46	106,81
A	89414,1	89420,1	89394,3	89429,4	89420,0	89420,0
C_{stat}	0,9901	0,9832	0,9739	0,9993	1,0002	1,0002
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,1510	1,1493	1,1354	1,1532	1,1502	1,1471
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,2050	1,2007	1,1890	1,2034	1,2017	1,1945
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	19,41	19,24	19,28	19,26	19,39	19,45
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	21,84	21,75	21,76	21,71	21,83	22,05
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	22,85	22,77	22,72	22,54	22,65	22,89
A	22284,7	22268,5	22340,7	22343,4	22338,7	22356,3
C_{stat}	0,8714	0,8637	0,8626	0,8617	0,8676	0,8702
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,9800	0,9767	0,9740	0,9717	0,9772	0,9863
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,0254	1,0225	1,0170	1,0088	1,0139	1,0239
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k_{stat}	7,57	7,43	7,68	7,64	7,54	7,76
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	8,93	8,68	8,87	8,90	8,84	8,87
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	9,25	8,89	9,10	9,07	9,09	9,12
A	9921,4	9906,7	9922,5	9960,9	9895,0	9936,0
C_{stat}	0,7633	0,7505	0,7744	0,7666	0,7616	0,7812
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,9001	0,8762	0,8939	0,8935	0,8934	0,8927
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,9323	0,8974	0,9171	0,9106	0,9186	0,9179
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Anlagen

Anlage A. 4. 6: Messergebnisse für Werkstoff M08 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M08-13	M08-14	M08-15	M08-16	M08-17	M08-18
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	97,23	91,12	89,50	90,29	90,33	90,23
k _{dyn,5Hz}	111,42	105,99	105,12	105,34	104,85	104,52
k _{dyn,10Hz}	115,78	110,31	109,29	109,08	108,79	107,96
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	1,0876	1,0192	1,0011	1,0099	1,0104	1,0093
C _{dyn,5Hz}	1,2463	1,1856	1,1758	1,1783	1,1728	1,1691
C _{dyn,10Hz}	1,2951	1,2339	1,2225	1,2201	1,2169	1,2076
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 150 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	41,35	42,70	41,87	41,68	41,74	41,56
k _{dyn,5Hz}	46,38	47,82	46,96	46,75	46,81	46,63
k _{dyn,10Hz}	48,17	49,61	48,74	48,57	48,59	48,40
A	45000,0	45000,0	45000,0	45000,0	44850,0	45000,0
C _{stat}	0,9189	0,9489	0,9304	0,9262	0,9307	0,9236
C _{dyn,5Hz}	1,0307	1,0627	1,0436	1,0389	1,0437	1,0362
C _{dyn,10Hz}	1,0704	1,1024	1,0831	1,0793	1,0834	1,0756
S	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Dimensionen	300 mm x 100 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	26,44	27,05	26,79	26,35	26,46	26,60
k _{dyn,5Hz}	29,49	30,25	29,98	29,67	29,75	29,76
k _{dyn,10Hz}	30,90	31,45	31,39	30,86	31,05	31,02
A	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0	29900,0
C _{stat}	0,8843	0,9047	0,8960	0,8813	0,8849	0,8896
C _{dyn,5Hz}	0,9863	1,0117	1,0027	0,9923	0,9950	0,9953
C _{dyn,10Hz}	1,0334	1,0518	1,0498	1,0321	1,0385	1,0375
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 50,0 mm x 12,5 mm					
k _{stat}	11,27	10,91	11,24	11,09	11,05	10,93
k _{dyn,5Hz}	13,40	12,78	13,34	13,38	13,44	13,47
k _{dyn,10Hz}	13,87	13,40	14,08	14,15	14,36	14,24
A	15000,0	14950,0	14950,0	15000,0	14950,0	14950,0
C _{stat}	0,7513	0,7298	0,7518	0,7393	0,7391	0,7311
C _{dyn,5Hz}	0,8933	0,8548	0,8923	0,8920	0,8990	0,9010
C _{dyn,10Hz}	0,9247	0,8963	0,9418	0,9433	0,9605	0,9525
S	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Anlage A. 4. 7: Messergebnisse für Werkstoff M09

Prüfkörper-ID	M09-01	M09-02	M09-03	M09-04	M09-05	M09-06
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 25,0 mm			150 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	32,47	33,03	34,45	33,77	34,42	33,44
$k_{dyn,5Hz}$	37,02	37,60	39,14	38,39	39,09	37,94
$k_{dyn,10Hz}$	37,70	38,14	40,06	39,13	39,74	38,76
$k_{dyn,20Hz}$	38,36	39,37	40,90	39,56	40,81	39,45
A	22725,5	22650,3	22725,5	22650,3	22650,3	22575,0
C_{stat}	1,4288	1,4583	1,5159	1,4909	1,5196	1,4813
$C_{dyn,5Hz}$	1,6291	1,6600	1,7222	1,6948	1,7257	1,6804
$C_{dyn,10Hz}$	1,6591	1,6840	1,7628	1,7275	1,7546	1,7167
$C_{dyn,20Hz}$	1,6881	1,7382	1,7999	1,7466	1,8016	1,7474
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			150 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	12,13	11,79	12,49	20,01	20,45	19,81
$k_{dyn,5Hz}$	14,00	13,71	14,48	23,16	23,70	23,03
$k_{dyn,10Hz}$	14,36	14,10	14,89	23,74	24,22	23,60
$k_{dyn,20Hz}$	14,62	14,45	15,05	24,43	24,97	24,17
A	10000,0	10000,0	10000,0	15050,0	15050,0	15050,0
C_{stat}	1,2130	1,1790	1,2490	1,3296	1,3588	1,3163
$C_{dyn,5Hz}$	1,4001	1,3713	1,4478	1,5391	1,5746	1,5300
$C_{dyn,10Hz}$	1,4361	1,4095	1,4886	1,5772	1,6092	1,5680
$C_{dyn,20Hz}$	1,4622	1,4454	1,5051	1,6235	1,6590	1,6059
S	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2
Dimensionen	70 mm x 70 mm x 25,0 mm			125 mm x 75 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	5,04	4,75	5,10	11,18	11,30	11,01
$k_{dyn,5Hz}$	5,76	5,49	5,85	12,76	12,85	12,64
$k_{dyn,10Hz}$	5,89	5,57	5,98	13,10	13,28	12,97
$k_{dyn,20Hz}$	6,60	5,66	6,23	13,37	13,64	13,16
A	4900,0	4900,0	4900,0	9312,5	9337,5	9375,0
C_{stat}	1,0286	0,9694	1,0408	1,2005	1,2102	1,1744
$C_{dyn,5Hz}$	0,2906	0,2739	0,2964	0,4231	0,4284	0,4192
$C_{dyn,10Hz}$	0,2973	0,2780	0,3028	0,4344	0,4425	0,4303
$C_{dyn,20Hz}$	0,3331	0,2827	0,3158	0,4435	0,4545	0,4365
S	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
Dimensionen	50 mm x 50 mm x 25,0 mm			100 mm x 50,0 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,66	1,54	1,70	3,87	3,87	3,83
$k_{dyn,5Hz}$	1,85	1,71	1,89	4,74	4,75	4,68
$k_{dyn,10Hz}$	n.v.	n.v.	n.v.	4,85	4,88	4,76
$k_{dyn,20Hz}$	n.v.	n.v.	n.v.	4,95	4,96	4,79
A	2500,0	2500,0	2500,0	4950,0	4975,0	5000,0
C_{stat}	0,6640	0,6160	0,6800	0,7818	0,7779	0,7660
$C_{dyn,5Hz}$	0,0931	0,0852	0,0959	0,1573	0,1583	0,1553
$C_{dyn,10Hz}$	n.v.	n.v.	n.v.	0,1609	0,1625	0,1579
$C_{dyn,20Hz}$	n.v.	n.v.	n.v.	0,1642	0,1652	0,1588
S	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7

Anlagen

Anlage A. 4. 8: Messergebnisse für Werkstoff M10

Prüfkörper-ID	M10-01	M10-02	M10-03	M10-04	M10-05	M10-06
Dimensionen	120 mm x 120 mm x 25,0 mm			150 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	21,28	21,63	20,93	37,49	37,60	37,55
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	23,01	24,38	23,90	42,63	42,65	42,57
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	24,31	24,76	24,40	43,22	43,28	43,54
A	14400,0	14280,3	14580,5	22275,5	22275,5	22425,0
C_{stat}	1,4778	1,5147	1,4355	1,6830	1,6880	1,6745
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,5978	1,7074	1,6391	1,9139	1,9144	1,8985
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,6884	1,7336	1,6737	1,9402	1,9431	1,9414
S	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			150 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	13,32	13,28	13,03	21,75	21,71	21,70
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	14,74	14,61	14,21	24,32	23,85	24,00
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	14,96	14,89	14,52	24,67	24,78	24,68
A	9950,0	9850,5	9950,0	14850,0	14925,0	15000,0
C_{stat}	1,3387	1,3482	1,3095	1,4646	1,4546	1,4467
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,4814	1,4835	1,4280	1,6379	1,5983	1,5997
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,5036	1,5120	1,4590	1,6611	1,6604	1,6455
S	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2
Dimensionen	70 mm x 70 mm x 25,0 mm			125 mm x 75 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	5,27	5,37	5,15	11,51	11,60	11,52
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	5,68	5,76	5,49	12,02	12,55	12,44
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	5,81	5,92	5,57	13,06	13,20	13,08
A	4900,0	4900,0	4900,0	9312,5	9375,0	9337,5
C_{stat}	1,0755	1,0959	1,0510	1,2360	1,2373	1,2337
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,1592	1,1761	1,1200	1,2908	1,3391	1,3318
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,1855	1,2082	1,1376	1,4028	1,4080	1,4012
S	0,7	0,7	0,7	0,9	1,0	0,9
Dimensionen	50 mm x 50 mm x 25,0 mm			100 mm x 50,0 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,74	1,78	1,72	3,86	3,90	3,87
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,79	1,80	1,70	4,45	4,53	4,48
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	n.v.	n.v.	n.v.	4,76	4,76	4,72
A	2450,3	2475,0	2475,0	4975,0	4975,0	4925,3
C_{stat}	0,7101	0,7192	0,6949	0,7759	0,7839	0,7857
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,3659	0,3663	0,3471	0,4777	0,4831	0,4800
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	n.v.	n.v.	n.v.	0,5115	0,5076	0,5054
S	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7

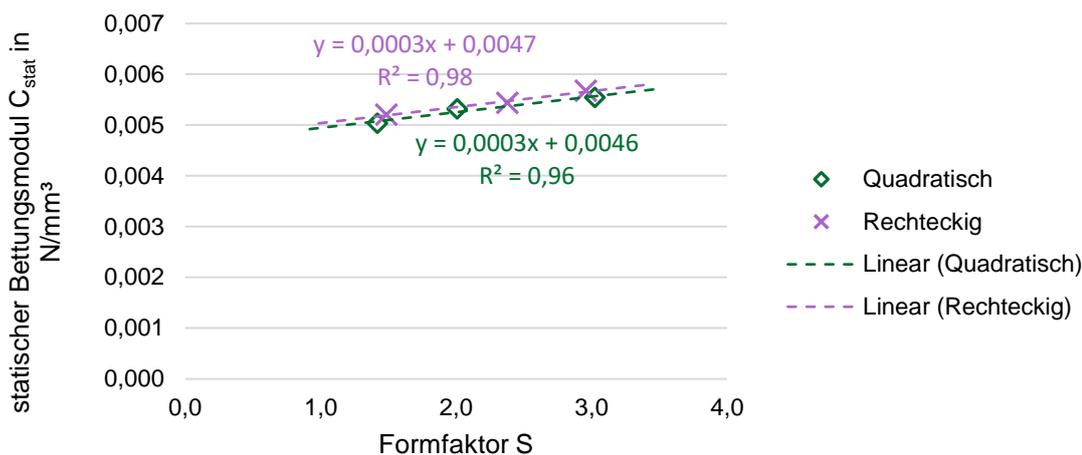


Abbildung A. 4. 1: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M02

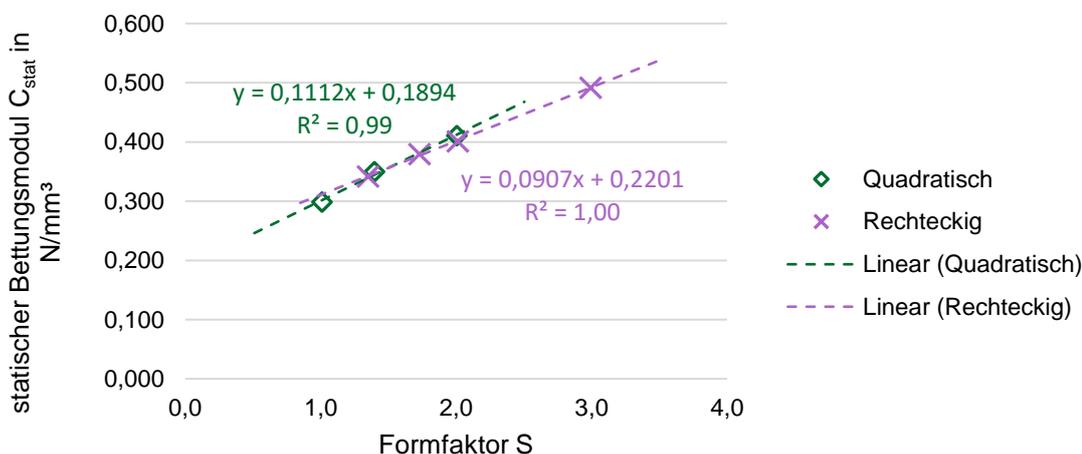


Abbildung A. 4. 2: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M04

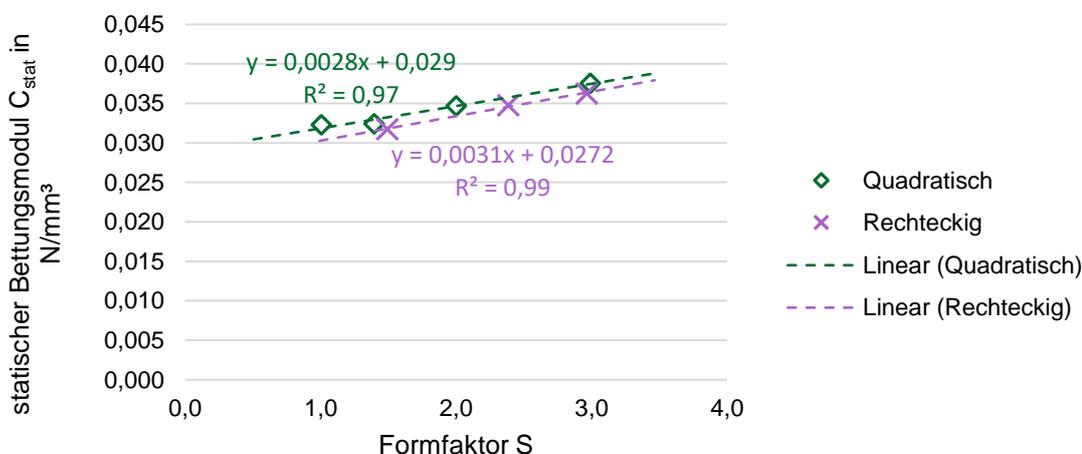


Abbildung A. 4. 3: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M05

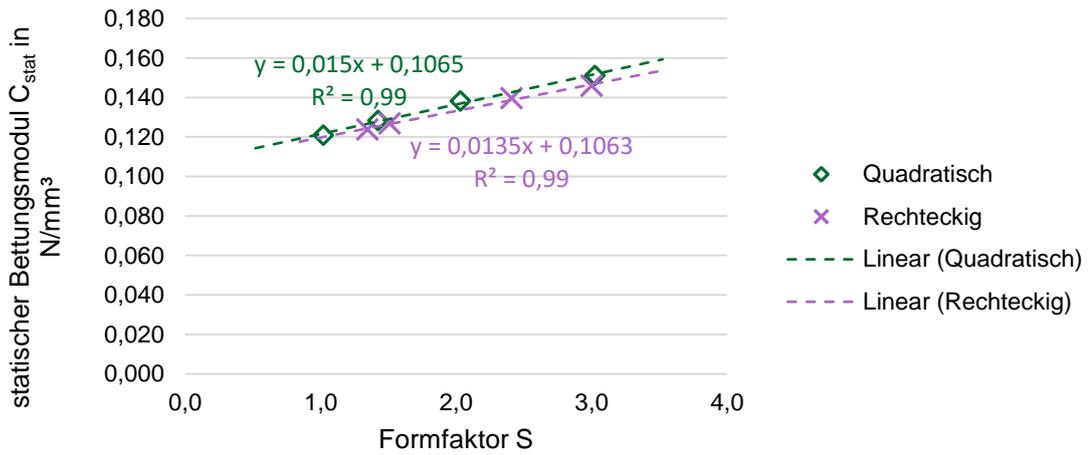


Abbildung A. 4. 4: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M06

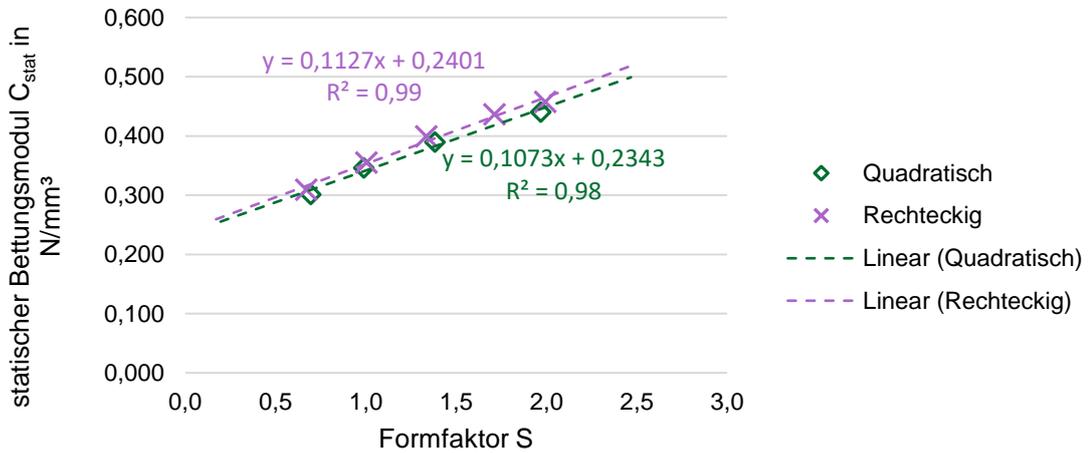


Abbildung A. 4. 5: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M08

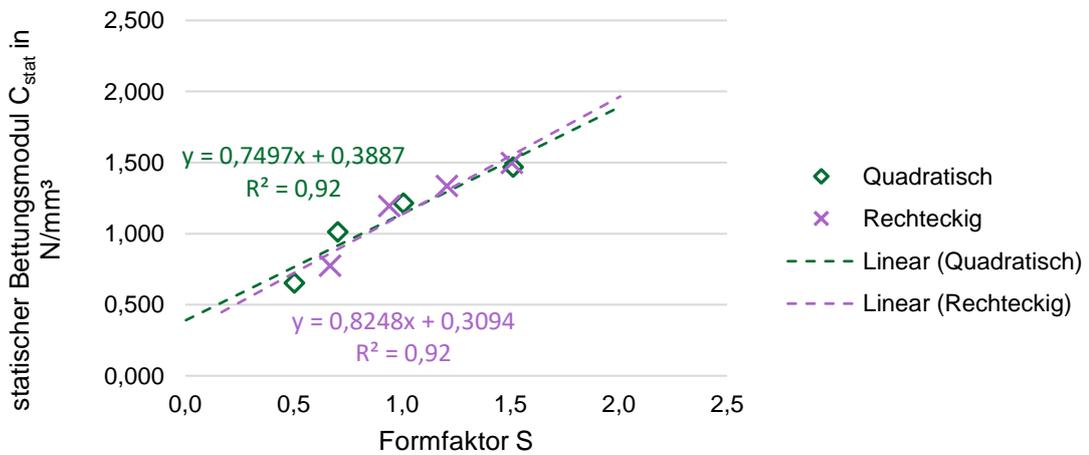


Abbildung A. 4. 6: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M09

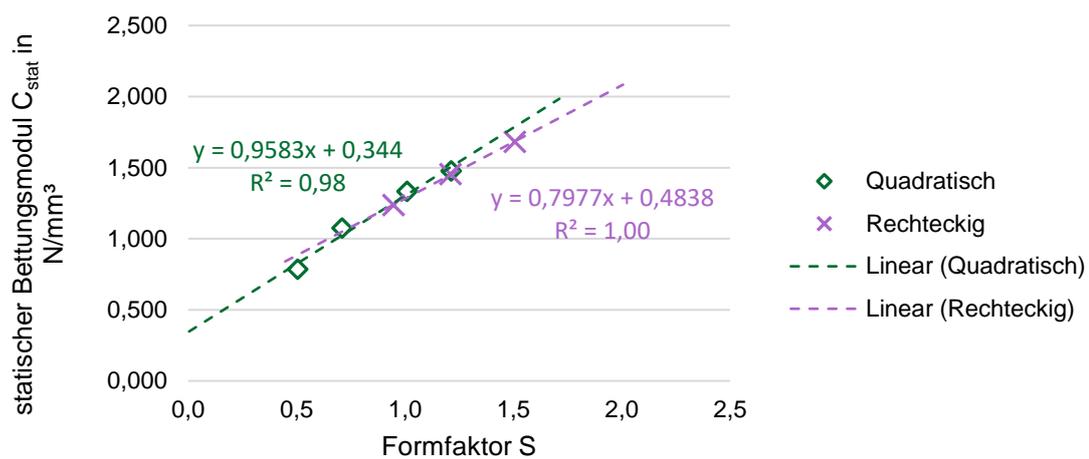


Abbildung A. 4. 7: Vergleich des statischen Bettungsmoduls bei Prüfkörper mit quadratischer und rechteckiger Grundfläche von Werkstoff M10

A.5 Messergebnisse für verklebte und unverklebte Prüfkörper

Anlage A. 5. 1: Messergebnisse für Werkstoff M03 im verklebten/einschichtigen Zustand

	verklebt					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	9,17	9,61	9,32	9,44	9,52	9,48
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	11,21	11,33	11,31	11,45	11,26	11,23
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	11,80	11,88	11,89	12,03	11,81	11,79
A	89401,0	89700,0	89550,5	89401,0	89700,0	89700,0
C_{stat}	0,1026	0,0107	0,1041	0,1056	0,1061	0,1057
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,1254	0,0126	0,1263	0,1281	0,1255	0,1252
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,1320	0,0132	0,1328	0,1346	0,1317	0,1314
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	3,98	4,08	4,10	4,16	4,10	4,04
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	4,61	4,72	4,79	4,82	4,76	4,70
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	4,94	5,00	5,11	5,10	5,09	5,01
A	39966,7	39733,8	39766,8	39800,0	39833,5	39900,1
C_{stat}	0,0996	0,1027	0,1031	0,1045	0,1029	0,1013
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,1153	0,1188	0,1205	0,1211	0,1195	0,1178
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,1236	0,1258	0,1285	0,1281	0,1278	0,1256
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	2,12	2,21	2,21	2,24	2,23	2,20
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	2,41	2,52	2,51	2,53	2,33	2,52
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	2,49	2,61	2,58	2,62	2,41	2,61
A	22350,1	22300,4	22325,3	22201,0	22250,7	22275,5
C_{stat}	0,0949	0,0991	0,0990	0,1009	0,1002	0,0988
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,1078	0,1130	0,1124	0,1140	0,1047	0,1131
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,1114	0,1170	0,1156	0,1180	0,1083	0,1172
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm					
k_{stat}	0,90	0,92	0,93	0,94	0,89	0,92
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,05	1,07	1,1	1,09	1,04	1,07
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	1,08	1,10	1,13	1,12	1,06	1,10
A	9950,0	9950,0	9966,7	9950,0	9950,0	9950,0
C_{stat}	0,0905	0,0925	0,0933	0,0945	0,0894	0,0925
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,1055	0,1075	0,1104	0,1095	0,1045	0,1075
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,1085	0,1106	0,1134	0,1126	0,1065	0,1106
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 5. 1: Messergebnisse für Werkstoff M03 im verklebten/einschichtigen Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	6,31	6,28	6,36	6,36	6,22	6,21
k _{dyn,5Hz}	7,44	7,35	7,42	7,37	7,29	7,26
k _{dyn,10Hz}	7,77	7,65	7,74	7,69	7,61	7,58
A	89401,0	89401,0	89400,0	89700,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,0706	0,0702	0,0711	0,0709	0,0696	0,0695
C _{dyn,5Hz}	0,0832	0,0822	0,0830	0,0822	0,0815	0,0812
C _{dyn,10Hz}	0,0869	0,0856	0,0866	0,0857	0,0851	0,0848
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	3,39	3,36	3,40	3,40	3,35	3,33
k _{dyn,5Hz}	3,94	3,90	3,96	3,94	3,87	3,85
k _{dyn,10Hz}	4,10	4,07	4,11	4,10	4,04	4,01
A	49468,0	49385,0	49451,5	49468,0	49418,1	49451,1
C _{stat}	0,0685	0,0680	0,0688	0,0687	0,0678	0,0673
C _{dyn,5Hz}	0,0796	0,0790	0,0801	0,0796	0,0783	0,0779
C _{dyn,10Hz}	0,0829	0,0824	0,0831	0,0829	0,0818	0,0811
S	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	1,45	1,43	1,45	1,45	1,42	1,42
k _{dyn,5Hz}	1,63	1,61	1,63	1,62	1,62	1,56
k _{dyn,10Hz}	1,69	1,67	1,68	1,67	1,68	1,62
A	22475,0	22550,0	22425,0	22500,0	22525,0	22525,0
C _{stat}	0,0645	0,0634	0,0647	0,0644	0,0630	0,0630
C _{dyn,5Hz}	0,0725	0,0714	0,0727	0,0720	0,0719	0,0693
C _{dyn,10Hz}	0,0752	0,0741	0,0749	0,0742	0,0746	0,0719
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	0,57	0,57	0,57	0,58	0,57	0,56
k _{dyn,5Hz}	0,66	0,66	0,66	0,67	0,66	0,65
k _{dyn,10Hz}	0,69	0,68	0,69	0,69	0,68	0,68
A	9850,5	9900,3	9867,0	9900,3	9900,3	9900,3
C _{stat}	0,0579	0,0576	0,0578	0,0586	0,0576	0,0566
C _{dyn,5Hz}	0,0670	0,0667	0,0669	0,0677	0,0667	0,0657
C _{dyn,10Hz}	0,0700	0,0687	0,0699	0,0697	0,0687	0,0687
S	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Anlagen

Anlage A. 5. 1: Messergebnisse für Werkstoff M03 im verklebten/einschichtigen Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	4,66	4,67	4,67	4,59	4,72	4,7
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	5,45	5,48	5,49	5,43	5,49	5,45
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	5,73	5,78	5,78	5,75	5,77	5,75
A	89400,0	89102,0	89401,0	89401,0	89700,0	89700,0
C_{stat}	0,0521	0,0524	0,0522	0,0513	0,0526	0,0524
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0610	0,0615	0,0614	0,0607	0,0612	0,0608
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,0641	0,0649	0,0647	0,0643	0,0643	0,0641
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	1,95	1,97	1,94	1,93	1,96	1,93
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	2,13	2,18	2,15	2,11	2,17	2,15
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	2,22	2,25	2,23	2,19	2,25	2,22
A	39633,8	39667,3	39733,7	39666,7	39800,2	39601,0
C_{stat}	0,0492	0,0497	0,0488	0,0487	0,0492	0,0487
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0537	0,0550	0,0541	0,0532	0,0545	0,0543
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,0560	0,0567	0,0561	0,0552	0,0565	0,0561
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	150 mm x 120 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	0,82	0,83	0,81	0,82	0,83	0,82
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,93	0,94	0,93	0,91	0,95	0,94
$k_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,96	0,97	0,96	0,94	0,98	0,97
A	17770,5	17820,0	17880,0	17780,7	17855,2	17855,2
C_{stat}	0,0461	0,0466	0,0453	0,0461	0,0465	0,0459
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0523	0,0527	0,0520	0,0512	0,0532	0,0526
$C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$	0,0540	0,0544	0,0537	0,0529	0,0549	0,0543
S	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Anlage A. 5. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 im unverklebten Zustand

Dimensionen	unverklebt					
	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	8,65	8,64	8,03	8,01	8,98	8,74
k _{dyn,5Hz}	10,70	10,74	10,11	10,14	11,05	10,72
k _{dyn,10Hz}	11,21	11,25	10,60	10,62	11,50	11,20
A	89401,0	89251,5	89550,5	89550,5	89401,0	89700,3
C _{stat}	0,0968	0,0968	0,0897	0,0894	0,1004	0,0974
C _{dyn,5Hz}	0,1197	0,1203	0,1129	0,1132	0,1236	0,1195
C _{dyn,10Hz}	0,1254	0,1260	0,1184	0,1186	0,1286	0,1249
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	3,73	3,82	3,48	3,51	3,87	3,80
k _{dyn,5Hz}	4,45	4,55	4,20	4,19	4,55	4,45
k _{dyn,10Hz}	4,60	4,70	4,36	4,37	4,70	4,62
A	39700,5	39833,5	39833,4	39866,7	39833,4	39900,0
C _{stat}	0,0940	0,0959	0,0874	0,0880	0,0972	0,0952
C _{dyn,5Hz}	0,1121	0,1142	0,1054	0,1051	0,1142	0,1115
C _{dyn,10Hz}	0,1159	0,1180	0,1095	0,1096	0,1180	0,1158
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	1,99	2,07	1,89	1,88	2,07	2,06
k _{dyn,5Hz}	2,37	2,37	2,12	2,14	2,34	2,39
k _{dyn,10Hz}	2,44	2,47	2,19	2,22	2,44	2,47
A	22350,3	22425,0	22425,0	22350,3	22425,0	22475,0
C _{stat}	0,0890	0,0923	0,0843	0,0841	0,0923	0,0917
C _{dyn,5Hz}	0,1060	0,1057	0,0945	0,0957	0,1043	0,1063
C _{dyn,10Hz}	0,1092	0,1101	0,0977	0,0993	0,1088	0,1099
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	0,82	0,86	0,75	0,77	0,83	0,83
k _{dyn,5Hz}	0,98	1,01	0,90	0,92	0,98	0,98
k _{dyn,10Hz}	1,01	1,05	0,92	0,95	1,01	1,01
A	9916,8	9916,8	9933,4	9950,1	9867,1	9900,0
C _{stat}	0,0827	0,0867	0,0755	0,0774	0,0841	0,0838
C _{dyn,5Hz}	0,0988	0,1018	0,0906	0,0925	0,0993	0,0990
C _{dyn,10Hz}	0,1018	0,1059	0,0926	0,0955	0,1024	0,1020
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	5,47	5,35	5,36	5,48		
k _{dyn,5Hz}	6,48	6,34	5,48	6,49		
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0		
C _{stat}	0,0612	0,0598	0,0600	0,0611		
C _{dyn,5Hz}	0,0725	0,0709	0,0613	0,0724		
S	2,0	2,0	2,0	2,0		

Anlage A. 5. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03 im unverklebten Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
k_{stat}	3,06	2,99	2,97	3,03
$k_{dyn,5Hz}$	3,55	3,47	3,48	3,54
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
C_{stat}	0,0614	0,0600	0,0596	0,0608
$C_{dyn,5Hz}$	0,0713	0,0697	0,0699	0,0711
S	1,3	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 37,5 mm			
k_{stat}	1,31	1,28	1,28	1,29
A	22650,0	22801,0	22500,0	22500,0
C_{stat}	0,0578	0,0561	0,0569	0,0573
S	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm			
k_{stat}	0,53	0,52	0,53	0,52
A	10000,0	10000,0	10000,0	10000,0
C_{stat}	0,0530	0,0520	0,0530	0,0520
S	0,7	0,7	0,7	0,7
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
k_{stat}	3,90	4,01	3,99	3,94
$k_{dyn,5Hz}$	4,56	4,73	4,72	4,64
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
C_{stat}	0,0436	0,0449	0,0445	0,0442
$C_{dyn,5Hz}$	0,0510	0,0529	0,0526	0,0521
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
k_{stat}	1,66	1,72	1,70	1,71
$k_{dyn,5Hz}$	1,93	2,02	2,01	1,99
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
C_{stat}	0,0415	0,0432	0,0427	0,0430
$C_{dyn,5Hz}$	0,0483	0,0508	0,0505	0,0500
S	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	150 mm x 120 mm x 50,0 mm			
k_{stat}	0,69	0,72	0,71	0,71
A	18000,0	18000,0	18000,0	18000,0
C_{stat}	0,0383	0,0400	0,0394	0,0394
S	0,8	0,8	0,8	0,8

Anlage A. 5. 3: Messergebnisse für Werkstoff M08 im verklebten Zustand

	verklebt					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	41,49	43,52	44,85	44,43	45,13	44,64
k _{dyn,5Hz}	53,85	50,76	51,89	51,45	52,46	52,02
k _{dyn,10Hz}	55,91	52,66	53,72	53,42	54,36	54,06
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89251,5	89401,0
C _{stat}	0,4641	0,4868	0,5017	0,4970	0,5056	0,4993
C _{dyn,5Hz}	0,6023	0,5678	0,5804	0,5755	0,5878	0,5819
C _{dyn,10Hz}	0,6254	0,5890	0,6009	0,5975	0,6091	0,6047
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	17,16	17,13	17,48	17,42	17,55	17,50
k _{dyn,5Hz}	20,93	19,43	19,86	19,86	19,97	19,95
k _{dyn,10Hz}	21,83	20,33	20,75	20,73	20,84	20,89
A	39833,3	39534,6	39601,0	39601,0	36000,9	39567,8
C _{stat}	0,4308	0,4333	0,4414	0,4399	0,4875	0,4423
C _{dyn,5Hz}	0,5254	0,4915	0,5015	0,5015	0,5547	0,5042
C _{dyn,10Hz}	0,5480	0,5142	0,5240	0,5235	0,5789	0,5280
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	9,10	8,66	8,84	8,78	8,82	8,87
k _{dyn,5Hz}	10,65	10,14	10,10	10,16	10,07	10,28
k _{dyn,10Hz}	11,14	10,60	10,68	10,63	10,63	10,71
A	22350,1	22250,7	22275,5	22275,5	22275,5	22275,5
C _{stat}	0,4072	0,3892	0,3968	0,3942	0,3960	0,3982
C _{dyn,5Hz}	0,4765	0,4557	0,4534	0,4561	0,4521	0,4615
C _{dyn,10Hz}	0,4984	0,4764	0,4795	0,4772	0,4772	0,4808
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	3,50	3,22	3,25	3,20	3,20	3,31
k _{dyn,5Hz}	3,82	3,67	3,68	3,78	3,73	3,78
k _{dyn,10Hz}	3,92	3,76	3,75	3,89	3,82	3,89
A	9900,0	9850,5	9850,5	9850,5	9950,0	9900,3
C _{stat}	0,3535	0,3269	0,3299	0,3249	0,3216	0,3343
C _{dyn,5Hz}	0,3859	0,3726	0,3736	0,3837	0,3749	0,3818
C _{dyn,10Hz}	0,3960	0,3817	0,3807	0,3949	0,3839	0,3929
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlagen

Anlage A. 5. 3: Messergebnisse für Werkstoff M08 im verklebten Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	30,51	30,63	30,04	30,51	30,19	30,03
k _{dyn,5Hz}	35,59	35,58	35,17	35,64	35,35	34,95
k _{dyn,10Hz}	36,68	36,65	36,28	36,76	36,49	36,05
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
C _{stat}	0,3390	0,3403	0,3338	0,3390	0,3354	0,3337
C _{dyn,5Hz}	0,3954	0,3953	0,3908	0,3960	0,3928	0,3883
C _{dyn,10Hz}	0,4076	0,4072	0,4031	0,4084	0,4054	0,4006
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	14,91	15,03	14,78	15,03	14,90	14,85
k _{dyn,5Hz}	17,29	17,30	17,03	17,34	17,20	17,07
k _{dyn,10Hz}	17,72	17,82	17,54	17,80	17,68	17,53
A	49426,5	49551,0	49509,5	49584,2	49517,8	49551,0
C _{stat}	0,3017	0,3033	0,2985	0,3031	0,3009	0,2997
C _{dyn,5Hz}	0,3498	0,3491	0,3440	0,3497	0,3473	0,3445
C _{dyn,10Hz}	0,3585	0,3596	0,3543	0,3590	0,3570	0,3538
S	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	5,78	5,81	5,69	5,83	5,72	5,74
k _{dyn,5Hz}	6,62	6,71	6,55	6,73	6,66	6,61
k _{dyn,10Hz}	6,94	6,94	6,81	6,97	6,88	6,85
A	22650,3	22525,0	22600,1	22525,0	22550,0	22500,0
C _{stat}	0,2552	0,2579	0,2518	0,2588	0,2537	0,2551
C _{dyn,5Hz}	0,2923	0,2979	0,2898	0,2988	0,2953	0,2938
C _{dyn,10Hz}	0,3064	0,3081	0,3013	0,3094	0,3051	0,3044
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm					
k _{stat}	2,09	2,11	2,08	2,05	2,07	2,03
k _{dyn,5Hz}	2,35	2,35	2,33	2,37	2,33	2,33
k _{dyn,10Hz}	2,39	2,40	2,37	2,41	2,38	2,38
A	9900,3	9867,1	9900,3	9883,7	9900,3	9850,5
C _{stat}	0,2111	0,2138	0,2101	0,2074	0,2091	0,2061
C _{dyn,5Hz}	0,2374	0,2382	0,2353	0,2398	0,2353	0,2365
C _{dyn,10Hz}	0,2414	0,2432	0,2394	0,2438	0,2404	0,2416
S	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Anlage A. 5. 3: Messergebnisse für Werkstoff M08 im verklebten Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	22,74	22,62	22,66	22,34	22,54	22,41
$k_{dyn,5Hz}$	26,26	26,32	26,36	25,9	26,2	26,15
$k_{dyn,10Hz}$	27,30	27,07	27,14	26,72	26,97	26,97
A	90000,0	90000,0	90000,0	90300,0	89850,0	89850,0
C_{stat}	0,2527	0,2513	0,2518	0,2474	0,2509	0,2494
$C_{dyn,5Hz}$	0,2918	0,2924	0,2929	0,2868	0,2916	0,2910
$C_{dyn,10Hz}$	0,3033	0,3008	0,3016	0,2959	0,3002	0,3002
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	8,30	8,31	8,28	8,13	8,31	8,17
$k_{dyn,5Hz}$	9,53	9,63	9,67	9,38	9,58	9,48
$k_{dyn,10Hz}$	9,91	9,86	9,95	9,68	9,88	9,73
A	39900,1	39866,8	39800,3	39966,7	39800,1	39601,0
C_{stat}	0,2080	0,2084	0,2080	0,2034	0,2088	0,2063
$C_{dyn,5Hz}$	0,2388	0,2416	0,2430	0,2347	0,2407	0,2394
$C_{dyn,10Hz}$	0,2484	0,2473	0,2500	0,2422	0,2482	0,2457
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	150 mm x 120 mm x 50,0 mm					
k_{stat}	3,14	3,13	3,12	3,07	3,10	3,09
$k_{dyn,5Hz}$	3,57	3,55	3,56	3,51	3,53	3,53
$k_{dyn,10Hz}$	3,65	3,70	3,74	3,61	3,68	3,64
A	17920,0	17904,8	17880,0	17954,0	17880,0	17880,0
C_{stat}	0,1752	0,1748	0,1745	0,1710	0,1734	0,1728
$C_{dyn,5Hz}$	0,1992	0,1983	0,1991	0,1955	0,1974	0,1974
$C_{dyn,10Hz}$	0,2037	0,2066	0,2092	0,2011	0,2058	0,2036
S	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Anlagen

Anlage A. 5. 4: Messergebnisse für Werkstoff M08 im unverklebten Zustand

	unverklebt					
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	42,70	42,46	42,10	42,39	42,54	42,57
k _{dyn,5Hz}	49,94	49,78	50,24	50,58	50,73	50,61
k _{dyn,10Hz}	51,43	51,54	51,79	52,32	52,53	52,61
A	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0	89401,0
C _{stat}	0,4776	0,4749	0,4709	0,4742	0,4758	0,4762
C _{dyn,5Hz}	0,5586	0,5568	0,5620	0,5658	0,5674	0,5661
C _{dyn,10Hz}	0,5753	0,5765	0,5793	0,5852	0,5876	0,5885
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	17,05	16,83	16,79	16,88	16,99	17,03
k _{dyn,5Hz}	19,54	19,33	19,23	19,29	19,39	19,44
k _{dyn,10Hz}	20,30	20,17	20,03	20,09	20,19	20,22
A	39766,9	39733,7	39733,7	39833,5	39767,0	39800,0
C _{stat}	0,4287	0,4236	0,4226	0,4238	0,4272	0,4279
C _{dyn,5Hz}	0,4914	0,4865	0,4840	0,4843	0,4876	0,4884
C _{dyn,10Hz}	0,5105	0,5076	0,5041	0,5043	0,5077	0,5080
S	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	8,62	8,52	8,48	8,50	8,56	8,61
k _{dyn,5Hz}	9,85	9,76	9,88	9,89	9,96	10,01
k _{dyn,10Hz}	10,22	10,13	10,20	10,27	10,33	10,36
A	22275,5	22275,5	22350,3	22350,3	22350,3	22350,3
C _{stat}	0,3870	0,3825	0,3794	0,3803	0,3830	0,3852
C _{dyn,5Hz}	0,4422	0,4381	0,4421	0,4425	0,4456	0,4479
C _{dyn,10Hz}	0,4588	0,4548	0,4564	0,4595	0,4622	0,4635
S	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm					
k _{stat}	3,18	3,18	3,22	3,13	3,22	3,24
k _{dyn,5Hz}	3,64	3,53	3,60	3,59	3,60	3,61
k _{dyn,10Hz}	3,74	3,63	3,68	3,68	3,68	3,70
A	9916,8	9900,3	9916,8	9966,7	9900,3	9933,4
C _{stat}	0,3207	0,3212	0,3247	0,3140	0,3252	0,3262
C _{dyn,5Hz}	0,3671	0,3566	0,3630	0,3602	0,3636	0,3634
C _{dyn,10Hz}	0,3771	0,3667	0,3711	0,3692	0,3717	0,3725
S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 5. 4: Messergebnisse für Werkstoff M08 im unverklebten Zustand (Fortsetzung)

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
k _{stat}	25,75	25,71	25,49	25,54
k _{dyn,5Hz}	29,38	29,2	29,04	29,16
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
C _{stat}	0,2880	0,2866	0,2842	0,2857
C _{dyn,5Hz}	0,3286	0,3255	0,3237	0,3262
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
k _{stat}	12,99	12,86	12,87	12,94
k _{dyn,5Hz}	14,00	14,69	14,67	14,80
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
C _{stat}	0,2598	0,2572	0,2574	0,2588
C _{dyn,5Hz}	0,2800	0,2938	0,2934	0,2960
S	1,3	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	150 mm x 150 mm x 37,5 mm			
k _{stat}	5,05	5,00	5,00	5,02
k _{dyn,5Hz}	5,76	5,72	5,74	5,75
A	22500,0	22500,0	22500,0	22500,0
C _{stat}	0,2244	0,2222	0,2222	0,2231
C _{dyn,5Hz}	0,2560	0,2542	0,2551	0,2556
S	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm			
k _{stat}	1,88	1,86	1,86	1,86
k _{dyn,5Hz}	2,18	2,16	2,17	2,17
A	10000,0	10000,0	10000,0	10000,0
C _{stat}	0,1880	0,1860	0,1860	0,1860
C _{dyn,5Hz}	0,2180	0,2160	0,2170	0,2170
S	0,7	0,7	0,7	0,7
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
k _{stat}	17,31	17,22	17,30	17,56
k _{dyn,5Hz}	19,89	19,78	19,80	20,02
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
C _{stat}	0,1923	0,1913	0,1929	0,1951
C _{dyn,5Hz}	0,2210	0,2198	0,2207	0,2224
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
k _{stat}	6,44	6,39	6,37	6,47
k _{dyn,5Hz}	7,39	7,38	7,38	7,44
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
C _{stat}	0,1610	0,1606	0,1593	0,1618
C _{dyn,5Hz}	0,1848	0,1854	0,1845	0,1860
S	1,0	1,0	1,0	1,0
Dimensionen	150 mm x 120 mm x 50,0 mm			
k _{stat}	2,49	2,51	2,47	2,51
k _{dyn,5Hz}	2,82	2,85	2,82	2,85
A	17880,0	18000,0	18000,0	18000,0
C _{stat}	0,1393	0,1394	0,1372	0,1394
C _{dyn,5Hz}	0,1577	0,1583	0,1567	0,1583
S	0,8	0,8	0,8	0,8

A.6 Messergebnisse für die Homogenität der Prüfwerkstoffe

Anlage A. 6. 1: Messergebnisse für Werkstoff M04 für Abbildung 47

Prüfkörper-ID	M04-01	M04-02	M04-03	M04-04	M04-05	M04-06
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	16,51	16,31	16,42	43,85	44,11	43,58
A	40000,0	40000,0	40000,0	89176,8	89401,0	88952,5
C_{stat}	0,4128	0,4078	0,4105	0,4917	0,4934	0,4899
S	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			200 mm x 200 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	6,57	6,89	6,92	16,88	15,66	15,57
A	19390,5	19460,0	19460,3	40000,0	39900,0	40100,0
C_{stat}	0,3388	0,3541	0,3556	0,4220	0,3925	0,3883
S	1,4	1,4	1,4	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	3,06	3,02	3,03	11,91	11,21	11,11
A	10150,5	10150,5	10201,0	29900,0	30124,5	30200,0
C_{stat}	0,3015	0,2975	0,2970	0,3983	0,3721	0,3679
S	1,0	1,0	1,0	1,7	1,7	1,7
Dimensionen				200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}				6,95	6,84	6,77
A				19950,0	20149,5	20100,0
C_{stat}				0,3484	0,3395	0,3368
S				1,3	1,4	1,3
Prüfkörper-ID	M04-07	M04-08	M04-09			
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 37,5 mm					
k_{stat}	8,89	9,36	9,25			
A	39900,0	40000,0	40000,0			
C_{stat}	0,2228	0,2340	0,2313			
S	1,3	1,3	1,3			
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 37,5 mm					
k_{stat}	3,83	3,95	3,93			
A	19670,0	19670,0	19670,0			
C_{stat}	0,1947	0,2008	0,1998			
S	0,9	0,9	0,9			
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm					
k_{stat}	1,68	1,73	1,72			
A	10000,0	10100,3	10150,5			
C_{stat}	0,1680	0,1713	0,1694			
S	0,7	0,7	0,7			

Anlage A. 6. 2: Messergebnisse für Werkstoff M10 für Abbildung 48

Prüfkörper-ID	M10-01	M10-02	M10-03	M10-04	M10-05	M10-06
Dimensionen	120 mm x 120 mm x 25,0 mm			150 mm x 150 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	21,28	21,63	20,93	37,49	37,60	37,55
A	14400,0	14280,3	14580,5	22275,5	22275,5	22425,0
C_{stat}	1,4778	1,5147	1,4355	1,6830	1,6880	1,6745
S	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			150 mm x 100 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	13,32	13,28	13,03	21,75	21,71	21,70
A	9950,0	9850,5	9950,0	14850,0	14925,0	15000,0
C_{stat}	1,3387	1,3482	1,3095	1,4646	1,4546	1,4467
S	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2
Dimensionen	70 mm x 70 mm x 25,0 mm			125 mm x 75 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	5,27	5,37	5,15	11,51	11,60	11,52
A	4900,0	4900,0	4900,0	9312,5	9375,0	9337,5
C_{stat}	1,0755	1,0959	1,0510	1,2360	1,2373	1,2337
S	0,7	0,7	0,7	0,9	1,0	0,9
Dimensionen	50 mm x 50 mm x 25,0 mm			100 mm x 50,0 mm x 25,0 mm		
k_{stat}	1,74	1,78	1,72	3,86	3,90	3,87
A	2450,3	2475,0	2475,0	4975,0	4975,0	4925,3
C_{stat}	0,7101	0,7192	0,6949	0,7759	0,7839	0,7857
S	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7

Anlagen

Anlage A. 6. 2: Messergebnisse für Werkstoff M10 für Abbildung 48 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M10-07	M10-08	M10-09	M10-10	M10-11	M10-12
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 12,5 mm			200 mm x 200 mm x 37,5 mm		
k_{stat}	46,63	47,09	47,18	43,46	43,87	44,27
A	10000,0	10000,0	10000,0	40100,0	40050,0	40000,0
C_{stat}	4,6630	4,7090	4,7180	1,0838	1,0953	1,1068
S	2,0	2,0	2,0	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	70 mm x 70 mm x 12,5 mm			140 mm x 140 mm x 37,5 mm		
k_{stat}	18,55	18,55	18,51	17,40	17,19	16,98
A	4830,3	4830,3	4830,3	19670,0	19635,0	19600,0
C_{stat}	3,8404	3,8404	3,8321	0,8846	0,8755	0,8663
S	1,4	1,4	1,4	0,9	0,9	0,9
Dimensionen	50 mm x 50 mm x 12,5 mm			100 mm x 100 mm x 37,5 mm		
k_{stat}	5,66	5,69	5,69	7,16	7,10	7,03
A	2450,3	2500,0	2475,0	10050,0	10000,0	9950,0
C_{stat}	2,3100	2,2760	2,2990	0,7124	0,7095	0,7065
S	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7
Dimensionen				70 mm x 70 mm x 37,5 mm		
k_{stat}				2,66	2,64	2,61
A				4865,0	4865,0	4865,0
C_{stat}				0,5468	0,5416	0,5365
S				0,5	0,5	0,5
Dimensionen				50 mm x 50 mm x 37,5 mm		
k_{stat}				1,28	1,28	1,28
A				2475,0	2475,0	2475,0
C_{stat}				0,5172	0,5172	0,5172
S				0,3	0,3	0,3

Anlage A. 6. 3: Messergebnisse für Werkstoff M03 für Abbildung 49

Prüfkörper-ID	M03-01	M03-02	M03-03	M03-04	M03-05	M03-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	10,39	10,52	10,35	10,46	10,41	10,19
$k_{dyn,10Hz}$	10,81	10,86	10,76	10,79	10,73	10,62
$k_{dyn,20Hz}$	11,30	11,33	11,26	11,27	11,69	11,51
A	89401,0	89550,5	89700,3	89401,0	90000,0	90000,0
$C_{dyn,5Hz}$	0,1162	0,1175	0,1154	0,1170	0,1157	0,1132
$C_{dyn,10Hz}$	0,1209	0,1213	0,1200	0,1207	0,1192	0,1180
$C_{dyn,20Hz}$	0,1264	0,1265	0,1255	0,1261	0,1299	0,1279
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	4,57	4,59	4,58	7,01	6,90	7,03
$k_{dyn,10Hz}$	4,76	4,76	4,79	7,29	7,20	7,29
$k_{dyn,20Hz}$	4,97	4,99	5,00	7,62	7,58	7,62
A	40200,3	40100,0	40300,5	59900,0	60100,0	60000,0
$C_{dyn,5Hz}$	0,1138	0,1144	0,1137	0,1170	0,1149	0,1172
$C_{dyn,10Hz}$	0,1184	0,1188	0,1189	0,1217	0,1198	0,1215
$C_{dyn,20Hz}$	0,1236	0,1244	0,1241	0,1271	0,1260	0,1271
S	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	2,11	2,12	2,10	3,19	3,29	3,32
$k_{dyn,10Hz}$	2,20	2,21	2,19	3,33	3,41	3,43
$k_{dyn,20Hz}$	2,31	2,31	2,30	3,48	3,56	3,58
A	19740,0	19670,0	19810,5	29800,3	29850,0	29650,5
$C_{dyn,5Hz}$	0,1068	0,1078	0,1058	0,1070	0,1103	0,1119
$C_{dyn,10Hz}$	0,1115	0,1124	0,1108	0,1116	0,1143	0,1156
$C_{dyn,20Hz}$	0,1169	0,1176	0,1161	0,1166	0,1191	0,1208
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	1,04	1,04	1,04	2,14	2,19	2,23
$k_{dyn,10Hz}$	1,08	1,08	1,07	2,23	2,29	2,30
$k_{dyn,20Hz}$	1,12	1,12	1,12	2,35	2,39	2,41
A	10150,5	10150,5	10150,5	19949,8	19899,0	19899,0
$C_{dyn,5Hz}$	0,1022	0,1023	0,1021	0,1070	0,1102	0,1119
$C_{dyn,10Hz}$	0,1063	0,1068	0,1052	0,1120	0,1149	0,1158
$C_{dyn,20Hz}$	0,1106	0,1102	0,1100	0,1177	0,1200	0,1210
S	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3

Anlagen

Anlage A. 6. 3: Messergebnisse für Werkstoff M03 für Abbildung 49 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M03-07	M03-08	M03-09
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 37,5 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	2,99	2,96	2,97
$k_{dyn,10Hz}$	3,11	3,10	3,10
$k_{dyn,20Hz}$	3,25	3,23	3,23
A	39601,0	39800,0	39700,5
$C_{dyn,5Hz}$	0,0754	0,0744	0,0749
$C_{dyn,10Hz}$	0,0785	0,0779	0,0780
$C_{dyn,20Hz}$	0,0819	0,0812	0,0814
S	1,3	1,3	1,3
Dimensionen	140 mm x 140 mm x 37,5 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	1,37	1,36	1,37
$k_{dyn,10Hz}$	1,42	1,42	1,42
$k_{dyn,20Hz}$	1,48	1,46	1,47
A	19670,0	19740,3	19600,0
$C_{dyn,5Hz}$	0,0698	0,0690	0,0699
$C_{dyn,10Hz}$	0,0724	0,0718	0,0724
$C_{dyn,20Hz}$	0,0751	0,0742	0,0748
S	0,9	0,9	0,9
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm		
$k_{dyn,5Hz}$	0,67	0,65	0,65
$k_{dyn,10Hz}$	0,70	0,68	0,68
$k_{dyn,20Hz}$	0,72	0,70	0,70
A	10050,0	10050,0	10050,0
$C_{dyn,5Hz}$	0,0664	0,0649	0,0650
$C_{dyn,10Hz}$	0,0694	0,0676	0,0677
$C_{dyn,20Hz}$	0,0717	0,0701	0,0697
S	0,7	0,7	0,7

Anlage A. 6. 4: Messergebnisse für Werkstoff M06 für Abbildung 52

Prüfkörper-ID	M06-01	M06-02	M06-03	M06-04	M06-05	M06-06
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm			300 mm x 300 mm x 25,0 mm		
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	7,79	7,81	7,92	8,06	7,90	5,31
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	15,27	15,01	15,11	14,92	14,90	13,71
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	15,62	15,28	15,30	15,17	15,19	14,22
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	10,41	10,26	10,68	10,85	10,62	5,89
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	15,56	15,38	15,34	15,22	15,22	14,04
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	15,72	15,41	15,42	15,32	15,55	14,55
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	11,64	10,76	11,73	11,86	11,70	6,10
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	15,82	15,45	15,56	15,48	15,54	14,35
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	16,19	15,43	15,45	15,51	15,31	14,77
A	90000,0	89700,3	89850,0	89850,0	89850,0	89520,2
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0866	0,0870	0,0882	0,0897	0,0880	0,0594
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,1697	0,1674	0,1682	0,1661	0,1659	0,1531
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,1736	0,1704	0,1703	0,1689	0,1691	0,1589
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,1157	0,1144	0,1189	0,1207	0,1182	0,0657
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,1729	0,1714	0,1707	0,1694	0,1694	0,1568
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,1747	0,1718	0,1717	0,1705	0,1730	0,1626
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,1293	0,1199	0,1306	0,1320	0,1302	0,0682
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,1758	0,1722	0,1732	0,1723	0,1729	0,1603
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,1799	0,1720	0,1720	0,1726	0,1704	0,1650
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 25,0 mm			300 mm x 200 mm x 25,0 mm		
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	3,55	3,49	3,37	5,22	5,17	4,12
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	6,45	6,26	6,31	9,62	9,67	9,06
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	6,35	6,35	6,39	9,66	9,82	9,27
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	4,29	4,52	4,48	6,85	6,84	4,72
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	6,59	6,32	6,43	9,76	9,76	9,23
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	6,55	6,50	6,40	9,83	9,85	9,42
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	4,61	4,90	4,84	7,52	7,47	5,03
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	6,77	6,46	6,51	9,87	9,81	9,40
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	6,60	6,60	6,55	9,91	10,03	9,67
A	40300,5	40300,5	40200,0	60150,0	60450,0	59800,0
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0881	0,0865	0,0839	0,0868	0,0855	0,0689
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,1601	0,1554	0,1570	0,1599	0,1599	0,1516
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,1575	0,1575	0,1589	0,1606	0,1625	0,1551
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,1066	0,1122	0,1116	0,1138	0,1131	0,0789
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,1635	0,1569	0,1599	0,1622	0,1615	0,1543
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,1624	0,1614	0,1592	0,1635	0,1629	0,1574
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,1143	0,1216	0,1205	0,1251	0,1235	0,0841
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,1680	0,1603	0,1619	0,1642	0,1622	0,1572
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,1638	0,1639	0,1630	0,1647	0,1659	0,1616
S	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4

Anlagen

Anlage A. 6. 4: Messergebnisse für Werkstoff M06 für Abbildung 52 (Fortsetzung)

Dimensionen	140 mm x 140 mm x 25,0 mm			300 mm x 100 mm x 25,0 mm		
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	1,53	1,69	1,68	2,51	2,51	2,04
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	2,96	2,90	2,93	4,46	4,41	4,15
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	2,98	2,85	2,88	4,32	4,29	4,12
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	1,91	2,14	2,16	3,18	3,22	2,33
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	3,06	2,94	3,00	4,52	4,50	4,23
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	3,07	2,90	2,97	4,37	4,34	4,24
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	2,09	2,31	2,32	3,46	3,47	2,53
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	3,14	2,97	3,20	4,66	4,60	4,32
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	3,10	2,99	3,03	4,43	4,44	4,36
A	19880,8	19810,5	19881,0	30150,0	30150,0	29850,0
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0768	0,0853	0,0847	0,0831	0,0833	0,0682
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,1490	0,1463	0,1473	0,1478	0,1462	0,1392
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,1499	0,1438	0,1449	0,1434	0,1424	0,1382
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,0960	0,1078	0,1088	0,1056	0,1068	0,0780
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,1540	0,1486	0,1507	0,1500	0,1491	0,1416
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,1546	0,1462	0,1493	0,1449	0,1441	0,1419
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,1052	0,1164	0,1169	0,1148	0,1151	0,0849
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,1577	0,1502	0,1610	0,1546	0,1526	0,1449
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,1561	0,1510	0,1522	0,1469	0,1473	0,1462
S	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 25,0 mm			200 mm x 100 mm x 25,0 mm		
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,76	0,87	0,87	1,74	1,78	1,41
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	1,42	1,41	1,41	2,96	2,94	2,76
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	1,38	1,36	1,37	2,90	2,90	2,70
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,93	1,11	1,11	2,20	2,22	1,60
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	1,46	1,43	1,48	3,01	3,00	2,86
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	1,42	1,40	1,43	2,97	2,97	2,82
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	1,01	1,20	1,18	2,37	2,38	1,80
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	1,56	1,52	1,56	3,12	3,05	2,95
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	1,46	1,46	1,49	3,05	3,00	2,90
A	10150,5	10150,5	10150,5	20250,8	20250,8	20100,0
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0748	0,0858	0,0855	0,0858	0,0881	0,0701
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,1402	0,1386	0,1394	0,1460	0,1452	0,1372
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,1364	0,1336	0,1346	0,1432	0,1431	0,1344
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,0917	0,1092	0,1090	0,1085	0,1096	0,0798
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,1439	0,1405	0,1457	0,1487	0,1483	0,1422
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,1402	0,1383	0,1405	0,1465	0,1468	0,1401
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,0991	0,1184	0,1165	0,1172	0,1173	0,0897
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,1541	0,1497	0,1539	0,1540	0,1504	0,1465
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,1437	0,1436	0,1467	0,1506	0,1482	0,1442
S	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,3

Anlage A. 6. 4: Messergebnisse für Werkstoff M06 für Abbildung 52 (Fortsetzung)

Prüfkörper-ID	M06-07	M06-08	M06-09	M06-07	M06-08	M06-09
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 37,5 mm			140 mm x 140 mm x 37,5 mm		
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	2,83	3,06	3,07	1,34	1,47	1,44
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	4,00	4,08	4,07	1,83	1,88	1,86
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	3,96	4,01	4,03	1,87	1,99	2,02
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	3,08	3,38	3,38	1,47	1,58	1,57
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	4,07	4,15	4,13	1,85	1,92	1,90
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	4,05	4,07	4,08	1,87	1,95	1,92
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	3,22	3,56	3,55	1,50	1,67	1,62
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	4,11	4,23	4,20	1,95	1,99	1,95
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	4,15	4,16	4,20	1,88	2,04	1,93
A	39900,0	39900,0	40000,0	19881,0	19881,0	19740,3
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0710	0,0767	0,0768	0,0675	0,0737	0,0729
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,1003	0,1022	0,1018	0,0922	0,0947	0,0945
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,0992	0,1005	0,1007	0,0941	0,1001	0,1024
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,0772	0,0846	0,0844	0,0737	0,0795	0,0793
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,1021	0,1039	0,1033	0,0930	0,0967	0,0962
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,1015	0,1019	0,1020	0,0941	0,0982	0,0972
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,0806	0,0891	0,0887	0,0755	0,0841	0,0823
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,1031	0,1060	0,1049	0,0982	0,1000	0,0989
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,1039	0,1043	0,1050	0,0946	0,1027	0,0976
S	1,3	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9
Dimensionen	100 mm x 100 mm x 37,5 mm					
K _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,91	0,91	0,89			
K _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,87	0,89	0,90			
K _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,85	0,86	0,87			
K _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,95	0,92	0,89			
K _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,90	0,95	0,95			
K _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,90	0,90	0,91			
K _{HF,dyn,20Hz,VL1}	1,00	1,01	0,99			
K _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,99	1,01	1,00			
K _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,99	0,97	0,99			
A	10100,3	10100,3	10100,3			
C _{HF,dyn,5Hz,VL1}	0,0898	0,0905	0,0879			
C _{HF,dyn,5Hz,VL2}	0,0866	0,0878	0,0888			
C _{HF,dyn,5Hz,VL3}	0,0843	0,0850	0,0859			
C _{HF,dyn,10Hz,VL1}	0,0940	0,0915	0,0882			
C _{HF,dyn,10Hz,VL2}	0,0894	0,0938	0,0939			
C _{HF,dyn,10Hz,VL3}	0,0893	0,0892	0,0897			
C _{HF,dyn,20Hz,VL1}	0,0987	0,0997	0,0980			
C _{HF,dyn,20Hz,VL2}	0,0976	0,1005	0,0987			
C _{HF,dyn,20Hz,VL3}	0,0975	0,0961	0,0976			
S	0,7	0,7	0,7			

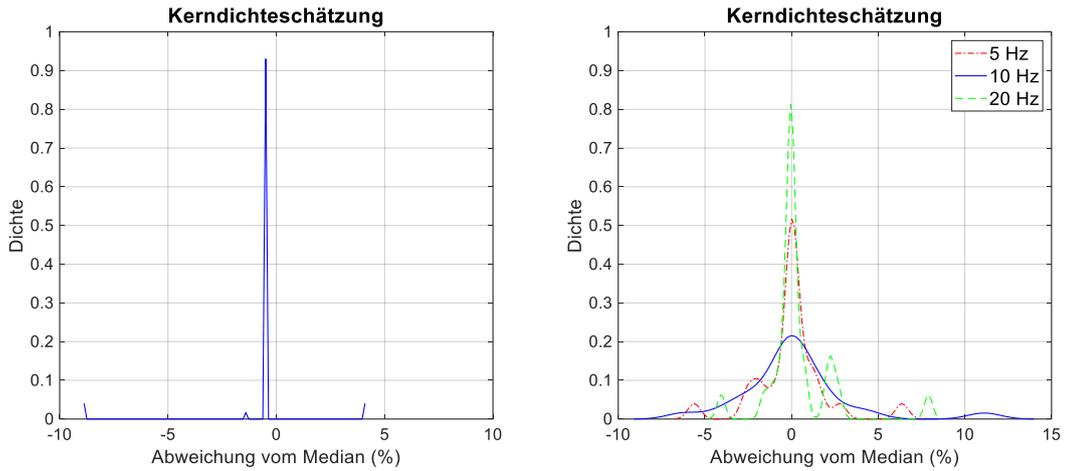


Abbildung A. 6. 1: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M02

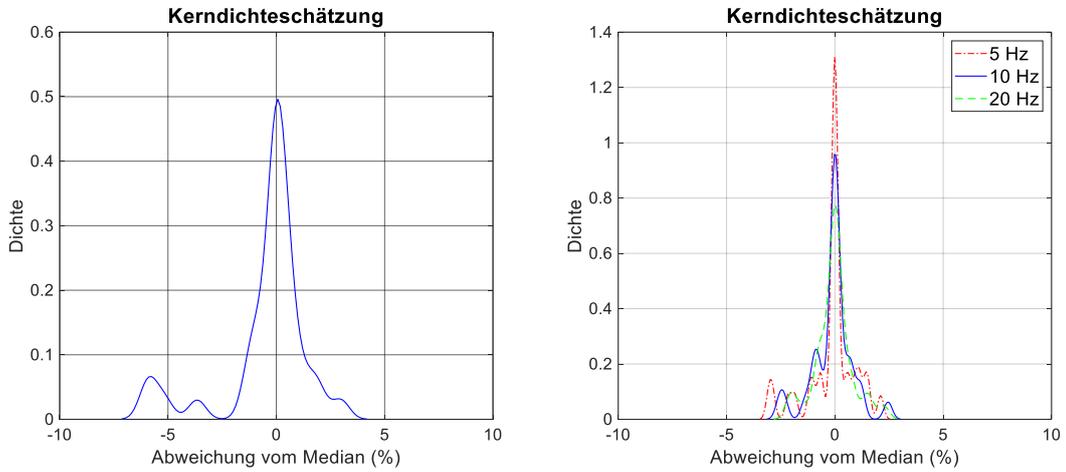


Abbildung A. 6. 2: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M03

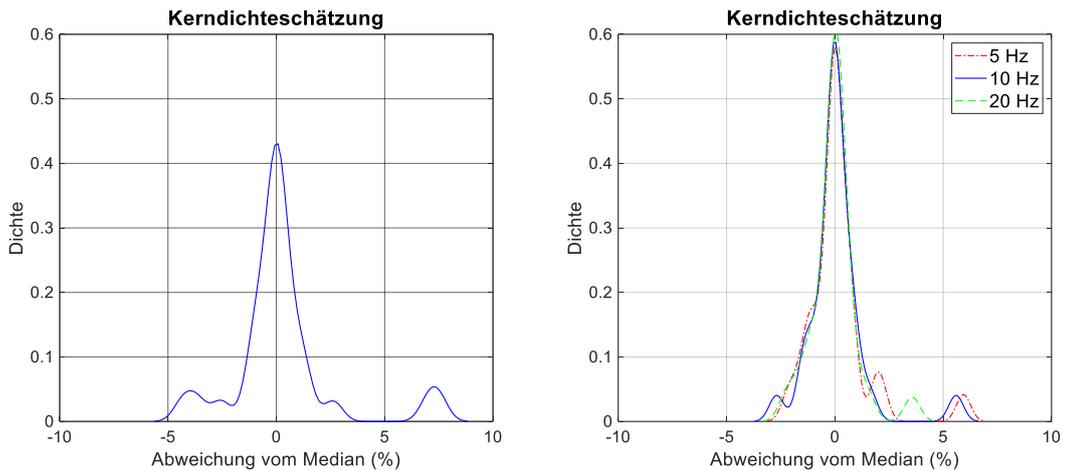


Abbildung A. 6. 3 Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M04

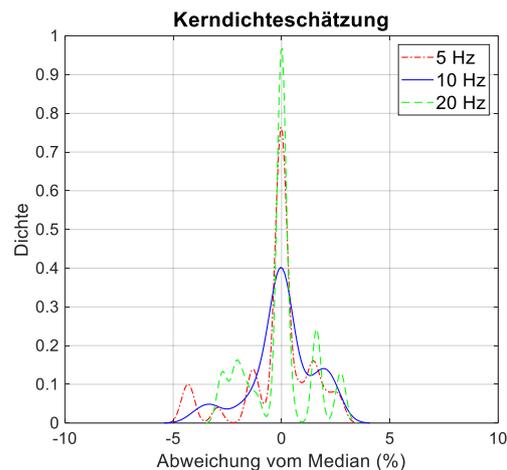
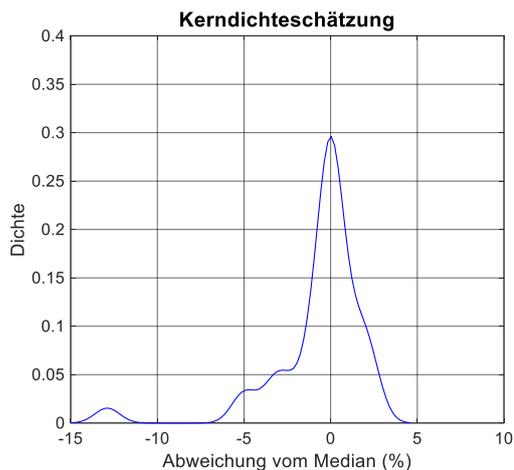


Abbildung A. 6. 4: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M05

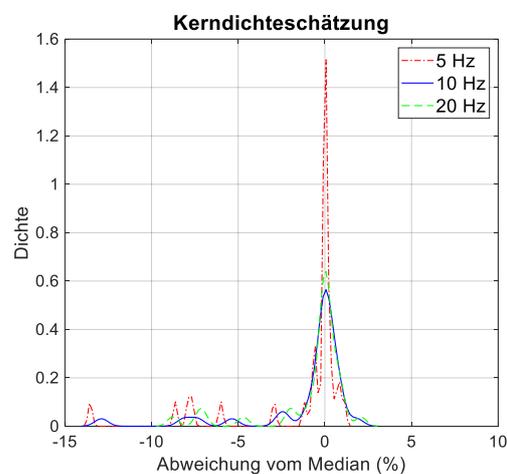
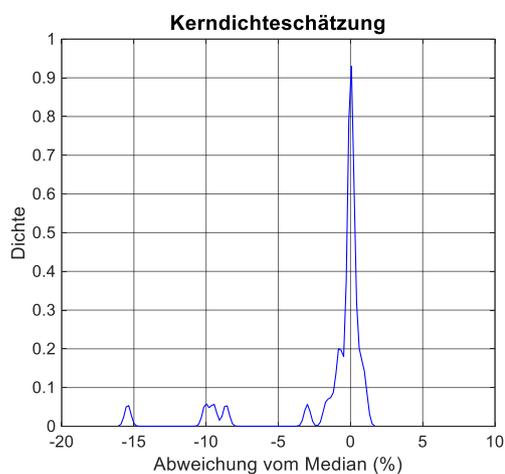


Abbildung A. 6. 5: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M06

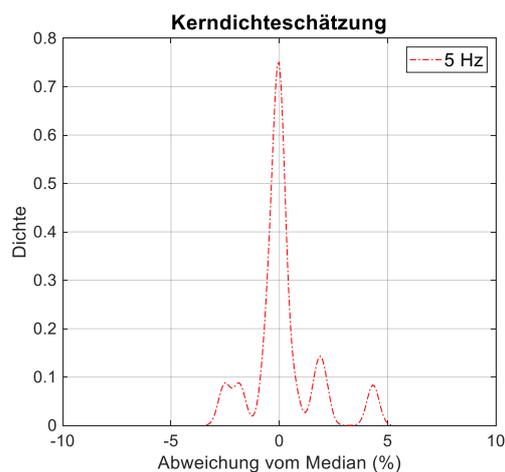
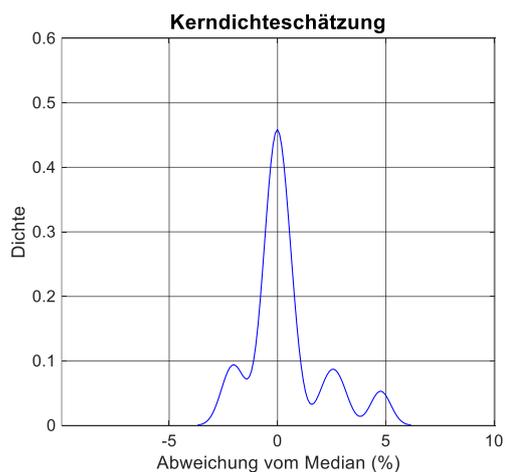


Abbildung A. 6. 6: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M07

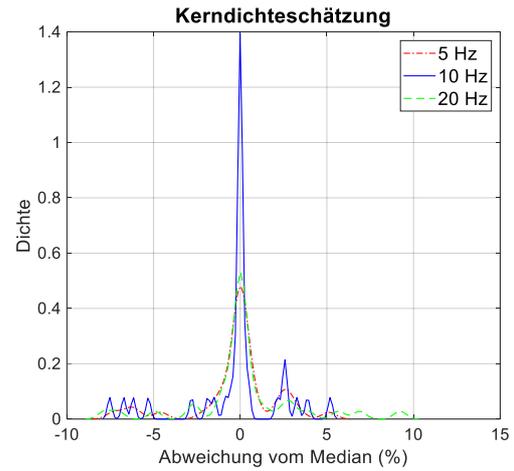
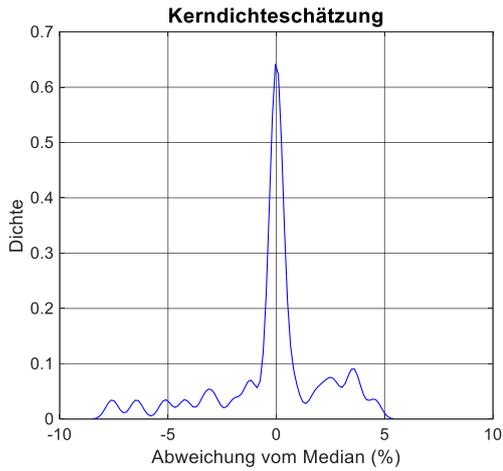


Abbildung A. 6. 7: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M08

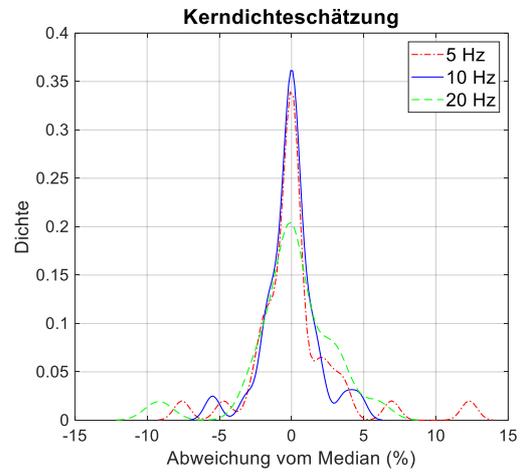
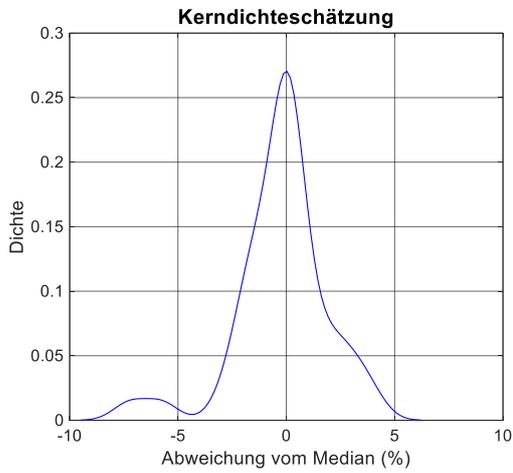


Abbildung A. 6. 8: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M09

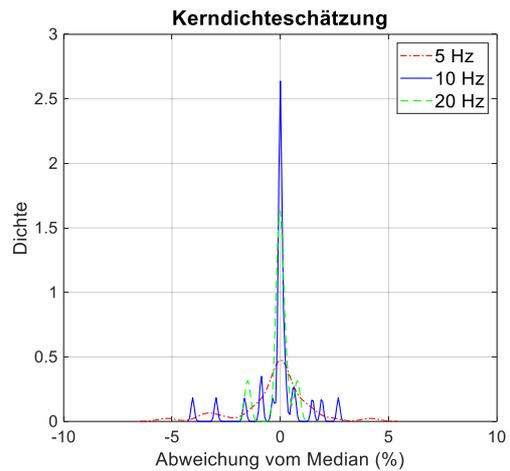
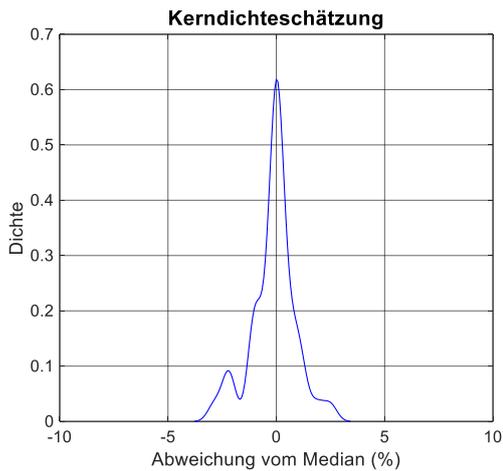


Abbildung A. 6. 9: Kerndichteabschätzung statischer Bettungsmodul (links) und niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul (rechts) Werkstoff M010

A.7 Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Belastungszyklen

Anlage A. 7. 1: Messergebnisse für Werkstoff M01

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
k _{stat,3}	3,25	3,24	2,87	2,90	3,19
k _{stat,5}	3,19	3,19	2,90	2,88	3,21
A	89700,0	89401,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0362	0,0362	0,0321	0,0323	0,0356
C _{stat,5}	0,0356	0,0357	0,0324	0,0321	0,0358
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
k _{stat,3}	1,71	1,75	1,74	1,62	1,50
k _{stat,5}	1,74	1,77	1,76	1,62	1,50
A	89400,0	89700,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0191	0,0195	0,0195	0,0181	0,0167
C _{stat,5}	0,0195	0,0197	0,0197	0,0181	0,0167
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
k _{stat,3}	1,19	1,16	1,18		
k _{stat,5}	1,18	1,17	1,18		
A	89102,0	89401,0	89251,5		
C _{stat,3}	0,0134	0,0130	0,0132		
C _{stat,5}	0,0132	0,0131	0,0132		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
k _{stat,3}	0,89	0,87	0,88		
k _{stat,5}	0,88	0,86	0,87		
A	90000,0	89401,0	89700,5		
C _{stat,3}	0,0098	0,0097	0,0098		
C _{stat,5}	0,0098	0,0096	0,0097		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlagen

Anlage A. 7. 2: Messergebnisse für Werkstoff M03

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
k _{stat,3}	5,47	5,35	5,36	5,48
k _{stat,5}	5,46	5,35	5,36	5,48
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0612	0,0598	0,0600	0,0611
C _{stat,5}	0,0611	0,0598	0,0600	0,0611
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
k _{stat,3}	3,06	2,99	2,97	3,03
k _{stat,5}	3,05	2,99	2,96	3,03
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
C _{stat,3}	0,0614	0,0600	0,0596	0,0608
C _{stat,5}	0,0612	0,0600	0,0594	0,0608
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
k _{stat,3}	3,90	4,01	3,99	3,94
k _{stat,5}	3,90	4,01	3,88	3,94
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
C _{stat,3}	0,0436	0,0449	0,0445	0,0442
C _{stat,5}	0,0436	0,0449	0,0433	0,0442
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
k _{stat,3}	1,66	1,72	1,70	1,71
k _{stat,5}	1,66	1,72	1,70	1,70
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
C _{stat,3}	0,0415	0,0432	0,0427	0,0430
C _{stat,5}	0,0415	0,0432	0,0427	0,0427
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 7. 3: Messergebnisse für Werkstoff M07

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
k _{stat,3}	46,44	46,02	44,97	45,19	48,21
k _{stat,5}	46,55	46,14	45,04	45,25	48,33
A	90300,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
C _{stat,3}	0,5143	0,5113	0,4997	0,5021	0,5357
C _{stat,5}	0,5155	0,5127	0,5004	0,5028	0,5370
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
k _{stat,3}	24,31	24,45	23,66	23,77	23,76
k _{stat,5}	24,34	24,49	23,70	23,83	23,81
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
C _{stat,3}	0,2701	0,2717	0,2629	0,2641	0,2640
C _{stat,5}	0,2704	0,2721	0,2633	0,2648	0,2646
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
k _{stat,3}	15,55	15,46	15,51		
k _{stat,5}	15,56	15,46	15,51		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
C _{stat,3}	0,1728	0,1718	0,1723		
C _{stat,5}	0,1729	0,1718	0,1723		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
k _{stat,3}	10,97	10,84	10,91		
k _{stat,5}	10,98	10,84	10,91		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
C _{stat,3}	0,1219	0,1204	0,1212		
C _{stat,5}	0,1220	0,1204	0,1212		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlagen

Anlage A. 7. 4: Messergebnisse für Werkstoff M08

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
k _{stat,3}	25,75	25,71	25,49	25,54
k _{stat,5}	25,75	25,67	25,46	25,47
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
C _{stat,3}	0,2880	0,2866	0,2842	0,2857
C _{stat,5}	0,2880	0,2862	0,2838	0,2849
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
k _{stat,3}	12,99	12,86	12,87	12,94
k _{stat,5}	13,00	12,85	12,88	12,94
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
C _{stat,3}	0,2598	0,2572	0,2574	0,2588
C _{stat,5}	0,2600	0,2570	0,2576	0,2588
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
k _{stat,3}	17,31	17,22	17,30	17,56
k _{stat,5}	17,28	17,21	17,27	17,54
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
C _{stat,3}	0,1923	0,1913	0,1929	0,1951
C _{stat,5}	0,1920	0,1912	0,1925	0,1949
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
k _{stat,3}	6,44	6,39	6,37	6,47
k _{stat,5}	6,43	6,40	6,37	6,48
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
C _{stat,3}	0,1610	0,1606	0,1593	0,1618
C _{stat,5}	0,1608	0,1608	0,1593	0,1620
S	1,0	1,0	1,0	1,0

A.8 Messergebnisse für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten

Anlage A. 8. 1: Messergebnisse für Werkstoff M01 bei einfacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
k _{stat,3}	3,25	3,24	2,87	2,90	3,19
A	89700,0	89401,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0362	0,0362	0,0321	0,0323	0,0356
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
k _{stat,3}	1,71	1,75	1,74	1,62	1,50
k _{stat,5}	1,74	1,77	1,76	1,62	1,50
A	89400,0	89700,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0191	0,0195	0,0195	0,0181	0,0167
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
k _{stat,3}	1,19	1,16	1,18		
A	89102,0	89401,0	89251,5		
C _{stat,3}	0,0134	0,0130	0,0132		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
k _{stat,3}	0,89	0,87	0,88		
A	90000,0	89401,0	89700,5		
C _{stat,3}	0,0098	0,0097	0,0098		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlagen

Anlage A. 8. 2: Messergebnisse für Werkstoff M01 bei halber Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
k _{stat,3}	3,10	3,06	2,78	2,80	3,10
A	89700,0	89401,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0346	0,0342	0,0311	0,0312	0,0346
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
k _{stat,3}	1,67	1,72	1,68	1,57	1,48
A	89400,0	89700,0	89401,0	89700,0	89700,0
C _{stat,3}	0,0187	0,0192	0,0188	0,0175	0,0165
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
k _{stat,3}	1,13	1,13	1,13		
A	89102,0	89401,0	89251,5		
C _{stat,3}	0,0127	0,0126	0,0127		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
k _{stat,3}	0,85	0,83	0,84		
A	90000,0	89401,0	89700,5		
C _{stat,3}	0,0094	0,0093	0,0094		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlage A. 8. 3: Messergebnisse für Werkstoff M03 bei einfacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	5,47	5,35	5,36	5,48
$k_{dyn,5Hz}$	6,48	6,34	6,48	6,49
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0
$C_{stat,3}$	0,0612	0,0598	0,0600	0,0611
$C_{dyn,5Hz}$	0,0725	0,0709	0,0725	0,0724
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	3,06	2,99	2,97	3,03
$k_{dyn,5Hz}$	3,55	3,47	3,48	3,54
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
$C_{stat,3}$	0,0614	0,0600	0,0596	0,0608
$C_{dyn,5Hz}$	0,0713	0,0697	0,0699	0,0711
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	3,90	4,01	3,99	3,94
$k_{dyn,5Hz}$	4,56	4,73	4,72	4,64
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
$C_{stat,3}$	0,0436	0,0449	0,0445	0,0442
$C_{dyn,5Hz}$	0,0510	0,0529	0,0526	0,0521
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	1,66	1,72	1,70	1,71
$k_{dyn,5Hz}$	1,93	2,02	2,01	1,99
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
$C_{stat,3}$	0,0415	0,0432	0,0427	0,0430
$C_{dyn,5Hz}$	0,0483	0,0508	0,0505	0,0500
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlagen

Anlage A. 8. 4: Messergebnisse für Werkstoff M03 bei halber Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{\text{stat},3}$	5,41	5,30	5,32	5,43
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	6,53	6,41	6,52	6,55
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0605	0,0593	0,0595	0,0605
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0730	0,0717	0,0729	0,0730
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{\text{stat},3}$	3,01	2,95	2,92	2,98
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	3,54	3,48	3,48	3,51
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0604	0,0592	0,0586	0,0598
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0711	0,0699	0,0699	0,0705
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{\text{stat},3}$	3,84	3,96	3,93	3,88
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	4,58	4,70	4,68	4,60
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0430	0,0443	0,0438	0,0435
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0512	0,0526	0,0522	0,0516
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{\text{stat},3}$	1,64	1,69	1,68	1,67
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,94	2,02	2,00	2,00
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0410	0,0425	0,0422	0,0420
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0485	0,0508	0,0503	0,0503
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 8. 5: Messergebnisse für Werkstoff M03 bei zweifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{\text{stat},3}$	5,53	5,42	5,44	5,55
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	6,48	6,34	6,47	6,52
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0619	0,0606	0,0608	0,0619
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0725	0,0709	0,0724	0,0727
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{\text{stat},3}$	3,10	3,04	3,01	3,07
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	3,56	3,49	3,50	3,53
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0622	0,0610	0,0604	0,0616
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0715	0,0701	0,0703	0,0709
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{\text{stat},3}$	3,98	4,09	4,07	4,01
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	4,68	4,81	4,80	4,72
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0445	0,0457	0,0454	0,0450
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0523	0,0538	0,0535	0,0530
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{\text{stat},3}$	1,70	1,74	1,72	1,72
$k_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	1,95	2,05	2,01	2,00
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
$C_{\text{stat},3}$	0,0425	0,0437	0,0432	0,0432
$C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$	0,0488	0,0515	0,0505	0,0503
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlagen

Anlage A. 8. 6: Messergebnisse für Werkstoff M03 bei dreifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	5,53	5,44	5,44	5,58
$k_{dyn,5Hz}$	6,47	6,40	6,47	6,54
A	89401,0	89401,0	89401,0	89700,0
$C_{stat,3}$	0,0619	0,0608	0,0608	0,0622
$C_{dyn,5Hz}$	0,0724	0,0716	0,0724	0,0729
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	3,13	3,07	3,03	3,09
$k_{dyn,5Hz}$	3,56	3,48	3,47	3,52
A	49800,0	49800,0	49800,0	49800,0
$C_{stat,3}$	0,0629	0,0616	0,0608	0,0620
$C_{dyn,5Hz}$	0,0715	0,0699	0,0697	0,0707
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	3,98	4,11	4,09	4,03
$k_{dyn,5Hz}$	4,55	4,72	4,71	4,62
A	89401,0	89401,0	89700,0	89102,0
$C_{stat,3}$	0,0445	0,0460	0,0456	0,0452
$C_{dyn,5Hz}$	0,0509	0,0528	0,0525	0,0519
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	1,71	1,76	1,74	1,74
$k_{dyn,5Hz}$	1,94	2,02	1,99	2,01
A	40000,0	39800,0	39800,0	39800,0
$C_{stat,3}$	0,0428	0,0442	0,0437	0,0437
$C_{dyn,5Hz}$	0,0485	0,0508	0,0500	0,0505
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 8. 7: Messergebnisse für Werkstoff M07 bei einfacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
k _{stat,3}	46,44	46,02	44,97	45,19	48,21
k _{dyn,5Hz}	50,35	50,17	48,90	49,25	52,34
A	90300,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
C _{stat,3}	0,5143	0,5113	0,4997	0,5021	0,5357
C _{dyn,5Hz}	0,5576	0,5574	0,5433	0,5472	0,5816
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
k _{stat,3}	24,31	24,45	23,66	23,77	23,76
k _{dyn,5Hz}	25,98	25,90	25,38	25,46	25,35
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
C _{stat,3}	0,2701	0,2717	0,2629	0,2641	0,2640
C _{dyn,5Hz}	0,2887	0,2878	0,2820	0,2829	0,2817
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
k _{stat,3}	15,55	15,46	15,51		
k _{dyn,5Hz}	16,56	16,54	16,6		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
C _{stat,3}	0,1728	0,1718	0,1723		
C _{dyn,5Hz}	0,1840	0,1838	0,1839		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
k _{stat,3}	10,97	10,84	10,91		
k _{dyn,5Hz}	11,78	11,63	11,70		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
C _{stat,3}	0,1219	0,1204	0,1212		
C _{dyn,5Hz}	0,1309	0,1292	0,1301		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlagen

Anlage A. 8. 8: Messergebnisse für Werkstoff M07 bei halber Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
$k_{stat,3}$	47,54	47,30	45,99	46,14	49,31
$k_{dyn,5Hz}$	51,57	50,81	49,82	50,02	53,39
A	90300,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,5265	0,5256	0,5110	0,5127	0,5479
$C_{dyn,5Hz}$	0,5711	0,5646	0,5536	0,5558	0,5932
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
$k_{stat,3}$	24,87	24,97	24,16	24,34	24,39
$k_{dyn,5Hz}$	26,50	26,61	26,03	26,19	26,14
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,2763	0,2774	0,2684	0,2704	0,2710
$C_{dyn,5Hz}$	0,2944	0,2957	0,2892	0,2910	0,2904
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
$k_{stat,3}$	15,82	15,76	15,79		
$k_{dyn,5Hz}$	16,87	16,80	16,84		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1758	0,1751	0,1754		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1874	0,1867	0,1871		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
$k_{stat,3}$	11,07	10,93	11,00		
$k_{dyn,5Hz}$	11,87	11,74	11,81		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1230	0,1214	0,1222		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1319	0,1304	0,1312		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlage A. 8. 9: Messergebnisse für Werkstoff M07 bei zweifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
$k_{stat,3}$	47,84	47,45	46,48	46,62	49,62
$k_{dyn,5Hz}$	51,50	50,71	50,03	50,15	53,04
A	90300,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,5298	0,5272	0,5164	0,5180	0,5513
$C_{dyn,5Hz}$	0,5703	0,5634	0,5559	0,5572	0,5893
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
$k_{stat,3}$	24,88	25,13	24,38	24,51	24,60
$k_{dyn,5Hz}$	26,37	26,46	25,96	26,07	26,04
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,2764	0,2792	0,2709	0,2723	0,2733
$C_{dyn,5Hz}$	0,2930	0,2940	0,2884	0,2897	0,2893
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
$k_{stat,3}$	15,88	15,85	15,87		
$k_{dyn,5Hz}$	16,82	16,80	16,81		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1764	0,1761	0,1763		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1869	0,1867	0,1868		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
$k_{stat,3}$	11,18	11,02	11,10		
$k_{dyn,5Hz}$	11,90	11,73	11,82		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1242	0,1224	0,1233		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1322	0,1303	0,1313		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlagen

Anlage A. 8. 10: Messergebnisse für Werkstoff M07 bei dreifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 12,5 mm				
$k_{stat,3}$	46,44	46,12	45,24	45,15	48,22
$k_{dyn,5Hz}$	50,22	49,49	48,95	48,89	52,06
A	90300,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,5143	0,5124	0,5027	0,5017	0,5358
$C_{dyn,5Hz}$	0,5561	0,5499	0,5439	0,5432	0,5784
S	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 25,0 mm				
$k_{stat,3}$	24,37	24,47	23,75	23,87	23,91
$k_{dyn,5Hz}$	25,94	25,92	25,44	25,57	25,45
A	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,2708	0,2719	0,2639	0,2652	0,2657
$C_{dyn,5Hz}$	0,2882	0,2880	0,2827	0,2841	0,2828
S	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm				
$k_{stat,3}$	15,72	15,66	15,69		
$k_{dyn,5Hz}$	16,49	16,59	16,54		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1747	0,1740	0,1743		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1832	0,1843	0,1838		
S	2,0	2,0	2,0		
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm				
$k_{stat,3}$	11,06	10,90	10,98		
$k_{dyn,5Hz}$	11,74	11,60	11,67		
A	90000,0	90000,0	90000,0		
$C_{stat,3}$	0,1229	0,1211	0,1220		
$C_{dyn,5Hz}$	0,1304	0,1289	0,1297		
S	1,5	1,5	1,5		

Anlage A. 8. 11: Messergebnisse für Werkstoff M08 bei einfacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	25,75	25,71	25,49	25,54
$k_{dyn,5Hz}$	29,38	29,20	29,04	29,16
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
$C_{stat,3}$	0,2880	0,2866	0,2842	0,2857
$C_{dyn,5Hz}$	0,3286	0,3255	0,3237	0,3262
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	12,99	12,86	12,87	12,94
$k_{dyn,5Hz}$	15,00	14,69	14,67	14,80
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
$C_{stat,3}$	0,2598	0,2572	0,2574	0,2588
$C_{dyn,5Hz}$	0,3000	0,2938	0,2934	0,2960
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	17,31	17,22	17,30	17,56
$k_{dyn,5Hz}$	19,89	19,78	19,80	20,02
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,1923	0,1913	0,1929	0,1951
$C_{dyn,5Hz}$	0,2210	0,2198	0,2207	0,2224
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	6,44	6,39	6,37	6,47
$k_{dyn,5Hz}$	7,39	7,38	7,38	7,44
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
$C_{stat,3}$	0,1610	0,1606	0,1593	0,1618
$C_{dyn,5Hz}$	0,1848	0,1854	0,1845	0,1860
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlagen

Anlage A. 8. 12: Messergebnisse für Werkstoff M08 bei halber Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	25,88	25,78	25,65	25,74
$k_{dyn,5Hz}$	30,27	29,94	29,80	30,09
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
$C_{stat,3}$	0,2895	0,2874	0,2860	0,2879
$C_{dyn,5Hz}$	0,3386	0,3338	0,3322	0,3366
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	13,06	13,00	13,01	13,08
$k_{dyn,5Hz}$	14,64	14,74	14,73	14,83
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
$C_{stat,3}$	0,2612	0,2600	0,2602	0,2616
$C_{dyn,5Hz}$	0,2928	0,2948	0,2946	0,2966
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	17,43	17,28	17,20	17,54
$k_{dyn,5Hz}$	20,32	20,21	20,14	20,37
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,1937	0,1920	0,1918	0,1949
$C_{dyn,5Hz}$	0,2258	0,2246	0,2245	0,2263
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	6,53	6,52	6,47	6,55
$k_{dyn,5Hz}$	7,48	7,45	7,46	7,55
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
$C_{stat,3}$	0,1633	0,1638	0,1618	0,1638
$C_{dyn,5Hz}$	0,1870	0,1872	0,1865	0,1888
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlage A. 8. 13: Messergebnisse für Werkstoff M08 bei zweifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	26,04	25,78	25,59	25,86
$k_{dyn,5Hz}$	30,11	29,80	29,77	30,03
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
$C_{stat,3}$	0,2913	0,2874	0,2853	0,2893
$C_{dyn,5Hz}$	0,3368	0,3322	0,3319	0,3359
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	13,27	13,16	13,19	13,22
$k_{dyn,5Hz}$	14,95	14,82	14,83	14,92
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
$C_{stat,3}$	0,2654	0,2632	0,2638	0,2644
$C_{dyn,5Hz}$	0,2990	0,2964	0,2966	0,2984
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	17,42	17,40	17,24	17,61
$k_{dyn,5Hz}$	20,54	20,52	20,24	20,66
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,1936	0,1933	0,1922	0,1957
$C_{dyn,5Hz}$	0,2282	0,2280	0,2256	0,2296
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	6,65	6,59	6,58	6,66
$k_{dyn,5Hz}$	7,49	7,44	7,44	7,54
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
$C_{stat,3}$	0,1663	0,1656	0,1645	0,1665
$C_{dyn,5Hz}$	0,1873	0,1869	0,1860	0,1885
S	1,0	1,0	1,0	1,0

Anlagen

Anlage A. 8. 14: Messergebnisse für Werkstoff M08 bei dreifacher Geschwindigkeit

Dimensionen	300 mm x 300 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	26,10	26,16	25,94	26,06
$k_{dyn,5Hz}$	29,94	29,68	29,54	29,76
A	89401,0	89700,0	89700,0	89401,0
$C_{stat,3}$	0,2919	0,2916	0,2892	0,2915
$C_{dyn,5Hz}$	0,3349	0,3309	0,3293	0,3329
S	2,0	2,0	2,0	2,0
Dimensionen	250 mm x 200 mm x 37,5 mm			
$k_{stat,3}$	13,30	13,18	13,26	13,25
$k_{dyn,5Hz}$	15,03	14,93	14,88	14,97
A	50000,0	50000,0	50000,0	50000,0
$C_{stat,3}$	0,2660	0,2636	0,2652	0,2650
$C_{dyn,5Hz}$	0,3006	0,2986	0,2976	0,2994
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	300 mm x 300 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	17,59	17,53	17,45	17,71
$k_{dyn,5Hz}$	20,23	20,10	20,12	20,24
A	90000,0	90000,0	89700,0	90000,0
$C_{stat,3}$	0,1954	0,1948	0,1945	0,1968
$C_{dyn,5Hz}$	0,2248	0,2233	0,2243	0,2249
S	1,5	1,5	1,5	1,5
Dimensionen	200 mm x 200 mm x 50,0 mm			
$k_{stat,3}$	6,67	6,62	6,61	6,70
$k_{dyn,5Hz}$	7,51	7,49	7,46	7,55
A	40000,0	39800,0	40000,0	40000,0
$C_{stat,3}$	0,1668	0,1663	0,1653	0,1675
$C_{dyn,5Hz}$	0,1878	0,1882	0,1865	0,1888
S	1,0	1,0	1,0	1,0

A.9 Messergebnisse für die Werkstofffunktion

Anlage A. 9. 1: Werkstofffunktionen für die Werkstoffe M02 – M07 und M09 – M10 für die untersuchten Prüfkörperdicken von 25,0 mm und 37,5 mm

Werkstoff	Prüfkörperdicke in mm	Werkstofffunktion
M02	25,0	$C_{\text{stat},M02,v} = 0,0008 \cdot \ln(S) + 0,0048$
	37,5	$C_{\text{stat},M02,v} = 0,0007 \cdot \ln(S) + 0,0036$
M03	25,0	$C_{\text{stat},M03,v} = 0,0111 \cdot \ln(S) + 0,0827$
	37,5	$C_{\text{stat},M03,v} = 0,0155 \cdot \ln(S) + 0,0565$
M04	25,0	$C_{\text{stat},M04,v} = 0,1746 \cdot \ln(S) + 0,2900$
	37,5	$C_{\text{stat},M04,v} = 0,0869 \cdot \ln(S) + 0,2048$
M05	25,0	$C_{\text{stat},M05,v} = 0,0038 \cdot \ln(S) + 0,0318$
	37,5	$C_{\text{stat},M05,v} = 0,0050 \cdot \ln(S) + 0,0218$
M06	25,0	$C_{\text{stat},M06,v} = 0,0284 \cdot \ln(S) + 0,1214$
	37,5	$C_{\text{stat},M06,v} = 0,0165 \cdot \ln(S) + 0,0839$
M07	25,0	$C_{\text{stat},M07,v} = 0,0519 \cdot \ln(S) + 0,2134$
	37,5	$C_{\text{stat},M07,v} = 0,0452 \cdot \ln(S) + 0,1431$
M09	25,0	$C_{\text{stat},M09,v} = 0,7195 \cdot \ln(S) + 1,2048$
	37,5	$C_{\text{stat},M09,v} = 0,2877 \cdot \ln(S) + 0,6335$
M10	25,0	$C_{\text{stat},M10,v} = 0,9203 \cdot \ln(S) + 1,2961$
	37,5	$C_{\text{stat},M10,v} = 0,4310 \cdot \ln(S) + 0,9235$

Anlagen

Anlage A. 9. 2: Gemessene und berechnete (grün) Werte des statischen Bettungsmoduls C_{stat} für Werkstoff M08, verklebt

S	Statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7	0,5368	0,2823	0,2096	0,1736
1,0	0,6134	0,3316	0,2554	0,2072
1,5	0,7005	0,3969	0,3012	0,2506
2,0	0,7546	0,4385	0,3369	0,2789
3,0	0,8613	0,4924	0,3856	0,3199
4,5	0,9362	0,5545	0,4343	0,3609
6,0	0,9936	0,5966	0,4689	0,3899

Anlage A. 9. 3: Prozentuale Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Werten von Werkstoff M08, verklebt unter Berücksichtigung von Faktor Q

S	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7	9,9 %	3,8 %	4,3 %	2,3 %
1,0	6,6 %	4,7 %	1,4 %	1,5 %
1,5	3,7 %	3,0 %	1,2 %	1,2 %
2,0	1,0 %	3,2 %	0,2 %	1,7 %
3,0	1,5 %	4,4 %	0,5 %	2,6 %
4,5	1,5 %	3,8 %	1,1 %	3,4 %
6,0	2,9 %	3,8 %	1,5 %	3,8 %

Anlage A. 9. 4: Messergebnisse (gemessen und extrapoliert) für Werkstoff M08 im einschichtigen/verklebten Zustand

		Statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5368	0,2823	0,2096	0,1736
1,0		0,6134	0,3316	0,2554	0,2072
1,5		0,7005	0,3969	0,3012	0,2506
2,0		0,7546	0,4385	0,3369	0,2789
3,0		0,8613	0,4924	0,3856	0,3199
4,5		0,9362	0,5545	0,4343	0,3609
6,0		0,9936	0,5966	0,4689	0,3899
		Niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul $C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$ in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5709	0,3203	0,2371	0,1978
1,0		0,6695	0,3852	0,2946	0,2397
1,5		0,7816	0,4667	0,3474	0,2911
2,0		0,8628	0,5131	0,3931	0,3258
3,0		0,9806	0,5919	0,4516	0,3755
4,5		1,0614	0,6673	0,5109	0,4251
6,0		1,1799	0,7210	0,5530	0,4604
		Niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul $C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$ in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5620	0,3298	0,2416	0,2050
1,0		0,6725	0,3948	0,3058	0,2470
1,5		0,7981	0,4890	0,3570	0,3003
2,0		0,8872	0,5357	0,4054	0,3355
3,0		1,0177	0,6138	0,4665	0,3862
4,5		1,1265	0,6964	0,5283	0,4370
6,0		1,2344	0,7531	0,5721	0,4730

Anlagen

Anlage A. 9. 5: Messergebnisse (berechnet mit Formel (5-5), (5-6) und (5-7)) für Werkstoff M08

		Statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5237	0,2971	0,2127	0,1676
1,0		0,6002	0,3498	0,2550	0,2038
1,5		0,6870	0,4096	0,3031	0,2450
2,0		0,7487	0,4520	0,3373	0,2743
3,0		0,8356	0,5119	0,3854	0,3155
4,5		0,9225	0,5717	0,4335	0,3567
6,0		0,9841	0,6142	0,4676	0,3859
		Niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul $C_{\text{dyn},5\text{Hz}}$ in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5596	0,3286	0,2403	0,1924
1,0		0,6580	0,3943	0,2922	0,2362
1,5		0,7699	0,4689	0,3511	0,2860
2,0		0,8493	0,5219	0,3929	0,3214
3,0		0,9613	0,5966	0,4518	0,3712
4,5		1,0732	0,6712	0,5107	0,4210
6,0		1,1526	0,7242	0,5525	0,4563
		Niederfrequenter dynamischer Bettungsmodul $C_{\text{dyn},10\text{Hz}}$ in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5538	0,3329	0,2471	0,2000
1,0		0,6638	0,4030	0,3010	0,2447
1,5		0,7889	0,4827	0,3622	0,2954
2,0		0,8776	0,5392	0,4057	0,3315
3,0		1,0027	0,6190	0,4669	0,3823
4,5		1,1278	0,6987	0,5281	0,4331
6,0		1,2165	0,7552	0,5716	0,4691

Anlage A. 9. 6: Messergebnisse (gemessen und extrapoliert) für Werkstoff M08 im unverklebten Zustand

		Statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5657	0,2749	0,1865	0,1388
1,0		0,6364	0,3221	0,2230	0,1606
1,5		0,7168	0,3829	0,2583	0,1929
2,0		0,7663	0,4259	0,2861	0,2123
3,0		0,8662	0,4749	0,3243	0,2411
4,5		0,9341	0,5348	0,3623	0,2699
6,0		0,9873	0,5750	0,3893	0,2904

Anlage A. 9. 7: Messergebnisse (berechnet mit Formel (5-9)) für Werkstoff M08 im unverklebten Zustand

		Statischer Bettungsmodul C_{stat} in N/mm^3			
S \ h	h	12,5 mm	25,0 mm	37,5 mm	50,0 mm
0,7		0,5384	0,2793	0,1814	0,1283
1,0		0,6194	0,3301	0,2182	0,1565
1,5		0,7115	0,3878	0,2602	0,1887
2,0		0,7768	0,4287	0,2899	0,2115
3,0		0,8689	0,4864	0,3318	0,2436
4,5		0,9610	0,5440	0,3737	0,2758
6,0		1,0264	0,5850	0,4035	0,2986