
Mechanische Verbundeigenschaften zusammengesetzter Querschnitte aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und mineralisch basierten Plattenwerkstoffen unter statischen und seismischen Beanspruchungen

Mechanical composite properties of composed cross-sections made of thin steel
sheet drywall profiles and mineral-based boards under static and seismic loads

Vom Fachbereich Architektur



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dominik Herfurth

Erstgutachter: Prof. Dr. Karsten Tichelmann

Zweitgutachter: Prof. Dr. Jörg Lange

Tag der Einreichung: 19.02.2024

Darmstadt 2024

Herfurth, Dominik: Mechanische Verbundeigenschaften zusammengesetzter Querschnitte aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und mineralisch basierten Plattenwerkstoffen unter statischen und seismischen Beanspruchungen
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-275227
Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2024

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses>

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Karsten Tichelmann, der mich bereits im Studium für Leichtbauweisen begeisterte und damit den entscheidenden Impuls für meinen fachlichen und beruflichen Werdegang gab. Ebenfalls gilt ein besonderer Dank meinem Arbeitgeber, dem Unternehmen Knauf Gips KG, der es mir ermöglichte, die dieser Dissertation zugrunde liegenden Untersuchungen durchzuführen. Ohne die Unterstützung meines Vorgesetzten, Dr. Markus Biebl, und der Mitarbeitenden vom ‚Mechanik Bereich der Anwendungstechnischen Entwicklung‘ wäre eine Umsetzung nicht möglich gewesen. Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die immer an mich geglaubt und mich in meinem Vorhaben bestärkt hat.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Symbole.....	XV
Begriffsdefinitionen.....	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.2 Statische Aspekte der leichten Ständerbauweise	3
1.3 Seismische Aspekte der leichten Ständerbauweise.....	5
2 Stand der Normung	7
2.1 Produktnormen.....	7
2.2 Anwendungsnormen und Merkblätter	8
2.3 Prüfnormen	9
2.4 Bemessungsnormen, -richtlinien und Normen für Lastannahmen.....	10
3 Stand der Forschung	13
3.1 Statische Untersuchungen.....	13
3.2 Seismische Untersuchungen	15
4 Konkretisierung der Zielsetzung	18
4.1 Offene Fragestellungen	18
4.2 Weiterführender Forschungsbedarf und Ziel der Untersuchungen.....	19
4.3 Potentiale für die leichte Ständerbauweise	21
5 Methodik	25
5.1 Eingrenzung relevanter Bauprodukte	25
5.1.1 Gipsplatten für die Beplankung	25
5.1.2 Metallprofile für die Unterkonstruktion.....	26
5.1.3 Schrauben für den mechanischen Verbund.....	27
5.2 Auswahl geeigneter Prüfverfahren.....	27
5.2.1 Kleinteilprüfungen	27
5.2.2 Bauteilprüfung.....	32
5.3 Klimabeanspruchung	33

6	Untersuchung der einschnittigen Verbindung unter quasi monoton statischer Belastung	35
6.1	Untersuchungsparameter.....	35
6.1.1	Aufbau der Prüfkörper	35
6.1.2	Festlegung der Klimabeanspruchung.....	38
6.1.3	Untersuchungsumfang.....	39
6.1.4	Prüfablauf.....	39
6.2	Untersuchungsergebnisse.....	41
6.3	Auswertung	43
6.3.1	Bestimmung des Verschiebungsmoduls	43
6.3.2	Bestimmung der Fließverschiebung und der Duktilität	45
6.4	Einfluss der Klimabeanspruchung	50
6.4.1	Abhängigkeit des Verschiebungsmoduls vom massebezogenen Feuchtegehalt	50
6.4.2	Abhängigkeit der Fließverschiebung und Duktilität vom massebezogenen Feuchtegehalt	54
7	Untersuchung der einschnittigen Verbindung unter zyklischer Belastung	58
7.1	Untersuchungsparameter.....	58
7.1.1	Aufbau der Prüfkörper	58
7.1.2	Festlegung der Klimatisierung	58
7.1.3	Untersuchungsumfang.....	60
7.1.4	Prüfablauf.....	60
7.2	Untersuchungsergebnisse.....	61
7.3	Auswertung	62
7.3.1	Bestimmung der Festigkeitsminderung.....	62
7.3.2	Bestimmung der Energiedissipation, der verfügbaren potentiellen Energie und des Dämpfungsverhältnisses.....	63
7.4	Einfluss der Klimabeanspruchung	67
7.4.1	Abhängigkeit der Festigkeitsminderung von der Klimabeanspruchung.....	67
7.4.2	Abhängigkeit der Energiedissipation und des Dämpfungsverhältnisses von der Klimabeanspruchung	68
8	Untersuchung des Bauteilverhaltens unter statischer Belastung.....	70
8.1	Untersuchungsparameter.....	70
8.1.1	Aufbau des Prüfkörpers.....	70
8.1.2	Prüfablauf.....	72
8.1.3	Feuchtebeanspruchung.....	74
8.2	Untersuchungsergebnis	75
8.3	Auswertung	76
8.3.1	Bewertung des Last-Verformungsverhaltens	76
8.3.2	Bestimmung der Bauteilsteifigkeit.....	77

9	Rechnerisches Verfahren für Bauteile.....	78
9.1	Auswahl eines geeigneten Verfahrens für die Berechnung der effektiven Steifigkeit des Verbundquerschnitts.....	78
9.2	Berechnung der Anfangssteifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds.....	79
9.3	Verifizierung über Vergleich mit Untersuchungsergebnissen	86
9.4	Bewertung der Anwendbarkeit	92
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	94
	Literaturverzeichnis	98
	Normen- und Richtlinienverzeichnis.....	101
	Bildquellenverzeichnis	105
	Anhang	106
A	Statische Kleinteilversuche.....	106
A.1	Detaillierte Ergebnisse Verschiebungsmodul	106
A.2	Detaillierte Ergebnisse Fließverschiebung und Duktilität	112
B	Zyklische Kleinteilversuche.....	117
B.1	Protokoll zyklische Prüfungen.....	117
B.2	Detaillierte Ergebnisse Festigkeitsminderung	119
B.3	Detaillierte Ergebnisse Energiedissipation, verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis	120
B.4	Schleifenzyklen bei Klima 20 °C / 50 %	124
B.5	Schleifenzyklen bei Klima 20 °C / 90 %	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1: Nichttragende, leichte Ständerwand aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und beidseitig zwei Lagen Gipsplatten, Quelle: Knauf Gips KG	2
Abbildung 1.2-1: Qualitative Einordnung der Lastabtragung von Profilen und Bepunktung bei Stahlleichtbau- und Trockenbauwänden zwischen zwei hypothetischen mechanischen Grenzmodellen	4
Abbildung 4.3-1: Außenwand in leichter Ständerbauweise aus korrosionsgeschützten CW-Profilen (Blechdicke 0,6 mm) und Wärmedämmverbundsystem, Quelle: Knauf Aquapanel GmbH & Co. KG	22
Abbildung 4.3-2: Nichttragende Trennwände in leichter Ständerbauweise aus CW-Profilen (Blechdicke 0,6 mm) innerhalb eines Gebäudes in Holzbauweise, Quelle: Blum Dietz GmbH.....	23
Abbildung 5.2.1-1: Idealisierte Darstellung der Ausbildung eines Kräftepaars im Bereich der Verbindung aus Platte und Profil aufgrund des asymmetrischen Prüfkörperaufbaus	31
Abbildung 5.2.1-2: Prinzipskizze des gewählten Aufbaus für Kleinteilprüfungen als 3D-Isometrie, Quelle: Anna-Lea Berger.....	32
Abbildung 5.2.2-1: Prüfaufbau einer 8 m hohen Bauteilprüfungen als Regelbereich-Ausschnitt einer Trennwand im Rahmen der Untersuchungen von Gutsch, A. et al. (2007), veröffentlicht in Herfurth et al. (2008)	33
Abbildung 6.1.1-1 (links): Frontansicht des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern	36
Abbildung 6.1.1-2 (Mitte): Rückseiten des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern	36
Abbildung 6.1.1-3 (rechts): Seitenansicht des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern Quelle: Anna-Lea Berger	36
Tabelle 6.1.2-2: Mittelwerte des massebezogenen Feuchtegehalts je untersuchter Klimastufe	39
Abbildung 6.2-1: Exemplarische Darstellung einer Bereichseinteilung der Last-Verformungskurven (Diagramm aus Prüfsoftware mit softwarespezifischer Achsenbezeichnung)	41
Abbildung 6.2-2: Bildfolge der beobachteten Schraubenschrägstellung und des Schraubenkopfdurchzugs während der Prüfung	42

Abbildung 6.3.2-1: Bestimmung einer Näherungsgeraden $f(F)$ als lineare Regression für den Wertebereich $[0,1 F_{\max}; 0,3 F_{\max}]$ der Zugkraft F im quasi-elastischen Kurvenbereich	46
Abbildung 6.3.2-2: Bestimmung einer Näherungsgeraden $f(V)$ als lineare Regression für den Wertebereich $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$ der Relativverschiebung V im elastisch-plastischen Kurvenbereich	46
Abbildung 6.3.2-3: Bestimmung der Fließverschiebung V_y als Schnittpunkt der Geraden $f(V)$ und $f(F)$	47
Abbildung 6.4.1-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte.....	51
Abbildung 6.4.1-2: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie exponentielle Regression der Mittelwerte	51
Abbildung 6.4.1-3: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln K_i der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte.....	53
Abbildung 6.4.1-4: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln K_i der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie exponentielle Regression der Mittelwerte	53
Abbildung 6.4.2-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Fließverschiebung V_y der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte.....	55
Abbildung 6.4.2-2: Isotherme Betrachtung (20 °C) der Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Fließverschiebung V_y der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte	55
Abbildung 6.4.2-3: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Duktilität D der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte.....	57
Abbildung 6.4.2-4: Isotherme Betrachtung (20 °C) der Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Duktilität D der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte	57
Abbildung 7.1.2-1: Frontansicht des Prüfkörpers in der klimatisierten Einhausung	59
Abbildung 7.2-1: Exemplarische Gegenüberstellung von Zyklen der jeweils ersten Probe der beiden Klimastufen 20 °C / 50 % und 20 °C / 90 %	61

Abbildung 7.3.1-1: Exemplarische Darstellung der Festigkeitsminderung $ \Delta F $ der Probe 1 im Halbzyklus Druck bei Klimastufe 20 °C / 50 % mit bilinearer Hüllkurve	62
Abbildung 7.3.2-1: Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Energiedissipation E_d und der verfügbaren potentiellen Energie E_p über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %	64
Abbildung 7.3.2-2: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses v_{eq} über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %	65
Abbildung 7.4.1-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der prozentualen Festigkeitsminderung $ \Delta F $ je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung.....	67
Abbildung 7.4.2-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Energiedissipation E_d je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 und bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53).....	68
Abbildung 7.4.2-2: Mittelwerte mit Indikation des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses v_{eq} je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 und bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53).....	69
Abbildung 8.1.1-1: Prüfkörperaufbau Wand mit Maßangaben in Millimetern.....	71
Abbildung 8.1.1-2: Unterer Wandanschluss ohne Verschraubung der Platte im UW50x40x06-Profil.....	72
Abbildung 8.1.1-3: Idealisierte Lagerbedingungen des Prüfkörpers.....	72
Abbildung 8.1.2-1: Lasteinleitung in den Prüfkörper Wand (Angaben in Millimetern)	73
Abbildung 8.1.2-2: Anordnung der Wegaufnehmer an der Profilseite des Prüfkörpers Wand (Angaben in Millimetern).....	74
Abbildung 8.1.2-3: Positionierung der Wegaufnehmer direkt neben dem Profil an der Rückseite der Platte.....	74
Abbildung 8.2-1: Last-Verformungskurve des Prüfkörpers mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe	75
Abbildung 8.2-2: Ausschnitt der Last-Verformungskurve des Prüfkörpers im kleinen Last-Verformungs-bereich mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe	76

Abbildung 8.3.1-1: Anfangsbereich der Last-Verformungskurve des Prüfkörpers mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe	77
Abbildung 9.1-1: Modell eines Verbundquerschnitts aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen im Holzbau, Darstellung in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1:2010-12	78
Abbildung 9.2-1: Tabellenverfahren zur Ermittlung der Profilquerschnittswerte	80
Abbildung 9.3-1: Statisches System zur Berechnung der Steifigkeit des geprüften Bauteilaufbaus.....	86
Abbildung 9.3-2: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus mit den berechneten Steifigkeiten für den Verformungsbereich bis 1/1000 Wandhöhe (Anfangssteifigkeitsbereich).....	89
Abbildung 9.3-3: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus mit den berechneten Steifigkeiten für den Verformungsbereich bis 1/500 Wandhöhe (Gebrauchstauglichkeitsbereich).....	91
Abbildung 9.4-1: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus und der berechneten Steifigkeiten für den gesamten Verformungsbereich.....	93
Abbildung A.1-1: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 %	107
Abbildung A.1-2: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %	108
Abbildung A.1-3: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 %	109
Abbildung A.1-4: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	110
Abbildung A.1-5: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 %	111
Abbildung B.4-1: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 1 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %.....	124
Abbildung B.4-2: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 2 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %.....	124

Abbildung B.4-3: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 3 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	125
Abbildung B.4-4: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 4 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	125
Abbildung B.4-5: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 5 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	126
Abbildung B.4-6: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 6 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	126
Abbildung B.4-7: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 7 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	127
Abbildung B.4-8: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 8 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	127
Abbildung B.4-9: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 9 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	128
Abbildung B.4-10: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 10 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	128
Abbildung B.4-11: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 11 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	129
Abbildung B.4-12: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 12 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.- % bei Klima 20 °C / 50 %	129
Abbildung B.5-1: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 1 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	130
Abbildung B.5-2: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 2 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	130
Abbildung B.5-3: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 3 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	131

Abbildung B.5-4: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 4 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	131
Abbildung B.5-5: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 5 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	132
Abbildung B.5-6: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 6 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	132
Abbildung B.5-7: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 7 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	133
Abbildung B.5-8: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 8 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	133
Abbildung B.5-9: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 9 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	134
Abbildung B.5-10: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 10 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% % bei Klima 20 °C / 90 %	134
Abbildung B.5-11: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 11 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% % bei Klima 20 °C / 90 %	135
Abbildung B.5-12: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 12 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% % bei Klima 20 °C / 90 %	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1.1-1: Ermittelte Plattenkennwerte an gemäß DIN EN 520:2009-12 entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz.....	26
Tabelle 5.2.1-1: Übersicht von Aufbauvarianten für Kleinteilprüfungen zur Ermittlung von Kennwerten einer Verbindung zweier Werkstoffe mittels mechanischen Verbindungsmittels bei Scherbeanspruchung	29
Tabelle 6.1.2-1: Übersicht über die gewählten Klimastufen.....	38
Tabelle 6.1.4-1: Geschätzte Höchstlast $F_{\max,est}$ nach Durchführung von 3 Vorversuchen je Prüfserie und Angabe der beiden Zwischenlaststufen gemäß Prüfverfahren der DIN EN 26891:1991 07	40
Tabelle 6.1.4-2: Schema der Lastaufbringung je Einzelprüfung.....	40
Tabelle 6.3.1-1: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	43
Tabelle 6.3.1-2: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	44
Tabelle 6.3.1-3: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	44
Tabelle 6.3.1-4: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	44
Tabelle 6.3.1-5: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	45
Tabelle 6.3.2-1: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß- Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$	48
Tabelle 6.3.2-2: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß- Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$	48

Tabelle 6.3.2-3: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß- Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$	48
Tabelle 6.3.2-4: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß- Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$	49
Tabelle 6.3.2-5: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß- Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$	49
Tabelle 7.3.1-1: Absolute und relative Festigkeitsminderung je Halbzyklus der Scherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % und Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	63
Tabelle 7.3.2-1: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23	65
Tabelle 7.3.2-2: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)	66
Tabelle 7.3.2-3: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23	66
Tabelle 7.3.2-4: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)	66
Tabelle 8.1.3-1: Massebezogener Feuchtegehalt der aus der Gipsplatte des Bauteilversuchs entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz	75
Tabelle 8.3.2-1: Massebezogener Feuchtegehalt der aus der Gipsplatte des Bauteilversuchs entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz	77

Tabelle A.1-1: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	107
Tabelle A.1-2: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	108
Tabelle A.1-3: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	109
Tabelle A.1-4: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	110
Tabelle A.1-5: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer	111
Tabelle A.2-1: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{max}; 0,4 F_{max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{Fmax}; 0,8 V_{Fmax}]$	112
Tabelle A.2-2: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{max}; 0,4 F_{max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{Fmax}; 0,8 V_{Fmax}]$	113
Tabelle A.2-3: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{max}; 0,4 F_{max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{Fmax}; 0,8 V_{Fmax}]$	114
Tabelle A.2-4: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{max}; 0,4 F_{max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{Fmax}; 0,8 V_{Fmax}]$	115
Tabelle A.2-5: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{max}; 0,4 F_{max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{Fmax}; 0,8 V_{Fmax}]$	116

Tabelle B.1-1: Protokoll der zyklischen Prüfungen	117
Tabelle B.2-1: Absolute und relative Festigkeitsminderung je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % und Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %	119
Tabelle B.3-1: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23	120
Tabelle B.3-2: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)	121
Tabelle B.3-3: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23	122
Tabelle B.3-4: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)	123

Symbole

a	Abstand von Schwerpunkt Teilfläche zu Schwerpunkt Gesamtquerschnitt
A	Fläche, Querschnittsfläche
b	Breite, Querschnittsbreite, Bauteilbreite, mitwirkende Breite
C	Verschiebungsmodul (allgemeine Schreibweise)
$C_{50-100N}$	Verschiebungsmodul im Lastbereich 50 N bis 100 N
$C_{100-150N}$	Verschiebungsmodul im Lastbereich 100 N bis 150 N
$C_{150-200N}$	Verschiebungsmodul im Lastbereich 150 N bis 200 N
$C_{200-250N}$	Verschiebungsmodul im Lastbereich 200 N bis 250 N
$C_{150-200N}(u)$	Regressionsfunktion für den Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$ in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt
D	Duktilität
e	Hebelarm
E	Elastizitätsmodul oder Energie
E_d	Energiedissipation
E_p	potentielle Energie
$(E)_{ef}$	effektive Steifigkeit
f	Durchbiegung
$f(F)$	Regressionsfunktion der ersten Kurvensekante des Last-Verformungsverlaufs in Abhängigkeit von der Kraft
$f(V)$	Regressionsfunktion der zweiten Kurvensekante des Last-Verformungsverlaufs in Abhängigkeit von der Verschiebung
F	Kraft bzw. Last
F_{max}	Maximalkraft bzw. Höchstlast
$F_{max, est}$	geschätzte Maximalkraft bzw. geschätzte Höchstlast

$F_u(b)$	Kraft bzw. Last für Fall b, entspricht $0,8 F_{\max}$
$ \Delta F $	Betrag der Festigkeitsminderung
$ \Delta F _{\text{abs}}$	Betrag der absoluten Festigkeitsminderung
$ \Delta F _{\text{rel}}$	Betrag der relativen Festigkeitsminderung
h	Höhe, Querschnittshöhe, Wandhöhe
I	Flächenmoment 2. Grades
I_{ef}	effektives Flächenmoment 2. Grades
k bzw. K	Verschiebungsmodul (Schreibweise gemäß Holzbaunormung)
k_i bzw. K_i	Verschiebungsmodul bei $0,4 F_{\max, \text{est}}$ und zugehöriger Verschiebung
$K_i(u)$	Regressionsfunktion für den Verschiebungsmodul K_i in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt
k_s bzw. K_s	Verschiebungsmodul bei $0,4 F_{\max, \text{est}}$ und modifizierter Verschiebung
K_{ser}	Verschiebungsmodul für Gebrauchstauglichkeitsnachweise
l	Spannweite
n	E-Modul-Verhältnissfaktor
q	Streckenlast
R^2	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung oder Schraubenabstand
t	Dicke
T	Temperatur
u	massebezogener Feuchtegehalt
V	Verschiebung
V_u	Grenzverschiebung
$V_u(b)$	Grenzverschiebung für Fall b bei $0,8 F_{\max}$
V_y	Fließverschiebung
\bar{x}	Mittelwert (arithmetisches Mittel)

Z	Zugkraft
α	Winkel der ersten Kurventangente des Last-Verformungsverlaufs
β	Winkel der zweiten Kurventangente des Last-Verformungsverlaufs
γ	Abminderungswert
δ	Variationskoeffizient
φ	relative Luftfeuchte
ν_{eq}	äquivalentes Dämpfungsverhältnis

Begriffsdefinitionen

Äquivalentes Dämpfungsverhältnis

steht für die hysterese-dämpfenden Eigenschaften eines dynamischen Systems und bildet das Verhältnis von Energiedissipation zu verfügbarer potentieller Energie ab.

Bruchlast

ist definiert als Last, bei der entweder ein Versagen der Verbindung oder ein Lastabfall auf 80 % der Maximallast eintritt oder die Verschiebung den Wert von 30 mm erreicht hat.

Duktilität

ist die Eigenschaft einer Verbindung, die beschreibt, in welchem Maße Verschiebungen über den elastischen Bereich hinaus bis zur Bruchlast aufgenommen werden können. Sie entspricht dem Verhältnis von Grenzverschiebung zu Fließverschiebung.

Energiedissipation

ist ein Maß für die Umwandlung der in ein dynamisches System eingetragenen Bewegungsenergie in eine andere Energieform (z. B. Wärme).

Festigkeitsminderung

stellt die Verringerung der aufgetragenen Last im Vergleich mehrere Zyklen gleicher Verschiebung dar.

Fließlast

kennzeichnet die Last beim Übergang vom elastischen Bereich in den plastischen Bereich (im vorliegenden Fall vom quasi-elastischen in den elastisch-plastischen Bereich).

Fließverschiebung

ist die der Fließlast entsprechende Verschiebung der Verbindung.

Grenzverschiebung

ist die der Bruchlast entsprechende Verschiebung der Verbindung.

Potentielle Energie

entspricht der von einem dynamischen System maximal aufnehmbaren Energie.

Verschiebungsmodul

beschreibt ähnlich einer Federsteifigkeit das Last-Verschiebungsverhalten einer Verbindung.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

„Der Leichtbau zählt zu den Schlüsseltechnologien vieler Industriebranchen und favorisiert ressourcen- und energieeffiziente Strukturbauteile und Konstruktionen mit belastungs- und funktionsgerechten Eigenschaften“ (**Gelbrich 2016**).

Der Aspekt der Energie- und Ressourceneffizienz gewinnt vor dem Hintergrund ambitionierter nationaler und europäischer Nachhaltigkeitsziele zunehmend an Bedeutung und sollte bei der Auswahl einer geeigneten Bauweise für die jeweils zu lösende Bauaufgabe ebenso berücksichtigt werden wie technische und wirtschaftliche Aspekte.

Dabei sollte der Anspruch bestehen, für jeden Anwendungsbereich Systeme zu generieren, die durch Optimierung von Material, Struktur und Herstellverfahren ein niedriges Gewicht in Verbindung mit hoher Leistungsfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit aufweisen (**Gelbrich, 2016**).

Nach **Becker et al. (2004)** lassen sich beim Leichtbau die drei Grundformen Materialeichtbau, Strukturleichtbau und Systemleichtbau unterscheiden, die auch in Mischformen auftreten können. Eine leichte Ständerbauweise im Verbund mit Plattenwerkstoffen und Funktionsintegration lässt sich per Definition am ehesten dem Systemleichtbau zuordnen, wenngleich sie auch Eigenschaften des Material- und Strukturleichtbaus in sich trägt. In diesem Zusammenhang wird der Begriff ‚Trockenbau‘ verwendet, der im Sinne einer leichten Ständerbauweise eine Vielzahl unterschiedlicher Bauprodukte und Bauarten beinhaltet.

Die leichte Ständerbauweise kann als primäre Tragstruktur von Gebäuden eingesetzt werden, wenn die Ständer hinsichtlich Material und Querschnitt für lastabtragende Zwecke geeignet sind. Typische Vertreter der tragenden Ständerbauweise finden sich im Holzbau und im Stahlleichtbau.

In vorliegender Arbeit wird insbesondere die nichttragende, leichte Ständerbauweise aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und mineralisch basierten Plattenwerkstoffen betrachtet. Ein beispielhafter Wandaufbau in Verbindung mit Gipsplatten ist in Abbildung 1.1-1 dargestellt. Aufgrund des signifikant großen Bauvolumens bei nichttragenden Ausbauweisen kommt der leichten Ständerbauweise besondere Bedeutung zu. Vor allem in gewerblich genutzten und öffentlichen Gebäuden hat sich diese Bauweise als Standard für den Innenausbau durchgesetzt.

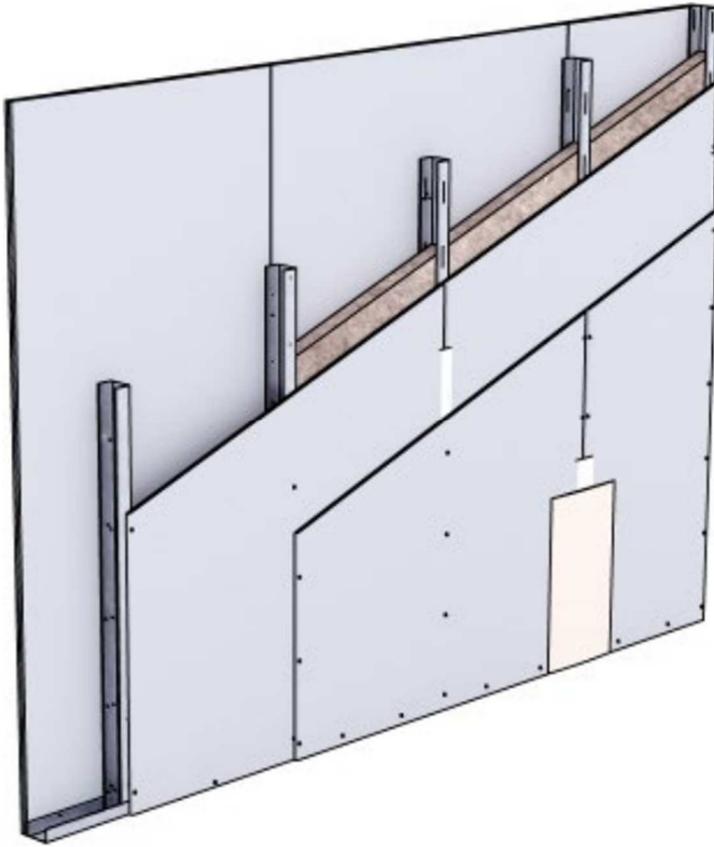


Abbildung 1.1-1: Nichttragende, leichte Ständerwand aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und beidseitig zwei Lagen Gipsplatten, Quelle: Knauf Gips KG

Das große Bauvolumen in Verbindung mit stetig steigenden, zumeist kombinierten Anforderungen aus mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften, z. B.

- Kinotrennwände mit großen Einbauhöhen, hohen Belastungen durch Personen im Panikfall (Anpressdruck) und gleichzeitig höchsten Schallschutzanforderungen;
- Brandwände mit langer Feuerwiderstandsdauer und zusätzlicher mechanischer Sicherheit gegenüber Stoßlasten aus herabstürzenden Trümmerteilen sowie
- Trennwände mit größtmöglicher Steifigkeit aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität für die Anwendung in Erdbebengebieten, erfordert eine ständige Weiterentwicklung der Bauweise.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird der Fokus auf die statischen und seismischen Eigenschaften der nichttragenden, leichten Ständerbauweise gerichtet. Im Speziellen werden die grundlegenden mechanischen Wirkprinzipien betrachtet, da deren umfangreiche Kenntnis als Grundlage für jede darauf aufbauende Bauteilentwicklung dienen sollte.

Generell wird das mechanische Verhalten von Bauteilen aus zusammengesetzten – also nicht monolithischen – Querschnitten im Wesentlichen einerseits von den Materialeigenschaften der verwendeten Komponenten und andererseits von deren Zusammenwirken im Verbund bestimmt. Verbundquerschnitte aus stabförmigen Komponenten (z. B. Profile) und flächigen Komponenten (z. B. plattenartige Beplankungen) entsprechen dem üblichen Konstruktionsprinzip der leichten Ständerbauweise.

Dabei zu berücksichtigen sind Anforderungen, die sich aus speziellen Einsatzbereichen der Bauweise ergeben, wie bei **Tichelmann et al. (2005)** beschrieben, und die in der praktischen Anwendung von hoher Relevanz sind. Hierzu gehören unter anderem Bäder und Feuchträume, die sich durch eine erhöhte Feuchtebeanspruchung auszeichnen. Es wird unterschieden zwischen gemäßigten Feuchträumen mit einer relativen Luftfeuchte bis 70 % und Feuchträumen mit relativer Luftfeuchte größer 70 %. Da die leichte Ständerbauweise in diesen Bereichen die gleichen statischen und seismischen Anforderungen erfüllen muss wie in durchschnittlich beanspruchten Einsatzbereichen, wird eine Berücksichtigung des mechanischen Verhaltens unter Feuchtebeanspruchung empfohlen.

Neben der theoretischen Betrachtung des nachgiebigen mechanischen Verbunds aus den genannten Komponenten und mechanischen Verbindungsmitteln soll mit der vorliegenden Untersuchung die Überprüfung einer Anwendbarkeit auf Bauteilebene erfolgen. Hierzu wird ein geeignetes Bemessungsverfahren ausgewählt und modifiziert, in das die Kennwerte des Verbundquerschnitts eingehen. Anschließend wird dieses Verfahren über Bauteilprüfungen verifiziert.

1.2 Statische Aspekte der leichten Ständerbauweise

Während in der tragenden Stahlleichtbau- und Holztafelbauweise die Weiterleitung aller planmäßigen Horizontal- und Vertikallasten durch die jeweiligen Bauteile bis zur Gründung sichergestellt werden muss, beschränken sich die Anforderungen an nichttragende Bauteile auf die Aufnahme von Innenausbaukosten und Sonderlastfällen.

In der Baupraxis wird den tragenden Bauweisen wegen der bauaufsichtlich höheren Relevanz eine deutlich größere Aufmerksamkeit als den nichttragenden Bauweisen gewidmet. So bestehen gerade für den Holzbau weitreichende Kenntnisse über Holzverbindungen und deren Tragfähigkeit bei Einsatz stiftförmiger Verbindungsmittel. Dies spiegelt sich auch in der entsprechenden Holzbaunormung wider, in der differenzierte Nachweisverfahren für Verbindungen zu finden sind. Die Plattenlagen können dabei zur Knickaussteifung der Ständer, als Gurte eines Verbundquerschnitts oder als statisch mitwirkende, aussteifende Beplankung herangezogen werden.

Aufgrund der ständig zunehmenden Anzahl an Unterkonstruktions-, Beplankungs- und mechanischen Verbindungsmittelvarianten wird die Betrachtung des nachgiebigen Verbunds zunehmend komplex. Bis heute besteht eine hohe Relevanz darin, vorhandene Bemessungsansätze durch differenzierte Untersuchungen zu erweitern. Als Beispiel sei der Stahlleichtbau genannt, für den die Plattenlagen der Beplankung die gleichen statischen Funktionen wie im Holztafelbau übernehmen können. Dies ist jedoch normativ noch nicht umfassend geregelt.

Im Gegensatz dazu wird den Verbundmechanismen der nichttragenden, leichten Ständerbauweisen bislang wenig Beachtung geschenkt. Das übliche Vorgehen zur Bestimmung der mechanischen Leistungsfähigkeit ist die Bauteilprüfung. Beispielsweise sind für nichttragende Trennwände Reallastprüfungen mit Konsollasten, Linienlasten sowie Stoßlasten (harter und weicher Stoß) an kompletten Wandaufbauten vorgesehen. Alternativ ist der rechnerische Nachweis prinzipiell zulässig, jedoch ist eine Wandbemessung allein über die Unterkonstruktion bei Verwendung von trockenbauüblichen, dünnwandigen

Stahlprofilen aufgrund der geringen Blechdicke nicht zielführend. Die rechnerische Berücksichtigung einer Mitwirkung der Beplankung ist obligatorisch, um auf diesem Wege ein realitätsnahes mechanisches Verhalten der Trennwände zu prognostizieren.

Es kann angenommen werden: Je geringer die Blechdicke dünnwandiger Stahlprofile, desto größer der Beitrag einer Beplankung an der Gesamttragfähigkeit und -steifigkeit einer daraus konstruierten Wand. Unter Annahme folgender hypothetischer Grenzmodelle für beidseitig beplankte Ständerwände

- Modell A: Profile lastabtragend – Beplankung dient ausschließlich zum Raumabschluss oder als Brandschutzbekleidung und leistet keinen Beitrag zur Lastabtragung (z. B. konventioneller Stahlbau)
- Modell B: Beplankung lastabtragend (Doppelschale) – Profile dienen ausschließlich zur Schubverbindung der Schalen

liegen Stahlleichtbauwände mit einer üblichen Blechdicke der dünnwandigen Stahlprofile $\geq 1,5$ mm näher am Modell A und Trockenbauwände mit einer üblichen Blechdicke der dünnwandigen Stahlprofile von 0,6 mm näher am Modell B (siehe Abbildung 1.2-1). Diese rein qualitative Einordnung soll zeigen, dass das Aktivieren der Beplankung ein entscheidender Faktor bei leichten Ständerbauweisen mit sehr dünnen Stahlprofilen ist. Bereits kleine Änderungen der mechanischen oder geometrischen Eigenschaften der eingesetzten Komponenten können große Auswirkungen auf das lokale Verbundverhalten und somit auch auf das gesamte Bauteilverhalten haben.

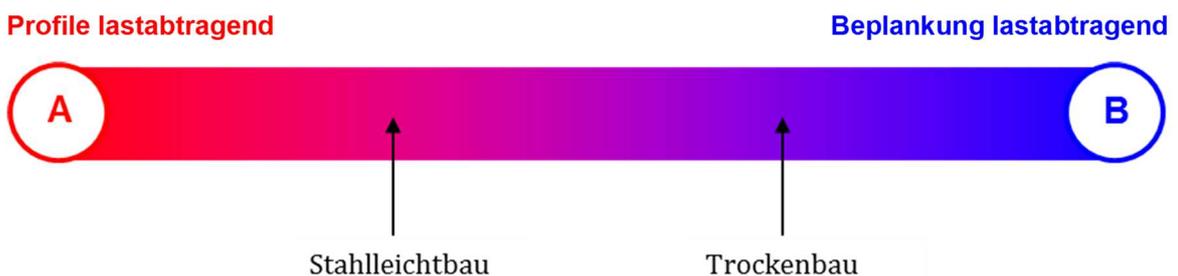


Abbildung 1.2-1: Qualitative Einordnung der Lastabtragung von Profilen und Beplankung bei Stahlleichtbau- und Trockenbauwänden zwischen zwei hypothetischen mechanischen Grenzmodellen

Der Begriff Trockenbau steht im Allgemeinen für eine Bauweise, bei der keine bzw. kaum Baufeuchte auftritt. In Fachkreisen wird der Begriff üblicherweise synonym für den Teilbereich nichttragender Bauarten aus dünnwandigen Stahlprofilen (Blechdicke in der Regel 0,6 mm), mineralisch basierten Plattenwerkstoffen (überwiegend Gipsplatten) und Schraubverbindungen verwendet.

Eine Besonderheit der leichten Ständerbauweise im Innenausbau von Gebäuden sind die hohen normativen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit. Hierbei sind abhängig vom Anwendungsbereich Verformungsgrenzen von $h/200$ bis $h/500$ (mit h = Wandhöhe) einzuhalten. Wie von **Gutsch et al. (2007)** gezeigt, werden diese Gebrauchstauglichkeitskriterien unter üblichen Belastungen stets maßgebend, da sie sich grundsätzlich vor dem Verlust der Standsicherheit einstellen. Damit rückt vor allem die Steifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds in den Fokus, die maßgeblich durch den Verschiebungsmodul der Verbindung aus Profilen, Platten und Verbindungsmitteln bestimmt wird.

1.3 Seismische Aspekte der leichten Ständerbauweise

Henkel et al. (2008) benennen die Vorteile leichter Ständerbauweisen für seismische Anwendungen, die sich aufgrund ihres spezifischen mechanischen Verhaltens und geringen Gewichts ergeben. Diese haben unmittelbare positive Auswirkung auf Erdbebensicherheit und Schadensrisiko und sind gegenüber Ausbaulösungen in Massivbauweise zu bevorzugen. Zum einen führt das geringe Eigengewicht der Ständerwände bei auftretender Baugrundbeschleunigung zu entsprechend niedrigen Erdbebenlasten, entsprechend dem Prinzip $Kraft = Masse \times Beschleunigung$. Diese Lastreduktion ist sowohl lokal (Bauteil) als auch global (Gebäude) von hoher Relevanz. Sie bewirkt, dass die unmittelbare Beanspruchung der nichttragenden Trennwand sowie die Aufnahme und Weiterleitung der Erdbebenlasten durch die Tragstruktur des Gebäudes auf einem niedrigeren und damit risikoärmerem Niveau stattfindet als bei vergleichsweise schweren Innenausbauten, z. B. Mauerwerk. Zum anderen ist eine hohe Duktilität, die sich vor allem durch den nachgiebigen Verbund aus Platte, Profil und mechanischem Verbindungsmittel einstellt, eine systemimmanente Eigenschaft dieser Ausbauweise. Im Gegensatz zu Ausbauten, die spröde Versagenszustände bei dynamischer Beanspruchung aufweisen (auch hier bietet sich wieder das Beispiel Mauerwerk an), können Energieeinträge aus Bewegungen der verbundenen Tragstruktur aufgrund des duktilen Verhaltens sehr gut durch plastische Verformung und durch Reibung absorbiert werden.

Von diesen Bewegungen sind gemäß **Pocanschi und Phocas (2003)** vor allem relative Geschossverschiebungen, wie sie sich im Erdbebenfall durch die Gebäudeantwort auf die Baugrundbeschleunigung einstellen können, von großer Relevanz für nichttragende Trennwände. Hierbei ist sowohl die Auswirkung der Geschossverschiebung als seismische Beanspruchung für die Trennwände als auch die Beeinflussung der primären Gebäudestruktur durch eine seismische Aktivierung der Trennwände zu beachten. Die Wirksamkeit dieser Interaktion wird zum einen durch die Steifigkeitsunterschiede zwischen Tragwerk und Ausbau bestimmt (je größer der Steifigkeitsunterschied, desto geringer die Mitwirkung der nichttragenden Trennwände), zum anderen hat die Art der Anschlussausbildung einen entscheidend Einfluss (je besser entkoppelt, desto geringer die Mitwirkung der nichttragenden Trennwände).

Überschreitungen der Verformungsgrenzen, wie sie bei extremen Erdbebenereignissen auftreten können, führen gewöhnlich nicht zu einem vollständigen Zusammenbruch oder Einsturz der leichten Ständerkonstruktionen. Durch lokal begrenzte Beschädigungen, wie etwa Rissbildung in der Beplankung oder Kopfdurchzug einzelner Schrauben, werden Spannungsspitzen in der Konstruktion abgebaut und sie wird gleichzeitig ‚weicher‘, ohne ihre unmittelbare Standsicherheit zu verlieren. Daraus ergibt sich ein geringeres Gefährdungsrisiko für angrenzende Bauteile und vor allem für Personen, die sich in der Nähe des betreffenden Bauteils aufhalten.

Nach **Meskouris et al. (2011)** ist in diesem Zusammenhang sogar ein Aufreißen der Wand durch lokales Plattenversagen akzeptabel, solange die Standsicherheit gewährleistet ist. In aktuelleren Veröffentlichungen wird hier stärker differenziert. Vor dem Hintergrund, dass eine derart starke Schädigung von Trennwänden im Erdbebenfall ernstzunehmende Konsequenzen wie einen vollständigen Funktionsverlust nach sich ziehen kann, wie von **Landolfo und Holl (2015)** beschrieben, bietet sich eine beanspruchungsabhängige Schadensbetrachtung an.

In besonderer Weise hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang der Brandschutz als Bauteileigenschaft mit hoher Sicherheitsrelevanz für Leib und Leben. Dieser kann insbesondere bei einem möglichen sekundären Brandereignis nach dem primären Erdbebenereignis zum Tragen kommen. Das Bauteil darf daher nicht so stark beschädigt sein, dass das vorgesehene Brandschutzziel nicht mehr erreicht werden kann.

Ob duktiler Verhalten oder Schadensbegrenzung – auch unter seismischen Aspekten spielen die Verbundeigenschaften eine entscheidende Rolle. Die bereits genannten Mechanismen aus Verformung und Reibung werden innerhalb des Bauteils in erster Linie durch das Zusammenwirken aus Beplankung und Unterkonstruktion über das mechanische Verbindungsmittel bestimmt. Um das Verhalten der leichten Ständerbauweise in der Erdbebenanwendung besser beurteilen zu können, ist eine Analyse des Verbundverhaltens unter zyklischen Beanspruchungen unabdingbar.

2 Stand der Normung

Entsprechend der zuvor getroffenen Eingrenzung wird nachfolgend der Stand der Normung für die nichttragende, leichte Ständerbauweise in Verbindung mit trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und einer Beplankung aus Gipsplatten aufgezeigt. Als Verbindungsmittel kommen sogenannte Schnellbauschrauben zum Einsatz, die es ermöglichen, die Gipsplatten ohne Vorbohren auf den Stahlprofilen zu befestigen.

2.1 Produktnormen

Produktnormen dienen der Beschreibung eines Bauprodukts und legen dessen Eigenschaften und Leistungsmerkmale mittels definierter Anforderungen fest. Bestandteil der Produktnorm können Prüfverfahren sowie die Eingrenzung von Anwendungsbereichen für das Bauprodukt sein. Vor Beginn der europäischen Harmonisierung waren Bauprodukte national geregelt. Durch den europäischen Harmonisierungsprozess ist in den letzten Jahren eine Überführung in die europäische Normung vollzogen worden. „Harmonisierung bezeichnet die Angleichung der unterschiedlichen Rechtsordnungen in den EU-Mitgliedstaaten. Darin besteht eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Bürgerinnen und Bürger in Europa von der europ. Integration profitieren können. Von Anfang an wollte die Gemeinschaft auf diese Weise Handelshemmnisse abbauen, um den gemeinsamen Markt zu verwirklichen.“ (Höreth, 2020)

Eigenschaften und Leistungsmerkmale für Gipsplatten zur Verwendung in Bauwerken sind in der DIN EN 520:2009-12 geregelt. Anforderungen an die Biegebruchlast, die über den 3-Punkt-Biegeversuch zu ermitteln ist, sind abhängig vom Plattentyp. Aus der Biegebruchlast lässt sich die Biegezugfestigkeit ableiten. In Bezug auf die Biegesteifigkeit respektive den Biege-E-Modul trifft die Norm keine Aussagen. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass die Durchbiegung, falls erforderlich, unter Belastung ermittelt werden kann. Gipsplatten, die für nationale Anwendungen auch als statisch mittragende Beplankung verwendet werden sollen, müssen die ergänzende nationale Norm DIN 18180:2014-09 erfüllen. In ihr wird die Definition für die Plattentypen GKB, GKBI, GKF und GKFI enger gefasst, z. B. durch Festlegung einer Mindestrohichte. Die Plattentypen behalten dabei ihre Zuordnung nach der europäischen Norm DIN EN 520:2009-12 (z. B. entspricht GKF weiterhin Typ DF nach DIN EN 520:2009-12). Außerdem werden verbindliche Werte für den Biege-E-Modul definiert. Der E-Modul der Platten ist einer der zu berücksichtigenden Parameter zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds, in dem die Gipsplatten zum Einsatz kommen.

In der DIN EN 14195:2020-07 werden Anforderungen an dünnwandige Stahlprofile festgelegt, die als Metall-Unterkonstruktionsbauteile für Gipsplattensysteme eingesetzt werden. Der dafür verwendete Stahl muss den technischen Lieferbedingungen nach DIN EN 10132:2022-04 (Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung) oder DIN EN 10346:2015-10 (Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen) entsprechen. Üblicherweise kommt die Stahlsorte DX51D gemäß DIN EN 10346:2015-10 zum Einsatz. Die Besonderheit ist, dass in der Norm zwar die Zugfestigkeit für diese Stahlsorte, nicht jedoch die für einen Spannungsnachweis

erforderliche Streckgrenze definiert ist. Es ist somit stets auf Herstellerangaben zurückzugreifen. Beim E-Modul kann unabhängig von der Stahlsorte ein Wert von 210 000 N/mm² angenommen werden, solange es sich um ferritischen Stahl handelt. Die Bestimmung von Querschnittswerten der Profile darf gemäß DIN EN 14195:2020-07 über Berechnung erfolgen. Die Norm macht jedoch keine Aussagen bzgl. zulässiger Profilabmessungen, lediglich Maßtoleranzen sind geregelt. Aus diesem Grund gibt es für die Profile aus Stahlblech, die für Unterkonstruktionen bei der Verarbeitung von Platten verwendet werden, die ergänzende nationale Norm DIN 18182-1:2015-11, Zubehör für die Verarbeitung von Gipsplatten – Teil 1: Profile aus Stahlblech. Die Norm definiert Profilarten für unterschiedliche Anwendungsbereiche, wie beispielsweise CW-Profile (C-Profile für Wände). Die meisten Profilarten unterteilen sich dabei in mehrere Profilgrößen und können z. T. in unterschiedlichen Blechdicken von 0,4 mm bis 2,0 mm ausgeführt werden. Allerdings beträgt die aufgrund von nationalen Anwendungsnormen definierte Mindestblechdicke 0,6 mm, sodass kleinere Blechdicken in der Regel keine Rolle spielen.

Schrauben als Befestigungsmittel für Gipsplattensysteme müssen der DIN EN 14566:2009-10 entsprechen. Sie sind aus unlegiertem Stahl entweder nach DIN EN 10083-1:2006-10, Vergütungsstähle – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen, oder nach DIN EN 10084:2008-06, herzustellen. Für die beiden grundlegenden mechanischen Parameter Biegeverhalten der Schraube und Ausziehverhalten aus Blech sind entsprechende Prüfverfahren in der DIN EN 14566:2009-10 aufgeführt. Wie schon bei den harmonisierten Produktnormen der zuvor genannten Bauprodukte regelt die Norm nur allgemein Typen und Abmessungen für Schrauben. Für Details zum Zubehör für die Verarbeitung von Gipsplatten ist die ergänzende nationale Norm DIN 18182-2:2019-12 zu Rate zu ziehen. Hierin finden sich auch Angaben zum für die Befestigung von Gipsplatten auf 0,6 mm Profilblech gängigen Schraubentyp TN in unterschiedlichen Längen und Nenndurchmessern.

Zusammenfassend kann aus dem Stand der Produktnormen abgeleitet werden, dass bis auf die Streckgrenze der Stahlsorte DX51D alle für eine mechanische Betrachtung wichtigen Materialeigenschaften und Abmessungen aus der Verbindung harmonisierter europäischer Normung und nationaler Normung hervorgehen.

2.2 Anwendungsnormen und Merkblätter

Die Regelung von Anwendungen liegt im nationalen Verantwortungsbereich. Dementsprechend sind Anwendungen Bestandteil der nationalen Normung. Bei Anwendungsnormen kann unterschieden werden zwischen solchen, die Regeln für den Gebrauch eines Bauprodukts beinhalten (z. B. Verarbeitung und Montage) und solchen, die konkrete Anwendungslösungen aufzeigen (z. B. Bauarten).

In DIN 18181:2019-04 finden sich Angaben zu zulässigen Unterkonstruktionen und Befestigungsmitteln für Gipsplatten sowie zulässige Stützweiten, Spannweiten und Abstände für die jeweiligen Bauprodukte. Beispielsweise wird dort verwiesen auf dünnwandige Metallprofile gemäß DIN EN 14195 in Verbindung mit DIN 18182-1 und Schnellbauschrauben gemäß DIN EN 14566 in Verbindung mit DIN 18182-2.

Eine bauartbezogene Anwendungsnorm stellt die DIN 18183-1:2018-05 dar. Dort sind explizit beschriebene Wandkonstruktionen zusammengestellt, denen Eigenschaften wie die zulässige Wandhöhe zugeordnet sind. Die verwendbaren Bauprodukte sind stark eingegrenzt. So muss es sich bei den Platten zwingend um Typ GKB oder GKF nach DIN 18180, bei den Profilen um den Typ CW nach DIN 18182-1 und bei den Schrauben um Schnellbauschrauben nach DIN 18182-2 handeln. Ebenso sind konstruktive Aspekte wie der Profilachsabstand für die Wandaufbauten vorgegeben. Hervorzuheben ist die Angabe von Gebrauchstauglichkeitskriterien. Es werden mit $h/200$, $h/350$ und $h/500$ drei Durchbiegungskriterien in Abhängigkeit von der Wandhöhe definiert. Die Norm trifft allerdings keine Aussagen, in welchen Fällen diese Kriterien im Sinne von Anforderungen einzuhalten sind. Als Ergänzung zur Norm wurde deshalb vom Bundesverband der Gipsindustrie das Merkblatt 8, Wandhöhen leichter Trennwände – Stegausschnitte, Anschlüsse, Türen und Öffnungen, herausgegeben. Hierin wird das Durchbiegungskriterium $h/200$ als Grenzwert für Wände ≤ 4 m Höhe, das Durchbiegungskriterium $h/350$ als Grenzwert für Wände > 4 m Höhe und das Durchbiegungskriterium $h/500$ für besondere Anforderungen (z. B. verformungsempfindliche Beläge) festgelegt.

2.3 Prüfnormen

Zusätzlich zu den Informationen zu mechanischen Eigenschaften der Bauprodukte aus den Produktnormen (siehe Abschnitt 2.1) sind auch Informationen über mechanische Verbundeigenschaften im Zusammenwirken der Baustoffe und auch Informationen über das mechanische Verhalten ganzer Bauteile, falls diese im konstruktiven Aufbau nicht explizit über eine Anwendungsnorm erfasst sind, erforderlich.

Bei DIN EN 383:2007-03 handelt es sich um eine Prüfnorm für Holzbauwerke zur Bestimmung mechanischer Kennwerte eines Werkstoffs (z. B. Plattenwerkstoff) im Bereich und in Verbindung mit dem darin eingebrachten Verbindungsmittel. Ein wichtiger verformungsbasierter Parameter ist der Bettungsmodul.

Über DIN EN 26891:1991-07, eine Prüfnorm für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens von Verbindungen in statisch belasteten Holzbauwerken, kann der Verschiebungsmodul bestimmt werden. Der Verschiebungsmodul beschreibt das mechanische Verhalten zweier über ein Verbindungsmittel verbundener Werkstoffe (z. B. Plattenwerkstoff und Unterkonstruktionswerkstoff).

Da Gipsplatten Typ GKB und GKF als Plattenwerkstoffe im Sinne der Holzbaunorm vorgesehen sind (siehe Abschnitt 2.4) und Schnellbauschrauben per normativer Definition auch für Holzuntergründe geeignet sind, können die beiden dargestellten Prüfverfahren auf sie angewandt werden.

Die Zeichengebung ist in der Normung allerdings nicht konsistent. Das Zeichen K (Großbuchstabe) wird für den Bettungsmodul gemäß DIN EN 383:2007-03 und gleichermaßen für den Verschiebungsmodul gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12 (siehe Abschnitt 2.4) verwendet, während das Zeichen k (Kleinbuchstabe) für den Verschiebungsmodul nach DIN EN 26891:1991-07 steht. Zur Vereinheitlichung wird im Folgenden der nach Prüfnorm ermittelte Verschiebungsmodul durchgängig mit K

bezeichnet, während nach alternativen Methoden ausgewertete Verschiebungsmoduln im Folgenden mit dem allgemeinen Zeichen für den Verschiebungsmodul C bezeichnet werden.

Neben statischen Beanspruchungen sind bei der Analyse von Verbindungen aus Platte und Unterkonstruktion zudem zyklische Beanspruchungen relevant. DIN EN 12512:2006-12 beschreibt ein Prüfverfahren, über das die Energiedissipation von Verbindungen im Holzbau bestimmt werden kann. Hierbei können GKB- und GKF-Platten ebenfalls sinngemäß als Plattenwerkstoffe für den Holzbau betrachtet werden.

Sowohl für DIN EN 26891:1991-07 als auch für DIN EN 12512:2006-12 gilt, dass in beiden Normen keine Metallprofile vorgesehen sind. In Ermangelung anderer Prüfnormen, die explizit die Bestimmung des Verschiebungsmoduls und der Energiedissipation in einer Kombination aus Gipsplatten, Metallprofilen und Schnellbauschrauben regeln, erfolgt die Ermittlung dieser Kennwerte somit in Anlehnung an DIN EN 26891:1991-07 und DIN EN 12512:2006-12.

Zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens ganzer Wandkonstruktionen unter statischen und stoßartigen Belastungen ist DIN 4103-1:2015-06, Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise, heranzuziehen. Als Anforderungen werden dort verschiedene Lastszenarien vorgegeben, für die die Standsicherheit der Konstruktion gewährleistet sein muss. Zum experimentellen Nachweis werden mehrere Prüfverfahren beschrieben. Der Nachweis darf für statische, linienförmige Einwirkung (Horizontallast) alternativ auch rechnerisch erfolgen. Voraussetzung dafür ist, dass für die Wandbauart respektive die darin verwendeten Bauprodukte entsprechende rechnerische Nachweisverfahren existieren.

2.4 Bemessungsnormen, -richtlinien und Normen für Lastannahmen

Bemessungsnormen definieren Vorgehensweisen zur Dimensionierung und zur Bestimmung der Sicherheit von Bauwerken. Bemessungsnormen und -richtlinien, in denen rechnerische Nachweisverfahren geregelt sind, sowie Normen für Lastannahmen sind somit Grundlage des statischen und seismischen Nachweises von Bauteilen bis hin zu ganzen Bauwerken.

Gipsplatten vom Typ GKB und GKF können über die entsprechenden Holzbaunormen rechnerisch nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 2.3). In DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5, werden Verfahren für Spannungs-, Stabilitäts- und Verformungsnachweise der eingesetzten Bauprodukte beschrieben. Darüber hinaus enthält die Norm ein Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von mechanischen Verbindungsmitteln sowie ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit zusammengesetzter Querschnitte mit nachgiebigem mechanischem Verbund. In DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Nationaler Anhang, finden sich charakteristische Festigkeiten sowie E-Moduln für die GKB- und GKF-Platten.

Der rechnerische Nachweis von dünnwandigen Metallprofilen kann über DASt-Richtlinie 016, Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen, erfolgen. Dem in der Richtlinie beschriebenen

Bemessungskonzept liegt die Annahme eines wirksamen Profilquerschnitts zugrunde, wodurch die große Schlankheit der dünnwandigen Querschnittsteile und die damit verbundenen lokalen Stabilitätsaspekte berücksichtigt werden. Allerdings setzt die Richtlinie eine Nenndicke des Profilblechs von mindestens 1,0 mm voraus. Damit ist sie für die in Deutschland übliche Blechdicke von 0,6 mm für Profile nach DIN 18182-1:2015-11 nicht anwendbar.

Das Bemessungsverfahren der DASt-Richtlinie 016 diene in Teilen als Grundlage für DIN EN 1993-1-3:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche. Dort ist der Nachweis von Kernblechdicken ab 0,45 mm möglich. Auch bei Berücksichtigung der Zinkauflage des Blechs wird damit eine Nenndicke von 0,6 mm nicht überschritten. Die Norm gilt in Verbindung mit dem zugehörigen Nationalen Anhang, zudem sind die anderen Normteile zu beachten, wie z. B. DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, ebenfalls in Verbindung mit dem zugehörigen Nationalen Anhang. Der Nachweis von 0,6-mm-Profilen ist somit möglich, allerdings sieht die Norm kein Modell eines zusammengesetzten Querschnitts mit Plattenwerkstoffen vor. Lediglich die Annahme einer wirksamen Drehbettung, hervorgerufen durch eine Beplankung, kann berücksichtigt werden. Das unterstützt zwar beim Stabilitätsnachweis der Profile, liefert aber gegenüber dem realen Bauteilverhalten, bei dem sich ein mechanischer Verbund aus Profil und Platte einstellt, Ergebnisse, die sehr weit auf der sicheren Seite liegen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Last-Verformungseigenschaften von Ständerwänden im Sinne einer Gebrauchstauglichkeit nicht über das quasi-elastische Bauteilverhalten hinausgehen. Per Definition treten im quasi-elastischen Bereich weder Spannungsüberschreitungen noch lokales respektive globales Stabilitätsversagen oder plastische Effekte auf. Ein Standsicherheitsnachweis entsprechend den genannten Normen ist somit nicht erforderlich. Dagegen ist ein geeignetes Verbundmodell für den zusammengesetzten Querschnitt zur Berücksichtigung einer effektiven Steifigkeit essentiell für eine realitätsnahe Verformungsberechnung.

Bei Bemessung nach Eurocode 3 oder Eurocode 5 sind die für nichttragende innere Trennwände anzusetzenden Lasten im Eurocode 1 geregelt. Eigengewichtslasten und Lasten zur Berücksichtigung der Absturzicherung sind gemäß DIN EN 1991-1-1:2010-12 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 zu bestimmen. Lasten durch Winddruck in Innenräumen sind in DIN EN 1991-1-4:2010-12 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 festgelegt. Im Rahmen der Bemessung sind die Grundlagen der Tragwerksplanung nach DIN EN 1990:2021-10 in Verbindung mit DIN EN 1990/NA:2010-12 anzuwenden. Wird der Nachweis hingegen experimentell nach DIN 4103-1:2015-06 geführt, so gelten die dort geregelten Lastannahmen und Nachweisverfahren.

Für die seismische Bemessung nichttragender Bauteile stellt DIN EN 1998-1:2010-12, Eurocode 8, in Verbindung mit dem Nationalen Anhang ein vereinfachtes Bemessungsverfahren zur Verfügung. Hierbei werden durch lineare Berechnung Kräfte aus der Wichte, dem Bedeutungsbeiwert und dem Erdbebenbeiwert des Bauteils ermittelt. Der Erdbebenbeiwert beinhaltet Bodenbeschleunigung, Baugrundbeschaffenheit sowie Gebäudekennwerte. Da nichttragende Bauteile bei seismischer Beanspruchung eine

nichtlineare Antwort aufweisen, werden die linear ermittelten Kräfte durch Division durch einen Verhaltensbeiwert reduziert. Mit der so ermittelten quasi-statischen Erdbebenkraft (Erdbebenersatzkraft) kann das Bauteil mit bestehenden statischen Verfahren rechnerisch bemessen werden. Diese Herangehensweise bietet sich bei nichttragenden Trennwänden vor allem für eine Betrachtung der seismischen Beanspruchung senkrecht zur Bauteilebene (out-of-plane) an, da hierbei eine Biegebeanspruchung erzeugt wird, für deren Nachweis entsprechende, zuvor genannte Verfahren zur Verfügung stehen. Besondere Beachtung ist dem Verhalten des Bauteils bei Beanspruchung in Bauteilebene (in-plane) zu schenken. Bezüglich der zuvor beschriebenen quasi-statischen Erdbebenkraft kann davon ausgegangen werden, dass eine In-plane-Beanspruchung aufgrund der Scheibenwirkung der Beplankung gegenüber der Out-of-plane-Beanspruchung den unkritischeren Fall darstellt und üblicherweise nicht gesondert nachgewiesen werden muss. Anders verhält es sich bei einer Beanspruchung durch gegenseitige Stockwerksverschiebung im Erdbebenfall. Hierbei ist sicherzustellen, dass entsprechende Verformungen durch das Bauteil selbst oder seine Anschlüsse an die primäre Tragstruktur aufgenommen werden können. In DIN EN 1998-1:2010-12 sind drei Grenzbereiche der Stockwerksverschiebung definiert, die bei Einbau nichttragender Bauteile in Hochbauten zu beachten sind; ein Nachweisverfahren für die nichttragenden Bauteile ist in der Norm allerdings nicht vorgesehen. Eine anteilige Mitwirkung nichttragender Trennwände an der Gesamt-Energiedissipation bei Gebäuden in Holz- oder Stahlleichtbauweise ist normativ ebenfalls nicht vorgesehen.

3 Stand der Forschung

3.1 Statische Untersuchungen

Untersuchungen zum Verhalten mechanischer Verbindungen im Holzbau reichen bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts zurück. Ein frühes Beispiel stellt die Theorie der Holzverbindungen von **Johansen (1949)** dar, in welcher die Tragfähigkeit ein- und zweischnittiger Verbindungen mittels Stabdübeln und Bolzen untersucht wurde. Johansen betrachtete Verformungszustände, die sich im Holz und bei den stiftförmigen Verbindern im plastischen Zustand einstellen, und erkannte, dass diese im Wesentlichen durch die Lochleibungsfestigkeit des Holzes und die Fließgrenze der Stahlverbinder bestimmt werden. Seine Erkenntnisse dienen noch heute als Grundlage für das Bemessungskonzept der DIN EN 1995-1-1:2010-12 zur Tragfähigkeitsberechnung, insbesondere im Hinblick auf Vollholz-Holzwerkstoffplatten-Verbindungen.

Um die Nachgiebigkeit mechanischer Verbindungen im elastischen Zustand beurteilen zu können, die eine wesentliche Größe in Bezug auf die effektive Steifigkeit zusammengesetzter Querschnitte darstellt, untersuchte **Möhler (1956)** Biegeträger und Druckstäbe aus zwei- und dreiteilig zusammengesetzten Querschnitten für Stahlbau, Verbundbau und Holzbau. Unter Berücksichtigung einer Nachgiebigkeitszahl der Verbindung stellte er Grundgleichungen für die zusammengesetzten Querschnitte auf, welche auf der Verformungsbeziehung der Teilquerschnitte basieren. Ziel seiner Arbeit war es, den komplexen Nachweis, der das Lösen von Differentialgleichungen erfordert, durch ein vereinfachtes, faktorbasiertes Nachweisverfahren unter definierten Randbedingungen zu ersetzen. Hierzu führte er den Abminderungswert γ ein. Mit ihm lässt sich die effektive Steifigkeit des nachgiebigen Verbunds im Sinne einer erweiterten Betrachtung des starren Verbunds bestimmen (nachfolgend als γ -Verfahren bezeichnet). Das Verfahren basiert auf der Annahme eines konstanten Verschiebungsmoduls und ist somit als Näherung zu verstehen. Bauteilversuche haben jedoch bestätigt, dass das Verfahren hinreichend genaue Ergebnisse liefert und somit in der Praxis anwendbar ist. Es stellt heute die Grundlage für die Betrachtung nachgiebig zusammengesetzter Querschnitte in DIN EN 1995-1-1:2010-12 dar.

Das Verbundverhalten dünnwandiger Stahlprofile (Blechdicke 1,0 mm) in Verbindung mit unterschiedlichen Plattenwerkstoffen (unter anderem Gipsplatten) wurde von **Baehre et al. (1987)** untersucht. Hierfür wurden Verschiebungsmoduln der geschraubten Verbindungen in Zug-Scherprüfungen ermittelt. Ergänzend folgten Dauerstandversuche an den Verbindungen, um Aussagen über das Langzeitverhalten treffen zu können. Um den Einfluss der Materialfeuchte zu berücksichtigen, wurden zusätzliche Prüferien nach Wasserbadlagerung der Proben bis zur Sättigung des jeweiligen Materials durchgeführt. Da die Gipsplatten während der Wasserbadlagerung nachhaltig geschädigt wurden, konnten keine abschließenden Aussagen zum Feuchteeinfluss auf den Verschiebungsmodul getroffen werden.

Auch **Andresen (1989)** führte umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung des Verschiebungsmoduls durch. Seine Betrachtungen umfassten einschnittige und zweischnittige Vollholz-, Holzwerkstoff-Holz- sowie Holzwerkstoff-Stahllaschen-

Verbindungen. Explizit wurde auf den Einfluss der Materialfeuchte eingegangen. Die Holzquerschnitte wurden mit drei unterschiedlichen Holzfeuchten in den Prüfkörpern eingesetzt. Aus den Prüfergebnissen leitete er den Feuchteinflussfaktor α ab. Mit dem Feuchteinflussfaktor und dem Verschiebungsgrundmodul lässt sich ein materialfeuchtebezogener Verschiebungsmodul bei Holzverbindungen ermitteln.

Für den Stahlleichtbau zeigte **Naujoks (2002)** die statische Leistungsfähigkeit von Wandtafeln aus dünnwandigen Stahlprofilen mit Blechdicken von 1,5 und 2,0 mm in Verbindung mit unterschiedlichen Beplankungsarten (einschließlich Gipsfaserplatten) auf. Zur Entwicklung eines Bemessungsverfahrens zur rechnerischen Abbildung von Bauteilversuchen führte er ergänzende, kleinformatige Scherprüfungen an Proben aus Stahlprofilen, Plattenwerkstoffen und Schrauben durch. Die Ergebnisse dienten als Eingangsparemeter für das Bemessungsverfahren. Neben der Grenzabscherkraft wurde auch die Steifigkeit der jeweiligen Verbindungen ermittelt.

Tichelmann (2006) verweist auf die deutlich anisotropen Eigenschaften von Gipswerkstoffplatten, die in Verbindung mit Holzunterkonstruktionen zu einem komplexen mechanischen Verhalten führen. Um Aussagen über die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung treffen zu können, wurden experimentelle Untersuchungen unter anderem in Form von Zugscherversuchen durchgeführt. Dabei wurden der Plattentyp, die Plattenrohddichte und das Verbindungsmittel variiert. Es zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der ermittelten Traglasten von der Rohddichte der Platten. Für Gipsplatten höherer Rohddichte konnte gezeigt werden, dass die Annahmen der ‚Johansen-Theorie‘ zur Traglastbestimmung anwendbar sind. Ein weiterer relevanter Aspekt ist das hygrische Verhalten von Gipsplatten und dessen Auswirkung auf das mechanische Verhalten der Verbindung. Hierzu wurden ergänzende Dauerstandversuche an Zugscherproben unter definierten klimatischen Bedingungen durchgeführt, die bestätigten, dass die Luftfeuchtigkeit einen signifikanten Einfluss auf das Kriechverhalten von Gipsplatten im Bereich der Verbindungsmittel hat. Es wird darauf verwiesen, dass die Verwendbarkeit von Gipsplatten bei kurzzeitiger Beanspruchung, für die das Kriechverhalten nicht relevant ist, zwar prinzipiell bestätigt wurde, das mechanische Verhalten in Verbindung mit der Feuchte aber immer einer genauen Betrachtung bedarf.

Wandtafeln in Stahlleichtbauweise waren Schwerpunkt der Untersuchungen von **Pfau (2007)**, wobei der Fokus auf der Vorfertigung als rationelles Herstellverfahren für diese Bauweise lag. In Analogie zum Holztafelbau bietet sich der Einsatz druckluftgetriebener Verbindungsmittel an. Hierdurch können Wandtafeln in maschinellen Prozessen seriell und in großer Stückzahl produziert werden. Ein dafür geeignetes Verbindungsmittel ist der Ballistiknagel. Die Tragfähigkeit entsprechender Verbindungen aus Stahlleichtbauprofilen (Blechdicken 1,5 mm und 2,0 mm) und verschiedenen Plattenwerkstoffen (auch Gipsplatten), die mittels Ballistiknägeln befestigt wurden, konnte sowohl in kleinformatigen Druckscherprüfungen als auch in Bauteilversuchen bestimmt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch der Verschiebungsmodul der jeweiligen Verbindung ermittelt.

Mit dem Ziel, einen Berechnungsalgorithmus für nichttragende Trennwände unter Berücksichtigung der statischen Anforderungen der DIN 4103-1:1984-07 (Vorgänger der DIN 4103-1:2015-06) zu generieren, wurden von **Gutsch et al. (2007)** umfangreiche Untersuchungen an Wänden in leichter Ständerbauweise mit Stahlprofilen der Nenndicke 0,6 mm und Gipsplatten als Beplankungslagen durchgeführt. Das Prüfprogramm umfasste insgesamt 40 Wände verschiedener Einbauhöhen, unterschiedlicher Profilgrößen und mit

variabler Plattenlagenanzahl. Die Bauteilprüfungen wurden durch wenige exemplarische Kleinteilprüfungen an Verbundproben (Zugscherprüfungen) ergänzt. Aus den Ergebnissen konnten Aussagen über das Last-Verformungsverhalten der Wände in den gegebenen Material-, Geometrie- und Lastgrenzen abgeleitet werden. Der entwickelte Berechnungsalgorithmus, ein iteratives Verfahren, hat die Aufgabe, das Last-Verformungsverhalten der Wände innerhalb dieser Grenzen möglichst realitätsnah abzubilden, um somit eine Interpolation zwischen den geprüften Wandaufbauten und Wandhöhen zu ermöglichen. Dabei bedient sich der Algorithmus sowohl etablierter Verbundmodelle als auch empirisch basierter Näherungsfunktionen. Letztere beinhalten die Bestimmung eines lastabhängigen Verschiebungsmoduls. Die Ergebnisse der Untersuchungen mündeten in der Erstellung von zwei allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen (abP) für Wände und Schachtwände mit umfangreichen Bauteiltabellen. Diese beinhalten neben unterschiedlichen Aufbauvarianten und Wandhöhen auch die Verformungsklassen der DIN 18181:2007-02 (Vorgänger der DIN 18181:2019-04). Das Nachweisprinzip und Anwendungshinweise hierzu wurden von **Herfurth et al. (2008)** veröffentlicht.

3.2 Seismische Untersuchungen

Für die tragende Stahlleichtbauweise wurden von **Fiorino et al. (2006)** geschraubte Verbindungen aus Stahlleichtbauprofilen der Nenndicke 1,0 mm mit OSB-Platten und Gipsplatten-Beplankungen in monotonen und zyklischen Kleinteilprüfungen untersucht. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung von Einflüssen aus den beiden unterschiedlichen Plattenwerkstoffen, der Plattenausrichtung, des Schraubenrandabstandes, unterschiedlicher zyklischer Lastprotokolle sowie der maximalen Lastgröße. Dabei konnte unter anderem ein signifikanter Unterschied der mechanischen Eigenschaften der Verbindung bedingt durch das Plattenmaterial festgestellt werden. Während die Proben mit OSB-Platten eine höhere Tragfähigkeit und Energiedissipation aufwiesen, zeigten die Proben mit Gipsplatten eine höhere Duktilität. Zudem wurden Empfehlungen für eine anzunehmende Festigkeitsminderung bei Schraubverbindungen gegeben. Der Vergleich mit monotonen und zyklischen Untersuchungen an zwei Wandaufbauten hat gezeigt, dass eine rechnerische Prognose auf Basis der in den Kleinteilversuchen ermittelten Kennwerte zu einer guten Übereinstimmung führt. Die Wände wurden dabei, um die im Anwendungsbereich vorgesehene vertikale Lastabtragung zu berücksichtigen, zusätzlich zu den monotonen und zyklischen Horizontallasten auch mit permanenten Auflasten geprüft.

In Ergänzung zu den zuvor genannten Untersuchungen wurden von **Fiorino et al. (2008)** zementgebundene Platten als weitere Beplankungsvariante betrachtet. Die geprüften Proben ordnen sich hinsichtlich Tragfähigkeit und Energiedissipation zwischen OSB-Platten und Gipsplatten ein. In Bezug auf die Duktilität konnte keine eindeutige Aussage getroffen werden, weil diese unter den Halbzyklen im Zugkraftbereich keinen eindeutigen Trend aufwies.

Bislang stellen lastabtragende Wandtafeln in Stahlleichtbauweise einen unregelmäßigen Bereich in der Erdbebennormung dar. Daher wurde anhand einer Fallstudie in Italien die Anwendbarkeit experimentell ermittelter Eigenschaften für die seismische Auslegung von Gebäuden von **Iuorio et al. (2014)** untersucht. Insbesondere die beiden durchgeführten Wandprüfungen zeigten, dass die getroffenen rechnerischen Annahmen eine gute

Vorhersage der tatsächlichen Antwort der Wände auf die seismische Beanspruchung lieferten.

Um darüber hinaus den Einfluss alternativer Verbindungsmittel zu berücksichtigen, wurden von **Fiorino et al. (2016)** Untersuchungen unter anderem mit Ballistiknägeln durchgeführt. Als Beplankungsvarianten der Stahlleichtbauprofile kamen Gipsplatten erhöhter Rohdichte und Gipsfaserplatten zum Einsatz. Dabei wurde festgestellt, dass die Festigkeitsminderung ein etwas geringeres, aber dennoch ähnliches Niveau aufweist wie bei den in der Vergangenheit (vgl. **Fiorino, 2006, 2008**) durchgeführten Prüfungen an Schraubverbindungen.

Die oben genannten Untersuchungen wurden von **Macillo et al. (2017)** durch entsprechende monotone und zyklische Bauteilversuche an Wänden in Stahlleichtbauweise mit Gipsplatten erhöhter Rohdichte und Ballistiknägeln ergänzt. Das Versagen trat dabei stets im Bereich der Verbindungen auf. Die Festigkeitsminderung der Wand lag dabei etwas höher als die im Vergleich zu den Kleinteilversuchen ermittelte Festigkeitsminderung. In diesem Zusammenhang wurde auf den großen Einfluss der Ausführungsqualität von Verbindungen bei Herstellung der Wandtafeln und die sich daraus ergebenden Festigkeitseigenschaften hingewiesen. Weiterhin wurden die Verhaltensbeiwerte der Konstruktionen bestimmt. Mit Werten von 3,43 und 4,31 sind diese durchaus vergleichbar mit den Verhaltensbeiwerten ähnlicher Wände in Holzbauweise.

Weil neben Platten- und Verbindungsmitteltyp auch die Blechdicke der Stahlprofile und der Durchmesser der Verbindungsmittel von Relevanz sein können, wurden von **Fiorino et al. (2017)** Profile der Blechdicken 0,6 mm und 0,8 mm sowie Schraubendurchmesser von 3,5 mm bis 4,2 mm in vergleichenden monotonen Zugscherprüfungen gegenübergestellt. Dabei wurde der Randabstand der Schrauben mit 15 mm zwar praxisgerecht gewählt, stellte aber in allen Prüfkonfigurationen den Schwachpunkt dar. In allen Fällen kam es bei Erreichen der Maximallast zum Randausbruch der Schrauben aus der Platte. Das Randausbruchverhalten wird durch die Festigkeitseigenschaften des jeweiligen Plattentyps bestimmt. Somit konnte bezüglich der maximalen Tragfähigkeit der Verbindungen selbst kein signifikanter Einfluss des Schraubendurchmessers und der Profilblechdicke festgestellt werden. Darüber hinaus konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Art der Verbindung und der Energiedissipation festgestellt werden. Auffällig ist die starke Ergebnisstreuung aller ermittelten Parameter. Beispielsweise wurde für den Verschiebungsmodul der Kombination 0,6 mm Profil / 12,5 mm GKB-Platten / 3,5 mm Schnellbauschrauben ein Variationskoeffizient von 53 % ermittelt. In der abschließenden Beurteilung wurde dies mit Imperfektionen bei Aufbau und Einbau der Probekörper begründet.

Für statisch mitwirkende, aussteifende Beplankungen im Holztafelbau untersuchte **Rädel (2018)** das dissipative Verhalten von OSB-Platten, Gipsfaserplatte und Gipsplatten, die über Klammern mit der Holzunterkonstruktion verbunden sind. Dies erfolgte anhand monotoner und zyklischer Prüfungen sowohl an kleinformatischen Scherprobekörpern als auch an Bauteilen. In diesem Zuge wurden die für eine Bemessung wichtigen Parameter Verhaltensbeiwert und Überfestigkeit ermittelt. In Bezug auf die Energiedissipation konnten Art und Anzahl von Fließgelenken, die sich bei großen Verschiebungen ausbilden, als bestimmender Faktor identifiziert werden. Es wurde darauf verwiesen, dass sich die kleinformatischen Prüfungen in besonderem Maße dafür eignen, differenzierte Aussagen über das lokale Verhalten der Verbindung treffen zu können. Es zeigte sich, dass sich das

Dissipationsvermögen im direkten Vergleich bei Verwendung von OSB- und Gipsfaserplatten nicht wesentlich unterscheidet. Wandscheiben mit einer Beplankung aus Standardgipsplatten wiesen hingegen eine erkennbar niedrigere Energiedissipation auf. Dies wurde auf eine verminderte Fließgelenkausbildung aufgrund der geringeren Lochleibungsfestigkeit dieser Platten zurückgeführt.

Shin und Kim (2020) entwickelten ein Modellierungsverfahren zur Vereinfachung der analytischen Bewertung des Verhaltens leichter Ständerwände unter seismischer Beanspruchung. Das Verfahren beruht auf der Abbildung der eingesetzten Komponenten, deren Verbindung untereinander sowie auf der Randbefestigung einer Wand an der Tragstruktur des Gebäudes mithilfe diskreter Federelemente. Die Federelemente werden dabei in der Art modifiziert und angeordnet, sodass ein Hystereseverlauf aus zyklischer Beanspruchung repräsentativ abgebildet werden kann. Die sich aus dem jeweiligen Verschiebungszustand ergebenden Schadenszustände können auf Basis des Modells ebenfalls abgeschätzt werden. Zur Verifizierung wurden zwei Wandaufbauten zyklisch geprüft. Das analytische Verfahren zeigte hierbei eine gute Übereinstimmung.

Ergänzend zu ihren Untersuchungen an Verbindungen unterschiedlicher Konfigurationen prüften **Fiorino et al. (2023)** eine große Serie nichttragender Wände in leichter Ständerbauweise unter zyklischer Beanspruchung in Wandebene. Dabei wurden nicht nur Plattentyp und Profilblechdicke variiert, sondern auch die Plattenlagenanzahl, die Art der Befestigung an der Primärstruktur und die Anzahl der Unterkonstruktionsebenen (eine bzw. zwei Ständerreihen). Zudem wurden drei Schadensklassen von DS1 bis DS3 eingeführt, um eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen nach einem Erdbebenereignis zu ermöglichen. Für diese Schadensklassen wurden Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt und zulässige Geschossverschiebungen zugeordnet. Einen deutlich positiven Einfluss hatten dabei erwartungsgemäß gleitende Anschlüsse an der Primärstruktur (gleitender Deckenanschluss). Aber auch bei starren Anschlüssen konnten, vor allem in Verbindung mit Gipsplatten erhöhter Rohdichte, bereits für die mittlere Schadensklasse DS2 die maximal zu berücksichtigenden Stockwerksverschiebungen gemäß DIN EN 1998 1:2010 12 erreicht werden. In Bezug auf die höchste Schadensklasse DS3 wurden die Werte aus der Norm teilweise um das Doppelte übertroffen.

4 Konkretisierung der Zielsetzung

4.1 Offene Fragestellungen

Die Betrachtung des Stands der Normung hat gezeigt, dass es umfassende Regelungen der Bauprodukte in Form europäisch harmonisierter Produktnormen gibt. In Verbindung mit ergänzender nationaler Normung sowie nationalen normativen Anhängen stehen die für statische und seismische Betrachtungen erforderlichen Produktparameter zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet die nicht definierte Streckgrenze der Stahlsorte DX51D, die im Rahmen von Steifigkeitsermittlungen jedoch eine untergeordnete Rolle spielt.

Für die Feststellung der Leistungsfähigkeit der leichten Ständerbauweise unter statischen und seismischen Beanspruchungen, die im Sinne einer Bauart aus den betreffenden Bauprodukten hergestellt wird, kann prinzipiell auf bestehende Prüfnormen zurückgegriffen werden. Während die Überprüfung der statischen Leistungsfähigkeit für Bauteile geregelt ist, fehlen explizite bauartspezifische Prüfverfahren für die Ermittlung seismischer Parameter wie Duktilität und Energiedissipation. Hier müssen Untersuchungen in Anlehnung an existierende Verfahren anderer Bauarten erfolgen. Noch deutlicher zeigt sich der Mangel an vorhandenen Regelungen bei der Betrachtung des Verhaltens der lokalen Verbindung aus Platte, Profil und Verbindungsmittel. Für die Ermittlung statisch relevanter Kennwerte, z. B. den Verschiebungsmodul, muss ebenfalls auf Verfahren anderer Bauweisen wie den Holzbau zurückgegriffen werden. Hierbei ist neben einer Überprüfung der Eignung des Prüfablaufs vor allem ein geeigneter Prüfkörperaufbau festzulegen, der zum einen eine realitätsnahe Abbildung im Sinne eines Bauteilausschnitts darstellt und zum anderen die besonderen Eigenschaften der Bauprodukte, vor allem Geometrien, Abmessungen und Abstände, berücksichtigt. In den bisher diskutierten Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3) wurden unterschiedliche Varianten an Probekörperaufbauten vor dem Hintergrund des jeweiligen Prüfziels definiert, die sich jedoch zum Teil erheblich voneinander unterscheiden.

Unter Prüfziel ist unter anderem die Ermittlung des Einflusses von Parametern der verwendeten Bauprodukte, wie

- Plattentyp und Rohdichte der Platte,
 - Blechdicke des Stahlprofils,
 - Verbindungsmitteltyp, Durchmesser und Randabstand des Verbindungsmittels
- zu verstehen.

Ein weiterer, für leichte Bauweisen mit Gipsplatten besonders relevanter Parameter, ist die Klimabeanspruchung und der sich daraus ergebende massebezogene Feuchtegehalt des Materials, da Gipsplatten eine deutliche hygri sche Abhängigkeit ihrer mechanischen Eigenschaften aufweisen. Untersuchungen hierzu beschränken sich auf Prüfungen nach Wasserbadlagerung (vgl. **Baehre, 1987**), eine für Gipsplatten ungeeignete Art der Konditionierung, und Dauerlastversuche in Verbindung mit Holzunterkonstruktion unter definierten Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen (vgl. **Tichelmann, 2006**).

Tichelmann (2006) wies in diesem Zusammenhang darauf hin, dass es auch bei kurzzeitiger Belastung einer genauen Betrachtung des mechanischen Verhaltens bedarf. Dies ist umso wichtiger, da die leichte Ständerbauweise mit Gipsplatten in der Baupraxis auch in Bädern und Feuchträumen zum Einsatz kommt. Bisher liegen keine Untersuchungen vor, die das Verbundverhalten aus Gipsplatten und dünnwandigen Stahlprofilen unter statischen und zyklischen Beanspruchungen bei wechselnden klimatischen Bedingungen berücksichtigen.

Die Analyse der statistischen Streuung von ermittelten Kennwerten ist Voraussetzung für eine differenzierte Betrachtung von Abhängigkeiten und Einflussfaktoren. Dies gilt in besonderem Maße für Bauprodukte, die eine materialbedingte Streuung der mechanischen Eigenschaften aufweisen, wie es bei Gipsplatten der Fall ist. Im überwiegenden Teil der bisherigen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3) wurden zugunsten eines einfach- oder zweifachsymmetrischen Aufbaus Probekörper mit Mehrfachbefestigung gewählt. Die Prüfung einer Mehrfachbefestigung kann aber per se keine statistischen Aussagen über die Kennwerte der Einzelverbindung liefern. Diesen Untersuchungen ist gemein, dass auf Basis des lokal untersuchten Verbundverhaltens im Rahmen kleinformatiger Prüfungen auf das globale Verhalten von Bauteilen geschlossen werden soll. Hierzu bietet sich die Anwendung bestehender Bemessungsnormen an. Die prüftechnisch ermittelten Kennwerte der Verbindung werden in das dort geregelte Nachweisverfahren eingesetzt. Da entsprechende Bemessungsnormen für die hier betrachtete Bauart fehlen, wurde von **Gutsch et al. (2007)** ein Berechnungsalgorithmus für statische Beanspruchungen auf Basis des γ -Verfahrens aus dem Holzbau entwickelt. Der Algorithmus lieferte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Bauteilprüfungen, allerdings wurden die mechanischen Eigenschaften der Verbindung aus Platte und Profil (vornehmlich der Verschiebungsmodul) nur in sehr begrenztem Umfang im Rahmen von Zugscherprüfungen untersucht. Ob das γ -Verfahren für den nachgiebigen Verbund zusammengesetzter Querschnitte auch für Kennwerte anwendbar ist, die unter abweichenden Bedingungen ermittelt werden, muss noch überprüft werden.

4.2 Weiterführender Forschungsbedarf und Ziel der Untersuchungen

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der leichten Ständerbauweise mit Gipsplatten und dünnwandigen Stahlprofilen für statische und seismische Anwendungen auf Basis analytischer Verfahren ist eine umfassende Kenntnis aller mechanischen Verbundeffekte im Zusammenspiel der eingesetzten Komponenten nötig. Erkenntnisse auf diesem Gebiet existieren, wie bereits erwähnt, derzeit nur fragmentarisch. Somit sind weitere empirische Verbunduntersuchungen als Datenbasis für die Entwicklung eines anwendbaren mechanischen Verbundmodells erforderlich.

In der Anwendung nichttragender Trennwände ist der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit unter statischen Beanspruchungen der maßgebende Nachweisfall aufgrund der hohen Anforderungen bei der Durchbiegungsbegrenzung. In der Regel tritt eine Überschreitung der Durchbiegung lange vor Erreichen der Spannungsgrenzen oder des Stabilitätsversagens ein.

Die Größe der Durchbiegung unter horizontalen Lasten senkrecht zur Wandebene ist neben der Wandhöhe primär abhängig von der Biegesteifigkeit der Wand. Da es sich bei der leichten Ständerbauweise nicht um monolithische Bauteile handelt, sondern um Bauteile, die aus mehreren Komponenten zusammengesetzt und miteinander nachgiebig, mechanisch verbunden sind, ist die effektive Steifigkeit zu betrachten. Der Verschiebungsmodul ist der relevante Kennwert, der das lastabhängige Verformungsverhalten der Verbindung repräsentiert. Er bestimmt, in welchem Maß die Komponenten im Verbund ‚aktiviert‘ werden und erlaubt im Fall der betrachteten Bauart Aussagen darüber, in welchem Maß die Gipsplatten einen zusätzlichen Beitrag zur Biegesteifigkeit der dünnwandigen Stahlprofile liefern können. Um den Verschiebungsmodul zu ermitteln, werden in vorliegender Arbeit statisch monotone Prüfungen an Zugescherproben durchgeführt. Bei der Auswertung des Verschiebungsmoduls ist vor allem der Anfangsverschiebungsmodul (im Sinne einer Anfangssteifigkeit) zu beachten. Er ist dem Bereich des quasi-elastischen Last-Verformungsverhaltens der Probe zuzuordnen und korrespondiert mit dem für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis relevanten quasi-elastischen Last-Verformungsverhalten des Bauteils. Nachfolgende Kennwerte werden im Rahmen der Zugscherprüfungen ermittelt:

- Verschiebungsmodul,
- Fließverschiebung,
- Duktilität.

Für die Zugscherprüfungen wird ein geeigneter Probekörperaufbau festgelegt. Als Grundlage dient eine eingehende Betrachtung der im Rahmen vergangener Untersuchungen gewählten Aufbauvarianten (vgl. Abschnitt 3). Der Probekörperaufbau wird auf seine Eignung hinsichtlich des angestrebten Prüfziels überprüft. Um differenzierte, statistische Aussagen bzgl. der Ergebnisstreuung je Kennwert erhalten zu können, wird ein Aufbau mit einer einzelnen Schraubverbindung bevorzugt.

Um Kenntnisse bzgl. des Einflusses von Klimabeanspruchungen zu erlangen, die derzeit nicht vorhanden sind, werden die Prüfungen nach vorhergehender Klimatisierung der Proben durchgeführt. Dabei werden folgende Parameter variiert:

- Temperatur (thermisch),
- relative Luftfeuchte (hygrisch),
- massebezogener Feuchtegehalt der Gipsplatten (aus hygrothermischen Bedingungen).

Die Klimabeanspruchungen werden dabei so gewählt, dass anwendungsrelevante Klimabedingungen abgebildet werden.

Nach Ermittlung der Kennwerte erfolgt eine Beurteilung, ob eine Korrelation zwischen dem Niveau der Klimabeanspruchung und der Größe der Kennwerte besteht. Bei gegebener Übereinstimmung werden entsprechende Korrelationsfunktionen entwickelt. Diese sollen eine Prognose der Kennwerte auch für weitere, nicht untersuchte Klimata ermöglichen.

Da der Verschiebungsmodul als Eingangsparameter für die Berechnung des nachgiebigen mechanischen Verbunds dient, wird eine entsprechende Beispielrechnung mit einem aus der Korrelationsfunktion ermittelten Verschiebungsmodul durchgeführt. Die Berechnung wird nach dem γ -Verfahren durchgeführt und durch eine Bauteilprüfung verifiziert. Mithilfe des massebezogenen Feuchtegehalts der Gipsplatten, die bei der Bauteilprüfung eingesetzt werden, kann der zugehörige Verschiebungsmodul für die Berechnung ermittelt werden.

Die Untersuchungen von **Fiorino et al. (2006)** bis **Fiorino et al. (2022)** haben gezeigt, dass das dissipative Verhalten der geprüften Verbindungen eine gute Korrelation mit dem Dissipationsvermögen geprüfter Bauteilen aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Energiedissipation von Bauteilen im Wesentlichen durch das Verhalten der Verbindungen bestimmt wird. Anhand zyklischer Kleinteilversuche soll deshalb der Einfluss klimatischer Bedingungen auf eine mögliche Veränderung der Energiedissipation ermittelt werden. Hierfür wird der gleiche Prüfkörperaufbau gewählt wie für die statischen Prüfungen, da die dort ermittelte Fließverschiebung als Grundlage für die festzulegenden Zyklenamplituden dient. Somit muss der Prüfkörperaufbau bereits für die statischen Prüfungen so gewählt werden, dass er in der Lage ist, sowohl Zug- als auch Druckkräfte aufzunehmen. Folgende Kennwerte werden im Rahmen der Zugscherprüfungen ermittelt:

- Festigkeitsminderung,
- Energiedissipation,
- äquivalentes Dämpfungsverhältnis.

4.3 Potentiale für die leichte Ständerbauweise

Die Kenntnis der Verbundeigenschaften zwischen Platte und Profil sowie ein geeignetes Nachweisfahren zur Bestimmung der effektiven Wandsteifigkeit ermöglicht die statische Auslegung von Wänden hinsichtlich

- abweichender Geometrie/abweichendem Aufbau gegenüber Aufbau bei Bauteilprüfung,
- außergewöhnlicher Lastfälle (z. B. Überdruck aus Gaslöschanlage),
- erhöhter Feuchtebeanspruchung.

In Hinblick auf den Einsatz in Erdbebenzonen helfen Erkenntnisse über die seismisch relevanten Eigenschaften des Verbunds bei der Einschätzung des Bauteilverhaltens in Bezug auf

- Energiedissipation in Wandebene und senkrecht zur Wandebene,
- maximal aufnehmbare Stockwerksverschiebungen,
- mechanische Eigenschaften nach einem Erdbebenereignis (Resttragfähigkeit),
- Schadensbewertung und Bewertung des Funktionserhalts.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass neben den Verbundeigenschaften noch weitere Parameter zu berücksichtigen sind, die auf die statische und seismische Leistungsfähigkeit von Wänden in leichter Ständerbauweise Einfluss haben, wie z. B. Art und Ausführung der Befestigung an flankierenden Bauteilen. Diese sind gesondert nachzuweisen. Es sind darüber hinaus aber auch Erweiterungen der bisher bestehenden Anwendungsbereiche möglich. Nachfolgend soll dies anhand von zwei Beispielen veranschaulicht werden.

Zum einen ergeben sich erweiterte Nachweismöglichkeiten für die leichte Ständerbauweise als Außenbauteil von Gebäuden in Skelettbau- oder Schottenbauweise, beispielsweise mehrgeschossige Wohn- und Bürogebäude oder Hallenkonstruktionen. Diese Anwendung bietet sich besonders bei thermischer Sanierung der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden

an. Das nachträgliche Ausfachen von bestehenden offenen Strukturen ist eine grundlegende Disziplin der leichten Ständerbauweise. Trennwände in dieser Bauweise können Neigungen und Krümmungen, ein- und ausspringenden Ecken, Durchdringungen und weiteren geometrischen und konstruktiven Gegebenheiten des Bestands angepasst werden. Sie weisen ein vergleichsweise geringes Gewicht auf und sind in kurzer Montagezeit errichtet. Dabei ist zu beachten, dass für Außenwände höhere statische Anforderungen als für nichttragende Innenwände gelten. In erster Linie sind hierbei planmäßige Windlasten sowie Lastannahmen zur Gewährleistung der Absturzsicherheit (beides als Horizontallasten senkrecht zur Wandebene) zu berücksichtigen. Wenn der Nachweis entsprechender Lastfälle nicht über die Profile vorgenommen werden kann, wie das bei Profilen der Blechdicke 0,6 mm üblicherweise der Fall ist, muss die Beplankung statisch mitwirkend angesetzt werden. Wegen der hierfür fehlenden Bemessungsnormen ist der bauaufsichtliche Nachweis in Form einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) oder vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) zu erbringen.

In Verbindung mit den statischen Beanspruchungen sind Klimabeanspruchungen zu berücksichtigen. Da als Witterungsschutz üblicherweise hinterlüftete Vorhangfassaden oder Wärmedämmverbundsysteme (siehe Abbildung 4.3-1) eingesetzt werden, liegt die leichte Ständerwand im nicht direkt bewitterten Außenbereich und wird somit weder Regen noch UV-Strahlung ausgesetzt.



Abbildung 4.3-1: Außenwand in leichter Ständerbauweise aus korrosionsgeschützten CW-Profilen (Blechdicke 0,6 mm) und Wärmedämmverbundsystem, Quelle: Knauf Aquapanel GmbH & Co. KG

Dennoch ist mit erhöhter Feuchte bedingt durch das Außenklima zu rechnen. In Anlehnung an DIN EN 1995-1-1:2010-12 kann für Anwendungen im nicht direkt bewitterten Außenbereich die Nutzungsklasse 2 angesetzt werden. Hiernach ist ein Feuchtegehalt der

eingesetzten Baustoffe anzunehmen, der sich bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % einstellt. Die relative Luftfeuchte darf dabei einige Wochen pro Jahr überschritten werden. Eine Betrachtung des massebezogenen Feuchtegehalts von Gipsplatten, der sich bei relativen Luftfeuchten > 85 % einstellt, ist somit empfehlenswert. Mit Erkenntnissen über das Verbundverhalten unter erhöhten Feuchtebeanspruchungen kann eine Bestimmung der anwendungsspezifischen effektiven Wandsteifigkeit erfolgen. Dies kann unterstützend als Argument zur Erlangung einer aBG oder vBG herangezogen werden.

Weitere Potentiale finden sich in Mischbauweisen mit dem Holzbau oder dem Stahlleichtbau. In der Regel wird das gesamte Gebäude, also auch alle inneren Trennwände, aus tragenden, aussteifenden Tafeln gefertigt. Darüber hinaus kommen Mischbauweisen zum Einsatz. Bei diesen wird die Bauleistung aus ökonomischen Gründen auf verschiedene Gewerke verteilt. Im Fall des Holztafelbaus erstellt der Holzbaubetrieb die tragenden Bauteile des Gebäudes und fügt diese zur Gebäudetragstruktur. Alle nichttragenden Komponenten, wie nichttragende innerer Trennwände, können dann von einem Trockenbauerarbeiter nachträglich bauseits errichtet werden. In der Stützen-Riegelbauweise im Holzbau ist diese Ausführung häufig zu finden. In der Regel wird die Gebäudeaussteifung vom Gebäudekern übernommen, sodass es keiner aussteifenden Innenwände bedarf. Dies ermöglicht offene Grundrisse, die je nach Nutzung mit nichttragenden Wänden beliebig in Räume unterteilt werden können, wie in Abbildung 4.3-2 zu erkennen.



Abbildung 4.3-2: Nichttragende Trennwände in leichter Ständerbauweise aus CW-Profilen (Blechdicke 0,6 mm) innerhalb eines Gebäudes in Holzbauweise, Quelle: Blum Dietz GmbH

Dabei ist eine unplanmäßige Aktivierung der nichttragenden Wände hinsichtlich der Aussteifungslasten unerwünscht, da dies zu einer ungewollten Lastumlagerung in der Tragstruktur führen würde. Aufgrund der geringeren Scheibensteifigkeit der nichttragenden gegenüber den tragenden Wänden sowie der weder für Schubkraft noch für Zugkraftübertragung ausgelegten Randanschlüsse kann angenommen werden, dass ihr Beitrag an der Gebäudeaussteifung vernachlässigbar bleibt.

Auf den Erdbebenfall trifft dies voraussichtlich nicht zu. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der großen Verschiebungen, die während eines Erdbebenereignisses bedingt durch die Antwort des Gebäudes auftreten können, auch die nichttragenden Wände aktiviert werden. Dies kann durchaus einen positiven Beitrag leisten, da hierbei zusätzlich Energie dissipiert wird, was zu einer Entlastung der Tragstruktur führen kann. Mit Kenntnis der dissipativen Eigenschaften des Verbunds kann das Bauteilverhalten prognostiziert und der Beitrag an der gesamten Energiedissipation des Gebäudes abgeschätzt werden. Auch hier ist es wichtig, die Verbundeigenschaften zusätzlich unter Feuchteinwirkung zu ermitteln, um Wände, die zur Raumbildung von Bädern und Feuchträumen dienen, in die Betrachtungen einschließen zu können.

5 Methodik

5.1 Eingrenzung relevanter Bauprodukte

5.1.1 Gipsplatten für die Beplankung

Gipsplatten sind geregelte Bauprodukte, die als Plattenwerkstoffe in vielfältigen Anwendungen, überwiegend in trockenen Ausbauweisen, zum Einsatz kommen. Sie werden industriell in kontinuierlichem Bandstraßenbetrieb hergestellt. Wie vom **Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2013)** und von **Becker et al. (2004)** erläutert, bestehen sie aus einem Gipskern, der mit Karton ummantelt ist. Sichtseiten- und Rückseitenfläche sowie Längskanten sind mit Karton ummantelt. Die Querkanten sind produktionsbedingt geschnitten und somit nicht kartonummantelt. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Platte dient der Karton als Zugzonenbewehrung. Bei Biegebeanspruchung nimmt der in der Zugzone liegende Karton die Biegezugkraft auf, während sich über den Gipskern die Biegedruckkraft als Druckspannung verteilt. Der Gipskern besteht aus Stuckgips und Zusatzstoffen (z. B. Schaumbildner, Stärke, mineralische Zuschläge). Für Gipsplatten des Typs Feuerschutzplatte werden zusätzlich Glasfasern in den Gipskern eingebracht, um einen verbesserten Gefügezusammenhalt im Brandfall zu erzielen. Zudem weisen die Feuerschutzplatten einen Gipskern höhere Dichte auf, wodurch eine größere Menge chemisch gebundenen Wassers (Kristallwasser) zur Verfügung steht, das bei hohen Temperaturen verdampft. Durch die beim Verdampfen absorbierte thermische Energie wird der Temperaturdurchgang durch ein mit Gipsplatten beplanktes Bauteil begrenzt.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) gemäß DIN 18180:2014-09 (entspricht Typ DF gemäß DIN EN 520:2009-12) gewählt. Dieser Plattentyp muss aufgrund seiner Verwendung für sicherheitsrelevante Konstruktionen in besonderem Maße Anforderungen an eine gleichbleibende Produktqualität erfüllen. Dies wird durch werkseigene Produktionskontrollen sowie durch regelmäßige Anwendungsprüfungen sichergestellt. Damit kann die Stichprobenauswahl, die nachfolgenden Untersuchungen zugrunde liegt, als repräsentativ für diesen Plattentyp gewertet werden. Die Plattendicke wurde mit 12,5 mm festgelegt, dies entspricht der Standarddicke von Gipsplatten und kommt bei leichten Ständerkonstruktionen am häufigsten zum Einsatz. Das gesamte Probenmaterial, sowohl für die kleinformatischen Untersuchungen als auch für die Bauteilprüfung, entstammte derselben Produktionscharge. Die Gipsplatten wurden von der Knauf Gips KG zur Verfügung gestellt.

An entnommenen Plattenproben wurden nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz die Plattenkennwerte Dicke und volumenbezogene Masse gemäß DIN EN 520:2009-12 ermittelt. Zusätzlich wurde der Biege-E-Modul bei Ausrichtung des Rückseitenkartons in der Zugzone bestimmt (siehe Tabelle 5.1.1-1).

Tabelle 5.1.1-1: Ermittelte Plattenkennwerte an gemäß DIN EN 520:2009-12 entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz

Proben	Dicke [mm]	Volumenbezogene Masse [kg/m ³]	Biege-E-Modul Rückseitenkarton in Zugzone [N/mm ²]
Probe 1	12,55	834	3 353
Probe 2	12,55	823	3 155
Probe 3	12,38	818	3 166
Probe 4	12,53	823	3 222
Probe 5	12,60	828	3 163
\bar{x}	12,52	825	3 212

5.1.2 Metallprofile für die Unterkonstruktion

CW-Profile nach DIN 18182-1:2015-11 sind im Querschnitt C-förmig und werden für Wandanwendungen entsprechend DIN 18183-1:2018-05 eingesetzt. In einer Nennblechdicke von 0,6 mm entsprechen sie den üblichen in Deutschland eingesetzten Profilen für Metallständerwände, Schachtwände und freistehende Vorsatzschalen. Wie bei **Becker et al. (2004)** beschrieben, wird im Herstellprozess aus flachem, dünnwandigen Stahlblech durch Kaltumformung die Profilgeometrie erzeugt. Das eingesetzte Stahlblech entspricht üblicherweise der Stahlsorte DX51D nach DIN EN 10346:2015-10, für die keine Streckgrenze geregelt ist. Darüber hinaus weist das Stahlblech einen Korrosionsschutz in Form einer Verzinkung auf, die gemäß normativer Vorgabe mindestens 100 g/m² betragen muss. Der C-förmige Querschnitt unterteilt sich in einen Profilsteg, an den an beiden Enden jeweils ein Profilflansch anschließt. Die Profilflansche wiederum weisen an ihrem jeweils freien Ende einen Umbug auf. Die exakten Abmessungen der Querschnitte sind in DIN 18182-1:2015-11 angegeben.

Für die Untersuchung wurden CW-Profile mit der geringsten Steg- bzw. Querschnittshöhe gewählt. Es handelte sich dabei um den Profiltyp CW 50x50x06, wobei der erste Zahlenwert die Nennhöhe des Steges in Millimeter, der zweite Zahlenwert die Nennbreite der Flansche in Millimeter und der dritte Zahlenwert die Blechdicke in Zehntelmillimeter (Letzteres immer als zweistellige Angabe) ausdrückt. Durch die geringe Querschnittsgröße eignen sich diese Profile besonders für Aufbau und Prüfung kleinformatiger Probekörper. Die für die kleinformatigen Untersuchungen und Bauteilprüfung eingesetzten Profile stammten aus derselben Produktionscharge. Laut Herstellerangabe betrug die Streckgrenze des eingesetzten Stahlblechs > 240 N/mm² und die tatsächliche Blechdicke 0,59 mm. Da das 0,01 mm unter Nennmaß lag, wurde vereinfachend die Nennblechdicke angenommen. Die Profile wurden von der Richter System GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt.

5.1.3 Schrauben für den mechanischen Verbund

Schnellbauschrauben TN sind Schrauben mit Trompetenkopf und Nagelspitze nach DIN 18182-2:2019-12, über die sich Gipsplatten nach DIN 18180:2014-09 auf Profilen aus Stahlblech nach DIN 18182-1:2015-11 mittels Elektro-Bohrschrauber ohne Vorbohren befestigen lassen, um damit sogenannte Gipsplatten-Systeme, wie es in der Norm heißt, herzustellen. **Becker et al. (2004)** beschreiben, dass die Trompetenkopfform der Schrauben speziell für ein oberflächenbündiges Versenken in der Gipsplatte angepasst ist. Die Nagelspitze ermöglicht ein schnelles Eindringen in das Stahlblech und das Feingewinde einen schnellen Vortrieb der Schraube im Blech. Beim Durchdringen des Blechs entsteht ein Kragen um die Schraube, der einen leichten Einspannungseffekt (fester Sitz der Schraube) und einen erhöhten Auszugswiderstand erzeugt. Zur Herstellung der Schrauben können entweder Vergütungsstähle nach DIN EN 10083-1:2006-10 oder Einsatzstähle nach DIN EN 10084:2008-06 verwendet werden.

Für die Untersuchung wurden Schnellbauschrauben des Typs TN 3,5x25 mit doppelgängigem Feingewinde gewählt. Hierbei entspricht der erste Zahlenwert dem Nenndurchmesser in Millimeter und der zweite Zahlenwert der Nennlänge in Millimeter. Der Nenndurchmesser von 3,5 mm in Verbindung mit dem doppelgängigen Feingewinde ist die Vorzugslösung bei Verschraubung in 0,6 mm Blech. Die Nennlänge von 25 mm gewährleistet, dass die normative geforderte Mindestdurchdringung des Blechs von 10 mm eingehalten wird. Die für die Untersuchungen verwendeten Schrauben wurden demselben Schraubenpaket entnommen. Die Schrauben wurden von der Knauf Gips KG zur Verfügung gestellt.

5.2 Auswahl geeigneter Prüfverfahren

5.2.1 Kleinteilprüfungen

Für die Ermittlung der Kenngrößen Verschiebungsmodul, Fließverschiebung und Duktilität ist die Untersuchung von Verbindungen unter monoton statischer Belastung erforderlich. Hierfür bietet sich DIN EN 26891:1991-07 an, da diese unter anderem ein Verfahren zur Ermittlung des Verschiebungsmoduls beschreibt, das auf Kleinteilprüfungen anwendbar ist. Da die Norm keine Werkstoffe aus Stahl einschließt, wie es bei den Profilen (s. Abschnitt 5.1.2) der Fall ist, kann formal nur in Anlehnung an die Norm geprüft werden. Zudem ist im Prüfablauf ein einzelner Ent- und Belastungszyklus vorgesehen, wodurch streng genommen keine monoton statische Belastung aufgebracht wird. Dieser Zyklus ist allerdings für die normative Ermittlung des Verschiebungsmoduls erforderlich. Für die Ermittlung von Fließverschiebung und Duktilität kann der vorgegebene Prüfablauf dennoch herangezogen werden, die Aufbringung der Belastung muss in diesem Zusammenhang aber als quasi monoton bezeichnet werden.

In Bezug auf die für seismische Anwendung relevanten Kenngrößen Festigkeitsminderung, Energiedissipation und äquivalentes Dämpfungsverhältnis der Verbindung ist die Durchführung zyklischer Prüfungen erforderlich. Ein entsprechendes Verfahren ist in DIN EN 12512:2006-12 festgelegt, das auch für Kleinteilprüfungen geeignet ist. Wie oben

beschrieben, ist auch hier aufgrund der Verwendung von Stahl formal nur eine Prüfung in Anlehnung an die Norm möglich.

Neben dem Prüfablauf ist der Aufbau des Prüfkörpers von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse. Der Prüfkörper sollte zum einen die lokale Verbindung aus Platte und Profil in leichten Trennwänden möglichst realitätsnah abbilden, quasi einen bereichsweisen Ausschnitt des Bauteils darstellen. Zum anderen sollte die in der Prüfung erzeugte Beanspruchung der Verbindung möglichst nah an der idealen Scherbeanspruchung liegen, um das Verhalten der Schubfuge im nachgiebigen mechanischen Verbund abzubilden. Dies erfordert eine Reduktion exzentritätsbedingter Momente auf ein Minimum. Zudem ist für eine Bewertung der oben genannten Kennwerte eine Betrachtung der Ergebnisstreuung von großem Interesse.

Zur Auswahl eines geeigneten Prüfkörperaufbaus bietet es sich an, bereits existierende Varianten für ähnliche Untersuchungen zu betrachten. Tabelle 5.2.1-1 gibt einen Überblick über sechs ausgewählte Prüfkörperaufbauten, die zur Ermittlung der Kennwerte von Verbindungen unter Scherbeanspruchung dienen. Bei den Typen in der ersten Zeile handelt es sich um Aufbauvarianten mit einseitiger Verbindung Platte-Unterkonstruktion, die Typen in der zweiten Zeile repräsentieren beidseitige Verbindungen, jeweils in chronologischer Ordnung.

Typ 1.2 ist der Arbeit von **Naujoks (2002)** entnommen. Der Aufbau wurde für die Durchführung zyklischer Prüfungen an Verbindungen zwischen Blechen aus Stahlleichtbauprofilen (Blehdicken 1,5 und 2,0 mm) und verschiedenen Holzwerkstoff- und Gipswerkstoffplatten (u.a. kartonummantelte Gipsplatten) gewählt. Profile und Platten wurden dabei über Schrauben verbunden. Der Aufbau ist einfachsymmetrisch und erfordert durch die Verwendung von zwei Plattenstücken je Prüfkörper entsprechend mindestens zwei Schrauben.

Typ 1.3 wurde im Rahmen der Untersuchungen von **Pfau (2007)** genutzt und orientiert sich prinzipiell am asymmetrischen Aufbau des Typs 1.1. Ziel der Untersuchungen war es, mehrere Verbindungsmittel in einem Aufbau zu prüfen, um Plattenstöße von Holzwerkstoff- bzw. Gipswerkstoffplatten auf Stahlleichtbauprofilen (Blehdicken 1,5 und 2,0 mm) abbilden zu können. Als Verbindungsmittel kamen Schrauben und Ballistiknägeln zum Einsatz. Das aufgrund der Mehrfachverschraubung entstehende hohe Lastniveau kann zu einem vorzeitigen Versagen der Gipsplatten unter Zugbeanspruchung führen. Aus diesem Grund wurde ein geeigneter Aufbau für die Durchführung von Druckversuchen entwickelt.

Typ 2.1 diente **Tichelmann (2006)** dazu, Beanspruchungen der Verbindung zwischen Vollholz und Gipsplatten zu erzeugen, die möglichst vergleichbar zu einer realen Beanspruchung im Holztafelbau sind (Verbindung aus Holzrahmen und Beplankung). Der Aufbau besteht deshalb aus zwei praxisnah gewählten Vollholzquerschnitten, die auf Fuge gesetzt und beidseitig über jeweils ein Plattenstück miteinander verbunden sind. Der Aufbau erfordert somit mindestens 4 Verbindungsmittel; zum Einsatz kamen 8 Verbindungsmittel (Klammern, Nägel und Schrauben). Der symmetrische Aufbau ermöglicht eine zentrische Lasteinleitung in den Probekörper. Zudem ist er sehr gut für Dauerstandversuche geeignet (Aufhängung des Probekörpers und Befestigung von Gewichten am Probekörper).

Typ 2.2 ist dem Aufbau 2.1 ähnlich, die beiden Holzquerschnitte wurden durch zwei dünnwandige CW-Profilstücke mit 0,6 mm Blechdicke ersetzt. **Gutsch et al. (2007)** befestigten die Gipsplattenstücke auf einem der beiden Profile mit einer großen Anzahl an Schrauben, um Verschiebungen in diesem Bereich zu minimieren. Auf dem anderen Profilstück wurde jedes der beiden Gipsplattenstücke mit jeweils einer einzelnen Schnellbauschraube befestigt. Die Messung der Verschiebung erfolgte ausschließlich in diesem Bereich. Damit wurden die Vorteile eines symmetrischen Aufbaus mit einer Reduktion der betrachteten Verbindungspunkte auf zwei Schrauben kombiniert.

Typ 2.3 findet sich in der Veröffentlichung von **Fiorino et al. (2017)**. Es wurden ebenfalls dünnwandige CW-Profilstücke mit 0,6 mm Blechdicke in Verbindung mit Gipsplatten untersucht. Der Aufbau ist bzgl. der eingesetzten Komponenten vergleichbar mit Typ 2.2, folgt aber dem Prinzip der identischen Ausbildung aller Verbindungen aus Unterkonstruktionselementen und Plattenstücken gemäß Typ 2.1. Im Unterschied zu Typ 2.1 wurde die Mindestanzahl von 4 Verbindungsmitteln (Schnellbauschrauben) umgesetzt.

Den betrachteten Aufbauvarianten ist gemein, dass sie entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung optimiert wurden. Diese kann einen symmetrischen Aufbau oder eine Mehrfachbefestigung zwischen Platte und Unterkonstruktion erfordern. Die in vorliegender Arbeit angestrebte Zielsetzung beinhaltet eine explizite Betrachtung statistischer Ergebnisstreungen, um präzise Aussagen über Einflussfaktoren treffen zu können. Um aber belastbare statistische Aussagen hinsichtlich einer einzelnen Schraubverbindung treffen zu können, ist es erforderlich, dass entsprechend nur eine einzelne Schraubverbindung über den

Prüfkörper abgebildet wird. Bereits bei Verwendung von zwei Schrauben je Prüfkörper werden gemittelte Werte erzeugt. Zudem ist bzgl. der Standardabweichung einer Prüferie davon auszugehen, dass diese kleiner ausfällt, wenn zwei statt einer Schraube geprüft werden, und somit nicht das reale Streuverhalten der Einzelverbindung abgebildet wird. Als Schlussfolgerung hieraus wurde für die Kleinteilprüfungen ein Aufbau in Anlehnung an Typ 1.1 gewählt.

Hierbei ist der Effekt der Lastexzentrizität aufgrund des asymmetrischen Aufbaus zu berücksichtigen. Das dabei entstehende Moment muss durch ein inneres Kräftepaar, das sich im Prüfkörper ausbildet, aufgenommen werden. Abbildung 5.2.1-1 verdeutlicht diesen Effekt anhand eines idealisierten Modells, in dem sich die Komponenten frei verdrehen können. Tatsächlich wird sich auch eine Biegebeanspruchung der Komponenten einstellen, weshalb die Druckkraftübertragung nicht punktuell, sondern über eine entsprechende Kontaktfläche erfolgen wird. Ebenfalls im Modell nicht abgebildet ist die Übertragung der Scherkräfte über das Verbindungsmittel und über Reibung zwischen den Komponenten.

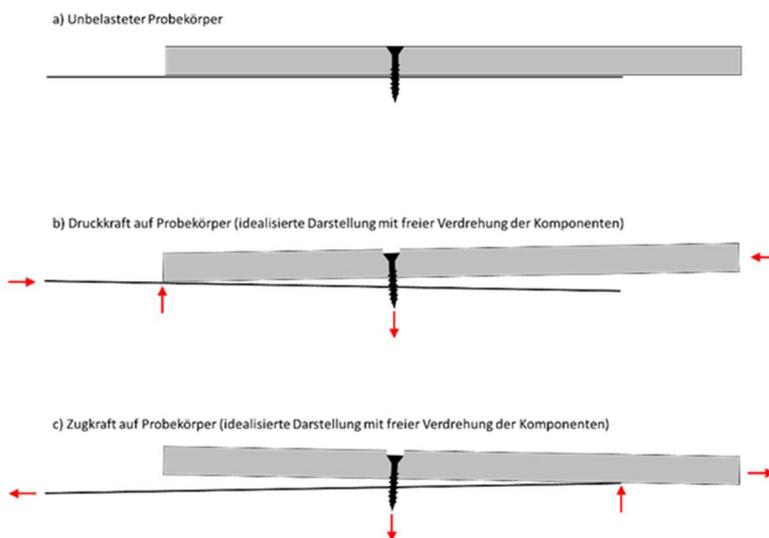


Abbildung 5.2.1-1: Idealisierte Darstellung der Ausbildung eines Kräftepaars im Bereich der Verbindung aus Platte und Profil aufgrund des asymmetrischen Prüfkörperaufbaus

Dieses stark vereinfachte Modell verdeutlicht dennoch, dass aufgrund des im Vergleich zum äußeren Hebelarm sehr viel größeren inneren Hebelarms davon auszugehen ist, dass die Zugkraftkomponente auf die Schraube hinreichend klein bleiben wird und deshalb die Annahme getroffen werden kann, dass der gewählte asymmetrische Aufbau gerade bei kleinen Last-Verschiebungszuständen (Betrachtung der Anfangssteifigkeit) keinen signifikanten Einfluss auf die Prüfergebnisse haben wird.

Abweichend zu Typ 1.1 wurde kein Blechstreifen, sondern ein Profilabschnitt verwendet. Dies liegt darin begründet, dass im Rahmen der zyklischen Untersuchungen auch Druckkräfte auf den Prüfkörper wirken. Ein einzelnes dünnes Blech würde bereits bei kleinen Druckkräften knicken. Der C-Querschnitt der Profile gewährleistet die erforderliche Knicksteifigkeit. Um die Exzentrizität der Lasteinleitung klein zu halten, wurde nur der der Platte zugewandte und mit ihr verschraubte Profilflansch in die Prüfvorrichtung eingespannt. Das Aufbauprinzip des Prüfkörpers ist in Abbildung 5.2.1-2 als 3D-Isometrie skizziert. Zu erkennen sind darin die Einlage im Bereich der Profileinspannung zum Ausgleich des Versatzes sowie zwei externe Wegaufnehmer, die die Verschiebung zwischen Platte und

Profil messen und eine mögliche Verdrehung messtechnisch erfassen können. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 6.1.1.

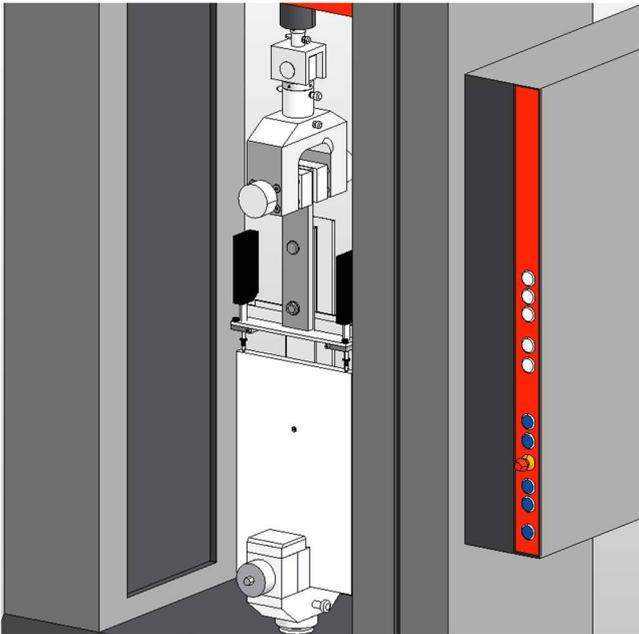


Abbildung 5.2.1-2: Prinzipskizze des gewählten Aufbaus für Kleinteilprüfungen als 3D-Isometrie, Quelle: Anna-Lea Berger

5.2.2 Bauteilprüfung

Für den Aufbau von Prüfkörpern zur Bauteilprüfung werden in DIN 4103-1:2015-06 nur allgemeine Aussagen getroffen. Hierin heißt es, dass Ausschnitte einer Wand verwendet werden dürfen. Demnach kann ein schmaler Prüfkörper aufgebaut und auf die seitlichen Anschlüsse an flankierende Bauteile verzichtet werden. Die Norm gibt weiterhin vor, dass Prüfkörper so zu wählen sind, dass sie in Bezug auf die vorgesehene Verwendung und Beanspruchung einen ungünstigen Fall darstellen, wodurch eine Prüfung auf der sicheren Seite erreicht wird.

Im Rahmen der Untersuchungen von **Gutsch et al. (2007)** wurde die Breite des Prüfkörpers mit der Breite der Platten gleichgesetzt. Dadurch kann die Ausbildung von Vertikalfugen vermieden werden. Darüber hinaus wurde die Linienlast nicht nur auf 0,9 m über dem Fußpunkt der Wand, sondern auch auf halber Wandhöhe aufgebracht. Dies dient der vereinfachten Simulation horizontaler Flächenlasten und stellt gleichzeitig den ungünstigsten Fall der möglichen Positionen einer horizontalen Linienlast dar.

Abbildung 5.2.2-1 zeigt das Foto eines Prüfaufbaus an der MPA Braunschweig im Rahmen der Untersuchungen von **Gutsch et al. (2007)**. Hier wurde der Wandausschnitt einer 8 m hohen Wand mit einer horizontalen Linienlast auf 4 m Höhe geprüft. Die Wand ist entsprechend der Beplankung 1,25 m breit. Die Profile der Unterkonstruktion wurden auf einen Achsabstand von 0,625 m gestellt. Von den insgesamt 3 Profilen befindet sich jeweils eines am rechten und linken Rand, das dritte ist in Wandmitte angeordnet.



Abbildung 5.2.2-1: Prüfaufbau einer 8 m hohen Bauteilprüfungen als Regelbereich-Ausschnitt einer Trennwand im Rahmen der Untersuchungen von **Gutsch, A. et al. (2007)**, veröffentlicht in **Herfurth et al. (2008)**

Der Prüfaufbau für die nachfolgenden Bauteilprüfungen wurde an den Prüfaufbau der MPA Braunschweig angelehnt. Um den Aspekt der mitwirkenden Plattenbreite beim sich einstellenden Verbundquerschnitt zu berücksichtigen, wurden nicht drei, sondern nur zwei Profile in der Art angeordnet, dass sich rechts und links ein Plattenüberstand entsprechend dem halben Achsabstand der Profile ergab. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 8.1.1.

5.3 Klimabeanspruchung

Witterungsbedingte Einflüsse wie Frost-Tau-Wechsel, UV-Strahlung oder Beregnung wurden im Rahmen der Untersuchungen nicht berücksichtigt, da leichte Ständerwände mit Beplankung aus GKF-Platten nicht im direkt bewitterten Außenbereich eingesetzt werden. Der vorgesehene Anwendungsbereich ist mit wenigen Ausnahmen auf Innenraumanwendungen beschränkt. Das Innenraumklima wird in erster Linie durch die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchte bestimmt. Für beheizte Innenräume kann dabei ein Temperaturbereich von 20 °C bis 30 °C angenommen werden. Kurzzeitig ist eine Über- oder Unterschreitung möglich, diese Sonderfälle waren nicht Teil der Untersuchung. Die relative Luftfeuchte kann in Innenräumen stark schwanken. So tritt in Bädern und Feuchträumen zeitweise eine erhöhte Luftfeuchte auf. Für die Untersuchungen wurde deshalb eine obere Grenze der relativen Luftfeuchte von 90 % gewählt. In der Praxis kommen in Fällen hoher Luftfeuchte üblicherweise imprägnierte Gipsplatten (hier: imprägnierte Feuerschutzplatten GKFI) zum Einsatz. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse zu gewährleisten, wurde der Wechsel auf einen zweiten Plattentyp vermieden und stattdessen der gewählte Plattentyp GKF beibehalten. Als unterer Grenzwert der relativen Luftfeuchte bietet sich der Referenzwert für Innenräume von 50 % an. Zwar kann

die relative Luftfeuchte in Innenräumen auch kleinere Werte annehmen, es ist aber nicht davon auszugehen, dass dies negative Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der Gipsplatten hat. Eine detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Klimabeanspruchungen findet sich in den Abschnitten 6.1.2 und 7.1.2.

6 Untersuchung der einschnittigen Verbindung unter quasi monoton statischer Belastung

6.1 Untersuchungsparameter

6.1.1 Aufbau der Prüfkörper

Entsprechend den Vorüberlegungen aus Abschnitt 5.2.1 wurde für den Prüfkörper die einschnittige Verbindung bestehend aus einer kleinformatischen Probe der Gipskarton-Feuerschutzplatte GKF 12,5 mm und einem Segment des Profils CW50x50x06 gewählt. Die beiden Komponenten wurden, wie in Abbildung 6.1.1-1 dargestellt, über eine einzelne Schraube miteinander verbunden.

Bezüglich der Abmessungen und Abstände wurden zwei Aspekte gegeneinander abgewogen. Zum einen sollte ein möglichst großer innere Hebelarm zwischen der Schraube als Zugverbindung und dem Druckpunkt zwischen Platte und Profil vorliegen, um die aus dem exzentrizitätsbedingten Moment entstehende Zugkraft auf die Schraube zu minimieren. Zum anderen sollten ein Randausbruch des Verbindungsmittels und ein Zugversagen der Platte im Rahmen der Prüfungen ausgeschlossen werden, da beides nicht Bestandteil der Untersuchung war. Hierfür sind möglichst große Abstände der Schraube zu allen Plattenrändern sowie zum Profilende zielführend. Andererseits können zu große Abmessungen der Komponenten zu unerwünschten Verformungen oder Stabilitätseffekten unter Druckbeanspruchung von Platte und Profil führen.

Die DIN 18180:2014-09 definiert den maximalen Schraubenabstand im Anwendungsbereich Trennwand mit 250 mm. Eine praxisnahe Betrachtung führt somit zu maximalen Randabständen von $250 \text{ mm} / 2 = 125 \text{ mm}$ in dem Sinne, dass der Prüfkörper einen Wandausschnitt repräsentiert, dessen Kanten mittig zwischen den Schrauben angeordnet sind. Um unerwünschte Effekte durch zu große Abmessungen zu vermeiden, wurde dieses Maximalmaß nicht ausgeschöpft. Stattdessen wurden die seitlichen Randabstände der Platte sowie die Randabstände in Kraftrichtung von Platte und Profil mit 100 mm festgelegt (siehe Abbildung 6.1.1-1).

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Einspannmaße der oberen und unteren Einspannvorrichtung der Prüfmaschine ergeben sich folgende Probenabmessungen:

Platte: $l \times b = 330 \times 200 \text{ mm}$

Profil: $l = 400 \text{ mm}$

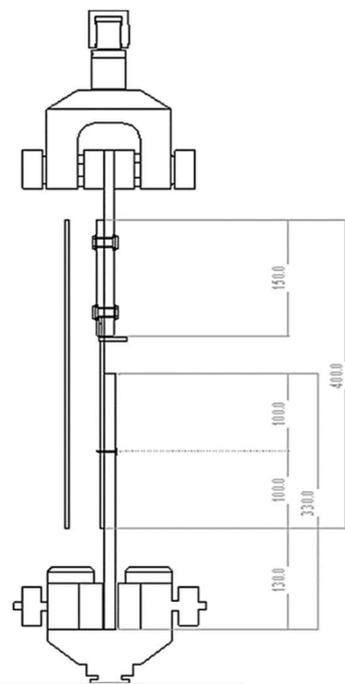
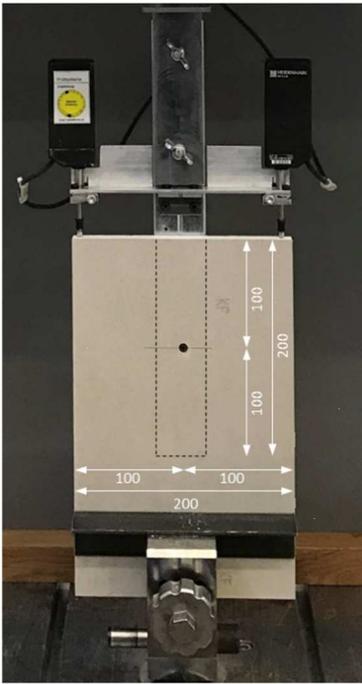


Abbildung 6.1.1-1 (links): Frontansicht des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern

Abbildung 6.1.1-2 (Mitte): Rückseiten des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern

Abbildung 6.1.1-3 (rechts): Seitenansicht des Zugscherprüfkörpers mit Maßangaben in Millimetern
Quelle: Anna-Lea Berger

An dem der Gipsplatte zugewandten Profilflansch wurde mit zwei Flügelschrauben-Verbindungen eine Stahlplatte in der Dicke der Gipsplatte montiert. Die Stahlplatte ragt über das Profilende hinaus und dient zur Einspannung in die Prüfmaschine. Damit ist zum einen sichergestellt, dass keine Exzentrizität zwischen oberer und unterer Einspannung entsteht, zum anderen findet die Lasteinleitung nur in das entsprechende Flanschblech statt, wodurch der äußere Hebelarm des auf den Prüfkörper wirkenden Kräftepaars minimiert wird.

Der äußere Hebelarm ergibt sich somit zu

$$e_1 = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \quad (6.1)$$

$$e_1 = \frac{12,5}{2} + \frac{0,6}{2}$$

$$e_1 = 6,55 \text{ mm}$$

mit

e_1 äußerer Hebelarm [mm]

t_1 Dicke Gipsplatte [mm]

t_2 Dicke Profilblech [mm]

Der innere Hebel beträgt sowohl für Zug- als auch Druckkraftbeanspruchung gemäß der zuvor definierten Randabstände der Schraube zur Plattenkante und zum Profilende sowie der in Abbildung 5.2.1-2 dargestellten Kräftepaarbildung

$$e_2 = a \quad (6.2)$$

$$e_2 = 100 \text{ mm}$$

mit

e_2 innerer Hebelarm [mm]

a Randabstand der Schraube zur Plattenkante bzw. zum Profilende [mm]

Damit ergibt sich die Zugkraft für die Schraubverbindung sowohl für Zug- als auch Druckkraftbeanspruchung des Probekörpers entsprechend des idealisierten Modells nach Abbildung 5.2.1-1 zu

$$Z = \frac{e_1}{e_2} \cdot F \quad (6.3)$$

$$Z = \frac{6,55}{100} \cdot F$$

$$Z = 0,0655 F$$

mit

Z resultierende Zugkraft auf die Schraubverbindung

F äußere Kraft auf den Prüfkörper (Zug- und Druckkraft) [mm]

Eine Beanspruchung der Schraube auf Kopfdurchzug durch die Platte respektive Auszug aus dem Profilblech von 6,55 % der in den Probekörper eingeleiteten Last ist vergleichsweise gering. Gemäß DIN EN 14566:2009-10 muss die Belastbarkeit der Schraubverbindung auf Zug mindestens 450 N betragen. Nach dem idealisierten Hebelarmmodell entspricht dies einer äußeren Lasteinwirkung von rund 6 870 N. Diese Lastgröße wird in der realen Prüfung nicht erreicht werden können, da sich die Schraube durch die Scherbeanspruchung schräg stellt und sich in Folge eine Schrägzugbeanspruchung ergibt, die schon bei deutlich niedrigerem Belastungsniveau zu einem Kopfdurchzug der Schraube durch die Platte führen kann. Für sehr kleine Verschiebungen zwischen Platte und Profil, die keine signifikante Schrägstellung der Schraube zur Folge haben, kann die auf die Schraubverbindung wirkende Zugkraft für die Verbundbetrachtung als vernachlässigbar angenommen werden.

6.1.2 Festlegung der Klimabeanspruchung

Zur Betrachtung thermischer und hygrischer Einflüsse auf die Größe des Verschiebungsmoduls, der Fließverschiebung und der Duktilität wurden unterschiedliche klimatische Bedingungen gewählt, die durch Variation der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sowie des sich daraus ergebenden massebezogenen Feuchtegehalts der Gipsplatte entsprechende Rückschlüsse zulassen. Dabei wurde darauf geachtet, dass es sowohl Klimata gleicher Temperatur und unterschiedlicher relativer Luftfeuchte als auch gleicher relativer Luftfeuchte und variierender Temperatur gibt. Bei den Klimastufen wurden sowohl normativ geregelte, für Prüfungen etablierte Temperatur-Luftfeuchte-Kombinationen herangezogen, als auch zusätzliche Zwischenstufen in der Form gewählt, dass sich weitere Vergleichsmöglichkeiten ergeben (siehe Tabelle 6.1.2-1).

Tabelle 6.1.2-1: Übersicht über die gewählten Klimastufen

Klimastufe	Erläuterung
20 °C / 50 %	in Anlehnung an DIN 4108 2:2013-02, anzunehmendes Innenraumklima für Wohnräume
30 °C / 50 %	gewählte, zusätzliche Klimastufe zur Betrachtung des Temperatureinflusses bei $\phi = 50\%$ relativer Luftfeuchte (Vergleich mit 20 °C / 50 %) sowie zur Betrachtung des Luftfeuchteinflusses bei T = 30 °C Temperatur (Vergleich mit 30°C / 90 %)
20 °C / 65 %	in Anlehnung DIN EN 26891:1991-07, Klimatisierung der Proben vor Prüfbeginn
20 °C / 90 %	gewählte, zusätzliche Klimastufe zur Betrachtung des Temperatureinflusses bei $\phi = 90\%$ relativer Luftfeuchte (Vergleich mit 30 °C / 90 %) sowie zur Betrachtung des Luftfeuchteinflusses bei T = 20 °C Temperatur (Vergleich mit 20 °C / 50 % und 20 °C / 65 %)
30 °C / 90 %	in Anlehnung an DIN EN 13964:2014-08, Klasse B für Decklagen

Zur Bestimmung der massebezogenen Plattenfeuchte der verwendeten Gipsplatten wurden insgesamt 16 gesonderte Proben mit der Probengröße 300 cm² aus zwei großformatigen Platten entnommen, zunächst bei 40 °C rückgetrocknet und dann nacheinander unter den 5 definierten Klimata bis zum Erreichen der Massekonstanz gelagert. Nach jeder Klimastufe wurde das Gewicht ermittelt. Aus dem Verhältnis des Probengewichts bei der jeweiligen Klimastufe zum Probengewicht nach Rücktrocknung ergibt sich der massebezogene Feuchtegehalt. Die Mittelwerte des massebezogenen Feuchtegehalts u sind in Tabelle 6.1.2-2 nachfolgend zusammengestellt.

Tabelle 6.1.2-2: Mittelwerte des massebezogenen Feuchtegehalts je untersuchter Klimastufe

Klimastufe	Mittelwert massebezogener Feuchtegehalt u
20 °C / 50 %	0,23 M.-%
30 °C / 50 %	0,29 M.-%
20 °C / 65 %	0,40 M.-%
20 °C / 90 %	0,61 M.-%
30 °C / 90 %	1,34 M.-%

Vor der mechanischen Prüfung der einschnittigen Verbindungen wurde das dafür vorgesehene Probenmaterial unter den jeweiligen Klimabedingungen bis zum Erreichen der Massekonstanz klimatisiert. Für die Prüfung wurden die Proben jeweils einzeln dem Klimaschrank entnommen, umgehend eingebaut und geprüft. Der Einbau dauerte ca. 1 min und die Prüfung selbst weitere 2 min bis zum Erreichen der für die Ergebnisauswertung relevanten Laststufe $0,4 F_{\max,est}$. Es ist davon auszugehen, dass innerhalb der gesamten Zeit für Einbau und Prüfung (3 min) keine signifikante Änderung des massebezogenen Feuchtegehalts der Proben eintrat.

6.1.3 Untersuchungsumfang

Aus den gewählten Klimastufen ergeben sich insgesamt 5 Prüfserien. Um adäquate Aussagen über Mittelwerte und Standardabweichungen der Prüfergebnisse treffen zu können, wurde der Mindestumfang je Prüfserie auf 10 auswertbare Stichproben festgelegt. Da es beim Einbau der Prüfkörper in die Prüfvorrichtung zu Beschädigungen kommen kann, wurde der Stichprobenumfang auf 12 erhöht. Zu einer Beschädigung kam es einmal (Probe 2 der Prüfserie bei Klima 20 °C / 90 %). Somit konnten vier Serien mit Stichprobenumfang 12 und eine Serie mit Stichprobenumfang 11 statistisch ausgewertet werden.

6.1.4 Prüfablauf

Die Prüfung wurde in Anlehnung an DIN EN 26891:1991-07 durchgeführt. Hierfür ist zunächst eine Höchstlast $F_{\max,est}$ zu schätzen. Für diese Schätzung wurden je Prüfserie 3 Vorversuche durchgeführt, die lediglich der Höchstlastermittlung dienten. Aus den 3 gemessenen Höchstlastwerten wurde im Anschluss das arithmetische Mittel gebildet, das als $F_{\max,est}$ für die jeweilige Serie herangezogen wurde. Daraus ergeben sich für die Prüfungsdurchführung die Zwischenlaststufen 40 % von $F_{\max,est}$ (erstes Lastplateau nach initialer Laststeigerung) und 10 % von $F_{\max,est}$ (zweites Lastplateau nach darauffolgender Lastabsenkung). Die Ergebnisse der $F_{\max,est}$ -Ermittlung können Tabelle 6.1.4-1 entnommen werden.

Tabelle 6.1.4-1: Geschätzte Höchstlast $F_{\max, \text{est}}$ nach Durchführung von 3 Vorversuchen je Prüfserie und Angabe der beiden Zwischenlaststufen gemäß Prüfverfahren der DIN EN 26891:1991 07

Feuchtegehalt u bei Klima	$F_{\max, \text{est}}$ [N]	0,4 $F_{\max, \text{est}}$ [N]	0,1 $F_{\max, \text{est}}$ [N]
0,23 M.-% bei 20 °C / 50 %	670	268	67
0,29 M.-% bei 30 °C / 50 %	660	264	66
0,4 M.-% bei 20 °C / 65 %	610	244	61
0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %	530	212	53
1,34 M.-% bei 30 °C / 90 %	545	218	55

Die Prüfungen wurden mithilfe einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Die kontinuierliche Verformungsmessung erfolgte dabei über zwei an den Außenkanten der Platte positionierte induktive Wegaufnehmer (siehe Abbildung 6.1.1-1a), die zugehörige Last wurde mittels Kraftmessdose erfasst. Bei dem System aus Kraftmessdose (Kraftsensor), Wegaufnehmer (Wegsensoren) und Universalprüfmaschine handelt es sich um ein von der Zwick Roell GmbH & Co. KG abgestimmtes Messsystem, das regelmäßig kalibriert wird. Die Lastaufbringung je Einzelprüfung erfolgte dabei gemäß dem in Tabelle 6.1.4-2 dargestellten Schema.

Tabelle 6.1.4-2: Schema der Lastaufbringung je Einzelprüfung

Lastaufbringung	Erläuterung
Schritt 1	Laststeigerung auf 0,4 $F_{\max, \text{est}}$ innerhalb von 120 s
Schritt 2	Last auf 0,4 $F_{\max, \text{est}}$ für 30 s konstant halten
Schritt 3	Lastabsenkung auf 0,1 $F_{\max, \text{est}}$ innerhalb von 90 s
Schritt 4	Last auf 0,1 $F_{\max, \text{est}}$ für 30 s konstant halten
Schritt 5	Laststeigerung bis F_{\max} innerhalb von 300 ± 120

6.2 Untersuchungsergebnisse

Die Last-Verformungskurven aller Prüfserien können der Anlage A entnommen werden. Auf eine explizite Zusammenstellung der Last-Verformungswerte je Laststufe wird an dieser Stelle verzichtet, da alle Messwerte kontinuierlich aufgezeichnet wurden und eine direkte Auswertung der relevanten Kenngrößen über die Prüfsoftware stattfand. Eine detaillierte Betrachtung dieser Kenngrößen erfolgt in Abschnitt 6.3.

Die aufgezeichneten Kurven lassen sich in einen quasi-elastischen, einen elastisch-plastischen, einen quasi-plastischen und in einen Bereich duktilen Versagens unterteilen. Die Unterteilung ist dabei nicht trennscharf möglich, da es Übergänge zwischen den Bereichen gibt, die sich nicht eindeutig zuordnen lassen (siehe Abbildung 6.2-1).

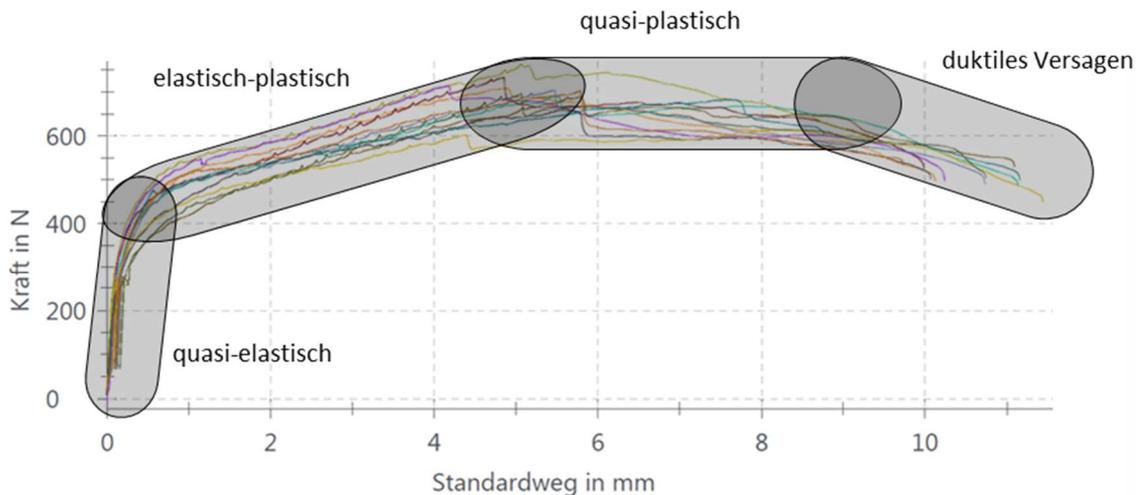


Abbildung 6.2-1: Exemplarische Darstellung einer Bereichseinteilung der Last-Verformungskurven (Diagramm aus Prüfsoftware mit softwarespezifischer Achsenbezeichnung)

Während des Prüfablaufs konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

Der Beginn des elastisch-plastischen Bereichs ist dadurch gekennzeichnet, dass die Schraube beginnt, sich erkennbar schräg zu stellen (linkes Bildpaar in Abbildung 6.2-2).

Im weiteren elastisch-plastischen Verlauf nimmt die Schrägstellung der Schraube zu und der Schraubenkopf beginnt, sich in die Platte einzuziehen (mittiges Bildpaar in Abbildung 6.2-2).

Der quasi-plastische Bereich und der Bereich duktilen Versagens sind dadurch gekennzeichnet, dass die maximale Schrägstellung der Schraube erreicht ist und Kopfdurchzug der Schraube durch die Platte stattfindet (rechtes Bildpaar in Abbildung 6.2-2). Zunächst geschieht dies bei konstanter Last (quasi-plastischer Bereich). Im Folgenden nimmt die Last bei fortschreitender Verformung stetig ab, da der Kopfdurchzugswiderstand kontinuierlich abnimmt (Bereich duktilen Versagens).

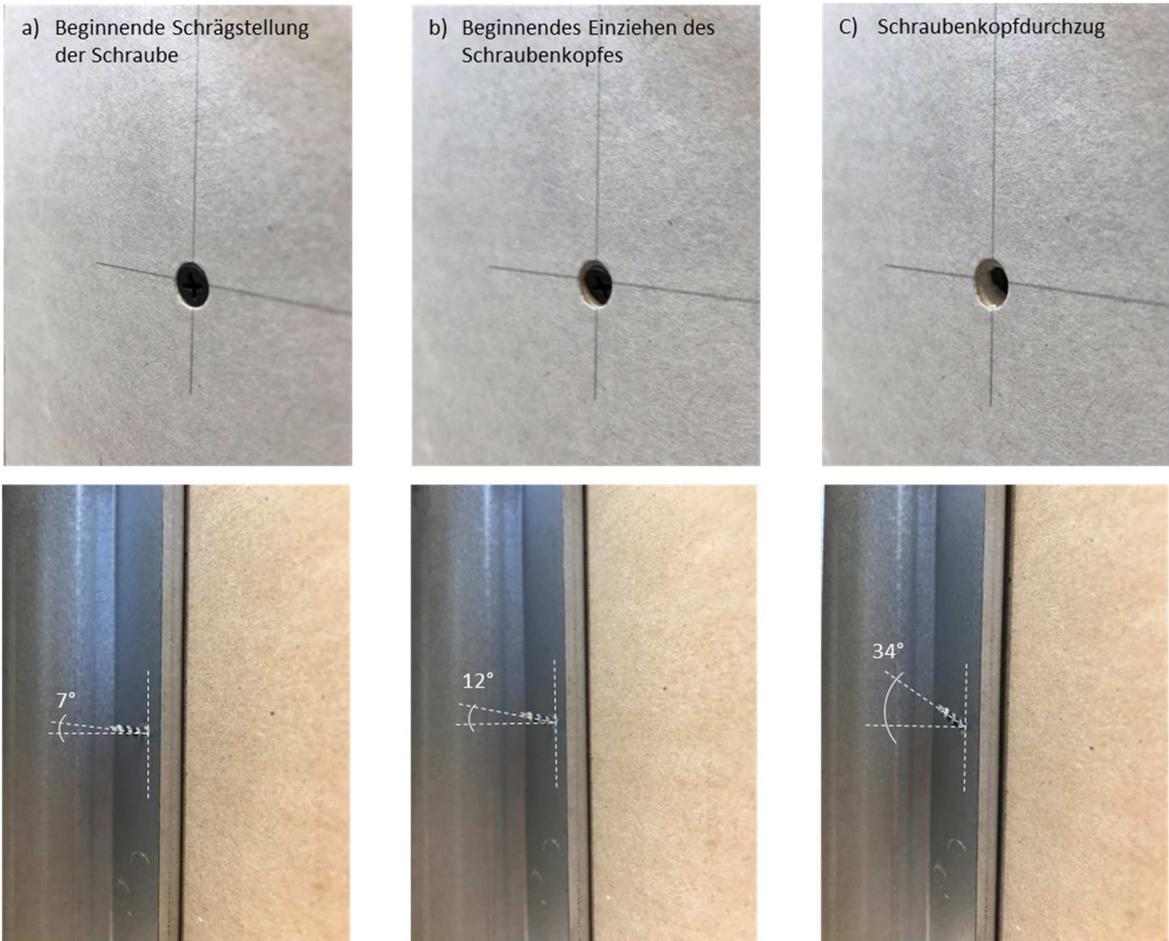


Abbildung 6.2-2: Bildfolge der beobachteten Schraubenschrägstellung und des Schraubenkopfdurchzugs während der Prüfung

6.3 Auswertung

6.3.1 Bestimmung des Verschiebungsmoduls

Im Holzbau wird das Formelzeichen k gemäß DIN EN 26891:1991-07 und das Formelzeichen K gemäß DIN EN 1991-1-1:2010-12 gleichermaßen für den Verschiebungsmodul verwendet. Der Verschiebungsmodul ist durch die Steifigkeit einer Verbindung zwischen zwei Werkstoffen (z. B. Gipsplatte und Stahlprofil durch Schraube verbunden) gekennzeichnet. Für die Beschreibung zusammengesetzter Querschnitte mit nachgiebigem mechanischen Verbund ist der Verschiebungsmodul eine maßgebende Größe. Die beiden in Anlehnung an DIN EN 26891:1991-07 für den quasi-elastischen Bereich ermittelten Werte k_i (bei $0,4 F_{\max,est}$ mit zugehöriger Verformung v_{04}) sowie k_s (bei $0,4 F_{\max,est}$ mit modifizierter Verformung $v_{i,mod} = 4/3 (v_{04} - v_{01})$) werden im Folgenden abweichend zu dieser Norm zum Zwecke der Vereinheitlichung mit DIN EN 1991-1-1:2010-12 mit K_i und K_s bezeichnet.

Da sich die Zwischenlaststufe $0,4 F_{\max,est}$ bereits im Übergangsbereich zwischen quasi-elastischer und elastisch-plastischer Verformung befindet, ist es erforderlich, für die Bestimmung der Anfangssteifigkeit der Verbindung zusätzlich den Verschiebungsmodul im quasi-elastischen Last-Verformungsbereich zu ermitteln. Dies kann unabhängig von $F_{\max,est}$ für kleine absolute Lastbereiche durchgeführt werden. Die Festlegung von absoluten Lastbereichen ermöglicht zudem eine bessere Vergleichbarkeit der Verschiebungsmoduln der unterschiedlichen Serien, da jede Serie einen gesonderter $F_{\max,est}$ -Wert aufweist. **Gutsch et al. (2007)** haben diese Herangehensweise der absoluten Lastbereiche ebenfalls gewählt, um aussagekräftigere Ergebnisse für ein Sekantenmodell des Verschiebungsmoduls zu erhalten. Der dort beschriebene Verschiebungsmodul C_1 deckt einen Lastbereich von 50 N bis 250 N ab. Nachfolgend wird dieser Lastbereich weiter verfeinert und der Verschiebungsmodul in 50-N-Schritten zwischen 50 N und 250 N ermittelt. Daraus ergeben sich 4 Verschiebungsmoduln für die 4 Lastschritte. Diese Verschiebungsmoduln sind mit dem allgemeinen Zeichen C benannt, der tiefgestellte Index kennzeichnet den jeweiligen Lastbereich.

Die Einzelauswertungen der Prüfungen können der Anlage A entnommen werden. Nachfolgende Tabellen 6.3.1-1 bis 6.3.1-5 sind eine Zusammenfassung in Form der statistischen Auswertungen je Prüfserie.

Tabelle 6.3.1-1: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,23 M.-% bei 30 °C / 50 %	$C_{50-100N}$ [N/mm]	$C_{100-150N}$ [N/mm]	$C_{150-200N}$ [N/mm]	$C_{200-250N}$ [N/mm]	K_i [N/mm]	K_s [N/mm]
\bar{x}	628,4	4 109,2	4 105,5	4 067,6	2 294,1	2 186,5
s	282,6	240,3	198,2	146,1	732,5	705,3
δ [%]	45,0	5,8	4,8	3,6	31,9	32,3

Tabelle 6.3.1-2: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
\bar{x}	705,2	4 028,8	4 048,5	4 118,6	2 371,6	2 292,7
s	282,3	138,7	144,6	146,4	713,2	702,7
δ [%]	40,0	3,4	3,6	3,6	30,1	30,6

Tabelle 6.3.1-3: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,40 M.-% bei 20 °C / 65 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
\bar{x}	567,9	3 917,0	3 940,0	Entfällt, da $0,4 F_{\max,est} < 250 \text{ N}$	2 236,4	2 054,4
s	267,3	391,9	285,2		827,5	810,3
δ [%]	47,1	10,0	7,2		37,0	39,4

Tabelle 6.3.1-4: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
\bar{x}	567,9	4 154,6	3 938,5	Entfällt, da $0,4 F_{\max,est} < 250 \text{ N}$	1 384,1	1 109,2
s	77,8	270,2	197,2		300,5	241,3
δ [%]	21,6	6,5	5,0		21,7	21,8

Tabelle 6.3.1-5: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 %, basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 1,34 M.-% bei 30 °C / 90 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
\bar{x}	294,8	3 937,3	3 710,4	Entfällt, da 0,4 F _{max,est} < 250 N	1 238,8	1 058,6
s	135,7	285,6	247,7		488,6	471,9
δ [%]	46,1	7,3	6,7		39,4	44,6

6.3.2 Bestimmung der Fließverschiebung und der Duktilität

Die Fließverschiebung V_y beschreibt die Verschiebung der Verbindung beim Eintreten erster plastischer Anteile im Last-Verformungsverhalten (Übergang von quasi-elastisch zu elastisch-plastisch). Die Duktilität D beschreibt, in welchem Maße die Verbindung in der Lage ist, Verschiebungen aufzunehmen, ohne wesentlich an Festigkeit zu verlieren. Hierbei spielen die elastisch-plastischen und quasi-plastischen Verformungsanteile eine große Rolle, da sie einen signifikant größeren Beitrag zur Gesamtverformung leisten als die quasi-elastischen Verformungsanteile.

Zur Bestimmung der beiden Größen wird das Auswertungsverfahren nach DIN EN 12512:2006-12 herangezogen. Mithilfe des Verfahrens wird zunächst ein vereinfachter bilinearer Verlauf für die Last-Verformungskurve abgeschätzt. Der Weg bis zum Schnittpunkt der beiden Geraden wird als Fließverschiebung bezeichnet. Die erste Gerade resultiert aus der Sekante zwischen den Punkten bei $0,1 F_{max}$ und $0,4 F_{max}$, während die zweite Gerade (bei Kurven ohne zwei eindeutig lineare Bereiche) als Tangente an den Kurvenverlauf mit einem definierten Winkel β in Abhängigkeit vom Winkel α der ersten Geraden angelegt wird. Die Beziehung zwischen den beiden Winkeln wird beschrieben mit der Gleichung $\text{tg}\beta = \frac{1}{6} \text{tg}\alpha$ (Schreibweise der Gleichung gemäß DIN EN 12512:2005-12).

Nachdem erste Auswertungen nach diesem Verfahren durchgeführt wurden, zeigte sich, dass hier eine Anpassung erfolgen sollte, da die erste Gerade bei $0,4 F_{max}$ bereits in den elastisch-plastischen Bereich übergeht und die zweite Gerade bezüglich der angenommenen Steigung den tatsächlichen Kurvenverlauf nicht repräsentativ abbildet. Abweichend zu DIN EN 12512:2006-12 wurde deshalb die erste Gerade als lineare Regression zwischen $0,1 F_{max}$ und $0,3 F_{max}$ ermittelt. Abbildung 6.3.2-1 zeigt exemplarisch an einer Kurve die gute Übereinstimmung der Geraden mit dem Anfangsbereich der Kurve. Ebenfalls abweichend zur Norm wurde die zweite Gerade als lineare Regression zwischen 20 % und 80 % der Verformung bei F_{max} ermittelt. Aus Abbildung 6.3.2-2 kann die Näherung an den Kurvenverlauf entnommen werden.

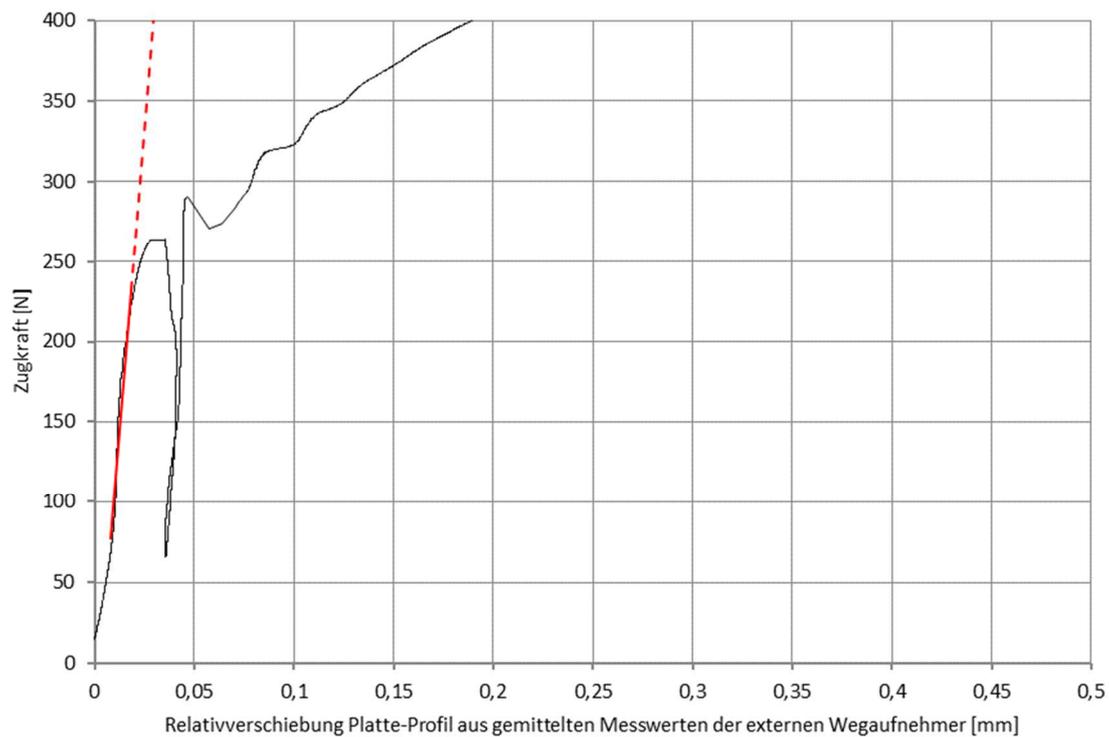


Abbildung 6.3.2-1: Bestimmung einer Näherungsgeraden $f(F)$ als lineare Regression für den Wertebereich $[0,1 F_{\max}; 0,3 F_{\max}]$ der Zugkraft F im quasi-elastischen Kurvenbereich

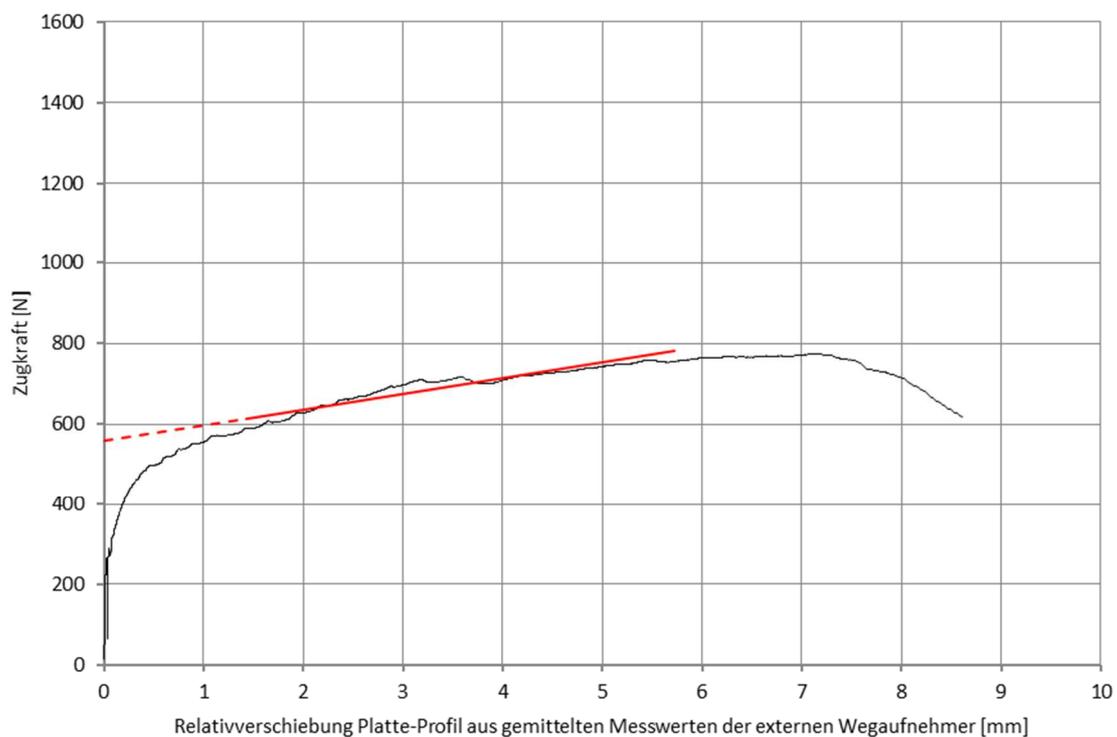


Abbildung 6.3.2-2: Bestimmung einer Näherungsgeraden $f(V)$ als lineare Regression für den Wertebereich $[0,2 V_{F_{\max}}; 0,8 V_{F_{\max}}]$ der Relativverschiebung V im elastisch-plastischen Kurvenbereich

Aus dem Schnittpunkt der beiden so erzeugten Geraden lässt sich eine repräsentative Fließverschiebung ableiten (siehe Abbildung 6.3.2-3). Die Einzelwerte der Fließverschiebung je Prüfung können der Anlage A entnommen werden. Für die statistische Auswertung wurden nur jene Ergebnisse herangezogen, bei denen sowohl die lineare Regression für die erste Gerade als auch die lineare Regression für die zweite Gerade ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 \geq 0,8$ aufweist. Dies stellt sicher, dass nur Fließverschiebungen mit guter Übereinstimmung der bilinearen Näherung zum tatsächlichen Kurvenverlauf berücksichtigt werden und somit die Aussagegenauigkeit für den Wert der mittleren Fließverschiebung je Serie erhöhen.

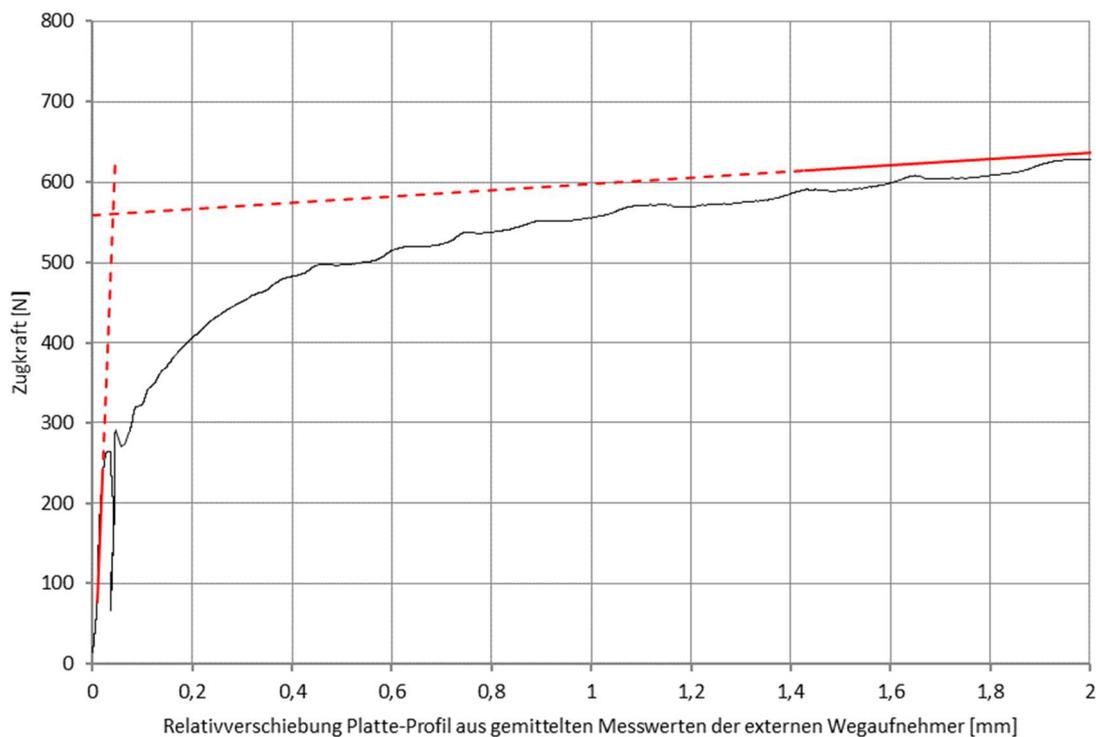


Abbildung 6.3.2-3: Bestimmung der Fließverschiebung V_y als Schnittpunkt der Geraden $f(V)$ und $f(F)$

Zur Ermittlung der Duktilität muss zunächst die Grenzverschiebung V_u bestimmt werden. Gemäß DIN EN 12512:2006-12 kommen dafür drei Fälle in Frage: Die Verschiebung beim Versagen (Fall a), die Verschiebung bei Abfall der Last auf 80 % von F_{\max} (Fall b) und eine absolute Verschiebung von 30 mm (Fall c). Anzusetzen ist der Fall, der zuerst eintritt. Bei allen Prüfungen war dies der Fall b.

Die Duktilität D ist definiert als das Verhältnis der Grenzverschiebung V_u zur Fließverschiebung V_y .

$$D = \frac{V_u}{V_y} \quad (6.4)$$

Die Einzelauswertungen der Prüfungen können der Anlage A entnommen werden. Nachfolgende Tabellen 6.3.2-1 bis 6.3.2-5 sind eine Zusammenfassung in Form der statistischen Auswertungen je Prüfserie.

Tabelle 6.3.2-1: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,23 M.-% bei 30 °C / 50 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	V_y [mm] berechnet	V_y [mm] gerundet	D [-]
\bar{x}	696,79	5,49	557,13	9,74	0,0809	0,08	136,93
s	36,52	1,11	29,08	0,65	0,0333	0,03	50,68
δ [%]	5,24	20,14	5,22	6,68	41,20	37,50	37,01

Tabelle 6.3.2-2: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	V_y [mm] berechnet	V_y [mm] gerundet	D [-]
\bar{x}	649,44	5,13	519,24	9,69	0,0502	0,05	211,33
s	46,63	1,50	37,28	0,81	0,0137	0,01	88,81
δ [%]	7,18	29,29	7,18	8,36	27,29	20,00	42,02

Tabelle 6.3.2-3: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,40 M.-% bei 20 °C / 65 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	V_y [mm] berechnet	V_y [mm] gerundet	D [-]
\bar{x}	671,55	6,15	536,97	10,11	0,0679	0,07	157,65
s	40,38	1,10	32,26	0,82	0,0193	0,02	43,65
δ [%]	6,01	17,87	6,01	8,10	28,35	28,57	27,69

Tabelle 6.3.2-4: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	V_y [mm] berechnet	V_y [mm] gerundet	D [-]
\bar{x}	519,77	5,11	415,63	9,61	0,1051	0,11	96,20
s	20,56	0,68	16,63	0,71	0,0253	0,03	23,17
δ [%]	3,96	13,24	4,00	7,35	24,03	27,27	24,08

Tabelle 6.3.2-5: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 1,34 M.-% bei 30 °C / 90 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	V_y [mm] berechnet	V_y [mm] gerundet	D [-]
\bar{x}	590,88	6,24	471,95	10,16	0,1512	0,15	71,14
s	28,53	0,67	22,73	0,55	0,0417	0,04	19,05
δ [%]	4,83	10,77	4,82	5,44	27,60	26,67	26,78

6.4 Einfluss der Klimabeanspruchung

6.4.1 Abhängigkeit des Verschiebungsmoduls vom massebezogenen Feuchtegehalt

Nachfolgend werden die Verschiebungsmoduln C (für eine rechnerische Bestimmung der effektiven Anfangssteifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds) und K (für eine rechnerische Bestimmung der effektiven Steifigkeit über den quasi-linearen Bereich) betrachtet.

Aus den Tabellen 6.3.1-1 bis 6.3.1-5 geht hervor, dass die jeweiligen Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ von den über alle Serien auswertbaren C-Moduln die geringste Streuung aufweisen. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 3,6 % und 7,2 % und zeigen gute Übereinstimmung mit dem E-Modul von Gipsplatten, deren Variationskoeffizient üblicherweise zwischen 5 % und 10 % liegt, was aus der kontinuierlichen Produktionskontrolle des Herstellers hervorgeht. Der Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$ wird nachfolgend daher bevorzugt betrachtet.

In den Abbildungen 6.4.1-1 und 6.4.1-2 sind die Mittelwerte der Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ über dem zuvor bestimmten massebezogenen Feuchtegehalt mit den Indikatoren der positiven und negativen Standardabweichung dargestellt. Gut zu erkennen ist die erwartungsgemäße Tendenz, dass der Verschiebungsmodul mit zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Von Gipsplatten ist bekannt, dass der E-Modul mit zunehmendem Feuchtegehalt geringer wird, da in den Poren des Gipsgefüges Wasser eingelagert wird, das zu einer Festigkeits- und Steifigkeitsminderung der Platte führt. Da weder die Feuchtebeanspruchung noch die Temperaturbeanspruchung (im betrachteten Temperaturbereich) Einfluss auf die Materialeigenschaften des eingesetzten Profilstahls und Schraubenstahls hat, kann die hygrothermische Abhängigkeit des C-Moduls allein der Gipsplatte zugeschrieben werden.

Diese Abhängigkeit lässt sich über lineare Regression (6.4.1-1) und exponentielle Regression (6.4.1-2) abbilden. Die beiden Funktionen liegen dabei deutlich innerhalb der Indikation der Standardabweichung. Darüber hinaus ist in beiden Fällen das Bestimmtheitsmaß sehr hoch. Mit $R^2 = 0,9334$ ist dabei das Bestimmtheitsmaß bei exponentieller Regression geringfügig höher als das der linearen Regression mit $R^2 = 0,9307$. Dennoch ist die lineare Regression plausibler, da bei sehr großem massebezogenen Feuchtegehalt der Verschiebungsmodul den Wert 0 annehmen kann. Dies entspricht einer Durchfeuchtung der Platte, die zur Zerstörung des Gipsgefüges führt. Bei exponentieller Regression konvergiert der Verschiebungsmodul lediglich gegen 0, kann diesen Wert aber nicht annehmen, was im Widerspruch zum tatsächlichen Materialverhalten steht.

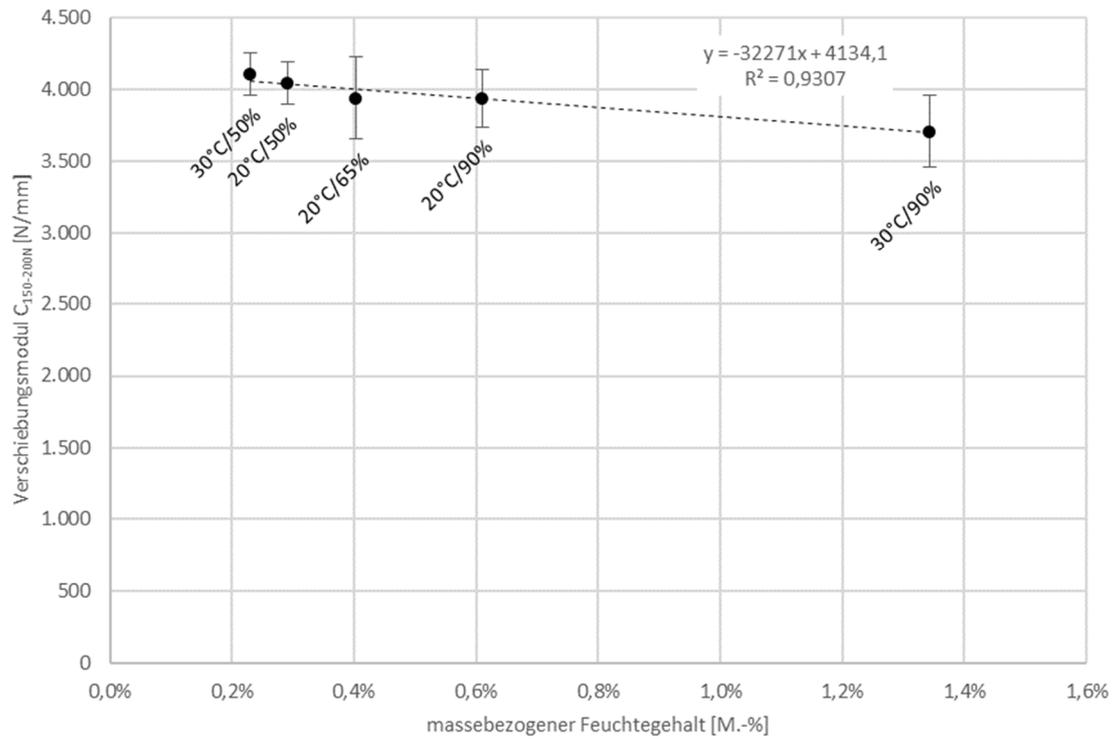


Abbildung 6.4.1-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

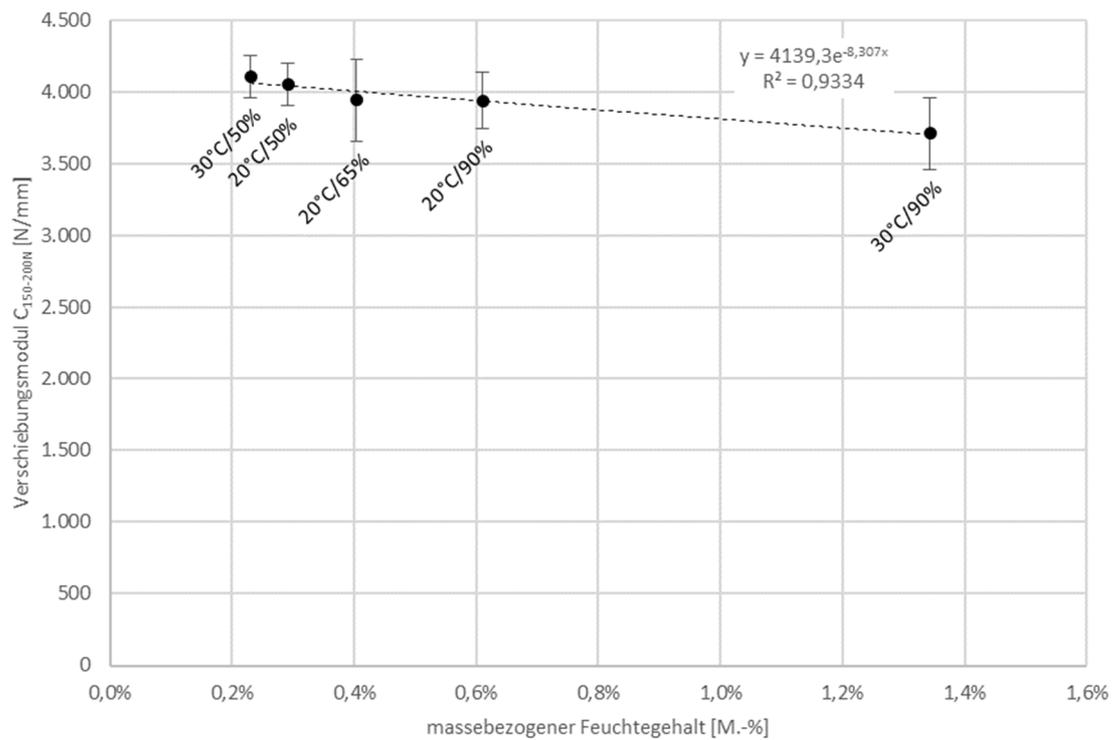


Abbildung 6.4.1-2: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie exponentielle Regression der Mittelwerte

Für den Verschiebungsmodul K wurde die analoge Herangehensweise gewählt. Aus den Tabellen 6.3.1-1 bis 6.3.1-5 geht hervor, dass die jeweiligen Verschiebungsmoduln K_i die geringere Streuung gegenüber K_s aufweisen. Die Variationskoeffizienten liegen dabei zwischen 21,7 % und 39,4 %, sind also deutlich höher als beim Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Auswertung von K ein Lastbereich betrachtet wird, in dem die Verformung bereits erste plastische Anteile enthält, die von Prüfung zu Prüfung variieren.

In den Abbildungen 6.4.1-3 und 6.4.1-4 sind die Mittelwerte der bevorzugt betrachteten Verschiebungsmoduln K_i über dem zuvor bestimmten massebezogenen Feuchtegehalt mit den Indikatoren der positiven und negativen Standardabweichung dargestellt. Auch hier ist die erwartungsgemäße Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmendem Feuchtegehalt der Verschiebungsmodul abnimmt, allerdings nicht so eindeutig wie beim Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$.

Eine lineare Regression (6.4.1-3) und eine exponentielle Regression (6.4.1-4) sind hier ebenfalls möglich. Mit Ausnahme des Wertes bei Klimastufe 20 °C / 90 % liegen die beiden Funktionen innerhalb der Indikation der Standardabweichung. Die Ausnahme bei Klimastufe 20 °C / 90 % kann auf die im Vergleich zu den anderen Klimastufen deutlich geringere Standardabweichung zurückgeführt werden. Bei vergleichbarer Standardabweichung würden beide Regressionen vollständig innerhalb der Indikation liegen.

Das Bestimmtheitsmaß ist mit $R^2 = 0,7437$ (lineare Regression) und $R^2 = 7928$ (exponentielle Regression) deutlich geringer als bei $C_{150-200N}$, kann aber noch als hinreichend genau betrachtet werden, um einen Zusammenhang zwischen massebezogenem Feuchtegehalt und K_i abzuleiten. Die etwas bessere Übereinstimmung der gemessenen Mittelwerte mit einer exponentiellen Regression gegenüber der linearen Regression zeigt sich hier in gleicher Weise. Wie zuvor beschrieben, ist von beiden Regressionsansätzen die lineare Regression plausibler und wird folglich für weitere Betrachtungen des nachgiebigen mechanischen Verbunds empfohlen.

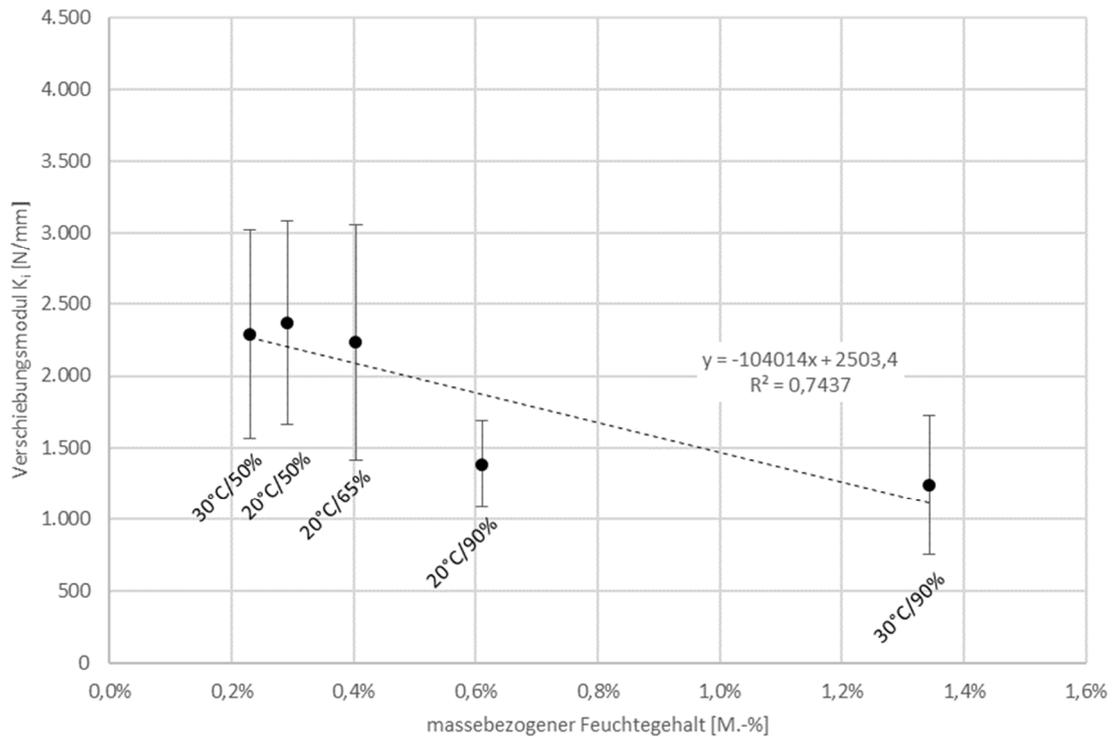


Abbildung 6.4.1-3: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln K_i der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

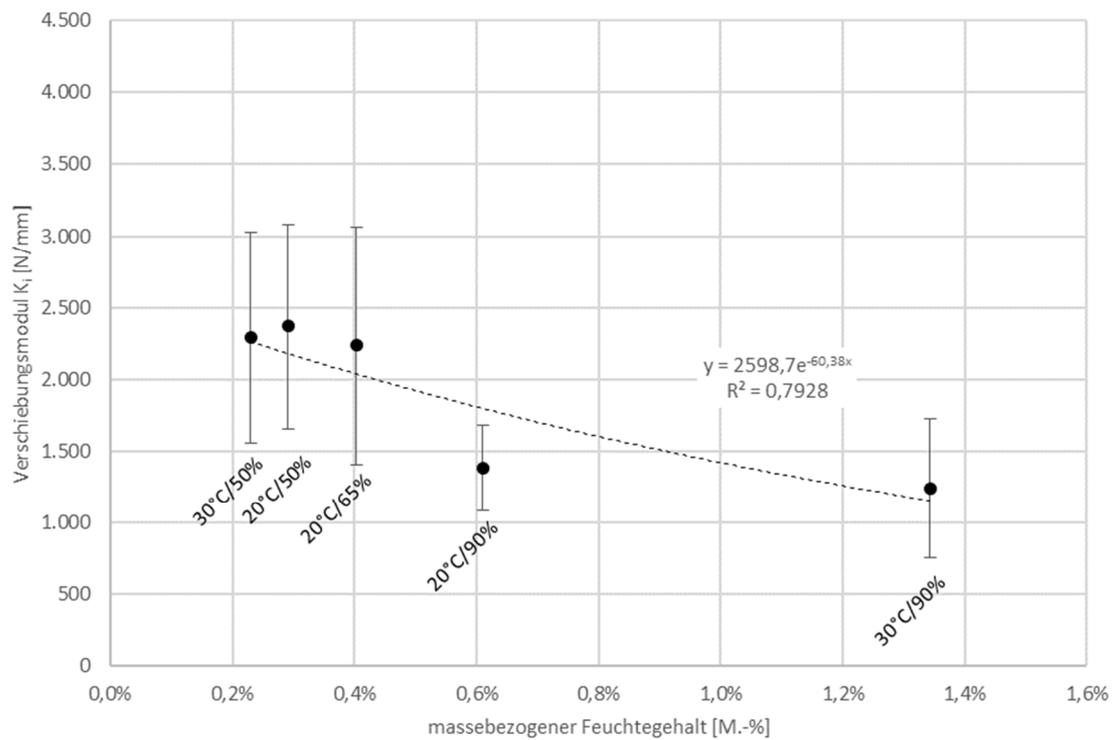


Abbildung 6.4.1-4: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Verschiebungsmoduln K_i der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie exponentielle Regression der Mittelwerte

6.4.2 Abhängigkeit der Fließverschiebung und Duktilität vom massebezogenen Feuchtegehalt

In den Abbildungen 6.4.2-1 und 6.4.2-2 sind die Mittelwerte der Fließverschiebung V_y über dem zuvor bestimmten massebezogenen Feuchtegehalt mit den Indikatoren der positiven und negativen Standardabweichung dargestellt. Gut zu erkennen ist die erwartungsgemäße Tendenz, dass die Fließverschiebung mit steigendem Feuchtegehalt zunimmt. Wie schon in Abschnitt 6.4.1 beschrieben, ist von Gipsplatten bekannt, dass der E-Modul mit zunehmendem Feuchtegehalt durch Wassereinlagerung im Gipsgefüge geringer wird. Dies führt bei gleicher Belastung zu größeren Verformungen der Platte bzw., auf den Verbund zwischen Gipsplatte, Profil und Schraube bezogen, zu größeren Fließverschiebungen. Analog zum Verschiebungsmodul haben weder die Feuchtebeanspruchung noch die Temperaturbeanspruchung (im betrachteten Temperaturbereich) Einfluss auf die Materialeigenschaften des eingesetzten Profilstahls und Schraubenstahls, weshalb die hygothermische Abhängigkeit von V_y allein der Gipsplatte zugeschrieben werden kann.

Diese Abhängigkeit lässt sich über lineare Regression abbilden. Die Funktion in Abbildung 6.4.2-1 liegt dabei mit Ausnahme der Klimastufe 20 °C / 50 % innerhalb der Indikation der Standardabweichung. Das Bestimmtheitsmaß steht mit $R^2 = 0,8477$ für eine gute Korrelation. Werden, wie in Abbildung 6.4.2-2 dargestellt, nur die Werte bei $T = 20\text{ °C}$ betrachtet, so ist eine deutliche Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes auf $R^2 = 0,9996$ zu erkennen. Dies lässt sich zum einen dadurch begründen, dass das Bestimmtheitsmaß bei Reduktion der betrachteten Wertmenge zwangsläufig zunimmt. Andererseits ist die lineare Abhängigkeit der drei Werte auffällig. Das lässt darauf schließen, dass neben dem massebezogenen Feuchtegehalt auch die Ausgleichstemperatur, die sich in der Platte einstellt, einen unmittelbaren Einfluss auf die Fließverschiebung hat.

Eine mögliche Erklärung hierfür könnten die temperaturabhängigen Eigenschaften des Kartons sein. Die Fließverschiebung liegt im Übergangsbereich zwischen quasi-elastischem und elastisch-plastischem Verhalten der Verbindung. Wie aus Abschnitt 6.2 bekannt, ist dieser Übergangsbereich durch eine beginnende Schrägstellung der Schraube mit anschließendem Durchziehen des Schraubenkopfes gekennzeichnet. Hierbei muss zunächst der Karton durchdrungen werden. Den Untersuchungen von **Huttel und Post (2015)** zufolge hat die Temperatur zusätzlich zur Materialfeuchte Einfluss auf die Erweichung einzelner Bestandteile im Papier, wodurch das Papier leichter verformbar wird. Anwendung findet dieser Effekt beim Tiefziehen von Papier, wofür die Maschinenwerkzeuge gezielt beheizt werden. Papier und Karton unterscheiden sich definitionsbedingt nur durch das Flächengewicht, weshalb die Aussagen auf Karton übertragbar sind. Dementsprechend könnte sich der Karton bei höheren Temperaturen auch nachgiebiger in Bezug auf Schrägstellung und Kopfdurchzug der Schraube verhalten, was zu größeren Verschiebungen führen würde. Eine isotherme Betrachtung ist demzufolge sinnvoll und liefert aussagekräftige Beziehungen zwischen massebezogenem Feuchtegehalt und Fließverschiebung.

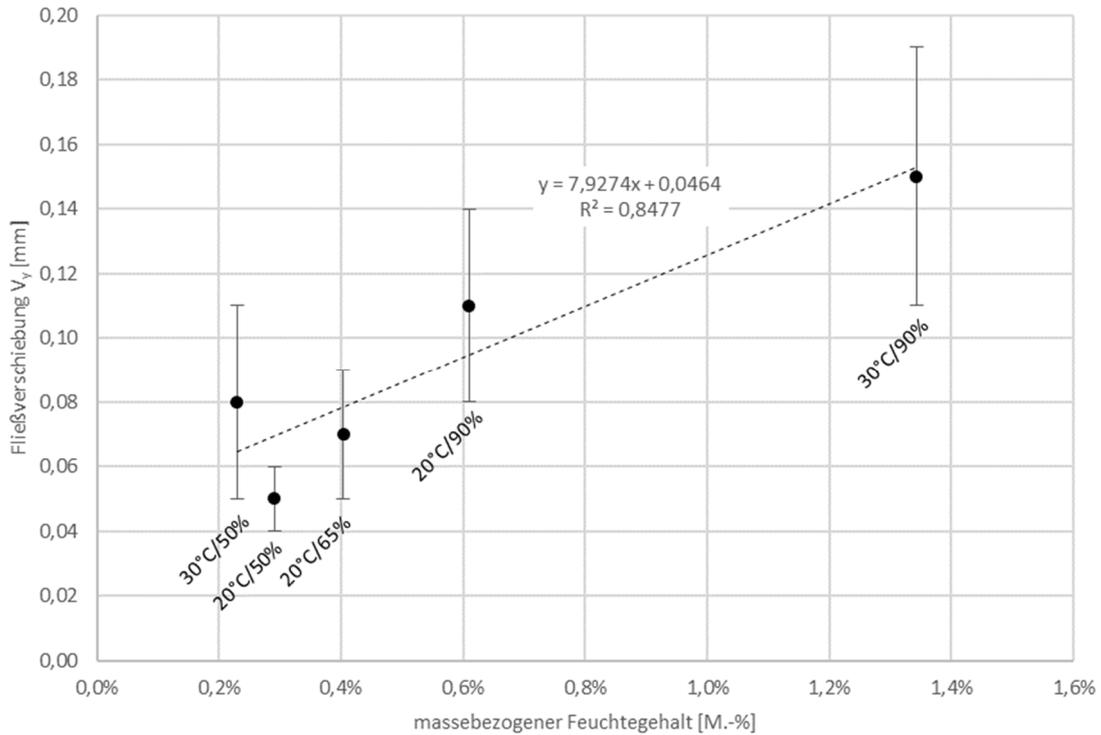


Abbildung 6.4.2-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Fließverschiebung V_y der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

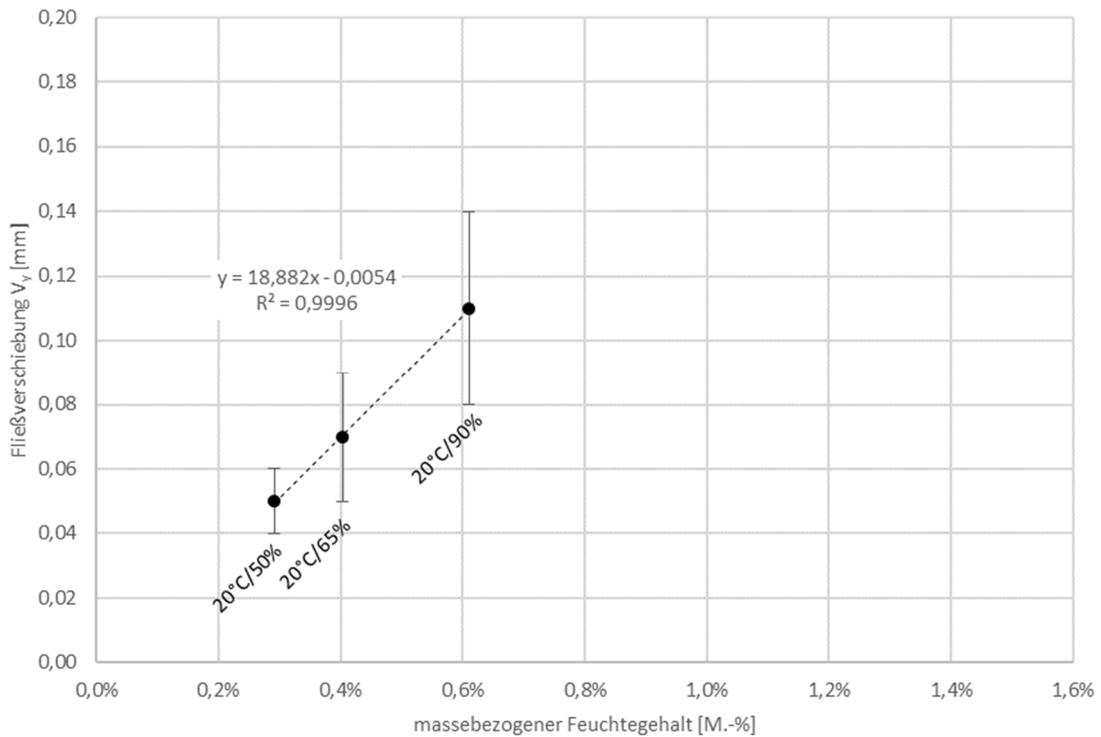


Abbildung 6.4.2-2: Isotherme Betrachtung (20 °C) der Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Fließverschiebung V_y der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

Für die Duktilität D wurde die analoge Herangehensweise gewählt. In den Abbildungen 6.4.2-3 und 6.4.2-4 sind die Mittelwerte über dem zuvor bestimmten massebezogenen Feuchtegehalt mit den Indikatoren der positiven und negativen Standardabweichung dargestellt. Hier ist die Tendenz erkennbar, dass die Duktilität mit zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Dies liegt darin begründet, dass die Duktilität das Verhältnis von Grenzverschiebung V_u zu Fließverschiebung V_y darstellt. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fließverschiebung mit zunehmendem massebezogenen Feuchtegehalt prozentual deutlich stärker zunimmt als die Grenzverschiebung, was bei Bildung des Quotienten zu abnehmenden Duktilitätswerten führt. Aus dem deutlich abfallenden Regressionsverlauf in Abbildung 6.4.2-3 kann abgeleitet werden, dass der massebezogene Feuchtegehalt eine signifikant höhere Auswirkung auf das quasi-elastische Verhalten als auf das quasi-plastische Verhalten des untersuchten Verbunds hat.

Da in die Bestimmung der Duktilität, wie bereits beschrieben, die Fließverschiebung eingeht (siehe Gleichung 6.4), spiegeln sich auch die temperaturabhängigen Effekte wider, die bereits von der Fließverschiebung bekannt sind. Das Bestimmtheitsmaß steigt bei Betrachtung der Werte bei $T = 20^\circ \text{C}$ auf $R^2 = 0,9831$ gegenüber dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,6003$ bei Betrachtung aller Werte.

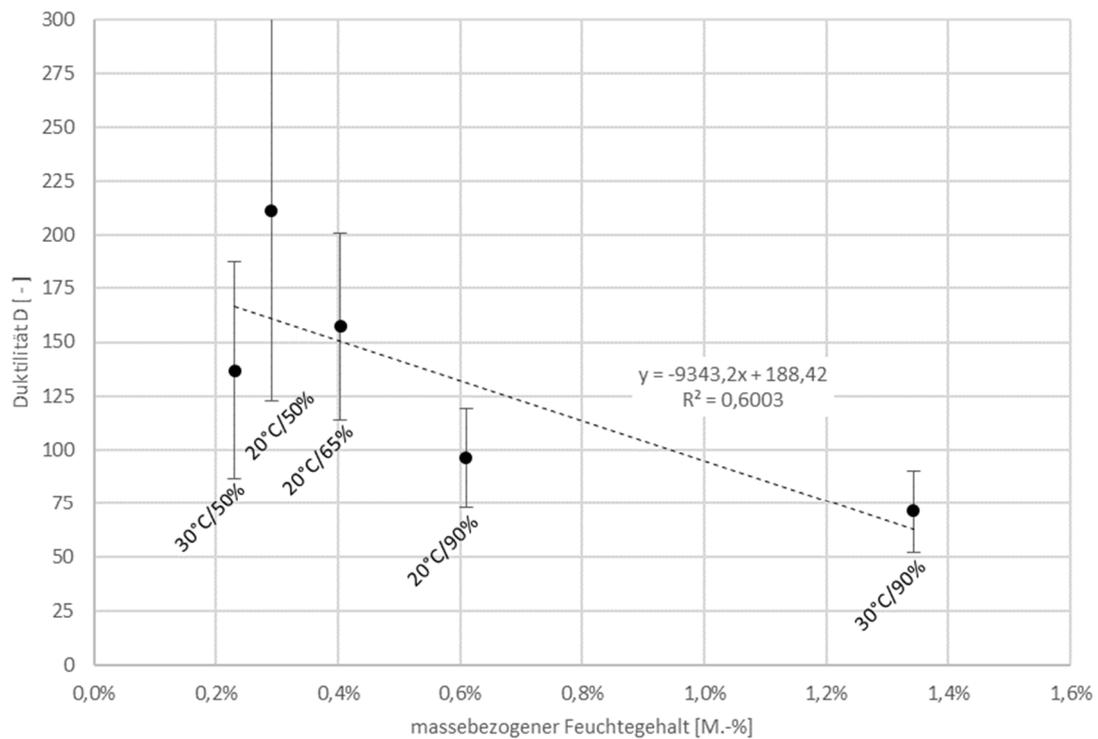


Abbildung 6.4.2-3: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Duktilität D der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

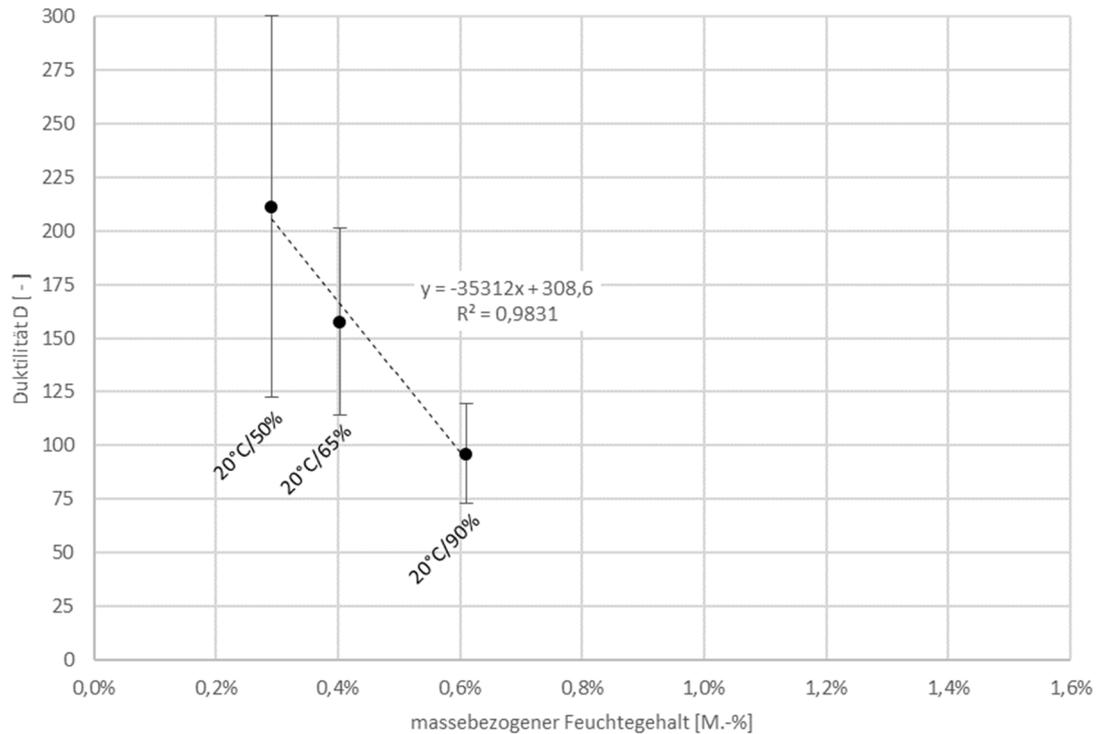


Abbildung 6.4.2-4: Isotherme Betrachtung (20 °C) der Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Duktilität D der Zug-Scherproben in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt sowie lineare Regression der Mittelwerte

7 Untersuchung der einschnittigen Verbindung unter zyklischer Belastung

7.1 Untersuchungsparameter

7.1.1 Aufbau der Prüfkörper

Der Aufbau der Probekörper erfolgte analog zu Abschnitt 6.1.1, wie bereits für die quasi monoton statischen Prüfungen beschrieben. Eine Anpassung des Aufbaus für zyklische Prüfungen ist entsprechend den Vorüberlegungen aus Abschnitt 5.2.1 nicht erforderlich, da Zug- und Druckkräfte in gleicher Weise in den Probekörper eingeleitet werden können und aufgrund des gleichen äußeren Hebelarms für beide Belastungsfälle betragsmäßig das gleiche Moment erzeugen.

7.1.2 Festlegung der Klimatisierung

Zur Betrachtung hygriischer Einflüsse auf die Größe der Festigkeitsminderung, der Energiedissipation und des Dämpfungsverhältnisses wurden zwei unterschiedliche klimatische Bedingungen gewählt, die durch Variation der relativen Luftfeuchte und des sich daraus ergebenden massebezogenen Feuchtegehalts der Gipsplatte entsprechende Rückschlüsse zulassen. Die Beschränkung auf zwei Klimata liegt darin begründet, dass die zyklischen gegenüber den quasi-statischen Prüfungen einen deutlich höheren Prüfaufwand darstellen. Da sich gemäß Abschnitt 6.4.2 eine isotherme Betrachtung anbietet, wurden beide Klimastufen auf Basis derselben Temperatur gewählt. Hierfür wurde die Temperatur $T = 20\text{ °C}$ als Referenz für typische Innenraumtemperaturen vorgesehen. Für die zuvor bei diesem Temperaturniveau betrachteten relativen Luftfeuchten von 50 %, 65 % und 90 % stellen folgende Klimastufen die Grenzfallbetrachtung dar (siehe Tabelle 6.1.2-1):

- 20 °C / 50 % in Anlehnung an DIN 4108-2:2013-02, anzunehmendes Innenraumklima für Wohnräume
- 20 °C / 90 % gewählte zusätzliche Klimastufe zur Betrachtung des Luftfeuchteinflusses bei $T = 20\text{ °C}$ Temperatur

Die Mittelwerte des massebezogenen Feuchtegehalts für diese beiden Klimata entsprechen den Angaben aus Tabelle 6.1.2-2:

20 °C / 50 % 0,23 M.-%

20 °C / 90 % 0,61 M.-%

Vor der zyklischen Prüfung der einschnittigen Verbindungen wurde das dafür vorgesehene Probenmaterial unter den jeweiligen Klimabedingungen bis zum Erreichen der Massekonstanz klimatisiert. Für die Prüfung wurden die Proben jeweils einzeln dem Klimaschrank entnommen, umgehend eingebaut und geprüft. Da sich die Einzelprüfung aufgrund der Vielzahl der Zyklen über einen Zeitraum von bis zu 45 Minuten erstrecken kann (abhängig von der jeweiligen zugrunde liegenden Fließverschiebung), ist nicht auszuschließen, dass es während der Prüfung zur Veränderung des massebezogenen Feuchtegehalts der Plattenproben unter Prüfhallenklimabedingungen kommen kann. Deshalb wurde eine Einhausung für die Prüfmaschine angefertigt (siehe Abbildung 7.1.2-1), in der die Prüfkörper geprüft wurden. Die Einhausung besitzt zwei Öffnungen an der Rückseite, eine Luftzuführung und einen Luftauslass. Ein an die Öffnungen angeschlossenes Klimaaggregat erzeugt eine kontinuierliche Luftströmung mit der vorgesehenen Temperatur und relativen Luftfeuchte. Über integrierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren kann kontinuierlich kontrolliert werden, dass das vorgesehene Klima gehalten wird.



Abbildung 7.1.2-1: Frontansicht des Prüfkörpers in der klimatisierten Einhausung

7.1.3 Untersuchungsumfang

Aus den gewählten Klimastufen ergeben sich zwei Prüfserien. Um adäquate Aussagen über Mittelwerte und Standardabweichungen der Prüfergebnisse treffen zu können, wurde der Mindestumfang je Prüfserie auf zehn auswertbare Stichproben festgelegt. Da es beim Einbau der Prüfkörper in die Prüfvorrichtung zu Beschädigungen kommen kann, wurde der Stichprobenumfang auf 12 erhöht. Der Fall einer Beschädigung trat nicht ein. Somit konnten beide Serien mit einem Stichprobenumfang von 12 statistisch ausgewertet werden.

7.1.4 Prüfablauf

Die Prüfung wurde in Anlehnung an DIN EN 12512:2006-12 durchgeführt. Als Eingangssparameter für die nachfolgend beschriebenen Zyklen diente die in Abschnitt 6.3.2 ermittelte Fließverschiebung V_y für die Klimastufen $20\text{ °C} / 50\%$ und $20\text{ °C} / 90\%$. Für die Klimastufe $20\text{ °C} / 50\%$ wurde die geschätzte Fließverschiebung der Proben $V_{y,est}$ mit $0,06\text{ mm}$ gemäß Vorauswertung statt $0,05\text{ mm}$ gemäß nachträglicher, präziserer Auswertung der quasi-statischen Prüfungen angenommen und analog für die Klimastufe $20\text{ °C} / 90\%$ mit $0,10\text{ mm}$ statt $0,11\text{ mm}$. Da diese Abweichung von $\pm 0,01\text{ mm}$ in beiden Fällen im Bereich der Standardabweichung liegt, kann die jeweils geschätzte Fließverschiebung als hinreichend repräsentativ gewertet werden.

Das Verfahren der zyklischen Prüfung sieht zunächst zwei initiale Zyklen vor, bei denen 25% bzw. 50% von $V_{y,est}$ als Verschiebung aufgebracht werden. Dabei wird der jeweils erste Halbzyklus durch kontinuierliche Belastung und anschließende Entlastung mit einer Druckbeanspruchung erzeugt. Beim jeweils zweiten Halbzyklus geschieht dies analog, jedoch durch Aufbringen einer Zugbeanspruchung.

Nach den initialen Zyklen folgen die Zyklusgruppen aus jeweils drei gleichen Zyklen mit derselben Verschiebung. Die Verschiebung wird dabei von Gruppe zu Gruppe gesteigert und folgt dabei dem Schema:

$$0,75 V_{y,est} - V_{y,est} - 2 V_{y,est} - 4 V_{y,est} - 6 V_{y,est} - 8 V_{y,est} - 10 V_{y,est} - \dots$$

Das Prüfende wurde mit Abschluss der 17. Zyklusgruppe definiert, was inklusive der initialen Zyklen einer Gesamtzahl von 53 Zyklen entspricht. Das detaillierte Zyklusprotokoll kann Tabelle B.1-1 in der Anlage B.1 entnommen werden.

Die Prüfungen wurden weggesteuert mithilfe einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von $0,02\text{ mm/s}$ wurde die Untergrenze des nach DIN EN 12512:2006-12 vorgegebenen Bereichs gewählt. Die kontinuierliche Verformungsmessung erfolgte dabei über zwei an den Außenkanten der Platte positionierte induktive Wegaufnehmer (siehe Abbildung 6.1.1-1), die zugehörige Last wurde mittels Kraftmessdose erfasst. Bei dem System aus Kraftmessdose (Kraftsensor), Wegaufnehmer (Wegsensoren) und Universalprüfmaschine handelt es sich um ein von der Zwick Roell GmbH & Co. KG abgestimmtes Messsystem, das regelmäßig kalibriert wird.

7.2 Untersuchungsergebnisse

Die zyklischen Last-Verformungskurven (Hysteresen) beider Prüfserien können der Anlage B.2 entnommen werden. Auf eine explizite Zusammenstellung der Last-Verformungswerte je Laststufe wird an dieser Stelle verzichtet, da alle Messwerte kontinuierlich aufgezeichnet wurden und eine entsprechende Auswertung der relevanten Kenngrößen direkt über die Prüfsoftware stattfand. Eine detaillierte Betrachtung dieser Kenngrößen erfolgt in Abschnitt 7.3.

Die exemplarische Gegenüberstellung von Zyklen der jeweils ersten Probe der beiden Klimastufen 20 °C / 50 % und 20 °C / 90 % (siehe Abbildung 7.2-1) verdeutlicht das unterschiedliche Last-Verformungsverhalten der nachgiebigen mechanischen Verbindung. Aufgrund der unterschiedlichen Werte für die geschätzte Fließverformung nimmt die absolute Verschiebung beim Klima 20 °C / 90 % im Vergleich zum Klima 20 °C / 50 % stärker zu. Ebenfalls erwartungsgemäß ist, dass die zugehörige Zug- und Druckkraft bei gleicher Verschiebung für das Klima mit der höheren relativen Luftfeuchte niedriger ausfällt. Dabei liegt der Verhältnisfaktor der Kraftniveaus der beiden Klimata bei rund 1,5 und ist damit höher als der Verhältnisfaktor für F_{\max} (Faktor 1,25) aus den quasi monoton statischen Versuchen. Dies kann auf eine stärkere Gefügeschädigung im Gips bei den Proben mit der höheren massebezogenen Feuchte bedingt durch die zyklische Belastung zurückgeführt werden.

Auffällig ist, dass sich trotz des unterschiedlichen Last-Verformungsverhaltens ein ähnlicher Flächeninhalt der Hüllflächen einstellt. Der Flächeninhalt der Hüllfläche ist ein Maß für die Energiedissipation des Prüfkörpers.

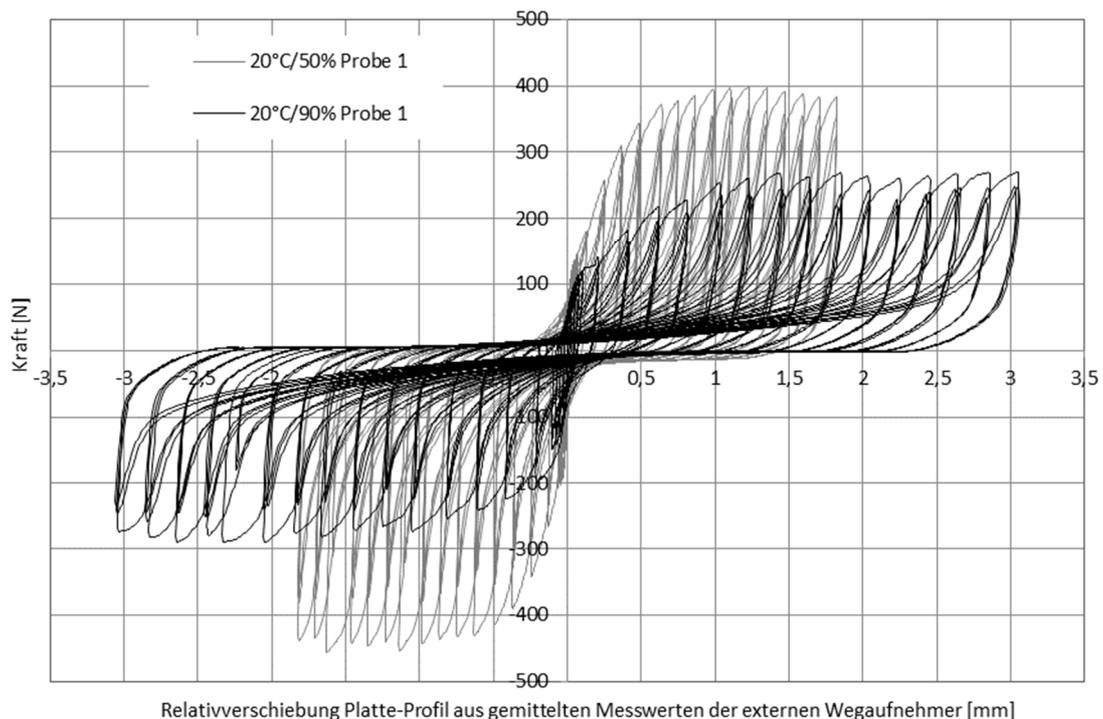


Abbildung 7.2-1: Exemplarische Gegenüberstellung von Zyklen der jeweils ersten Probe der beiden Klimastufen 20 °C / 50 % und 20 °C / 90 %

7.3 Auswertung

7.3.1 Bestimmung der Festigkeitsminderung

Die Festigkeitsminderung $|\Delta F|$ wird am Ende jeder Zyklusgruppe ermittelt. Aufgrund der beiden nicht zu berücksichtigenden initialen Zyklen besteht die erste Zyklusgruppe aus den Zyklen 3 – 4 – 5 und die erste Festigkeitsminderung wird somit zum Abschluss des 5. Zyklus bestimmt. Die Festigkeitsminderung berechnet sich durch Subtraktion des Betrages der aufbrachten Kraft bis zum Erreichen der gemäß Protokoll vorgesehenen Verschiebung des dritten Zyklus von dem des ersten Zyklus der Gruppe. Das Vorgehen ist für jede Zyklusgruppe bis zum Erreichen des Prüfungsendes, das im vorliegenden Fall mit der Zyklusgruppe 51 – 52 – 53 definiert wurde, zu wiederholen.

In Abbildung 7.3.1-1 ist die Festigkeitsminderung $|\Delta F|$ für das Ende jeder Zyklusgruppe exemplarisch für die Probe 1 im Halbzyklus Druck bei Klimastufe 20 °C / 50 % dargestellt. Der Kurvenverlauf lässt eine bilineare Abhängigkeit vermuten, die sich mittels bilinearer Hüllkurve visualisieren lässt. Der ansteigende Teil des bilinearen Verlaufes ist so zu interpretieren, dass die Gefügeschädigung im Gips zwischen dem ersten und dem dritten Zyklus der Gruppe bei kleinen Verschiebungen zunächst nicht wesentlich zunimmt. Je größere Verschiebungsniveaus während der Prüfung aufgebracht werden, desto stärkere Gefügeschädigungen entstehen zwischen dem ersten und dritten Zyklus einer Gruppe gleicher Verschiebung. Die Grenze ist bei Zyklus 23 erreicht. Ab hier stellt sich eine gleichbleibende Gefügeschädigung im Gips zwischen dem ersten und dem dritten Zyklus der Gruppe ein.

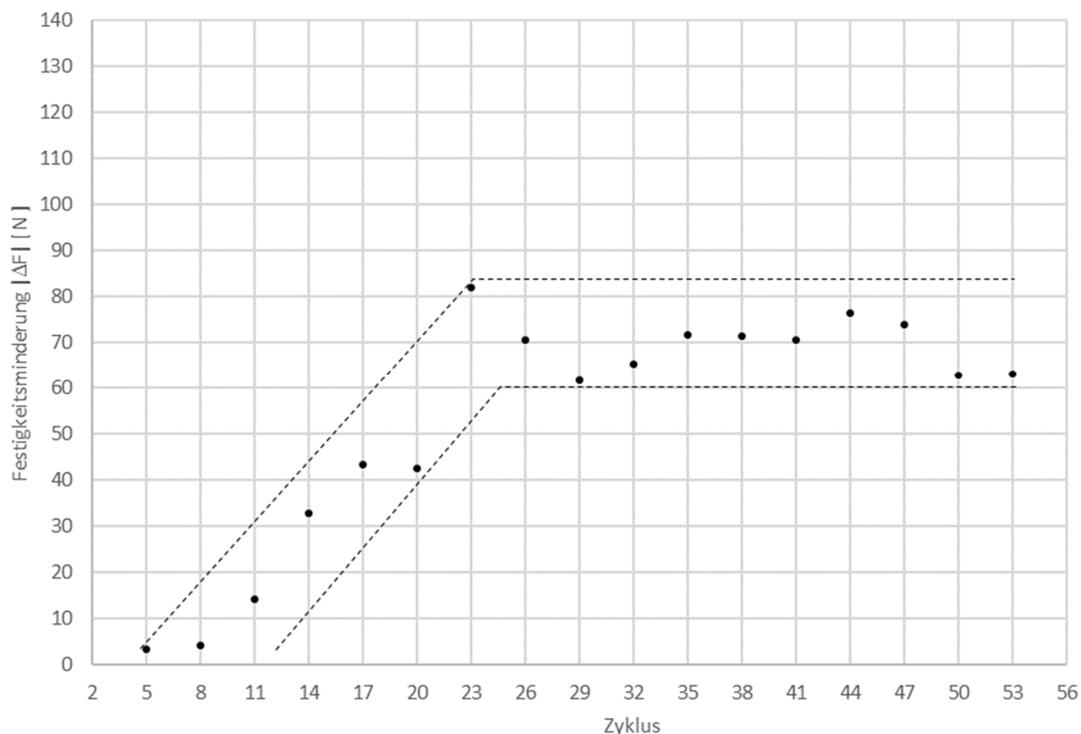


Abbildung 7.3.1-1: Exemplarische Darstellung der Festigkeitsminderung $|\Delta F|$ der Probe 1 im Halbzyklus Druck bei Klimastufe 20 °C / 50 % mit bilinearer Hüllkurve

Für einen aussagekräftigen direkten Vergleich der Festigkeitsminderung zwischen den beiden Prüfserien der unterschiedlichen Klimata wird – zusätzlich zum absoluten Wert der Festigkeitsminderung – der relative Wert der Festigkeitsminderung bestimmt, also die prozentuale Abnahme der Festigkeit zwischen dem jeweils ersten und dritten Zyklus einer Gruppe. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass bei gleicher Zyklusnummer eine unterschiedliche Verschiebung und damit auch eine unterschiedliche Kraft auf die Proben der Prüfserie bei 20 °C / 50 % und die Proben der Prüfserie bei 20 °C / 90 % aufgebracht wird.

Die Einzelauswertungen der Prüfungen können der Anlage B.2 entnommen werden. Nachfolgende Tabelle 7.3.1-1 zeigt eine Zusammenfassung in Form der statistischen Auswertungen je Prüfserie und je Halbzyklus.

Tabelle 7.3.1-1: Absolute und relative Festigkeitsminderung je Halbzyklus der Scherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % und Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

	Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)							
	Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %				Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %			
	Halbzyklus Druckbereich		Halbzyklus Zugbereich		Halbzyklus Druckbereich		Halbzyklus Zugbereich	
	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]
\bar{x}	78,59	20,73	95,32	27,55	45,57	20,05	54,69	25,49
s	16,87	3,03	32,3	5,51	7,11	2,73	11,4	2,72
δ [%]	21,47	14,62	33,89	20,00	15,6	13,62	20,84	10,67

7.3.2 Bestimmung der Energiedissipation, der verfügbaren potentiellen Energie und des Dämpfungsverhältnisses

Die Energiedissipation repräsentiert die verteilte Energie eines Halbzyklus. Dies entspricht der durch den jeweiligen Hystereseabschnitt umschriebenen Fläche. Sie ist ein Maß für die Umwandlung von Bewegungsenergie, die in ein dynamisches System eingetragen wird, in eine andere Energieform (z. B. Wärme). Diese Umwandlung findet beim nachgiebigen mechanischen Verbund vor allem durch plastische Verformung der Komponenten und durch Reibung zwischen den Komponenten statt. Die verfügbare potentielle Energie entspricht der idealisierten Teilfläche, die sich aus der maximalen Verschiebung je Halbzyklus und der zugehörigen maximalen Kraft ergibt.

Abbildung 7.3.2-1 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Energiedissipation E_d und der verfügbaren potentiellen Energie E_p über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %. Dabei scheint die Energiedissipation gegen einen Grenzwert zu konvergieren. Es kann also ab einer bestimmten Größe der Verschiebung durch weitere Vergrößerung keine zusätzliche Energie im System dissipiert werden. Im Vergleich dazu steigt die

verfügbare potentielle Energie definitionsbedingt mit zunehmender Verschiebung kontinuierlich an, solange es nicht zu einem signifikanten Lastabfall kommt.

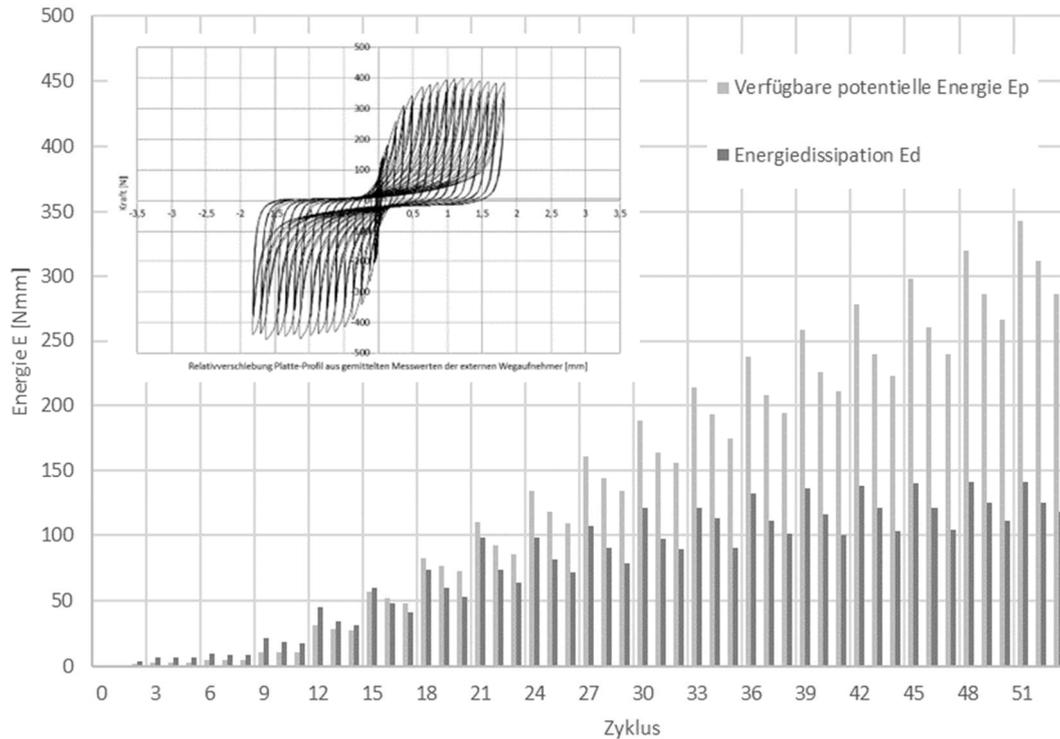


Abbildung 7.3.2-1: Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Energiedissipation E_d und der verfügbaren potentiellen Energie E_p über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %

Das äquivalente Dämpfungsverhältnis ν_{eq} steht für die hysterese-dämpfenden Eigenschaften des nachgiebigen mechanischen Verbunds. Es bildet das Verhältnis von Energiedissipation E_d zu verfügbarer potentieller Energie E_p ab und wird bestimmt mit

$$\nu_{eq} = \frac{E_d}{2 \cdot \pi \cdot E_p} \quad (7.1)$$

Durch die zuvor beschriebene Entwicklung der Energiedissipation, die sich degressiv verhält und gegen einen Grenzwert konvergiert, während die verfügbare potentielle Energie stetig wächst, nimmt das äquivalente Dämpfungsverhältnis entsprechend ab und konvergiert ebenfalls gegen einen Grenzwert. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 7.3.2-2, diese zeigt exemplarisch die Entwicklung des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses ν_{eq} über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %.

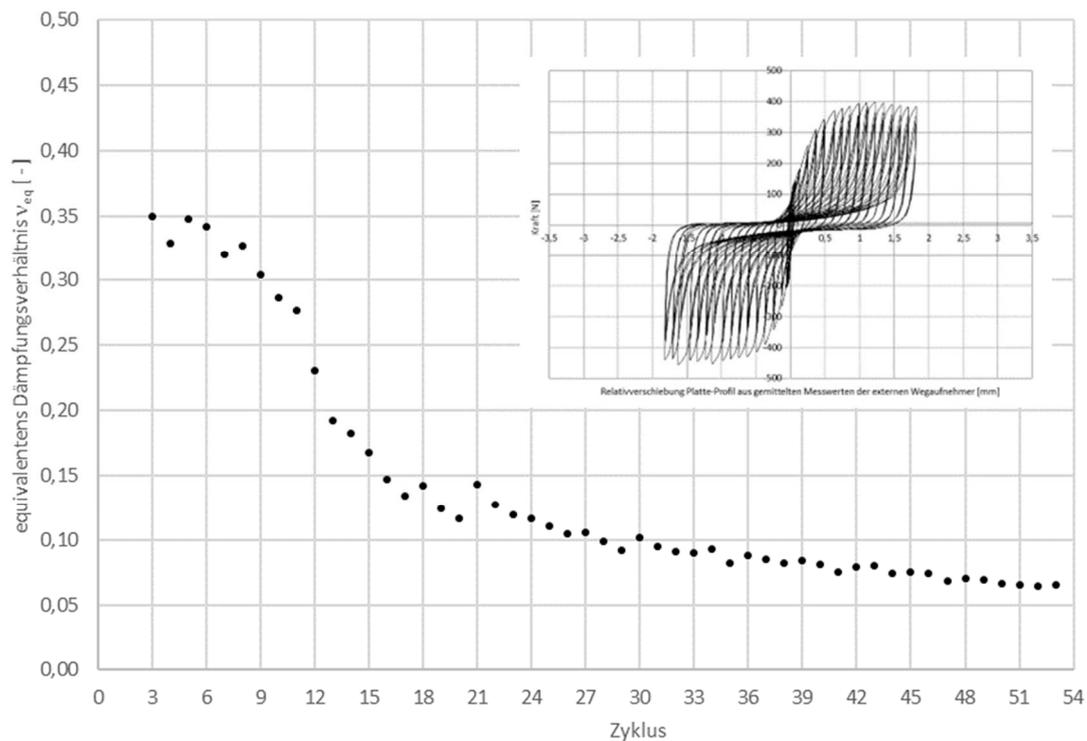


Abbildung 7.3.2-2: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses v_{eq} über die Prüfzyklen der Probe 1 bei Klimastufe 20 °C / 50 %

Die Einzelauswertungen der Prüfungen können der Anlage B.3 entnommen werden. Nachfolgende Tabellen sind eine Zusammenfassung in Form der statistischen Auswertungen je Prüferie und je Halbzyklus für die drei Größen Energiedissipation, verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 sowie zum Prüfende (Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53).

Tabelle 7.3.2-1: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 % $V_y = 0,06 \text{ mm}$	zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
\bar{x}	65,52	90,7	0,117	59,47	82,69	0,115
s	5,27	12,05	0,017	9,95	11,5	0,013
δ [%]	8,04	13,29	14,53	16,73	13,91	11,3

Tabelle 7.3.2-2: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 % $V_y = 0,06 \text{ mm}$	Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
\bar{x}	130,21	289,22	0,072	120,9	265,51	0,073
s	13,03	29,01	0,011	11,05	27,41	0,008
δ [%]	10,01	10,03	15,28	9,14	10,32	10,96

Tabelle 7.3.2-3: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 % $V_y = 0,1 \text{ mm}$	zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
\bar{x}	66,75	92,08	0,115	59,09	77,38	0,123
s	10,86	6,83	0,016	10,64	8,62	0,025
δ [%]	16,27	7,42	13,91	18,01	11,14	20,33

Tabelle 7.3.2-4: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 % $V_y = 0,1 \text{ mm}$	Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
\bar{x}	125,46	281,26	0,071	119,23	247,87	0,077
s	30,03	37,28	0,013	28,37	46,8	0,013
δ [%]	23,94	13,25	18,31	23,79	18,88	16,88

7.4 Einfluss der Klimabeanspruchung

7.4.1 Abhängigkeit der Festigkeitsminderung von der Klimabeanspruchung

Der Abbildung 7.4.1-1 können die Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der prozentualen Festigkeitsminderung $|\Delta F|$ der Zug-Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung entnommen werden. Aus der direkten Gegenüberstellung können zwei Aussagen abgeleitet werden.

Zum einen ist die prozentuale Festigkeitsminderung innerhalb einer Prüfserie unter Druck- und Zugbeanspruchung unterschiedlich. Die geringere Festigkeitsminderung unter Druckbeanspruchung lässt darauf schließen, dass Reibungseffekte unter Druckbeanspruchung einen größeren Einfluss haben als unter Zugbeanspruchung. Da davon auszugehen ist, dass sich die Reibung zwischen dem ersten und dritten Zyklus einer Gruppe nicht verändert, wird die Festigkeitsminderung bei größerem Reibungsanteil entsprechend geringer ausfallen. Die idealisierte Kräftepaarbildung gemäß Abbildung 5.2.1-2 stellt sich somit nicht ein. Es ist anzunehmen, dass der Prüfkörper unter Druckbeanspruchung leicht ‚verkantet‘ und durch den dabei entstehenden Anpressdruck der Platte an das Profil stärkere Reibungseffekte auftreten. Für die weiteren vergleichenden Betrachtungen bietet sich somit der Halbzyklus Zug an.

Zum anderen zeigt sich bei Gegenüberstellung gleicher Halbzyklen bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen eine prozentuale Festigkeitsminderung auf vergleichbarem Niveau. Daraus kann abgeleitet werden, dass die relative Luftfeuchte und die daraus resultierende massebezogene Feuchte der Platten einen vernachlässigbaren Einfluss hat.

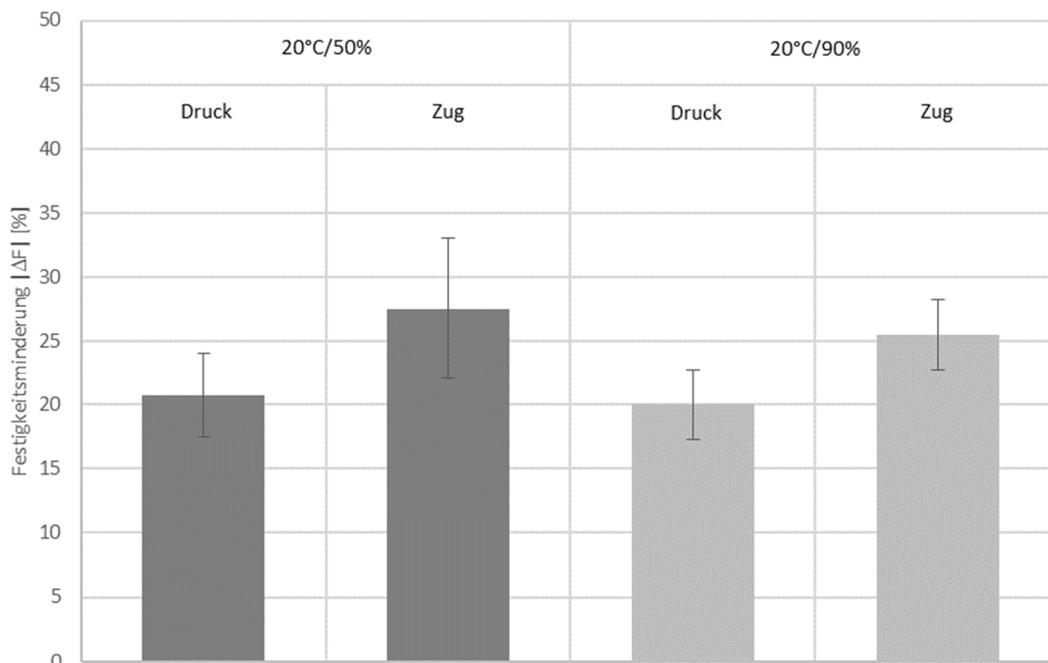


Abbildung 7.4.1-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der prozentualen Festigkeitsminderung $|\Delta F|$ je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung

7.4.2 Abhängigkeit der Energiedissipation und des Dämpfungsverhältnisses von der Klimabeanspruchung

Wie in Abschnitt 7.3.1 beschrieben, wird das Ende des ansteigenden linearen Teils der Festigkeitsminderung bei Zyklus 23 erreicht. Ab hier stellt sich eine gleichbleibende Gefügeschädigung im Gips zwischen dem ersten und dem dritten Zyklus der Gruppe ein. Dieser spezielle Grenzfall wird nachfolgend als zusätzliche Zwischenstufe für die Bewertung der Energiedissipation und des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses herangezogen.

Abbildung 7.4.2-1 stellt die Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Energiedissipation E_d je Halbzyklus der Scherproben bei Klima 20 °C / 90 % und Klima 20 °C / 50 % gegenüber. Dabei zeigt sich, dass sowohl bei der betrachteten Zwischenstufe (zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23) als auch bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53) der Effekt unterschiedlichen Verhaltens unter Druck- und Zugbeanspruchung deutlich abgemildert ist. Die Energiedissipation liegt in der Gegenüberstellung der Halbzyklen innerhalb einer Prüfserie auf vergleichbarem Niveau. Im direkten Vergleich der beiden Klimastufen sind die Ergebnisse je Halbzyklus bezogen auf die jeweilige Zyklengruppe sogar nahezu identisch. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die klimatischen Bedingungen in Bezug auf die untersuchten Konstellationen keinen Einfluss auf die Energiedissipation der Verbindung haben.

Die Zunahme der Energiedissipation von Zyklusgruppe 21 – 22 – 23 zu Zyklusgruppe 51 – 52 – 53 ergibt sich folgerichtig durch die größere Verschiebung und größere Last, was zu einer größeren umschriebenen Fläche des betrachteten Hystereseabschnitts führt.

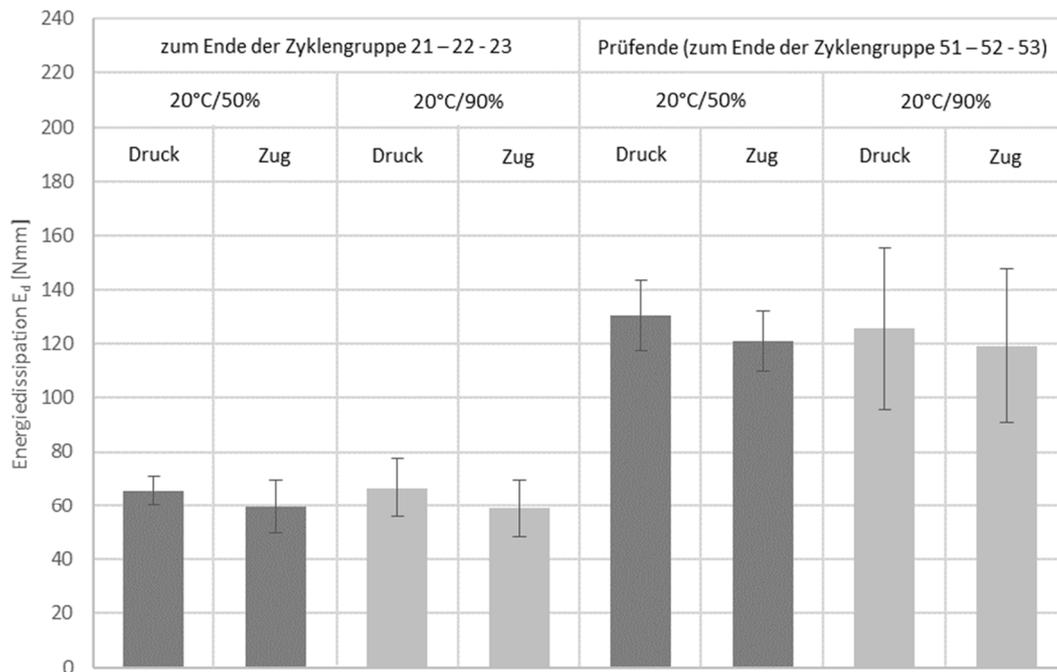


Abbildung 7.4.2-1: Mittelwerte mit Indikation der Standardabweichung der Energiedissipation E_d je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 und bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

Ähnlich verhält es sich beim äquivalenten Dämpfungsverhältnis. Der Vergleich der Halbzyklen Druck und Zug innerhalb einer Prüferie sowie der Vergleich der Klimastufen je Prüferie liefert ebenfalls geringe Unterschiede. Dies wird in Abbildung 7.4.2-2 verdeutlicht. Dort sind die Mittelwerte mit Indikation des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses v_{eq} je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 und bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53) dargestellt.

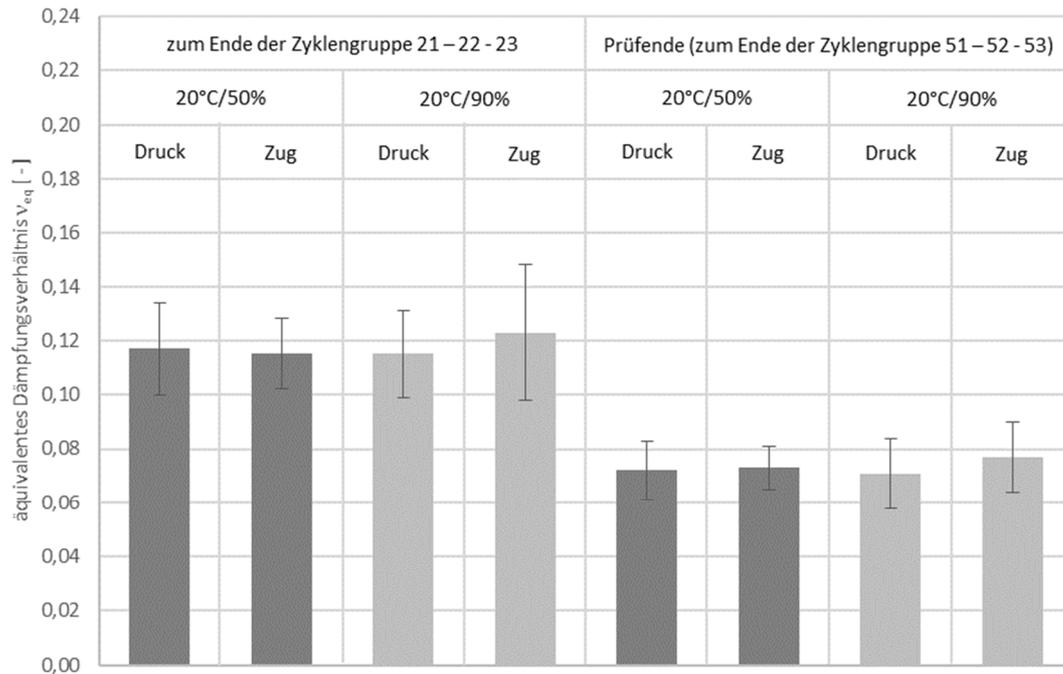


Abbildung 7.4.2-2: Mittelwerte mit Indikation des äquivalenten Dämpfungsverhältnisses v_{eq} je Halbzyklus der Scherproben in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23 und bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

8 Untersuchung des Bauteilverhaltens unter statischer Belastung

8.1 Untersuchungsparameter

8.1.1 Aufbau des Prüfkörpers

Als Grundlage für den konstruktiven Aufbau des Prüfkörpers Wand wurde die Anordnung der drei Komponenten Platte, Profil und Schraube entsprechend den Kleinteilversuchen herangezogen. Dies diente der optimalen Übertragbarkeit des mechanischen Verhaltens der einzelnen Verbindung auf die entsprechende Mehrfachverbindung, die das Bauteil aufweist. Hierfür wurde eine einzelne 12,5 mm-GKF-Platte einseitig auf Stahlprofile des Typs CW50x50x06 mit Schnellbauschrauben des Typs TN 3,5x25 befestigt. In dieser Form einseitig beplankte Wände werden in der Praxis als Schachtwände oder freistehende Vorsatzschalen verwendet. Wird die Beplankung dabei aus mehreren horizontal und vertikal angeordneten Platten ausgeführt, so ergeben sich Fugen, die verspachtelt werden müssen. Diese Plattenfugen können, abhängig von ihrer Anzahl und Lage, einen Effekt auf die Steifigkeit der Wand haben. Um diesen Effekt zu eliminieren, wurde für den Prüfaufbau eine ganze Platte und somit eine fugenfreie Beplankung gewählt.

Die maximal verfügbare Plattenlänge aus der untersuchten Plattencharge betrug 3 m, wodurch die Prüfkörperhöhe ebenfalls auf 3 m limitiert war. Dieses Maß wurde im Folgenden für den Prüfkörper gewählt, die Platte also nicht auf ein kleineres Maß für eine niedrigere Wand gekürzt. Je größer die Wandhöhe, desto größer ist die sich unter horizontaler Belastung senkrecht zur Wandebene einstellende Verformung. Hierbei kann von einer überproportionalen Beziehung zwischen Wandhöhe und Wanddurchbiegung ausgegangen werden. Dieser Effekt wurde für die Untersuchung angestrebt, da deutlich messbare Verformungen bei vergleichsweise geringen Spannungen in Platte und Profilen auftreten und somit Effekte aus nichtlinearem Verhalten der Komponenten, wie z. B. Beulen des Profilblechs, im nachfolgend betrachteten Last-Verformungsbereich der Wand ausgeschlossen werden können.

Die Breite der verwendeten Platte betrug 1,25 m. Gipsplatten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie an den Längskanten eine Kartonummantelung aufweisen. Hierbei ist es nicht auszuschließen, dass diese Ummantelung die Biegesteifigkeit der Platte beeinflusst. Um dies zu eliminieren, wurde die Platte an beiden Längskanten um 25 mm besäumt. Daraus resultiert ein Plattenmaß von 1,2 m. Dies ist zwar in Deutschland ein eher unübliches Maß, in vielen europäischen Ländern entspricht dies aber der Standard-Plattenbreite und kann somit als praxisgerecht angesehen werden. Die Breite des Prüfkörpers betrug entsprechend 1,2 m.

Aufgrund der angepassten Plattenbreite ergibt sich der Achsabstand der Profile zu 0,6 m entsprechend der halben Plattenbreite. Die Anordnung der Profile erfolgte symmetrisch mit einem Plattenüberstand auf beiden Seiten des Prüfkörpers von 0,3 m. Daraus resultiert eine maximal mitwirkende Plattenbreite im Verbundquerschnitt von 0,6 m (0,3 m

Plattenüberstand + 0,3 m halber Achsabstand). Durch die Definition der zuvor genannten Abstände kommen zwei Stahlprofile des Typs CW50x50x06 zum Einsatz. Für diese wurde eine Nennlänge von 3 m gewählt, um die Ausführung von Profilverlängerungen zu vermeiden (z. B. Schachteln der Profile), die ebenfalls Einfluss auf die resultierende Steifigkeit des Bauteils haben könnten. Die tatsächliche Länge wurde um 10 mm gekürzt, um eine Gleitwirkung des oberen Anschlusses von ± 10 mm zu ermöglichen.

Als oberer und unterer Anschluss kamen UW50x40x06-Profile zum Einsatz, in die die CW50x50x06-Profile formschlüssig eingestellt wurden. Eine kraftschlüssige Verbindung wie z. B. Verschraubung der Profile untereinander wurde nicht ausgeführt, wodurch nur eine Kraftübertragung erfolgen kann, die der Formschluss zulässt.

Zur Befestigung der UW50x40x06-Profile an der Holzeinlage des Prüfrahmens kamen FN4,3x35-Schrauben zum Einsatz. Diese wurden mittig im Steg des Profils, also in dessen Schwerachse angeordnet. Die Verschraubung von Platte und CW50x50x06-Profilen mit den Schnellbauschrauben Typ TN 3,5x25 erfolgte gemäß DIN 18181:2019-04 im Abstand von 250 mm. Als Abstand zum oberen und unteren Plattenrand wurde ein Maß von 125 mm gewählt. Dadurch ergibt sich eine Gesamtanzahl von 12 Schrauben je Profil bzw. 24 Schrauben für den Prüfkörper.

Die Abmessungen des Probekörpers sowie die Profilachsabstände und Schraubenabstände können Abbildung 8.1.1-1 entnommen werden.

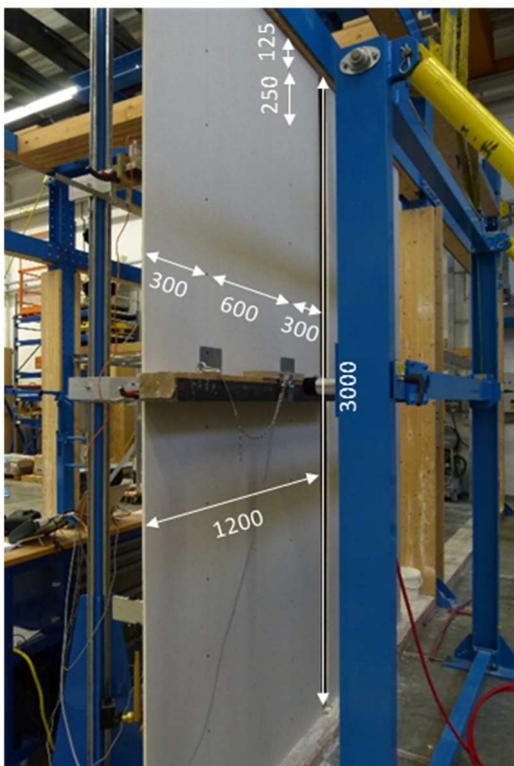


Abbildung 8.1.1-1: Prüfkörperaufbau Wand mit Maßangaben in Millimetern

Auf eine Verschraubung der Platte mit dem oberen und unteren UW50x40x06-Profil wurde verzichtet (siehe Abbildung 8.1.1.-2). Dies stellt sicher, dass es keinen ungewollten Einspanneffekt im Bereich der Anschlüsse gibt. Gemäß DIN 18183-1:2018-05 ist eine

solche Verschraubung zulässig, aber nicht erforderlich. Die Ausführung ist somit normkonform.



Abbildung 8.1.1-2: Unterer Wandanschluss ohne Verschraubung der Platte im UW50x40x06-Profil

Die nur formschlüssige Verbindung zwischen C- und U-Profilen, die mittige Befestigung der U-Profile am Untergrund in Verbindung mit der geringen Biegesteifigkeit des 0,6-mm-Blechs sowie der Verzicht auf eine Verschraubung der Platte mit den U-Profilen sorgen dafür, dass der Einspanneffekt bei unterem und oberem Anschluss vernachlässigbar ist und für beide Anschlüsse gelenkige Lagerbedingungen angenommen werden können. Beim oberen Anschluss ist durch die gekürzten C-Profile zudem eine vertikale Verschieblichkeit des Lagers gegeben, da beide C-Profile im U-Profil gleiten können.



Abbildung 8.1.1-3: Idealisierte Lagerbedingungen des Prüfkörpers

8.1.2 Prüfablauf

Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 4103 1:2015 06, jedoch wurde die Belastung abweichend zur Norm angebracht, die hier eine Höhe von 0,9 m über dem Fußpunkt vorsieht. Diese Prüfhöhe dient zum Nachweis von Linienlasten bezogen auf die sogenannten Einbaubereiche der Norm, die einen Anpressdruck von Personen auf Brüstungshöhe simulieren sollen. Im vorliegenden Fall ist es jedoch nicht das Ziel, die Anforderungen der Einbaubereiche nachzuweisen, sondern das Last-Verformungsverhalten des Prüfkörpers zu untersuchen, wofür sich eine Belastung auf halber Wandhöhe anbietet.

Nach Einbau des Prüfkörpers wurde auf 1,5 m Höhe ein horizontaler Lastverteilungsbalken montiert. Dieser dient dazu, eine Einzellast aus einem hydraulischen Prüfzylinder in eine gleichmäßige horizontale Streckenlast umzuwandeln. Entscheiden ist, dass der Balken keine

Steifigkeitserhöhung des Prüfkörpers zur Folge hat. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass er nur punktuell an zwei Stellen auf der Oberfläche des Prüfkörpers befestigt wird. Zudem bietet der Balken eine Aufnahme zur Fixierung einer Kraftmessdose (Kraftsensor). Gegen diese Kraftmessdose drückt der hydraulische Zylinder, der seinerseits an einem Widerlager befestigt ist. Die Anordnung der Lasteinleitung kann Abbildung 8.1.2-1 entnommen werden.



Abbildung 8.1.2-1: Lasteinleitung in den Prüfkörper Wand (Angaben in Millimetern)

Zur Ermittlung der lastabhängigen Verformung wurden auf der Profilseite des Prüfkörpers insgesamt sechs induktive Wegaufnehmer (Wegsensoren) angebracht. Je Profil waren drei Wegaufnehmer in der Art angeordnet, dass jeweils ein Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe, ein weiterer Wegaufnehmer im unteren Viertelpunkt und der dritte Wegaufnehmer im oberen Viertelpunkt bezogen auf die Prüfkörperhöhe positioniert wurde (Abbildung 8.1.2-2). Um zu vermeiden, dass mögliche lokale Verdrehungseffekte des Profils in die Messung eingehen, wurde der jeweilige Messpunkt der Wegaufnehmer nicht direkt auf dem Profil, sondern unmittelbar seitlich davon an der Plattenrückseite vorgesehen (Abbildung 8.1.2-3).

Der hydraulische Zylinder wurde im Handbetrieb gesteuert. Dabei wurde auf eine kraftgesteuerte Belastung von ca. 5 N/s geachtet. Die Prüfanforderungen einer gleichmäßig kontinuierlichen Belastung gemäß DIN 4103-1:2015-06 wurden somit eingehalten. Die Norm beinhaltet keine verpflichtenden Vorgaben bzgl. einer konkreten Prüfgeschwindigkeit.

Die Wegmessung mittels der 6 induktiven Wegaufnehmer erfolgte dabei mit 10 Messwerten pro Sekunde je Wegaufnehmer im gleichen Zeitintervall wie die Messwertübertragung der Kraftmessdose. Die Datensätze aller 7 Kanäle wurden in einem Datenlogger kontinuierlich aufgezeichnet. Die Kraftmessdose, die Wegaufnehmer und der Datenlogger sind ein von der

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH abgestimmtes Messsystem und werden regelmäßig kalibriert.



Abbildung 8.1.2-2: Anordnung der Wegaufnahme an der Profilseite des Prüfkörpers Wand (Angaben in Millimetern)



Abbildung 8.1.2-3: Positionierung der Wegaufnahme direkt neben dem Profil an der Rückseite der Platte

8.1.3 Feuchtebeanspruchung

Alle eingesetzten Komponenten lagerten bis zur Prüfung in der Prüfhalle. Da das Hallenklima Schwankungen ausgesetzt ist, kann somit keine spezifische Konditionierung der Gipsplatten abgeleitet werden. Eine Betrachtung der Temperatur- und Luftfeuchte im Sinne einer klimatischen Beanspruchung ist somit nicht zielführend. Sinnvoll hingegen ist die Ermittlung der massebezogenen Plattenfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung. Aus Abschnitt 6 ist bekannt, dass der Verschiebungsmodul mit der massebezogenen Plattenfeuchte korreliert.

Zur Bestimmung der massebezogenen Plattenfeuchte wurden im Anschluss an die Bauteilprüfung aus der verwendeten Gipsplatte insgesamt 3 Proben mit den Kantenabmessungen 300 mm x 400 mm entsprechend der Probenabmessung gemäß DIN EN 520:2009-12 entnommen und bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz rückgetrocknet. Das Ergebnis kann Tabelle 8.1.3-1 entnommen werden.

Tabelle 8.1.3-1: Massebezogener Feuchtegehalt der aus der Gipsplatte des Bauteilversuchs entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz

Proben	Gewicht nach Entnahme bei Hallenklima [g]	Gewicht nach Rücktrocknung bei 40 °C [g]	Massebezogene Plattenfeuchte [-]
Probe 1	1 227,40	1 224,79	0,21 %
Probe 2	1 235,85	1 233,22	0,21 %
Probe 3	1 238,95	1 236,38	0,21 %
\bar{x}	1 234,07	1 231,46	0,21 %

Eine Bestimmung des Biege-E-Moduls konnte aufgrund der Vorschädigung der Platten durch die Bauteilprüfung nicht erfolgen.

8.2 Untersuchungsergebnis

Aus Abbildung 8.2-1 kann das Last-Verformungsverhalten des Prüfkörpers entnommen werden. Die Maximallast betrug 1,1 kN/m bei einer Verformung von 48,3 mm auf halber Wandhöhe. Die Verformung ergibt sich dabei aus dem Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe.

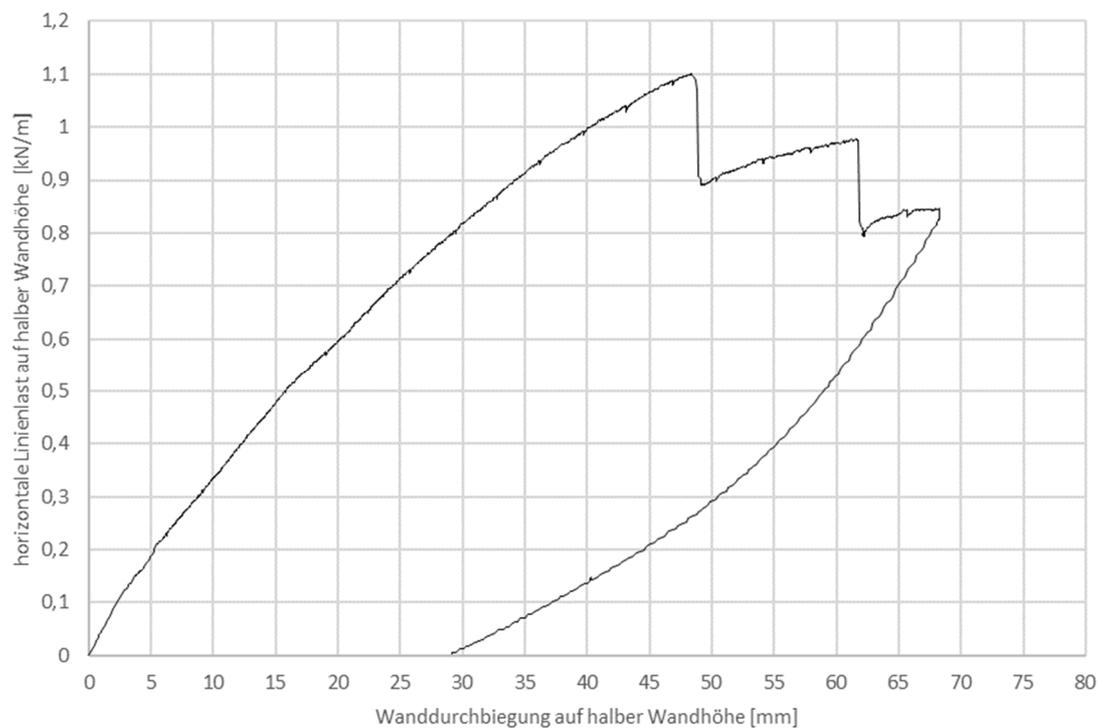


Abbildung 8.2-1: Last-Verformungskurve des Prüfkörpers mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe

Die Kurve zeigt zu Prüfbeginn im sehr kleinen Last- und Verformungsbereich einen stufenartigen Kurvenverlauf (siehe Abbildung 8.2-2). Dies ist nicht auf das mechanische Bauteilverhalten zurückzuführen, da für den geprüften Aufbau bei sehr kleinen Lasten respektive Verformungen keine nichtlinearen Effekte zu erwarten sind. Vielmehr ist dies als typische auflösungsbedingte Messwertfluktuation zu verstehen. Die analogen Messwerte werden digital gewandelt. Da der Analog-Digitalwandler eine spezifische Auflösung hat, kommt es bei der Umwandlung der Messwerte zu einer Veränderung des Messsignals, das sich in Form von Stufen im Kurvenverlauf darstellt. Zur besseren Bewertung des Last-Verformungsverhaltens wurde deshalb die Messwertkurve bereinigt. Hierfür wurden, wie in Abbildung 8.2-2 dargestellt, die Messwerte zwischen den Peaks entfernt, wodurch die Kurve einen kontinuierlichen Verlauf erhält. Dies wurde jedoch nur auf den quasi-elastischen Last-Verformungsbereich bis zu einer Verformung von 1/500 der Wandhöhe angewandt, da es bei höheren Lasten und Verformungen sehr wohl zu mechanischen Effekten kommen kann, die sich im Kurvenverlauf widerspiegeln.

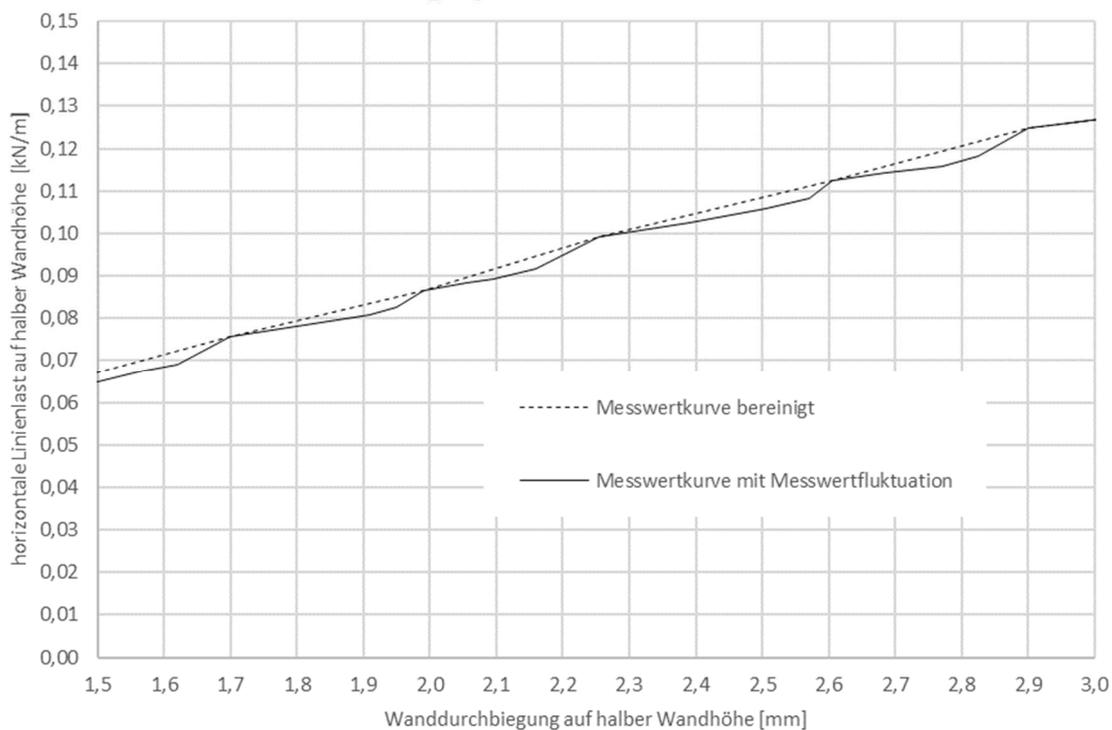


Abbildung 8.2-2: Ausschnitt der Last-Verformungskurve des Prüfkörpers im kleinen Last-Verformungsbereich mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe

8.3 Auswertung

8.3.1 Bewertung des Last-Verformungsverhaltens

Eine Betrachtung des Anfangsbereichs der Kurve in Abbildung 8.3.1-1 zeigt, dass sich das Verhalten bis zu einer Verformung von knapp 3 mm nahezu ideal elastisch darstellt. Dies entspricht einer Verformung von 1/1000 der Wandhöhe. Dieser Bereich kann als Anfangssteifigkeit der Wand gewertet werden. Im weiteren Verlauf bis zu einer Verformung von 1/500 der Wandhöhe bzw. 6 mm ist das Verhalten als quasi-elastisch zu verstehen.

Dabei entspricht $1/500$ der Wandhöhe dem strengsten Kriterium an die Gebrauchstauglichkeit gemäß DIN 18183-1:2018-05, das beispielsweise für Anwendungsfälle herangezogen wird, bei denen verformungsempfindliche Wandbeläge (wie großformatige Fliesen) entsprechende Anforderungen mit sich bringen.

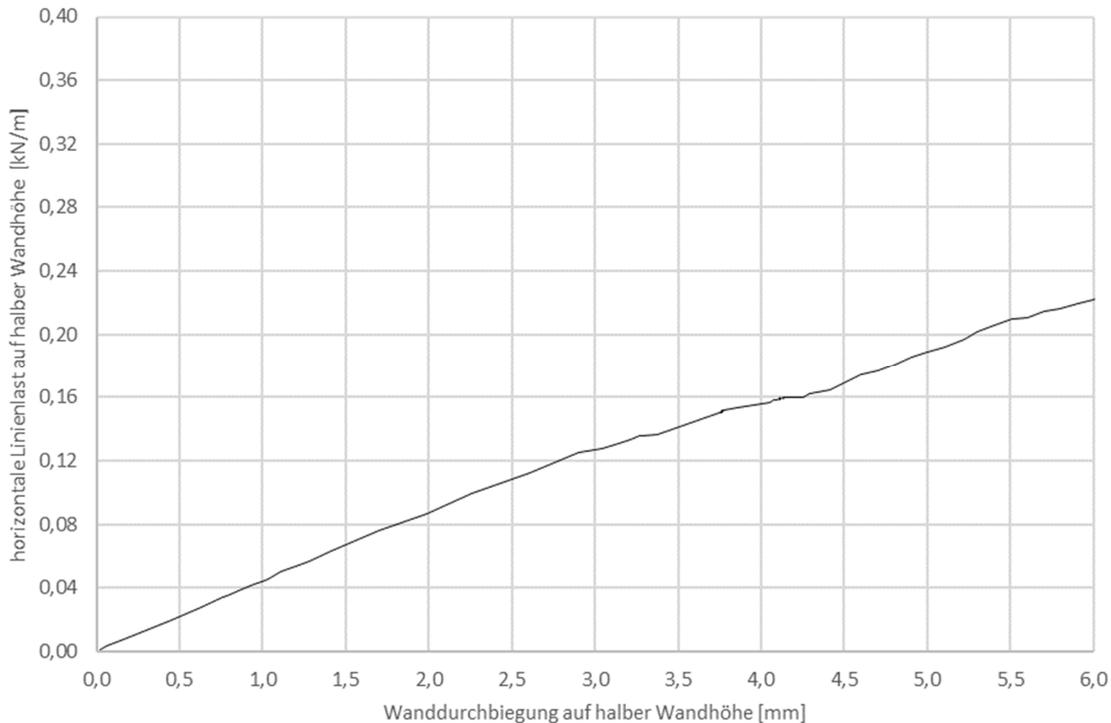


Abbildung 8.3.1-1: Anfangsbereich der Last-Verformungskurve des Prüfkörpers mit Angabe der Wanddurchbiegung als Mittelwert der beiden Wegaufnehmer auf halber Wandhöhe

8.3.2 Bestimmung der Bauteilsteifigkeit

Die Bauteilsteifigkeit wird nachfolgend für die zuvor definierten Bereiche der Anfangssteifigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ermittelt. Dafür wird die Linienlast in eine resultierende Einzellast umgerechnet und durch den zugehörigen Absolutwert der Verformung dividiert. Die so entstehende Kurvensekante stellt einen repräsentativen Mittelwert der Steifigkeit über den jeweils betrachteten Bereich dar.

Tabelle 8.3.2-1: Massebezogener Feuchtegehalt der aus der Gipsplatte des Bauteilversuchs entnommenen Plattenproben nach Rücktrocknung bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz

Bereich	Verformung [mm]	Linienlast [kN/m]	Resultierende Einzellast [N]	Bauteil- steifigkeit [N/mm]
Anfangssteifigkeit 1/1000 Wandhöhe	3	0,128	154,6	51,3
Gebrauchstauglichkeit 1/500 Wandhöhe	6	0,222	266,4	44,4

9 Rechnerisches Verfahren für Bauteile

9.1 Auswahl eines geeigneten Verfahrens für die Berechnung der effektiven Steifigkeit des Verbundquerschnitts

Für die Berechnung des Verbundquerschnitts bietet sich das γ -Verfahren an, das auf den Untersuchungen von **Möhler (1956)** basiert und in die Normung zur Bemessung zusammengesetzter Querschnitte mit nachgiebigem mechanischen Verbund im Holzbau, zuletzt DIN EN 1995-1-1:2010-12, eingegangen ist. Das Verfahren ist etabliert, setzt aber gemäß Norm rechteckige Querschnitte aus Holz oder Holzwerkstoffen voraus, wie in Abbildung 9.1-1 zu sehen ist.

Dennoch weist das Verfahren Aspekte auf, die auch für die Berechnung des Verbunds aus Gipsplatten und dünnwandigen Stahlprofilen geeignet scheinen. Es stellt eine Erweiterung des Verfahrens zur Berechnung des starren Verbunds dar, das über die Querschnittsflächen und die E-Moduln der Teilquerschnitte charakterisiert ist, und erweitert dieses um den Abminderungswert γ . Damit ist das Verfahren in der praktischen Anwendung leicht handhabbar. Der Abminderungswert γ ist dabei nicht alleine über den Verschiebungsmodul charakterisiert, sondern ebenfalls über die E-Moduln der eingesetzten Materialien der Teilquerschnitte. Da Gips und Stahl sehr unterschiedliche E-Moduln aufweisen (Faktor: 75), darf deren Einfluss keinesfalls vernachlässigt werden.

Gutsch et al. (2007) haben im Rahmen der Untersuchungen an Verbindungen aus Gipsplatten und dünnwandigen Stahlprofilen gezeigt, dass das Verfahren bei Festlegung eines geeigneten Verschiebungsmoduls mit hinreichender Genauigkeit anwendbar ist.

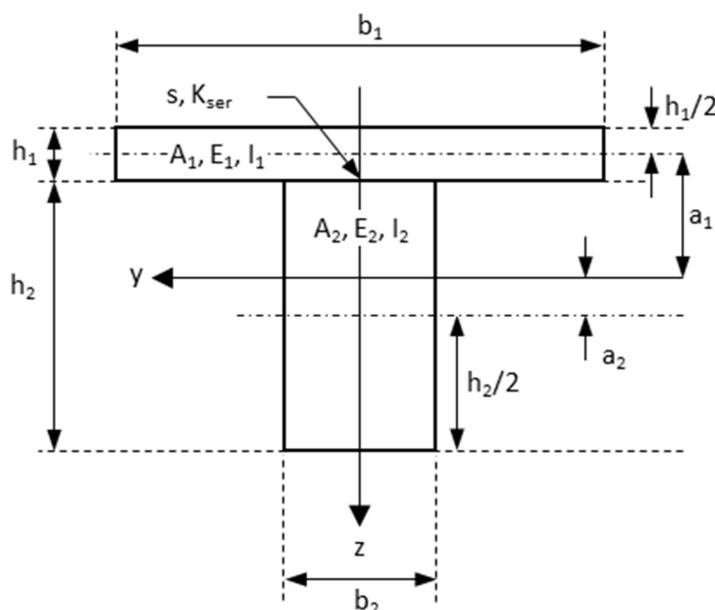


Abbildung 9.1-1: Modell eines Verbundquerschnitts aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen im Holzbau, Darstellung in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1:2010-12

9.2 Berechnung der Anfangssteifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds

Es folgt die Berechnung gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12.

Querschnittswerte Beplankung

Querschnittsfläche A_1 des mitwirkenden Anteils der Beplankung:

$$A_1 = b_1 \cdot h_1 \quad (9.1)$$

$$A_1 = 60 \cdot 1,25^2$$

$$A_1 = 75 \text{ cm}^2$$

mit

b_1 maximal mitwirkende Plattenbreite \rightarrow Profilachsabstand [cm]

h_1 Höhe Plattenquerschnitt, entspricht Plattendicke [cm]

Flächenmoment 2. Grades I_1 des mitwirkenden Anteils der Beplankung:

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} \quad (9.2)$$

$$I_1 = \frac{60 \cdot 1,25^3}{12}$$

$$I_1 = 9,766 \text{ cm}^3$$

Querschnittswerte Profil

Querschnittsfläche A_2 des Profils

$$A_2 = 0,95 \text{ cm}^2$$

gemäß Tabellenverfahren Abbildung 9.2-1

Flächenmoment 2. Grades I_2 des Profils

$$I_2 = 4,314 \text{ cm}^3$$

gemäß Tabellenverfahren Abbildung 9.2-1

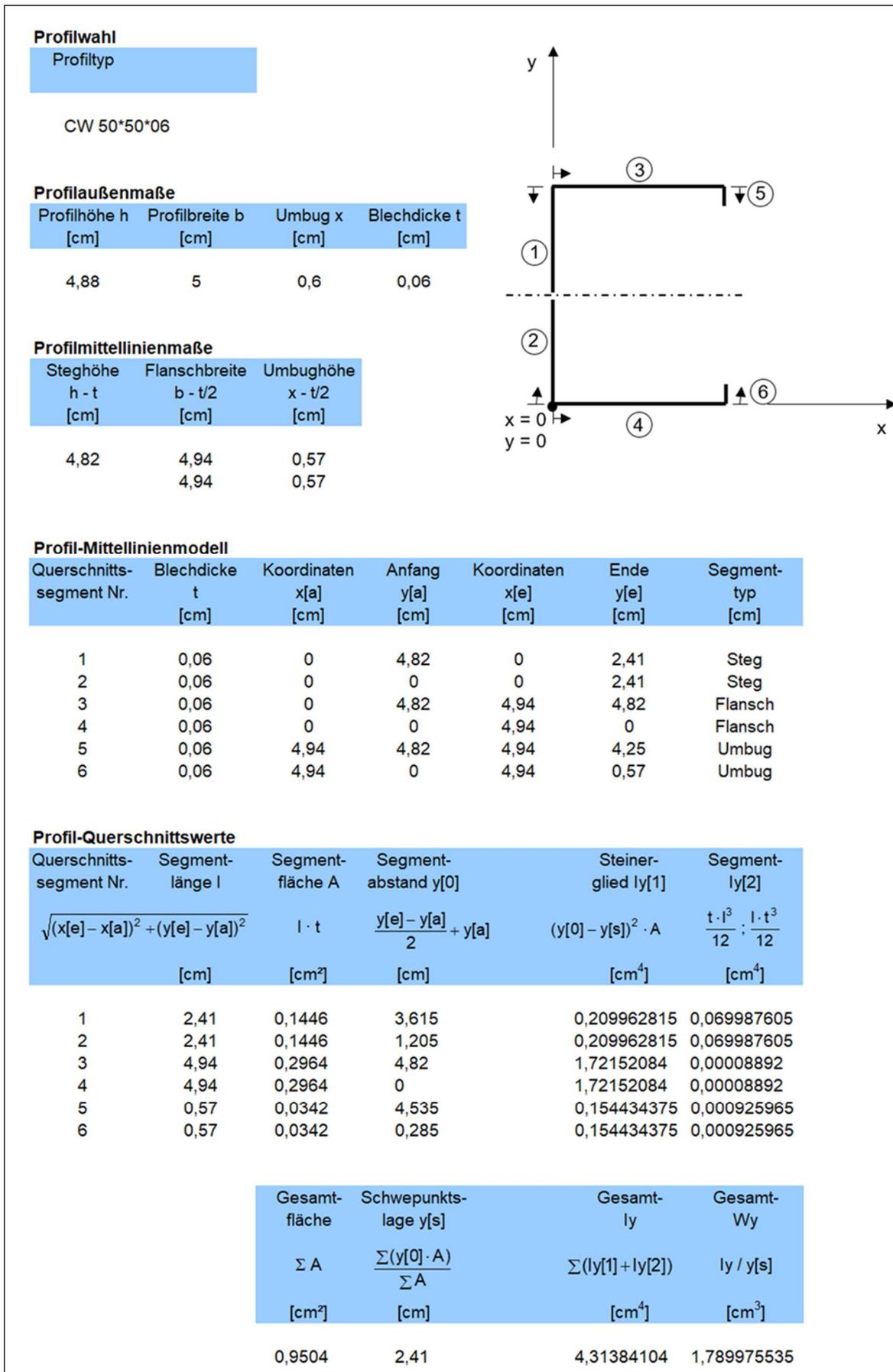


Abbildung 9.2-1: Tabellenverfahren zur Ermittlung der Profilquerschnittswerte

E-Modul-Verhältnissfaktoren n_1 und n_2 bezogen auf den E-Modul des Profils:

$$n_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad (9.3)$$

$$n_1 = \frac{2\,800}{210\,000}$$

$$n_1 = 0,013$$

mit

E_1 E-Modul Platte [N/mm²]

E_2 E-Modul Profil [N/mm²]

Hinweis zum angenommenen E-Modul der Platte: Wie bereits in 8.1.3 erläutert, konnte der tatsächliche Biege-E-Modul wegen der prüfbedingten Vorschädigung der Platten nicht ermittelt werden. Der in DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 geregelte Rechenwert von 2 800 N/mm² erscheint deshalb als adäquate Annahme. Die bereitgestellte Plattencharge wies nach Rücktrocknung einen mittleren Biege-E-Modul von 3 212 N/mm² auf (siehe Tabelle 5.1.1-1). Da bei zunehmendem massebezogenen Feuchtegehalt der E-Modul sinkt, ist im vorliegenden Fall (0,21 M.-%) von einem kleineren als dem im Trockenzustand geprüften E-Modul auszugehen.

$$n_2 = \frac{E_2}{E_2} \quad (9.4)$$

$$n_2 = \frac{210\,000}{210\,000}$$

$$n_2 = 1$$

Der erste Abminderungswert γ_1 wird unter Berücksichtigung des Verschiebungsmoduls ermittelt:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \pi^2 \cdot \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot s}{K_{ser} \cdot l^2}} \quad (9.5)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \pi^2 \cdot \frac{2\,800 \cdot 10^2 \cdot 75 \cdot 25}{K_{ser} \cdot 10^1 \cdot 300^2}}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{5\,757,269}{K_{ser}}} \quad (9.10)$$

mit

s Achsabstand der Schrauben [cm]

l Spannweite des Einfeldträgers \rightarrow Wandhöhe [cm]

K_{ser} Verschiebungsmodul für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis [N/mm]

Es folgt eine Fallbetrachtung des Verschiebungsmoduls.

Fall 1: Lineare Regression des Verschiebungsmoduls $C_{150-200N}$ bei einem massebezogenen Plattenfeuchtegehalt u der Platte von 0,21 %.

$$K_{ser} = C_{150-200N}(u) = -32\,271 \cdot u + 4\,134,1 \quad (9.11)$$

$$K_{ser} = C_{150-200N}(u = 0,21 \%) = -32\,271 \cdot 0,0021 + 4\,134,1$$

$$K_{ser} = 4\,066 \text{ N/mm}$$

mit

u massebezogener Plattenfeuchtegehalt [-]

Da es sich bei der Bestimmung des Verschiebungsmoduls um eine Näherung durch lineare Regression handelt, würde die Angabe von Dezimalstellen eine nicht vorhandene Genauigkeit implizieren. Aus diesem Grund wird das Ergebnis der Berechnung des Verschiebungsmoduls auf einen ganzzahligen Wert gerundet.

Daraus folgt der zugehörige Abminderungswert γ_1 durch Einsetzen in (9.10)

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{5\,757,269}{4\,066}}$$

$$\gamma_1 = 0,414$$

Der zweite Abminderungswert γ_2 ist definitionsgemäß

$$\gamma_2 = 1$$

Abstand des Beplankungsschwerpunkts a_1

$$a_1 = \frac{\gamma_2 \cdot n_2 \cdot A_2 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i} \quad (9.12)$$

$$a_1 = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot (1,25 + 4,88)}{2 \cdot (0,414 \cdot 0,013 \cdot 75 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95)}$$

$$a_1 = 2,151 \text{ cm}$$

Abstand des Profilschwerpunkts a_2

$$a_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_1 \quad (9.13)$$

$$a_2 = \frac{1,25 + 4,88}{2} - 2,151$$

$$a_2 = 0,914 \text{ cm}$$

Effektives Flächenmoment 2. Grades I_{ef}

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^2 (n_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (9.14)$$

$$I_{ef} = 0,013 \cdot 9,766 + 0,414 \cdot 0,013 \cdot 75 \cdot 2 \cdot 151^2 + 1 \cdot 4,314 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 0,914^2$$

$$I_{ef} = 7,102 \text{ cm}^2$$

Effektive Steifigkeit $(EI)_{ef}$

$$(EI)_{ef} = E_2 \cdot I_{ef} \quad (9.15)$$

$$(EI)_{ef} = 210\,000 \cdot 10^2 \cdot 7,102$$

$$(EI)_{ef} = 149\,142 \cdot 10^3 \text{ N/cm}^2$$

$$(EI)_{ef} = 149\,142 \text{ kN/cm}^2$$

Fall 2: Lineare Regression des Verschiebungsmoduls K_i bei einem massebezogenen Plattenfeuchtegehalt u der Platte von 0,21 %.

$$K_{ser} = K_i(u) = -104\,014 \cdot u + 2503,4 \quad (9.16)$$

$$K_{ser} = K_i(u = 21 \%) = -104\,014 \cdot 0,0021 + 2\,503,4$$

$$K_{ser} = 2\,285$$

Daraus folgt der zugehörige Abminderungswert γ_1 durch Einsetzen in (9.10)

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{5\,757,269}{2\,285}} = 0,284$$

Abstand des Beplankungsschwerpunkts a_1 durch Einsetzen in (9.12)

$$a_1 = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot (1,25 + 4,88)}{2 \cdot (0,284 \cdot 0,013 \cdot 75 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95)}$$

$$a_1 = 2,373 \text{ cm}$$

Abstand des Profilschwerpunkts a_2 durch Einsetzen in (9.13)

$$a_2 = \frac{1,25 + 4,88}{2} - 2,373$$

$$a_2 = 0,692 \text{ cm}$$

Effektives Flächenmoment 2. Grades I_{ef} durch Einsetzen in (9.14)

$$I_{ef} = 0,013 \cdot 9,766 + 0,284 \cdot 0,013 \cdot 75 \cdot 2\,373^2 + 1 \cdot 4,314 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 0,692^2$$

$$I_{ef} = 6,455 \text{ cm}^2$$

Effektive Steifigkeit $(EI)_{ef}$ durch Einsetzen in (9.15)

$$(EI)_{ef} = 210\,000 \cdot 10^2 \cdot 6,455$$

$$(EI)_{ef} = 135\,555 \cdot 10^3 \text{ N/cm}^2$$

$$(EI)_{ef} = 135\,555 \text{ kN/cm}^2$$

Fall 3: Referenzbetrachtung des starren Verbunds

$$K_{ser} = \infty$$

Daraus folgt der zugehörige Abminderungswert γ_1 durch Einsetzen in (9.10)

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{5\,757,269}{\infty}} = 1$$

Abstand des Beplankungsschwerpunkts a_1 durch Einsetzen in (9.12)

$$a_1 = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot (1,25 + 4,88)}{2 \cdot (1 \cdot 0,013 \cdot 75 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95)}$$

$$a_1 = 1,513 \text{ cm}$$

Abstand des Profilschwerpunkts a_2 durch Einsetzen in (9.13)

$$a_2 = \frac{1,25 + 4,88}{2} - 1,513$$

$$a_2 = 1,552 \text{ cm}$$

Effektives Flächenmoment 2. Grades I_{ef} durch Einsetzen in (9.14)

$$I_{ef} = 0,013 \cdot 9,766 + 1 \cdot 0,013 \cdot 75 \cdot 1,513^2 + 1 \cdot 4,314 + 1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 1,552^2$$

$$I_{ef} = 8,961 \text{ cm}^2$$

Effektive Steifigkeit $(EI)_{ef}$ durch Einsetzen in (9.15)

$$(EI)_{ef} = 188\,181 \cdot 10^2 \cdot 8,961$$

$$(EI)_{ef} = 188\,181 \cdot 10^3 \text{ N/cm}^2$$

$$(EI)_{ef} = 188\,181 \text{ kN/cm}^2$$

9.3 Verifizierung über Vergleich mit Untersuchungsergebnissen

Statisches System

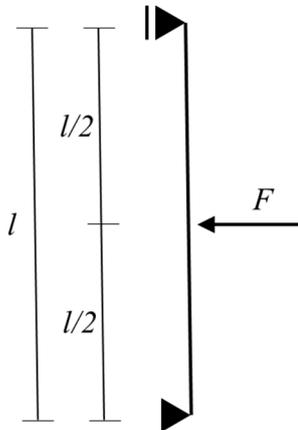


Abbildung 9.3-1: Statisches System zur Berechnung der Steifigkeit des geprüften Bauteilaufbaus

Durchbiegung des Einfeldträgers mit Einzellast in Feldmitte

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_{ef,Wand}} \quad (9.17)$$

mit

f Durchbiegung in Feldmitte [cm]

F Einzellast [kN]

l Spannweite des Einfeldträgers \rightarrow Wandhöhe [cm]

$$F = \frac{f \cdot 48 \cdot (EI)_{ef,Wand}}{l^3} \quad (9.18)$$

Betrachtung des Anfangssteifigkeitsbereichs der Wand

$$f = \frac{l}{1000} \quad (9.19)$$

Einsetzen in (9.18) ergibt:

$$F = \frac{l \cdot 48 \cdot (EI)_{ef,Wand}}{1000 \cdot l^3}$$

$$F = \frac{48 \cdot (EI)_{ef,Wand}}{1000 \cdot l^2}$$

Da die untersuchte Wand zwei Profile beinhaltet, muss zur Bestimmung der effektiven Wandsteifigkeit die effektive Steifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds zweifach angesetzt werden.

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot (EI)_{ef}}{1000 \cdot l^2} \quad (9.20)$$

Fall 1 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 149\,142 \text{ kN/m}^2$ für $C_{150-200N}$ in (9.20)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 149\,142}{1\,000 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,159 \text{ kN}$$

Dies entspricht einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{F}{b} \quad (9.21)$$

$$q = \frac{0,159}{1,2}$$

$$q = 0,133 \text{ kN/m}$$

mit

b Wandbreite [m]

Fall 2 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 135\,555 \text{ kN/m}^2$ für K_i in (9.20)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 135\,555}{1\,000 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,145 \text{ kN}$$

Dies entspricht durch Einsetzen in (9.21) einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{0,145}{1,2}$$

$$q = 0,121 \text{ kN/m}$$

Fall 3 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 188\,181 \text{ kN/m}^2$ für den starren Verbund in (9.20)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 188\,181}{1\,000 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,201 \text{ kN}$$

Dies entspricht durch Einsetzen in (9.21) einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{0,201}{1,2}$$

$$q = 0,168 \text{ kN/m}$$

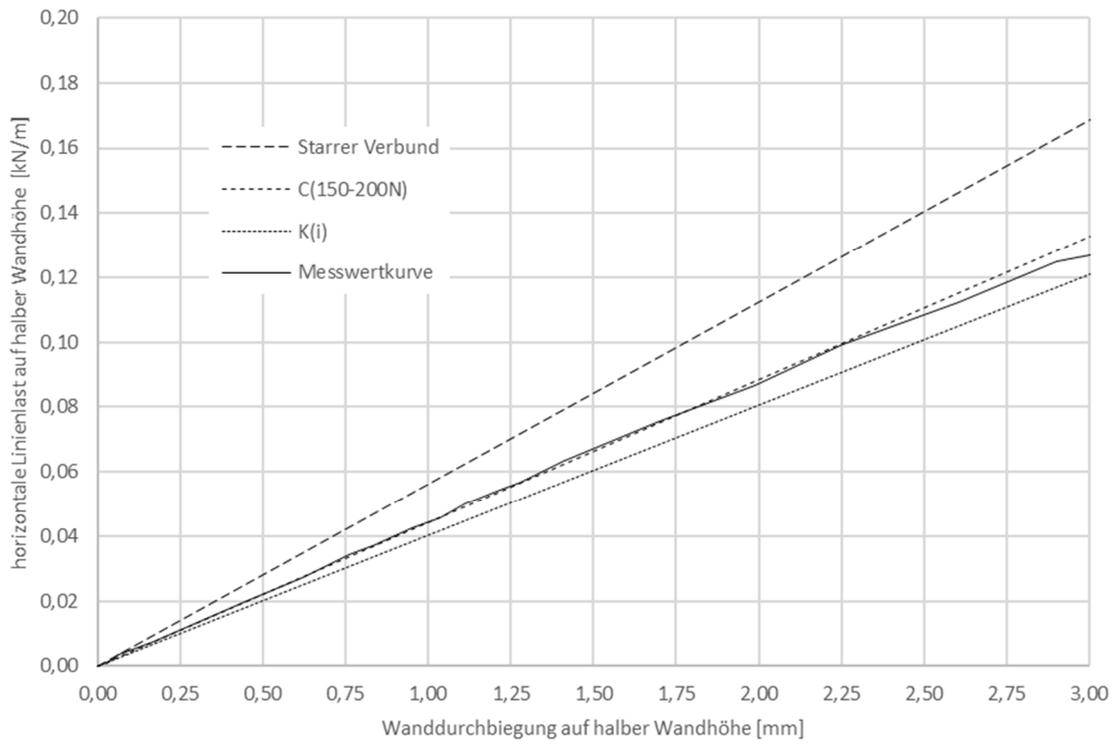


Abbildung 9.3-2: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus mit den berechneten Steifigkeiten für den Verformungsbereich bis 1/1000 Wandhöhe (Anfangssteifigkeitsbereich)

Betrachtung der Steifigkeit im Gebrauchstauglichkeitsbereich der Wand

$$f = \frac{l}{500} \quad (9.22)$$

Einsetzen in (9.18) ergibt:

$$F = \frac{l \cdot 48 \cdot (EI)_{ef,Wand}}{500 \cdot l^3}$$

$$F = \frac{48 \cdot (EI)_{ef,Wand}}{500 \cdot l^2}$$

Da die untersuchte Wand zwei Profile beinhaltet, muss zur Bestimmung der effektiven Wandsteifigkeit die effektive Steifigkeit des nachgiebigen mechanischen Verbunds zweifach angesetzt werden.

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot (EI)_{ef}}{500 \cdot l^2} \quad (9.23)$$

Fall 1 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 149\,142 \text{ kN/m}^2$ für $C_{150-200N}$ in (9.23)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 149\,142}{500 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,318 \text{ kN}$$

Dies entspricht durch Einsetzen in (9.21) einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{0,318}{1,2}$$

$$q = 0,265 \text{ kN/m}$$

Fall 2 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 135\,555 \text{ kN/m}^2$ für K_i in (9.23)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 135\,555}{500 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,289 \text{ kN}$$

Dies entspricht durch Einsetzen in (9.21) einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{0,289}{1,2}$$

$$q = 0,241 \text{ kN/m}$$

Fall 3 aus Abschnitt 9.2: Einsetzen der effektiven Steifigkeit $(EI)_{ef} = 188\,181 \text{ kN/m}^2$ für den starren Verbund in (9.23)

$$F = \frac{48 \cdot 2 \cdot 188\,181}{500 \cdot 300^2}$$

$$F = 0,401 \text{ kN}$$

Dies entspricht durch Einsetzen in (9.21) einer horizontalen Streckenlast q auf halber Wandhöhe von

$$q = \frac{0,401}{1,2}$$

$$q = 0,334 \text{ kN/m}$$

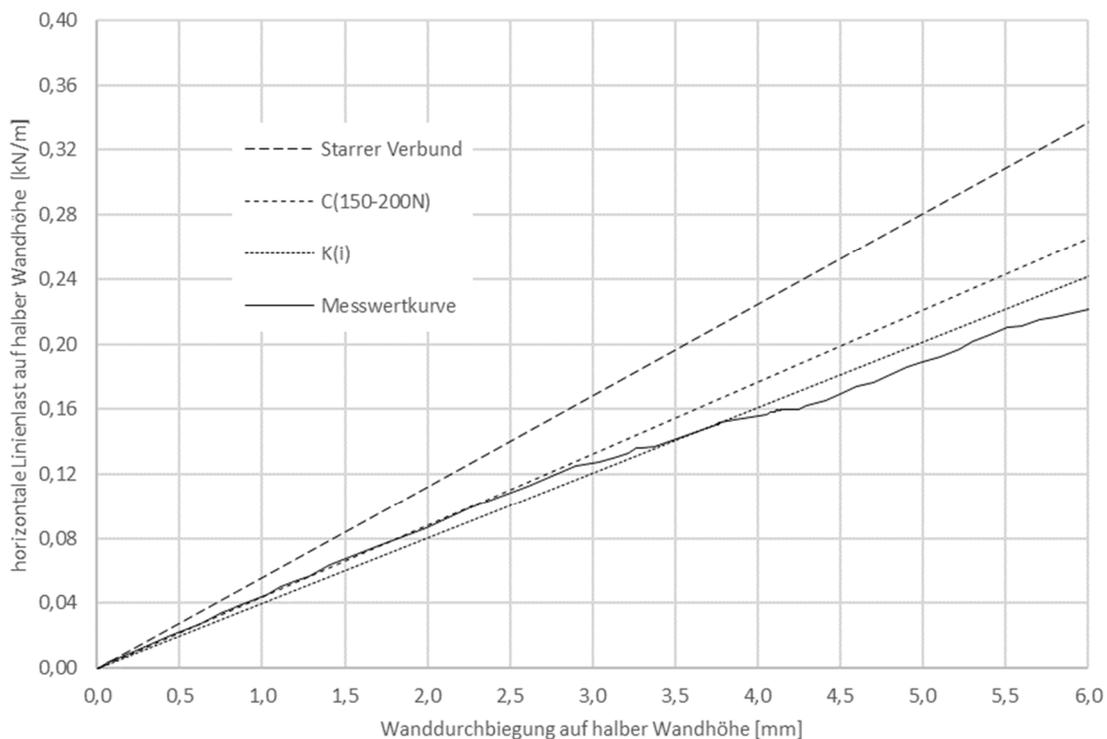


Abbildung 9.3-3: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus mit den berechneten Steifigkeiten für den Verformungsbereich bis 1/500 Wandhöhe (Gebrauchstauglichkeitsbereich)

9.4 Bewertung der Anwendbarkeit

Der Vergleich der berechneten Bauteilsteifigkeiten mit den Untersuchungsergebnissen des geprüften Bauteils hat bestätigt, dass das rechnerische Verfahren über den Verbundquerschnitt mit nachgiebigem mechanischen Verbund nach DIN EN 1995 1-1:2010-12 anwendbar ist. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Verschiebungsmodul zu. Da das Last-Verformungsverhalten des geprüften Bauteils nur einen kleinen quasi-elastischen Bereich aufweist, an den sich ein ausgeprägter elastisch-plastischer Bereich anschließt, kann es folglich keinen pauschalen Verschiebungsmodul für die Modellierung des Bauteilverhaltens geben.

Zielführend ist die Betrachtung einzelner Steifigkeitszustände des Bauteils und dazu korrespondierender Anforderungsniveaus im Sinne von Verformungsbegrenzungen. Dies wurde für den Bereich der Anfangssteifigkeit, in dem sich das Bauteil nahezu ideal elastisch verhält (Verformung bis 1/1000 der Wandhöhe), sowie für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit nach DIN 18183-1:2018-05, in dem sich das Bauteil quasi-elastisch verhält (Verformung bis 1/500 der Wandhöhe), durchgeführt. Im rechnerischen Verfahren wurden die in Abschnitt 6 beschriebenen Verschiebungsmoduln eingesetzt, die sowohl in Abhängigkeit von der Belastung der Verbindung als auch in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt ermittelt wurden. Mit den festgelegten Regressionsfunktionen lassen sich hierbei auch Verschiebungsmoduln für Feuchtegehalte prognostizieren, die nicht über Prüfung ermittelt wurden.

Dabei zeigt sich, dass der Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$, der den Lastbereich der Schraube von 150 bis 200 N repräsentiert, zu einem nahezu deckungsgleichen rechnerisch ermittelten Last-Verformungsverlauf gegenüber der Messwertkurve bis zu einer Verformung von 1/1000 der Wandhöhe führt (Abbildung 9.3-2).

Die Berechnung der Bauteilsteifigkeit mit dem Verschiebungsmodul K_i , der bis zur Lastgrenze $0,4 F_{max}$ bestimmt wird, stellt hingegen eine gute Näherung für das tatsächliche Last-Verformungsverhalten bis zu einer Verformung von 1/500 der Wandhöhe dar (Abbildung 9.3-2).

Der Vergleich mit der vollständigen Messwertkurve in Abbildung 9.4-1 verdeutlicht ebenfalls die gute Übereinstimmung der auf Basis der beiden Verschiebungsmoduln berechneten Steifigkeiten des nachgiebigen mechanischen Verbunds für den ersten Messwertkurvenabschnitt. Der Referenzberechnung mit starrem Verbund belegt erwartungsgemäß, dass die Annahme eines starren Verbunds zu einer signifikanten Überschätzung der Anfangssteifigkeit des Bauteils führt.

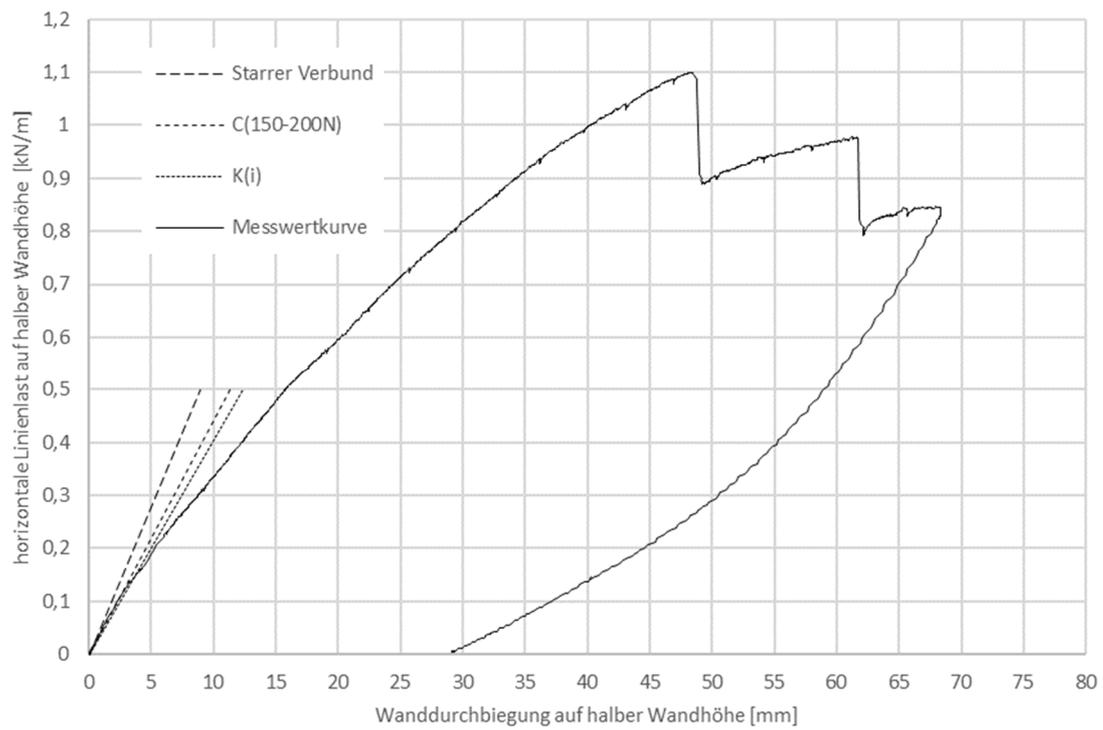


Abbildung 9.4-1: Gegenüberstellung der Messwertkurve des geprüften Bauteilaufbaus und der berechneten Steifigkeiten für den gesamten Verformungsbereich

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die nichttragende leichte Ständerbauweise aus trockenbauüblichen, dünnwandigen Stahlprofilen und mineralisch basierten Plattenwerkstoffen betrachtet. Aufgrund des signifikant großen Bauvolumens bei den nichttragenden Ausbauweisen kommt ihr eine besondere Bedeutung zu. Vor allem in gewerblich genutzten und in öffentlichen Gebäuden hat sich die leichte Ständerbauweise seit vielen Jahren als Standard für den Innenausbau etabliert. Neben wirtschaftlichen Vorteilen zeichnet sie sich vor allem durch ihre zeit- und ressourcenschonenden Eigenschaften aus.

Der Fokus der Untersuchungen lag auf den statischen und seismischen Eigenschaften der nichttragenden leichten Ständerbauweise. Konkret wurden grundlegende mechanische Wirkprinzipien betrachtet. Das mechanische Verhalten nichtmonolithischer Bauteile aus zusammengesetzten Querschnitten hängt im Wesentlichen einerseits von den Materialeigenschaften der verwendeten Komponenten und andererseits von deren Zusammenwirken im Verbund ab. Bei Verwendung sehr dünner Stahlprofile kommt dem Aktivieren der Beplankung im Verbundquerschnitt eine zentrale Bedeutung zu. Zur Erfüllung von Gebrauchstauglichkeitskriterien unter statischen Beanspruchungen ist die sich einstellende effektive Steifigkeit des nachgiebigen Verbunds entscheidend. Die Bestimmung der effektiven Steifigkeit setzt Kenntnis über den Verschiebungsmodul der Verbindung voraus. Ähnliches gilt auch für das seismische Verhalten von Bauteilen, deren Duktilität und Energiedissipation ebenfalls vom Verhalten der Verbindung zwischen Platte und Profil beeinflusst wird. Dabei zu berücksichtigen sind Anforderungen, die sich aus speziellen Einsatzbereichen der Bauweise ergeben. Hierzu gehören unter anderem Bäder und Feuchträume, die durch eine erhöhte Feuchtebeanspruchung gekennzeichnet sind. Da die leichte Ständerbauweise in diesen Bereichen die gleichen statischen und seismischen Anforderungen erfüllen muss, wird eine Berücksichtigung des mechanischen Verhaltens unter Feuchtebeanspruchung empfohlen.

Für die Untersuchungen wurden nachfolgende Bauprodukte gewählt, da sie aufgrund ihrer häufigen Verwendung in der Praxis als repräsentativ betrachtet werden können:

- Gipsplatten des Typs GKF (bzw. Typ DF) mit Nenndicke 12,5 mm,
- Stahlprofile des Typs CW 50x50x06 mit Nennblechdicke 0,6 mm,
- Schnellbauschrauben des Typs TN 3,5x25 mit Nenndurchmesser 3,5 mm.

Zur Ermittlung statischer und seismischer Kennwerte des Verbunds wurden kleinformatige Prüfkörper gewählt, die durch ihren spezifischen Aufbau die einzelne Schraubverbindung abbilden. Dies ermöglicht explizite Aussagen über die statistische Streuung des mechanischen Verhaltens der Einzelverbindung, wodurch eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse in Hinblick auf die Abhängigkeit von Feuchtebeanspruchungen ermöglicht wird. Zur Ermittlung statischer Kennwerte wurden quasi monoton-statische Prüfungen in Anlehnung an DIN EN 26891:1991-07 für fünf verschiedene Klimabedingungen und für die Ermittlung seismischer Kennwerte zyklische Prüfungen in Anlehnung an DIN EN 12512:2006-12 für zwei Klimabedingungen durchgeführt.

Um die Anwendbarkeit der ermittelten Kennwerte als Eingangsparameter für künftige Bauteilbemessungen zu überprüfen, wurden abschließend statische Berechnungen an einem

exemplarischen Verbundquerschnitt in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1:2010-12 vorgenommen. Zur Verifizierung diente eine Bauteilprüfung in Anlehnung an DIN 4103-1:2015-06, die es ermöglichte, rechnerisch ermittelte effektive Steifigkeiten und die tatsächlich gemessene effektive Steifigkeit gegenüberzustellen.

Bei der Bestimmung des Verschiebungsmoduls hat sich die Herangehensweise, diesen in einem fest definierten Lastbereich zu ermitteln, als zielführend herausgestellt. Die Verschiebungsmoduln $C_{150-200N}$ im Lastbereich von 150 N bis 200 N wiesen mit Variationskoeffizienten zwischen 3,6 % und 7,2 % die geringste Streuung über alle Prüfserien auf. Die Streuung zeigt gute Übereinstimmung mit dem E-Modul von Gipsplatten, deren Variationskoeffizient üblicherweise zwischen 5 % und 10 % liegt, was aus der kontinuierlichen Produktionskontrolle des Herstellers hervorgeht. Das Ergebnis bestätigt zum einen, dass eine repräsentative Prüfung einzelner Schraubverbindungen bei geeignetem Prüfkörperaufbau und Prüfverfahren möglich ist. Zum anderen lässt sich der Anfangssteifigkeitsbereich der Verbindung, für den ein nahezu elastisches Last-Verformungsverhalten beobachtet wurde, sehr präzise mit dem gewählten Verschiebungsmodul abbilden. Aus den fünf Prüfserien unterschiedlicher klimatischer Beanspruchungen von 20 °C bis 30 °C und von 50 % bis 90 % relativer Luftfeuchte kann abgeleitet werden, dass der Verschiebungsmodul mit zunehmendem massebezogenen Feuchtegehalt, der sich bei dem jeweiligen Klima einstellt, erwartungsgemäß abnimmt. Da weder die Feuchtebeanspruchung noch die Temperaturbeanspruchung (im betrachteten Temperaturbereich) Einfluss auf die Materialeigenschaften des eingesetzten Profilstahls und Schraubenstahls hat, kann die hygrothermische Abhängigkeit des C-Moduls alleinig der Gipsplatte zugeschrieben werden. Diese Abhängigkeit lässt sich über lineare Regression von Mittelwerten der Verschiebungsmoduln und zugehörigem massebezogenen Feuchtegehalt mit sehr hoher Korrelation (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,93$) abbilden.

Bei der normativen Bestimmung der Verschiebungsmoduln wies der Verschiebungsmodul K_i , der im Lastbereich $0,1 F_{max,est}$ und $0,4 F_{max,est}$ ermittelt wird, mit Variationskoeffizienten zwischen 21,7 % und 39,4 % die geringste Streuung gegenüber K_s auf. Die Streuung liegt deutlich höher als beim Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$, was auf den Auswertebereich zurückzuführen ist, in dem die Verformung bereits erste plastische Anteile enthält, die von Prüfung zu Prüfung variieren. Der Verschiebungsmodul K_i eignet sich somit besser zur Abbildung des quasi-elastischen Bereichs als zur Abbildung der Anfangssteifigkeit. Auch hier konnte die Abhängigkeit zum massebezogenen Feuchtegehalt der Gipsplatten festgestellt werden. Das Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,74$ ist bei linearer Regression im Vergleich zu $C_{150-200N}$ allerdings deutlich geringer, kann aber als akzeptabel gewertet werden, da die aus der Regressionsfunktion ermittelten Werte bis auf einen Fall immer im Bereich der Standardabweichung der Ergebnisse je Prüfserie liegen. Die schlechtere Korrelation von Mittelwerten der Verschiebungsmoduln und zugehörigem massebezogenen Feuchtegehalt kann mit der deutlich stärkeren Streuung begründet werden.

Für die Berechnung der effektiven Steifigkeit einer exemplarischen leichten Ständerwand über das Verfahren zusammengesetzter Querschnitte mit nachgiebigem mechanischen Verbund wurden die beiden genannten Verschiebungsmoduln verwendet. Der massebezogene Feuchtegehalt der Gipsplatten entsprach dabei nicht den geprüften Feuchtegehalten und musste somit mittels Regressionsfunktion bestimmt werden. Der berechneten effektiven Steifigkeit konnte dann das tatsächliche Last-Verformungsverhalten aus einer Bauteilprüfung gegenübergestellt werden. Der massebezogene Feuchtegehalt bei Bauteilprüfung entsprach dem für die Berechnung angesetzten Feuchtegehalt. Dabei zeigte

sich, dass der Verschiebungsmodul $C_{150-200N}$ zu einem nahezu deckungsgleichen berechneten Last-Verformungsverlauf gegenüber der Messwertkurve bis zu einer Verformung von 1/1000 der Wandhöhe führt. Dieser Verformungsbereich kann als Anfangssteifigkeit der Wand gewertet werden. Die Berechnung der Bauteilsteifigkeit mit dem Verschiebungsmodul K_i , stellt hingegen eine gute Näherung für das Last-Verformungsverhalten bis zu einer Verformung von 1/500 der Wandhöhe dar, was den quasi-elastischen Bereich der Wand repräsentiert und gleichzeitig das strengste normative Gebrauchstauglichkeitskriterium darstellt.

Der Vergleich der berechneten Bauteilsteifigkeiten mit den Untersuchungsergebnissen des geprüften Bauteils hat bestätigt, dass in den Grenzen der betrachteten Baustoffe und Klimata

- das Verfahren zusammengesetzter Querschnitte mit nachgiebigem mechanischen Verbund auch für sehr dünne Stahlprofile mit Gipsplatten Beplankung und Schraubverbindungen anwendbar ist,
- die Verwendung klimaabhängiger Verschiebungsmoduln zu sehr guten Übereinstimmungen führt,
- eine realitätsnahe, rechnerische Bestimmung des Last-Verformungsverhaltens leichter Ständerwände von der Anfangssteifigkeit bis in den quasi-elastischen Bereich möglich ist.

Diese Erkenntnisse können als Grundlage für ein künftiges Bemessungsverfahren dienen, in dem auch klimatische Aspekte Berücksichtigung finden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, um Einflüsse abweichender Baustoffeigenschaften und Verschiebungsmoduln höherer Lastbereiche zu ermitteln.

Als Eingangsparameter für die Durchführung der zyklischen Versuche mussten zunächst die Fließverschiebungen V_y der Verbindungen bestimmt werden. Hier zeigte sich die erwartungsgemäße Tendenz, dass die Fließverschiebung mit zunehmendem Feuchtegehalt zunimmt. Das Bestimmtheitsmaß bei linearer Regression steht mit $R^2 = 0,85$ für eine gute Korrelation. Bei isothermer Betrachtung ist eine deutliche Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes auf nahezu 1 ($R^2 = 0,9996$) zu erkennen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnten die temperaturabhängigen Eigenschaften des Kartons sein, die aus Tiefziehverfahren bekannt sind und dort genutzt werden. Dementsprechend könnte sich auch der Karton der Gipsplatten bei höheren Temperaturen nachgiebiger in Bezug auf Schrägstellung und Kopfdurchzug der Schraube verhalten, was in Folge zu größeren Fließverschiebungen führen würde. Eine isotherme Betrachtung ist demzufolge sinnvoll und liefert aussagekräftige Beziehungen zwischen massebezogenem Feuchtegehalt und Fließverschiebung.

Die Duktilität D beschreibt das Verhältnis von Grenzverschiebung V_u zu Fließverschiebung V_y . Es liegt die Vermutung nahe, dass die Verbindung mit zunehmendem massebezogenen Feuchtegehalt insgesamt weicher wird, die Verschiebungen zunehmen und damit die Duktilität steigt. Aus den Untersuchungsergebnissen geht allerdings hervor, dass die Duktilität mit zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Im direkten Vergleich liegt die Duktilität bei relativer Luftfeuchte 50 % gegenüber relativer Luftfeuchte 90 % (beides bei 20 °C) um den Faktor 2,2 höher. Es hat sich gezeigt, dass die Fließverschiebung bei höherer Feuchte prozentual deutlich stärker zunimmt als die Grenzverschiebung, was bei Bildung des Quotienten zu abnehmenden Duktilitätswerten führt. Aus den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, dass der massebezogene Feuchtegehalt

eine signifikant höhere Auswirkung auf das quasi-elastische Verhalten als auf das elastisch-plastische und quasi-plastische Verhalten des untersuchten Verbunds hat.

Duktiles Verhalten ist eine grundsätzlich positive Eigenschaft von nichttragenden Bauteilen in Erdbebenanwendungen. Ob der festgestellte Duktilitätsverlust auch zu einer verminderten seismischen Beanspruchbarkeit führt, wurde durch Bestimmung der Festigkeitsverluste im Rahmen zyklischer Prüfungen betrachtet. Hierfür wurden die beiden Klimastufen 20 °C / 50 % und 20 °C / 90 % gewählt. Es zeigte sich bei Gegenüberstellung der Halbzyklen eine prozentuale Festigkeitsminderung auf vergleichbarem Niveau sowohl während der Prüfung als auch zum Prüfende. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Klimabeanspruchung und die daraus resultierende massebezogene Feuchte der Platten einen deutlich kleineren Einfluss auf die prozentuale Festigkeitsminderung als auf die Duktilität hat.

Eine weitere, für die Verbindung seismisch relevante Eigenschaft ist die Energiedissipation unter zyklischer Beanspruchung. Sie ist ein Maß für die Umwandlung von Bewegungsenergie in plastische Verformung und in Reibungswärme. Beim untersuchten nachgiebigen mechanischen Verbund scheint die Energiedissipation mit zunehmender Zyklenzahl gegen einen Grenzwert zu konvergieren. Es kann also ab einer bestimmten Größe der Verschiebung durch weitere Vergrößerung keine zusätzliche Energie im System dissipiert werden. In der Gegenüberstellung beider Klimastufen ist die verteilte Energie je Halbzyklus nahezu identisch. Obwohl sich die umschriebenen Flächen der Hystereseabschnitte hinsichtlich ihrer Form unterscheiden, sind sie vom Flächeninhalt annähernd gleich. Dies legt in Bezug auf die untersuchten Konstellationen die Schlussfolgerung nahe, dass die klimatischen Bedingungen keinen wesentlichen Einfluss auf die Energiedissipation der Verbindung haben.

Innerhalb der Grenzen der betrachteten Baustoffe und Klimabeanspruchungen können somit nachfolgende Hypothesen basierend auf den Kleinteilversuchen für das Bauteilverhalten leichter Ständerwände unter seismischer Beanspruchung aufgestellt werden:

- ein vorzeitiges, lokales Versagen der Verbindungen von Bauteilen aufgrund erhöhter relativer Luftfeuchte ist unwahrscheinlich,
- die Energiedissipation von Bauteilen, die maßgebend von den Verbindungen bestimmt wird, ist unabhängig von der relativen Luftfeuchte.

Diese Hypothesen müssen durch zyklische Bauteilprüfungen bei variierenden Klimabeanspruchungen verifiziert werden. Entsprechende Prüfungen waren nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- Andresen, K. (1989). *Klassifizierung der Verbindung nach der Steifigkeit des Anschlusses, Bericht zum Forschungsvorhaben*. Technische Universität Berlin.
- Baehre, R., Schulz, U. & Burkhardt, S. (1987). *Tragverhalten von Verbundkonstruktionen aus Stahlblechprofilen und Plattenwerkstoffen, Abschlussbericht*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe.
- Becker, K., Pfau, J. & Tichelmann, K. (2004). *Trockenbauatlas – Grundlagen, Einsatzbereiche, Konstruktionen, Details* (3. Aufl.). Verlagsgesellschaft Rudolf Müller.
- Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2013). *Gips-Datenbuch*. Bundesverband der Gipsindustrie e.V.
- Fiorino, L., Della Corte, G. & Landolfo, R. (2007). Experimental tests on typical screw connections for cold-formed steel housing: *Engineering Structures*, 29 (8), 1761–1773. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.09.006
- Fiorino, L., Iuorio, O. & Landolfo, R. (2008, 14.-15. Okt.). Experimental response of connections between cold-formed steel profile and cement-based panel. In *Proceedings of the Nineteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, 603–619*. Missouri University of Science and Technology.
- Fiorino, L., Macillo, V. & Landolfo, R. (2016). Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures: *Advances in Structural Engineering*, 20 (7), 1–13. DOI: 10.1177/1369433216671318
- Fiorino, L., Pali, T., Bucciero, B., Macillo, V., Terracciano, M. T. & Landolfo, R. (2017). Experimental study on screwed connections for sheathed CFS structures with gypsum or cement based panels: *Thin-Walled Structures*, 116, 234-249. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.031

- Fiorino, L., Shakeel, S., Campiche, A. & Landolfo, R. (2023). In-plane seismic behavior of lightweight steel drywall facades through quasi-static reverse cyclic tests: *Thin-Walled Structures* 182 (A), 110157. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110157
- Gelbrich, S. (2016). *Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen* (Habilitationsschrift). Universitätsverlag Chemnitz.
- Gutsch, A.-W., Bodendiek, P. & Hirschfeld, S. (2007). Tragfähigkeitsnachweise für leichte innere Trennwände. In H. Budelmann & A.-W. Gutsch (Hrsg.), *Bau Symposium Braunschweig (BSB 2007): Stand und Entwicklung des Trockenbaus*. Schriftenreihe des iBMB (Heft 195, 1–16).
- Henkel, F.-O., Holl, D. & Schalk, M. (2008). *Erdbebensichere Bauen mit Trockenbausystemen*. Knauf Gips KG.
- Herfurth, D., Krämer, G., Bohnsack S., Fink. R., Ostermann, R., Rohlf, H., Gutsch, A., Bodendiek, P. & Hirschfeld, S. (2008). Neues Berechnungsverfahren zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Montagewänden mit Gipsplattenbeplankung für eine erhöhte Anwendungssicherheit bei hohen Wänden: *Bauphysik* 30 (4), 227-236. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Höreth, M. (2020). *Harmonisierung*. Bundeszentrale für politische Bildung. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-europalexikon/177038/harmonisierung/>
- Huttel, D. & Post, P. (2015). *Anwendung wirkmedienbasierter Verfahren zum Tiefziehen von Papier und Karton*. Schlussbericht der TU Darmstadt zum IGF-Vorhaben 17788N.
- Iuorio, O., Fiorino, L. & Landolfo, R. (2014). Testing CFS structures: The new school BFS in Naples: *Thin-Walled Structures*, 84, 275-288. DOI: 10.1016/j.tws.2014.06.006.
- Johansen, K. W. (1949). Theory of Timber Connections, *Publications of International Association of Bridge and Structural Engineering*, 9, 249-262. ETH Bibliothek, Zürich.
- Landolfo, R. & Holl, D. (2015). *Lightweight steel drywall constructions for seismic areas*. Knauf Gips KG.

- Macillo, V., Fiorino, L. & Landolfo, R. (2017). Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests: *Thin-Walled Structures*, 120, 161-171. DOI: 10.1016/j.tws.2017.08.022
- Meskouris, K., Hinzen, K.-G., Butenweg, C. & Mistler, M. (2011). *Bauwerke und Erdbeben – Grundlagen – Anwendungen – Beispiele* (3. Aufl.). Vieweg + Teubner Verlag.
- Möhler, K. (1956). *Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln*. Technische Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.
- Naujoks, B. (2002). *Tragverhalten von Wandtafeln mit Kaltprofilen unter horizontalen und vertikalen Lasten* (Dissertation). Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 66.
- Pfau, J. (2007). *Untersuchung der Befestigungstechnik mit ballistischen Verbindungsmitteln zur rationellen Erstellung tragender Tafелеlemente in Stahlprofil-Leichtbauweise*. Mensch & Buch Verlag.
- Pocanschi, A. & Phocas, M. (2003). *Kräfte in Bewegung – Die Techniken des erdbebensicheren Bauens*. B. G. Teubner Verlag.
- Rädel, P. (2018). *Ein Beitrag zum erdbebensicheren Konstruieren mit gipsgebundenen Plattenwerkstoffen im Holzbau* (Dissertation). TUprints, Darmstadt.
- Shin, D.-H. & Kim, H.-J. (2020). Macro-Modelling Approach for the In-Plane Cyclic Response of Cold-Formed Steel Partition Walls: *Applied Sciences* 10 (22), 8163. DOI: 10.3390/app10228163
- Tichelmann, K., Pfau, J. & Becker, K. (2005). *Trockenbauatlas – Teil II – Einsatzbereiche, Sonderkonstruktionen, Gestaltung, Gebäude*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller.
- Tichelmann, K. (2006). *Tragverhalten von hybriden Systemen in Leichtbauweise mit Gipswerkstoffplatten*. Kölner Wissenschaftsverlag.

Normen- und Richtlinienverzeichnis

- DAST-Richtlinie 016 (1992). *Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen* (2. Aufl.). Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln.
- DIN 4103-1:2015-06 (2015). *Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise*. Beuth Verlag.
- DIN 18168-1:2007-04 (2007). *Gipsplatten-Deckenbekleidungen und Unterdecken – Teil 1: Anforderungen an die Ausführung*. Beuth Verlag.
- DIN 18180:2014-09 (2014). *Gipsplatten – Arten und Anforderungen*. Beuth Verlag.
- DIN 18181:2019-04 (2019). *Gipsplatten im Hochbau – Verarbeitung*. Beuth Verlag.
- DIN 18182-1:2015-11 (2015). *Zubehör für die Verarbeitung von Gipsplatten – Teil 1: Profile aus Stahlblech*. Beuth Verlag.
- DIN 18182-2:2019-12 (2019). *Zubehör für die Verarbeitung von Gipsplatten – Teil 2: Schnellbauschrauben, Klammern und Nägel*. Beuth Verlag.
- DIN 18183-1:2018-05 (2018). *Trennwände und Vorsatzschalen aus Gipsplatten mit Metallunterkonstruktionen – Teil 1: Beplankung mit Gipsplatten*. Beuth Verlag.
- DIN 18807-7:1995-09 (1995). *Trapezprofile im Hochbau – Teil 7: Aluminium Trapezprofile und ihre Verbindungen; Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Versuche*. Beuth Verlag. (die Norm wurde zurückgezogen)
- DIN EN 383:2007-03 (2007). *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel*. Beuth Verlag.
- DIN EN 520:2009-12 (2009). *Gipsplatten – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1990:2021-10 (2021). *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Beuth Verlag.

- DIN EN 1990/NA:2010-12 (2010). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1991-1-1:2010-12 (2010). *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 (2010). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010). *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 (2010). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1993-1-1:2010-12 (2010). *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1993-1-1/NA:2022-10 (2022). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1993-1-3:2010-12 (2010). *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1993-1-3/NA:2017-05 (2017). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag.

- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 (2013). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1998-1:2010-12 (2010). *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Beuth Verlag.
- DIN EN 1998-1/NA:2023-11 (2023). *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Beuth Verlag.
- DIN EN 10083-1:2006-10 (2006). *Vergütungsstähle – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag.
- DIN EN 10084:2008-06 (2008). *Einsatzstähle – Technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag.
- DIN EN 10132:2022-04 (2022). *Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung – Technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag.
- DIN EN 10346:2015-10 (2015). *Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag.
- DIN EN 12512:2006-12 (2006). *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln*. Beuth Verlag.
- DIN EN 13964:2014-08 (2014). *Unterdecken – Anforderungen und Prüfverfahren*. Beuth Verlag.
- DIN EN 14195:2020-07 (2020). *Metall-Unterkonstruktionsbauteile für Gipsplatten-Systeme – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Beuth Verlag.
- DIN EN 14566:2009-10 (2009). *Mechanische Befestigungsmittel für Gipsplattensysteme Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Beuth Verlag.
- DIN EN 26891:1991-07 (1991). *Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*. Beuth Verlag.

ETAG 003 (2012). *Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Bausätze für innere Trennwände zur Verwendung als nichttragende Wände*. EOTA, Brüssel.

Bildquellenverzeichnis

- Abbildung 1.1-1:.....Knauf Gips KG
- Abbildung 4.3-1:.....Knauf Aquapanel GmbH & Co. KG
- Abbildung 4.3-2:.....Blum Dietz GmbH
- Tabelle 5.2.1-1 / Typ 2:Bernd Naujoks
- Tabelle 5.2.1-1 / Typ 3:Jochen Pfau
- Tabelle 5.2.1-1 / Typ 4:Karsten Tichelmann
- Tabelle 5.2.1-1 / Typ 5:MPA Braunschweig
- Tabelle 5.2.1-1 / Typ 6:Universität Neapel Federico II
- Abbildung 5.2.1-2:.....Anna-Lea Berger
- Abbildung 5.2.2-1:.....MPA Braunschweig
- Abbildung 6.1.1-3.....Anna-Lea Berger

Anhang

A Statische Kleinteilversuche

A.1 Detaillierte Ergebnisse Verschiebungsmodul

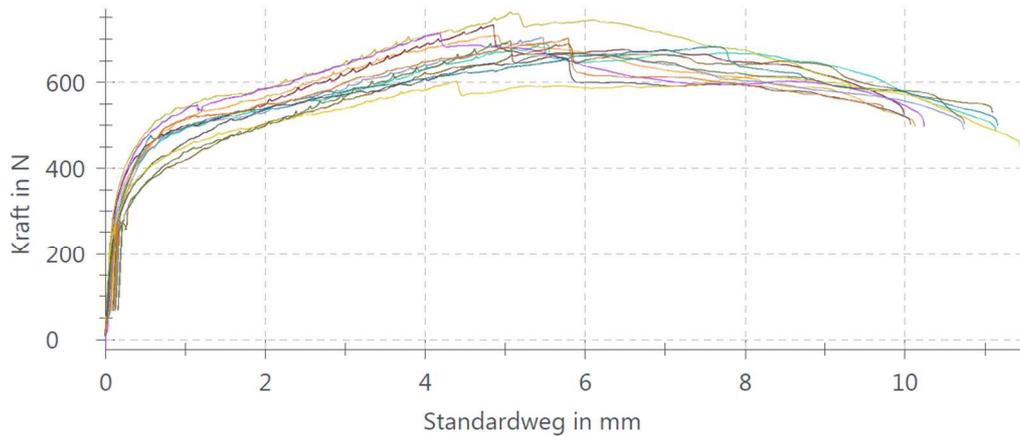


Abbildung A.1-1: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 %

Tabelle A.1-1: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,23 M.-% bei 30 °C / 50 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
Probe 1	963,8	4 002,2	3 981,7	4 045,1	3 084,7	2 693,1
Probe 2	679,3	3 602,2	3 695,4	3 813,1	2 388,1	2 220,1
Probe 3	1 052,5	4 063,8	4 098,0	4 108,1	3 341,1	2 946,9
Probe 4	1 133,2	4 081,2	4 071,3	4 032,2	3 633,2	3 165,5
Probe 5	694,8	4 551,0	4 503,1	4 390,7	2 695,0	3 299,8
Probe 6	366,7	4 273,2	4 188,0	4 043,9	1 639,2	1 419,6
Probe 7	383,2	4 159,3	4 085,0	3 996,9	1 692,5	2 014,1
Probe 8	486,0	4 407,3	4 372,7	4 247,6	1 990,6	1 927,6
Probe 9	458,2	4 143,1	4 093,8	3 920,3	1 809,3	1 593,2
Probe 10	585,1	3 983,8	4 009,1	4 064,4	2 009,2	1 667,4
Probe 11	298,3	4 116,5	4 096,4	4 038,6	1 380,4	1 123,0
Probe 12	439,9	3 926,5	4 071,8	4 109,9	1 865,7	2 168,0
\bar{x}	628,4	4 109,2	4 105,5	4 067,6	2 294,1	2 186,5
s	282,6	240,3	198,2	146,1	732,5	705,3
δ [%]	45,0	5,8	4,8	3,6	31,9	32,3

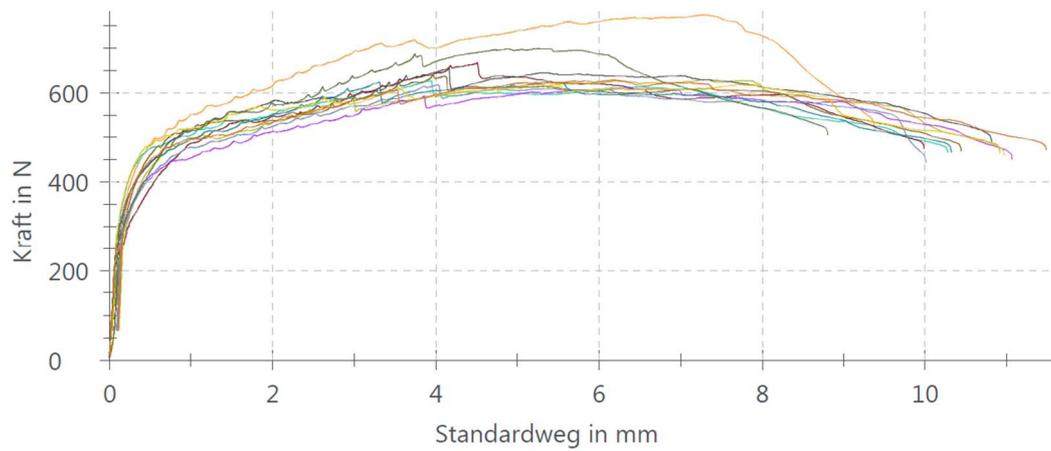


Abbildung A.1-2: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

Tabelle A.1-2: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
Probe 1	1 059,8	3 865,8	3 913,6	3 983,0	3 736,2	3 671,8
Probe 2	1 070,7	4 016,2	4 066,3	4 255,9	3 013,6	2 894,2
Probe 3	439,3	4 156,5	4 145,7	4 054,9	1 788,3	1 576,8
Probe 4	401,1	3 932,0	3 997,3	4 011,8	1 577,2	1 865,6
Probe 5	514,8	3 929,9	3 883,7	4 113,4	1 869,9	1 706,0
Probe 6	482,4	3 749,3	3 774,4	3 865,6	1 807,1	2 278,0
Probe 7	494,1	4 116,6	4 059,4	4 052,2	1 829,6	1 554,3
Probe 8	728,2	4 140,4	4 118,6	4 180,7	2 459,0	2 212,6
Probe 9	1 042,6	4 040,0	4 034,9	4 124,2	3 112,9	2 953,2
Probe 10	1 075,5	4 040,7	4 080,6	4 080,6	2 926,7	2 848,4
Probe 11	717,7	4 125,8	4 196,2	4 320,4	2 688,0	2 537,2
Probe 12	436,4	4 232,5	4 311,3	4 380,6	1 650,6	1 414,4
\bar{x}	705,2	4 028,8	4 048,5	4 118,6	2 371,6	2 292,7
s	282,3	138,7	144,6	146,4	713,2	702,7
δ [%]	40,0	3,4	3,6	3,6	30,1	30,6

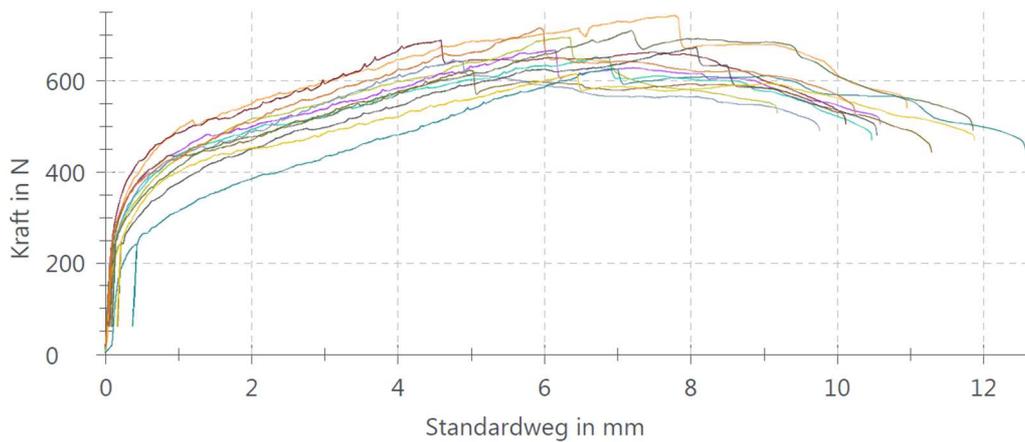


Abbildung A.1-3: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 %

Tabelle A.1-3: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,40 M.-% bei 20 °C / 65 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
Probe 1	573,7	4 250,2	4 119,6	Entfällt, da $0,4 F_{\max,est} < 250 \text{ N}$	2 570,6	2 743,5
Probe 2	535,6	4 006,9	3 983,7		2 148,5	1 965,9
Probe 3	1 042,8	3 869,0	3 850,5		3 386,7	3 221,0
Probe 4	508,6	4 189,9	4 049,7		2 263,1	2 097,5
Probe 5	792,8	4 165,6	4 282,4		2 961,9	2 625,2
Probe 6	691,4	4 247,7	4 245,1		2 543,7	2 242,2
Probe 7	527,4	3 971,8	3 932,7		2 098,9	1 823,0
Probe 8	130,4	2 891,3	3 228,9		619,0	639,6
Probe 9	286,8	4 013,7	3 866,2		1 394,2	1 156,5
Probe 10	297,6	3 505,3	3 756,5		1 256,5	1 060,3
Probe 11	488,1	4 155,2	4 184,2		2 279,7	1 948,9
Probe 12	940,2	3 737,8	3 780,1		3 314,3	3 129,0
\bar{x}	567,9	3 917,0	3 940,0		2 236,4	2 054,4
s	267,3	391,9	285,2		827,5	810,3
δ [%]	47,1	10,0	7,2		37,0	39,4

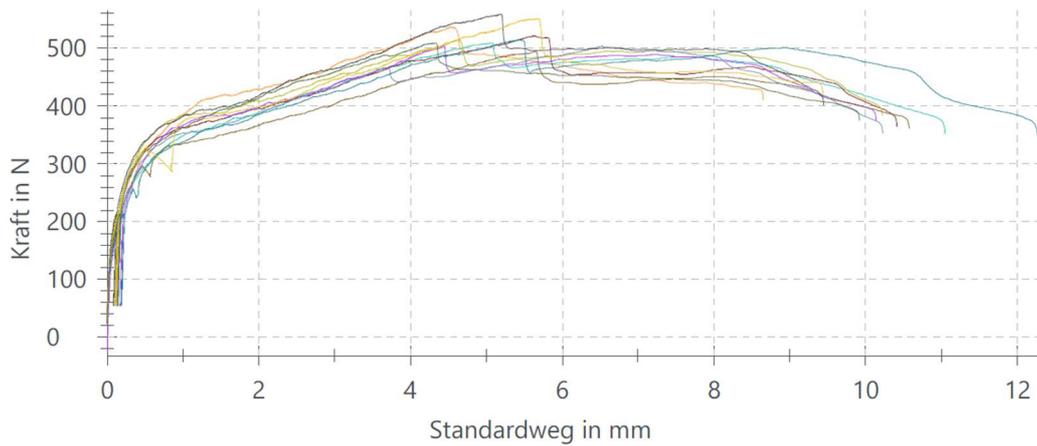


Abbildung A.1-4: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

Probenausfall wegen unplanmäßiger Beschädigung

Tabelle A.1-4: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
Probe 1	360,6	3 943,0	3 755,4	Entfällt, da $0,4 F_{\max,est} < 250 \text{ N}$	1 439,7	1 157,5
Probe 2	Probenausfall				Probenausfall	
Probe 3	321,3	3 781,2	3 718,0		1 218,2	973,2
Probe 4	431,2	4 310,0	4 040,8		1 635,6	1 313,8
Probe 5	441,2	3 819,6	3 796,5		1 583,1	1 297,4
Probe 6	272,1	4 420,3	4 002,8		1 048,3	889,1
Probe 7	323,2	3 847,9	3 661,1		1 199,7	957,3
Probe 8	326,0	4 388,7	4 117,9		1 236,7	966,2
Probe 9	249,4	4 012,8	3 804,6		986,1	774,5
Probe 10	514,4	4 391,3	4 210,8		2 016,2	1 613,9
Probe 11	388,5	4 371,7	4 025,6		1 570,0	1 240,4
Probe 12	343,3	4 413,6	4 189,8		1 291,5	1 017,5
\bar{x}	361,0	4 154,6	3 938,5		1 384,1	1 109,2
s	77,8	270,2	197,2		300,5	241,3
δ [%]	21,6	6,5	5,0		21,7	21,8

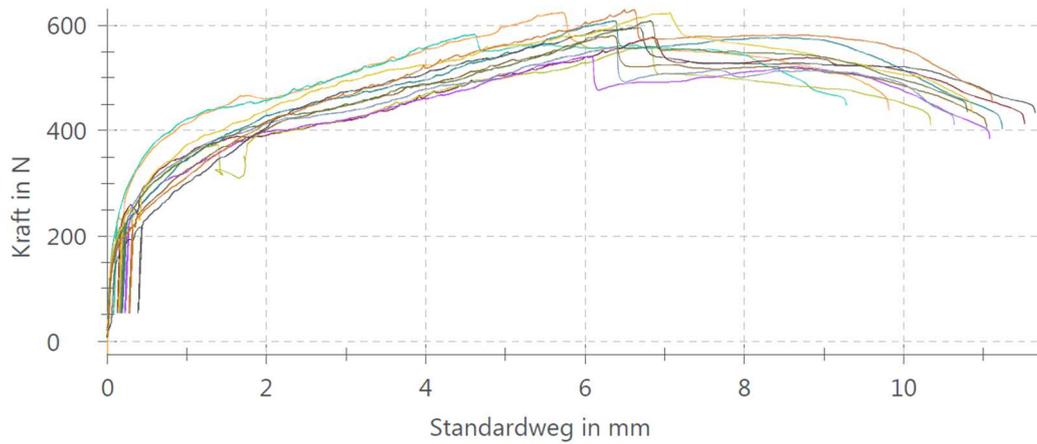


Abbildung A.1-5: Kraft-Standardweg-Seriengrafik (Zwick Software) der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 %

Tabelle A.1-5: Verschiebungsmoduln der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % basierend auf den gemittelten Messwerten der beiden externen Wegaufnehmer

Proben mit 1,34 M.-% bei 30 °C / 90 %	C _{50-100N} [N/mm]	C _{100-150N} [N/mm]	C _{150-200N} [N/mm]	C _{200-250N} [N/mm]	K _i [N/mm]	K _s [N/mm]
Probe 1	540,5	4 443,4	4 197,9	Entfällt, da $0,4 F_{\max, \text{est}} < 250 \text{ N}$	2 229,6	1 983,9
Probe 2	555,5	4 363,9	4 023,6		2 024,8	1 936,0
Probe 3	356,0	3 834,4	3 743,5		1 413,7	1 219,4
Probe 4	281,5	3 748,9	3 580,2		1 140,3	976,2
Probe 5	211,6	3 850,0	3 471,0		867,2	680,0
Probe 6	173,2	3 777,6	3 502,8		775,6	627,7
Probe 7	294,1	3 902,4	3 473,8		1 213,0	965,8
Probe 8	245,0	3 635,9	3 610,7		1 170,1	941,5
Probe 9	124,7	3 706,0	3 698,2		591,2	525,6
Probe 10	322,0	3 966,0	3 648,0		1 438,3	1 182,2
Probe 11	262,9	3 675,4	3 524,2		1 168,9	969,5
Probe 12	170,2	4 343,6	4 050,9		833,0	695,6
\bar{x}	294,8	3 937,3	3 710,4		1 238,8	1 058,6
s	135,7	285,6	247,7		488,6	471,9
δ [%]	46,1	7,3	6,7		39,4	44,6

A.2 Detaillierte Ergebnisse Fließverschiebung und Duktilität

Tabelle A.2-1: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,23 M.-% bei Klima 30 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{\max}; 0,8 V_{\max}]$

Proben mit 0,23 M.-% bei 30 °C / 50 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	$R_{f(F)}^2$	$R_{f(V)}^2$	V_y [mm]	D
Probe 1	709,01	4,78	567,19	9,17	0,9981	0,9937	0,0915	100,15
Probe 2	689,98	5,38	551,98	10,14	0,9954	0,9873	0,0965	105,04
Probe 3	733,85	4,71	586,77	9,35	0,9980	0,9967	0,0830	112,71
Probe 4	763,30	4,87	610,05	8,91	0,9983	0,9822	0,0422	211,24
Probe 5	713,43	4,00	569,53	9,42	0,9688	0,9935	0,0444	212,21
Probe 6	689,51	5,67	551,64	10,64	0,9104	0,9952	0,0807	131,92
Probe 7	704,13	5,26	563,21	9,48	0,9827	0,9903	0,1190	79,61
Probe 8	683,44	7,36	546,76	10,36	0,9791	0,9880	0,0538	192,51
Probe 9	659,97	5,49	527,76	9,60	0,9036	0,9749	0,0679	141,30
Probe 10	614,78	7,90	491,73	10,76	0,9820	0,7956	$R_{f(V)}^2 < 0,8$	
Probe 11	697,15	4,91	556,80	10,20	0,8749	0,9955	0,1520	67,08
Probe 12	702,95	5,57	562,16	8,91	0,9868	0,9893	0,0585	152,45
\bar{x}	696,79	5,49	557,13	9,74			0,0809	136,93
s	36,52	1,11	29,08	0,65			0,0333	50,68
δ [%]	5,24	20,14	5,22	6,68			41,20	37,01

Tabelle A.2-2: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{\max}; 0,8 V_{\max}]$

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %	F_{\max} [N]	$V_{F_{\max}}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	$R_{f(F)}^2$	$R_{f(V)}^2$	V_y [mm]	D
Probe 1	774,66	7,14	619,64	8,61	0,9096	0,9069	0,0402	213,99
Probe 2	626,90	3,80	500,93	9,63	0,9987	0,9784	0,0317	303,86
Probe 3	666,45	4,36	532,43	9,10	0,9914	0,9827	0,0522	174,44
Probe 4	629,12	6,93	502,62	10,04	0,7190	0,8444	$R_{f(F)}^2; R_{f(V)}^2 < 0,8$	
Probe 5	610,35	5,99	488,12	10,48	0,9997	0,9442	0,0612	171,34
Probe 6	641,08	3,80	512,45	9,71	0,9912	0,9308	0,0604	160,84
Probe 7	618,59	3,88	494,72	9,58	0,9814	0,9933	0,0616	155,60
Probe 8	624,08	3,16	499,25	9,73	0,9952	0,9884	0,0469	207,56
Probe 9	655,91	4,02	524,58	10,29	0,9920	0,8949	0,0573	179,48
Probe 10	618,78	7,41	494,81	10,32	0,2792	0,6971	$R_{f(F)}^2; R_{f(V)}^2 < 0,8$	
Probe 11	698,64	5,06	558,19	7,97	0,9950	0,9825	0,0649	122,84
Probe 12	628,73	6,04	503,10	10,79	0,9715	0,9044	0,0255	423,32
\bar{x}	649,44	5,13	519,24	9,69			0,0502	211,33
s	46,63	1,50	37,28	0,81			0,0137	88,81
δ [%]	7,18	29,29	7,18	8,36			27,29	42,02

Tabelle A.2-3: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,40 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,40 M.-% bei 20 °C / 65 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	$R_{f(F)}^2$	$R_{f(V)}^2$	V_y [mm]	D
Probe 1	743,34	7,59	594,41	9,99	0,9249	0,9782	0,1046	95,49
Probe 2	653,29	6,44	522,51	9,65	0,9834	0,9907	0,0458	210,79
Probe 3	688,72	4,46	550,11	9,67	0,9913	0,9920	0,0684	141,35
Probe 4	695,45	6,11	556,32	8,78	0,9761	0,9892	0,0677	129,67
Probe 5	667,08	6,02	533,59	10,10	0,9799	0,9955	0,0679	148,73
Probe 6	623,60	4,84	498,34	10,64	0,9887	0,9949	0,0463	229,94
Probe 7	646,06	4,62	516,67	9,41	0,9802	0,9952	0,0681	138,14
Probe 8	626,43	6,59	500,73	11,43	0,7334	0,9974	$R_{f(F)}^2 < 0,8$	
Probe 9	673,25	7,91	538,60	9,76	0,7955	0,9904	$R_{f(F)}^2 < 0,8$	
Probe 10	615,57	6,31	492,51	11,57	0,8428	0,9949	0,0916	126,39
Probe 11	710,27	7,02	567,37	10,60	0,8915	0,9971	0,0721	147,03
Probe 12	715,59	5,83	572,43	9,73	0,9749	0,9926	0,0466	208,99
\bar{x}	671,55	6,15	536,97	10,11			0,0679	157,65
s	40,38	1,10	32,26	0,82			0,0193	43,65
δ [%]	6,01	17,87	6,01	8,10			28,35	27,69

Tabelle A.2-4: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 65 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	$R_{f(F)}^2$	$R_{f(V)}^2$	V_y [mm]	D
Probe 1	536,77	4,45	429,64	8,33	0,9193	0,9824	0,1248	66,73
Probe 2	Probenausfall							
Probe 3	508,83	4,95	406,23	10,19	0,9337	0,9971	0,0920	110,79
Probe 4	521,01	5,56	416,96	9,65	0,9326	0,9948	0,0726	132,98
Probe 5	514,32	4,55	411,34	9,92	0,9587	0,9837	0,0847	117,13
Probe 6	504,15	4,36	402,89	9,68	0,9155	0,9850	0,1511	64,06
Probe 7	494,89	5,58	395,78	9,91	0,9280	0,9976	0,1041	95,19
Probe 8	504,29	6,44	402,81	9,64	0,8934	0,8516	0,1100	87,62
Probe 9	514,18	5,38	410,69	11,03	0,9136	0,9976	0,1364	80,85
Probe 10	559,00	5,13	447,14	8,97	0,9118	0,9936	0,0705	127,23
Probe 11	551,28	5,58	441,17	9,02	0,9032	0,9927	0,1087	82,93
Probe 12	508,77	4,24	407,28	9,37	0,8963	0,9942	0,1011	92,67
\bar{x}	519,77	5,11	415,63	9,61			0,1051	96,20
s	20,56	0,68	16,63	0,71			0,0253	23,17
δ [%]	3,96	13,24	4,00	7,35			24,03	24,08

Tabelle A.2-5: Fließverschiebung V_y und Duktilität D der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 1,34 M.-% bei Klima 30 °C / 90 % unter Berücksichtigung einer Bestimmtheitsmaß-Grenze $R^2 \geq 0,8$ der Näherungsgeraden $f(F)$ für $[0,1 F_{\max}; 0,4 F_{\max}]$ und $f(V)$ für $[0,2 V_{F\max}; 0,8 V_{F\max}]$

Proben mit 1,34 M.-% bei 30 °C / 90 %	F_{\max} [N]	$V_{F\max}$ [mm]	$F_u(b)$ [N]	$V_u(b)$ [mm]	$R_{f(F)}^2$	$R_{f(V)}^2$	V_y [mm]	D
Probe 1	624,43	5,66	498,96	9,28	0,9117	0,9856	0,1068	86,95
Probe 2	583,16	4,44	466,25	8,96	0,9407	0,9902	0,0852	105,11
Probe 3	577,41	6,76	461,23	10,79	0,9237	0,9792	0,1250	86,34
Probe 4	560,34	6,71	447,54	9,94	0,8790	0,9743	0,1153	86,16
Probe 5	541,65	5,97	432,74	10,43	0,8574	0,9855	0,1770	58,95
Probe 6	580,44	6,27	464,20	10,31	0,8285	0,9892	0,1845	55,87
Probe 7	559,19	6,26	446,35	10,22	0,9071	0,9903	0,1398	73,09
Probe 8	608,38	6,30	484,17	10,31	0,8944	0,9890	0,1802	57,21
Probe 9	595,33	6,49	475,80	10,80	0,7072	0,9514	$R_{f(F)}^2 < 0,8$	
Probe 10	623,17	6,96	497,75	10,16	0,9052	0,9701	0,1975	51,44
Probe 11	607,95	6,72	485,92	10,10	0,8944	0,9924	0,2011	50,24
Probe 12	629,08	6,38	502,45	10,57	0,7318	0,9875	$R_{f(F)}^2 < 0,8$	
\bar{x}	590,88	6,24	471,95	10,16			0,1512	71,14
s	28,53	0,67	22,73	0,55			0,0417	19,05
δ [%]	4,83	10,77	4,82	5,44			27,60	26,78

B Zyklische Kleinteilversuche

B.1 Protokoll zyklische Prüfungen

Tabelle B.1-1: Protokoll der zyklischen Prüfungen

	Abschnitt	Bezeichnung	Ergebnis
Zyklus 1	1	Druck 25 % Vy	
	2	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	3	Zug 25% Vy	
	4	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklus 2	5	Druck 50% Vy	
	6	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	7	Zug 50% Vy	
Zyklengruppe 3 - 4 - 5	8	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	9	Druck 75% Vy	
	10	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	11	Zug 75% Vy	
	12	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	13	Druck 75% Vy	
	14	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	15	Zug 75% Vy	
	16	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	17	Druck 75% Vy	$ \Delta F_c $
	18	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	19	Zug 75% Vy	$ \Delta F_t $
20	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}	
Zyklengruppe 6 - 7 - 8	21	Druck 100% Vy	
	22	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	23	Zug 100% Vy	
	24	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	25	Druck 100% Vy	
	26	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	27	Zug 100% Vy	
	28	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	29	Druck 100% Vy	$ \Delta F_c $
	30	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	31	Zug 100% Vy	$ \Delta F_t $
	32	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 9 - 10 - 11	33	Druck 200% Vy	
	34	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	35	Zug 200% Vy	
	36	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	37	Druck 200% Vy	
	38	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	39	Zug 200% Vy	
	40	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	41	Druck 200% Vy	$ \Delta F_c $
	42	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	43	Zug 200% Vy	$ \Delta F_t $
	44	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 12 - 13 - 14	45	Druck 400% Vy	
	46	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	47	Zug 400% Vy	
	48	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	49	Druck 400% Vy	
	50	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	51	Zug 400% Vy	
	52	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	53	Druck 400% Vy	$ \Delta F_c $
	54	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	55	Zug 400% Vy	$ \Delta F_t $
	56	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 15 - 16 - 17	57	Druck 600% Vy	
	58	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	59	Zug 600% Vy	
	60	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	61	Druck 600% Vy	
	62	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	63	Zug 600% Vy	
	64	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	65	Druck 600% Vy	$ \Delta F_c $
	66	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	67	Zug 600% Vy	$ \Delta F_t $
	68	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 18 - 19 - 20	69	Druck 800% Vy	
	70	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	71	Zug 800% Vy	
	72	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	73	Druck 800% Vy	
	74	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	75	Zug 800% Vy	
	76	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	77	Druck 800% Vy	$ \Delta F_c $
	78	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	79	Zug 800% Vy	$ \Delta F_t $
	80	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 21 - 22 - 23	81	Druck 1000% Vy	
	82	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	83	Zug 1000% Vy	
	84	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	85	Druck 1000% Vy	
	86	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	87	Zug 1000% Vy	
	88	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	89	Druck 1000% Vy	$ \Delta F_c $
	90	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	91	Zug 1000% Vy	$ \Delta F_t $
	92	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 24 - 25 - 26	93	Druck 1200% Vy	
	94	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	95	Zug 1200% Vy	
	96	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	97	Druck 1200% Vy	
	98	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	99	Zug 1200% Vy	
	100	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	101	Druck 1200% Vy	$ \Delta F_c $
	102	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	103	Zug 1200% Vy	$ \Delta F_t $
	104	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}

Fortsetzung Tabelle B.1-1

	Abschnitt	Bezeichnung	Ergebnis
Zyklengruppe 27 - 28 - 29	105	Druck 1400% Vy	
	106	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	107	Zug 1400% Vy	
	108	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	109	Druck 1400% Vy	
	110	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	111	Zug 1400% Vy	
	112	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	113	Druck 1400% Vy	$ \Delta F_c $
	114	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
115	Zug 1400% Vy	$ \Delta F_1 $	
116	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}	
Zyklengruppe 30 - 31 - 32	117	Druck 1600% Vy	
	118	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	119	Zug 1600% Vy	
	120	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	121	Druck 1600% Vy	
	122	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	123	Zug 1600% Vy	
	124	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	125	Druck 1600% Vy	$ \Delta F_c $
	126	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	127	Zug 1600% Vy	$ \Delta F_1 $
	128	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 33 - 34 - 35	129	Druck 1800% Vy	
	130	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	131	Zug 1800% Vy	
	132	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	133	Druck 1800% Vy	
	134	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	135	Zug 1800% Vy	
	136	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	137	Druck 1800% Vy	$ \Delta F_c $
	138	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	139	Zug 1800% Vy	$ \Delta F_1 $
	140	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 36 - 37 - 38	141	Druck 2000% Vy	
	142	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	143	Zug 2000% Vy	
	144	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	145	Druck 2000% Vy	
	146	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	147	Zug 2000% Vy	
	148	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	149	Druck 2000% Vy	$ \Delta F_c $
	150	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	151	Zug 2000% Vy	$ \Delta F_1 $
	152	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 39 - 40 - 41	153	Druck 2200% Vy	
	154	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	155	Zug 2200% Vy	
	156	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	157	Druck 2200% Vy	
	158	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	159	Zug 2200% Vy	
	160	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	161	Druck 2200% Vy	$ \Delta F_c $
	162	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	163	Zug 2200% Vy	$ \Delta F_1 $
	164	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}

	Abschnitt	Bezeichnung	Ergebnis
Zyklengruppe 42 - 43 - 44	165	Druck 2400% Vy	
	166	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	167	Zug 2400% Vy	
	168	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	169	Druck 2400% Vy	
	170	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	171	Zug 2400% Vy	
	172	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	173	Druck 2400% Vy	$ \Delta F_c $
	174	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	175	Zug 2400% Vy	$ \Delta F_1 $
	176	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 45 - 46 - 47	177	Druck 2600% Vy	
	178	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	179	Zug 2600% Vy	
	180	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	181	Druck 2600% Vy	
	182	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	183	Zug 2600% Vy	
	184	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	185	Druck 2600% Vy	$ \Delta F_c $
	186	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	187	Zug 2600% Vy	$ \Delta F_1 $
	188	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 48 - 49 - 50	189	Druck 2800% Vy	
	190	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	191	Zug 2800% Vy	
	192	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	193	Druck 2800% Vy	
	194	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	195	Zug 2800% Vy	
	196	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	197	Druck 2800% Vy	$ \Delta F_c $
	198	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	199	Zug 2800% Vy	$ \Delta F_1 $
	200	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
Zyklengruppe 51 - 52 - 53	201	Druck 3000% Vy	
	202	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	203	Zug 3000% Vy	
	204	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	205	Druck 3000% Vy	
	206	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	207	Zug 3000% Vy	
	208	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	209	Druck 3000% Vy	$ \Delta F_c $
	210	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}
	211	Zug 3000% Vy	$ \Delta F_1 $
	212	Entlasten (Weg null)	E_p, E_d, v_{eq}

B.2 Detaillierte Ergebnisse Festigkeitsminderung

Tabelle B.2-1: Absolute und relative Festigkeitsminderung je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % und Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

	Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)							
	Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 %				Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 %			
	Halbzyklus Druckbereich		Halbzyklus Zugbereich		Halbzyklus Druckbereich		Halbzyklus Zugbereich	
	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]	\Delta F abs [N]	\Delta F rel [%]
Probe 1	82,06	22,62	97,00	29,43	36,89	13,83	67,11	24,59
Probe 2	64,11	18,38	116,24	26,58	55,62	20,72	45,77	22,04
Probe 3	104,50	24,96	105,43	27,37	43,78	17,75	57,70	23,77
Probe 4	98,60	24,16	184,83	33,60	51,58	20,57	69,59	28,49
Probe 5	75,38	21,07	89,29	26,20	45,95	21,00	48,14	26,07
Probe 6	57,00	16,15	71,59	18,67	58,10	24,45	48,33	26,12
Probe 7	56,99	22,67	63,78	24,77	48,46	21,10	69,58	30,86
Probe 8	61,42	16,92	95,65	23,97	34,11	16,97	58,78	27,34
Probe 9	78,23	18,80	96,24	29,11	40,93	22,25	40,14	24,74
Probe 10	73,67	17,59	79,50	25,70	41,40	20,10	38,94	21,97
Probe 11	95,04	21,88	73,05	40,82	46,49	20,69	65,62	27,19
Probe 12	96,05	23,53	71,22	24,43	43,56	21,11	46,65	22,70
\bar{x}	78,59	20,73	95,32	27,55	45,57	20,05	54,69	25,49
s	16,87	3,03	32,3	5,51	7,11	2,73	11,4	2,72
δ [%]	21,47	14,62	33,89	20,00	15,6	13,62	20,84	10,67

B.3 Detaillierte Ergebnisse Energiedissipation, verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis

Tabelle B.3-1: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 % $V_y = 0,06 \text{ mm}$	zum Ende der Zyklengruppe 21 – 22 – 23					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
Probe 1	63,66	85,05	0,119	59,78	90,30	0,105
Probe 2	64,83	86,06	0,120	70,12	92,94	0,120
Probe 3	60,85	94,93	0,102	52,02	79,93	0,104
Probe 4	67,29	93,47	0,115	58,38	81,25	0,114
Probe 5	60,79	85,48	0,113	53,82	80,19	0,107
Probe 6	73,41	89,78	0,130	77,36	98,15	0,125
Probe 7	59,84	58,78	0,162	61,08	71,41	0,136
Probe 8	65,44	91,38	0,114	74,35	98,59	0,120
Probe 9	58,74	102,15	0,092	46,65	84,27	0,088
Probe 10	74,58	104,35	0,114	57,54	85,58	0,107
Probe 11	71,14	102,52	0,110	55,77	67,05	0,132
Probe 12	65,69	94,41	0,111	46,74	62,63	0,119
\bar{x}	65,52	90,7	0,117	59,47	82,69	0,115
s	5,27	12,05	0,017	9,95	11,5	0,013
δ [%]	8,04	13,29	14,53	16,73	13,91	11,3

Tabelle B.3-2: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 % bei Prüfmö (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

Proben mit 0,29 M.-% bei 20 °C / 50 % $V_y = 0,06 \text{ mm}$	Prüfmö (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
Probe 1	117,69	285,96	0,066	111,30	305,18	0,058
Probe 2	141,38	268,60	0,084	128,89	267,55	0,077
Probe 3	134,88	333,83	0,064	121,08	270,75	0,071
Probe 4	107,38	300,57	0,057	100,45	216,12	0,074
Probe 5	125,97	255,41	0,078	117,54	249,31	0,075
Probe 6	131,09	276,19	0,076	120,92	285,79	0,067
Probe 7	143,08	233,47	0,098	132,24	244,58	0,086
Probe 8	127,70	298,20	0,068	128,26	299,27	0,068
Probe 9	116,32	306,64	0,060	108,34	267,70	0,064
Probe 10	125,35	300,22	0,066	122,09	275,40	0,071
Probe 11	154,40	330,58	0,074	141,17	279,73	0,080
Probe 12	137,28	280,96	0,078	118,51	224,72	0,084
\bar{x}	130,21	289,22	0,072	120,9	265,51	0,073
s	13,03	29,01	0,011	11,05	27,41	0,008
δ [%]	10,01	10,03	15,28	9,14	10,32	10,96

Tabelle B.3-3: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % zum Ende der Zyklen­gruppe 21 – 22 – 23

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 % $V_y = 0,1 \text{ mm}$	zum Ende der Zyklen­gruppe 21 – 22 – 23					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
Probe 1	59,68	97,65	0,097	54,80	91,10	0,096
Probe 2	69,18	95,18	0,116	53,75	73,39	0,117
Probe 3	96,64	95,49	0,161	90,67	75,55	0,191
Probe 4	74,81	104,32	0,114	63,88	88,50	0,115
Probe 5	70,27	94,57	0,118	60,18	73,61	0,130
Probe 6	60,85	94,52	0,102	50,60	61,48	0,131
Probe 7	66,97	96,05	0,111	57,61	76,96	0,119
Probe 8	64,34	87,69	0,117	58,97	71,55	0,131
Probe 9	61,18	84,00	0,116	53,65	71,50	0,119
Probe 10	61,02	91,12	0,107	56,19	85,26	0,105
Probe 11	60,65	81,43	0,119	57,56	73,66	0,124
Probe 12	55,36	82,92	0,106	51,24	85,98	0,095
\bar{x}	66,75	92,08	0,115	59,09	77,38	0,123
s	10,86	6,83	0,016	10,64	8,62	0,025
δ [%]	16,27	7,42	13,91	18,01	11,14	20,33

Tabelle B.3-4: Energiedissipation E_d , verfügbare potentielle Energie und äquivalentes Dämpfungsverhältnis v_{eq} je Halbzyklus der Zugscherproben mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 % bei Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)

Proben mit 0,61 M.-% bei 20 °C / 90 % $V_y = 0,1 \text{ mm}$	Prüfende (zum Ende der Zyklengruppe 51 – 52 – 53)					
	Halbzyklus Druckbereich			Halbzyklus Zugbereich		
	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]	E_d [Nmm]	E_p [Nmm]	v_{eq} [-]
Probe 1	136,22	345,62	0,063	133,30	309,57	0,069
Probe 2	143,58	320,16	0,071	133,36	243,46	0,087
Probe 3	206,52	305,09	0,108	191,60	278,25	0,110
Probe 4	126,53	299,41	0,067	122,95	262,78	0,074
Probe 5	102,20	259,94	0,063	107,81	205,43	0,084
Probe 6	115,41	270,06	0,068	105,37	205,67	0,082
Probe 7	118,35	272,66	0,069	99,48	234,28	0,068
Probe 8	116,65	251,25	0,074	106,52	234,97	0,072
Probe 9	108,27	215,24	0,080	98,02	183,68	0,085
Probe 10	94,30	247,43	0,061	86,18	208,07	0,066
Probe 11	99,05	268,15	0,059	103,59	264,48	0,062
Probe 12	138,44	320,09	0,069	142,54	343,81	0,066
\bar{x}	125,46	281,26	0,071	119,23	247,87	0,077
s	30,03	37,28	0,013	28,37	46,8	0,013
δ [%]	23,94	13,25	18,31	23,79	18,88	16,88

B.4 Schleifenzyklen bei Klima 20 °C / 50 %

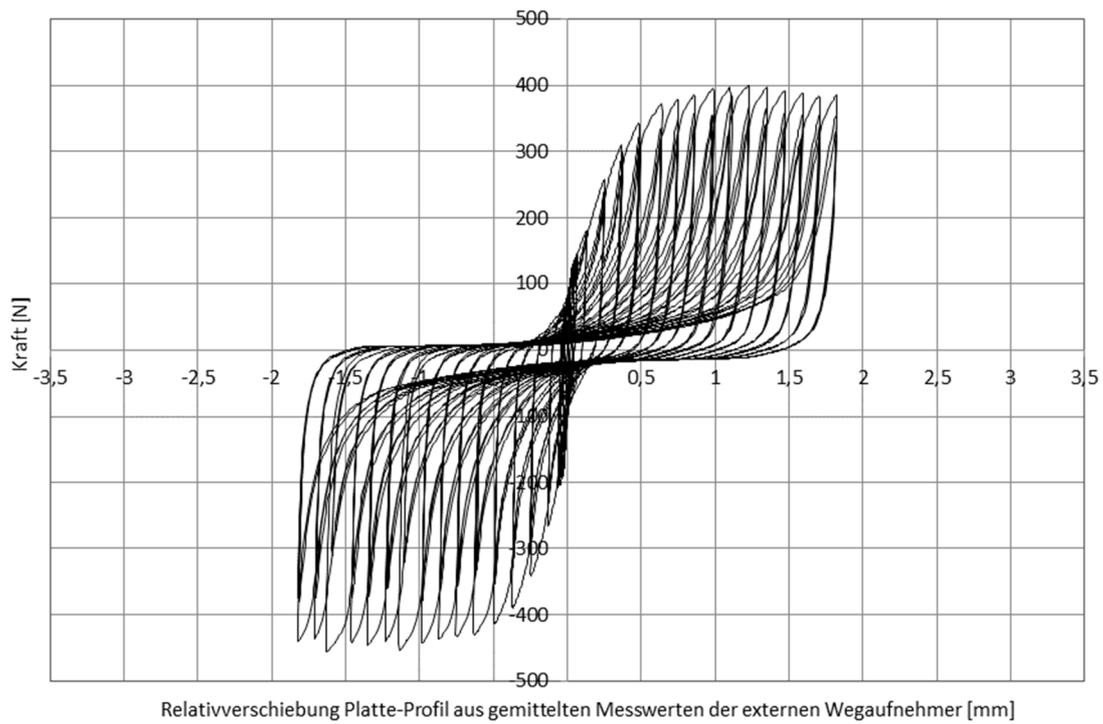


Abbildung B.4-1: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 1 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

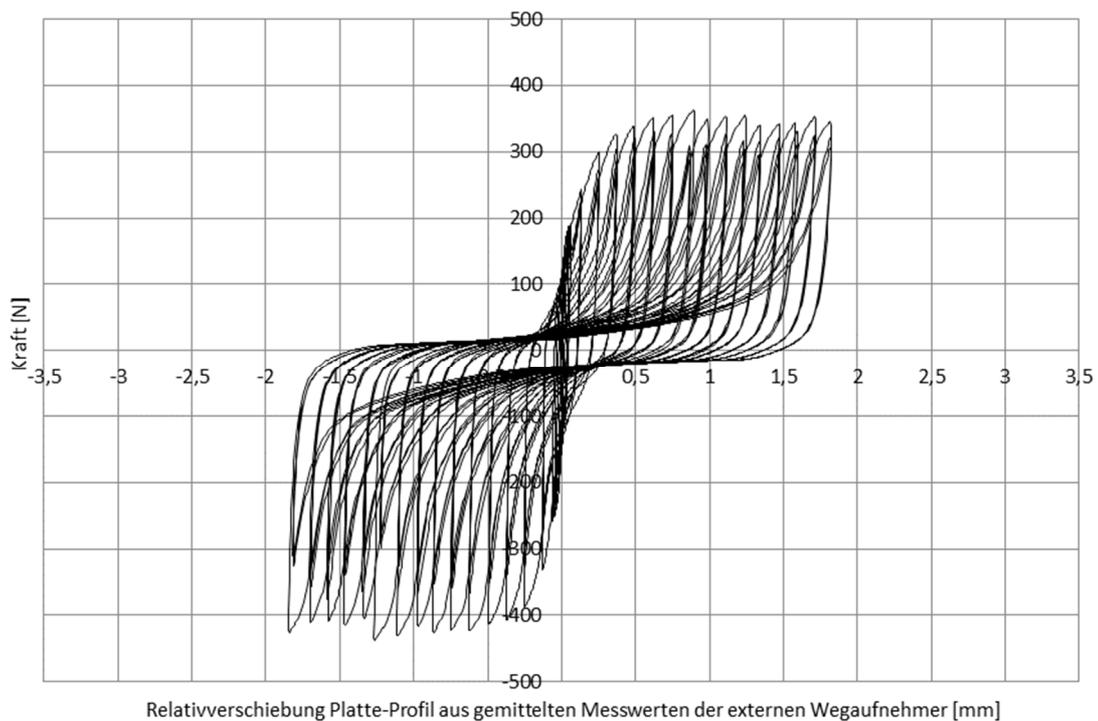


Abbildung B.4-2: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 2 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

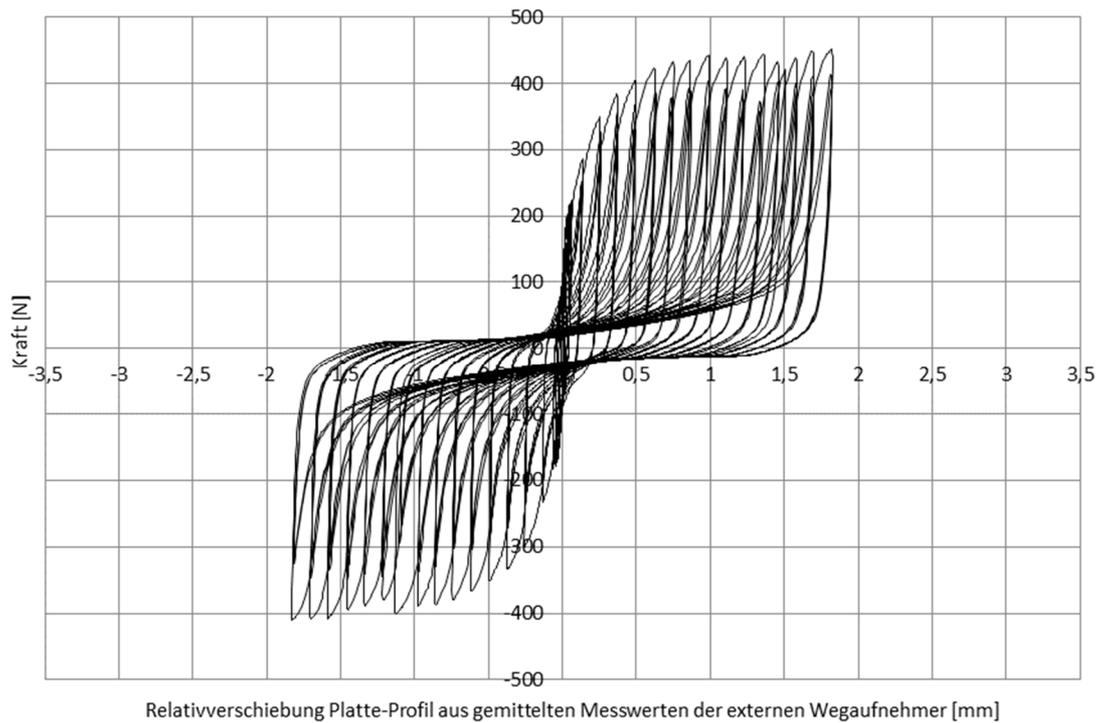


Abbildung B.4-3: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 3 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

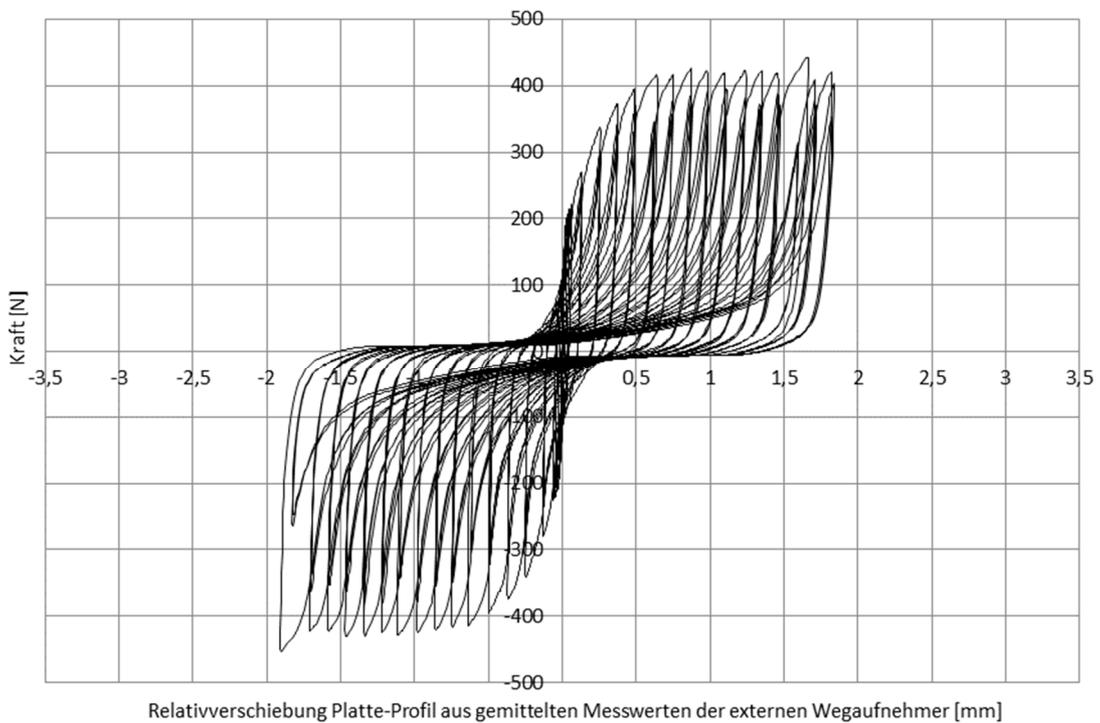


Abbildung B.4-4: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 4 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

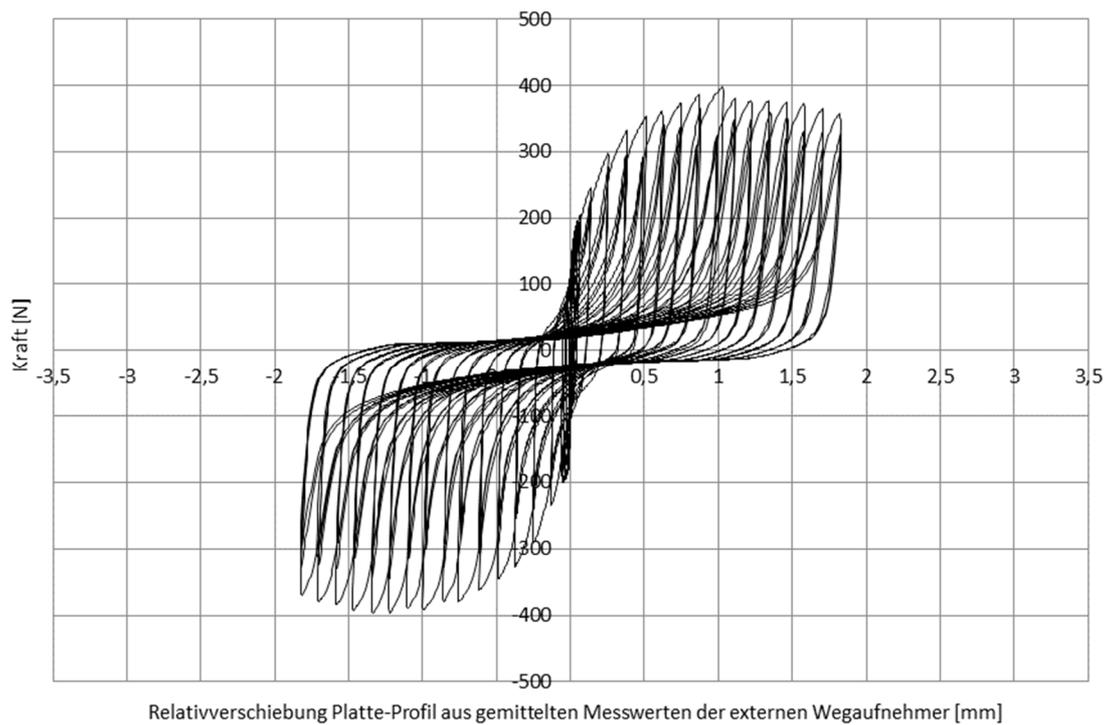


Abbildung B.4-5: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 5 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

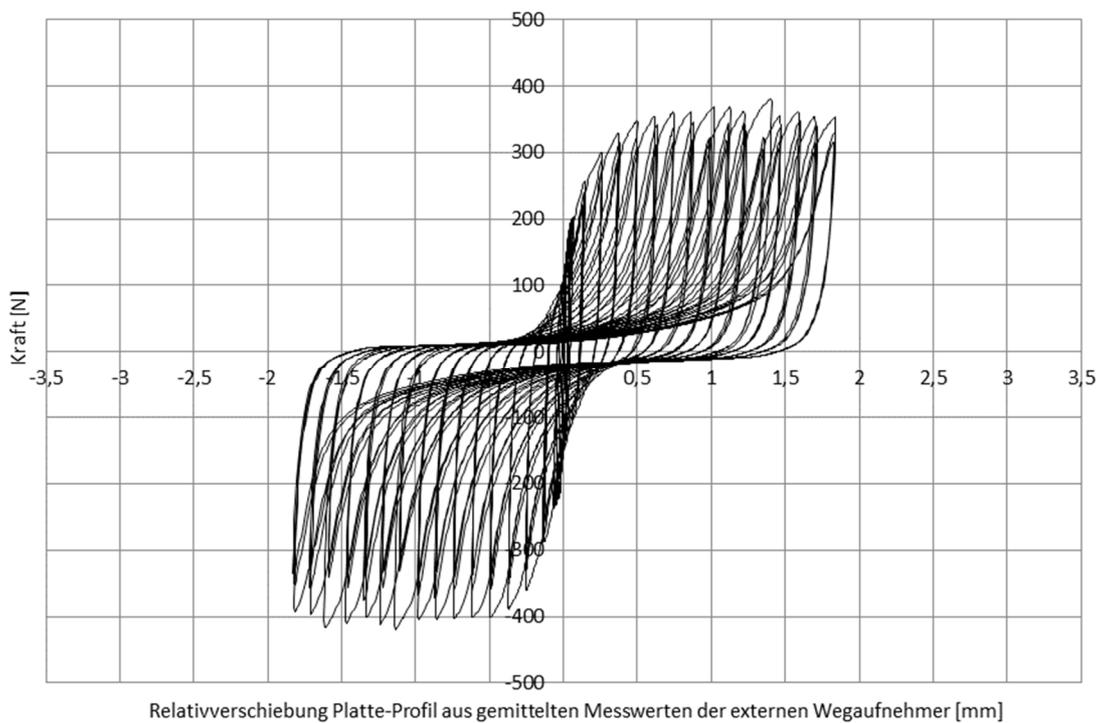


Abbildung B.4-6: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 6 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

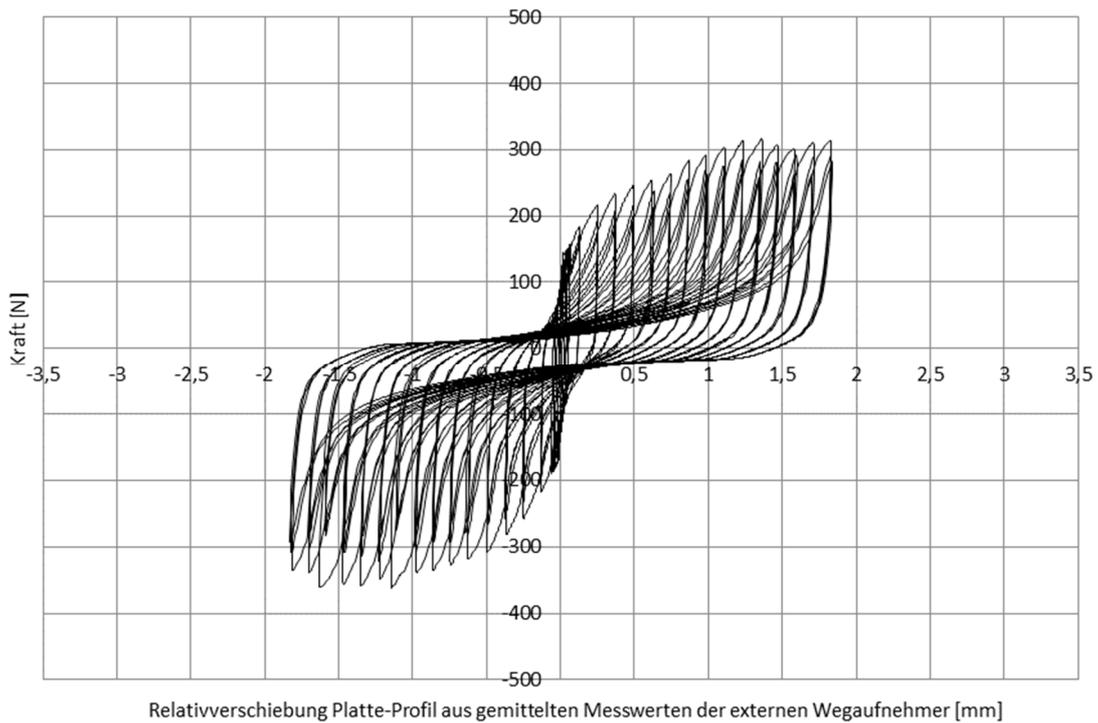


Abbildung B.4-7: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 7 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

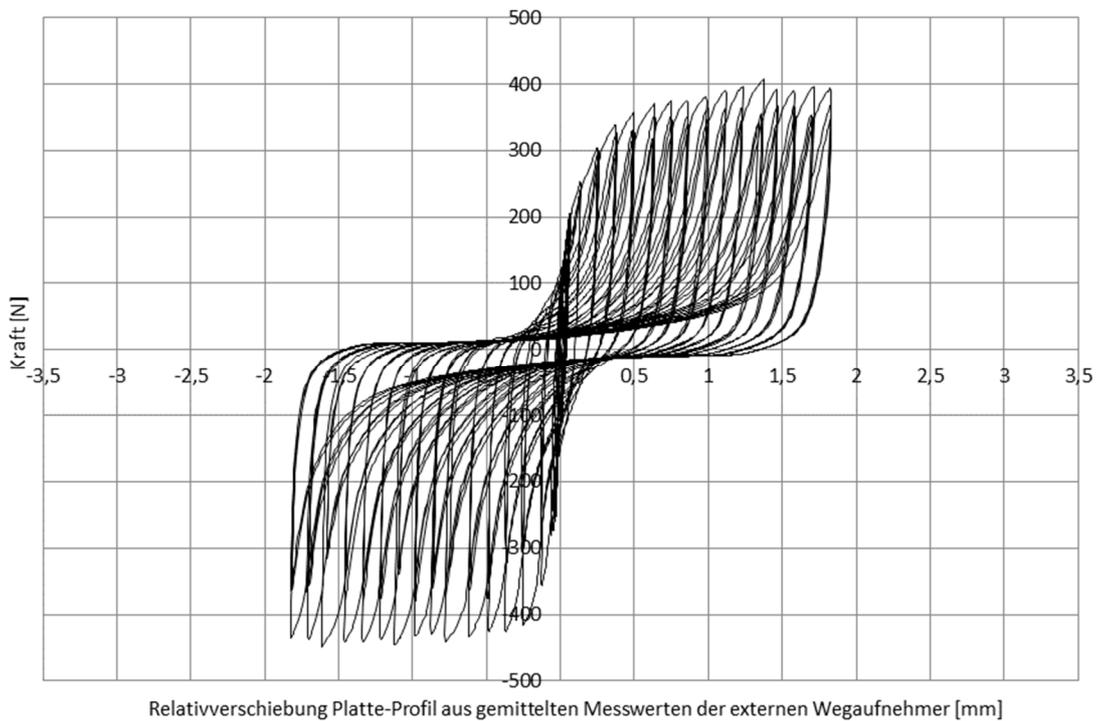


Abbildung B.4-8: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 8 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

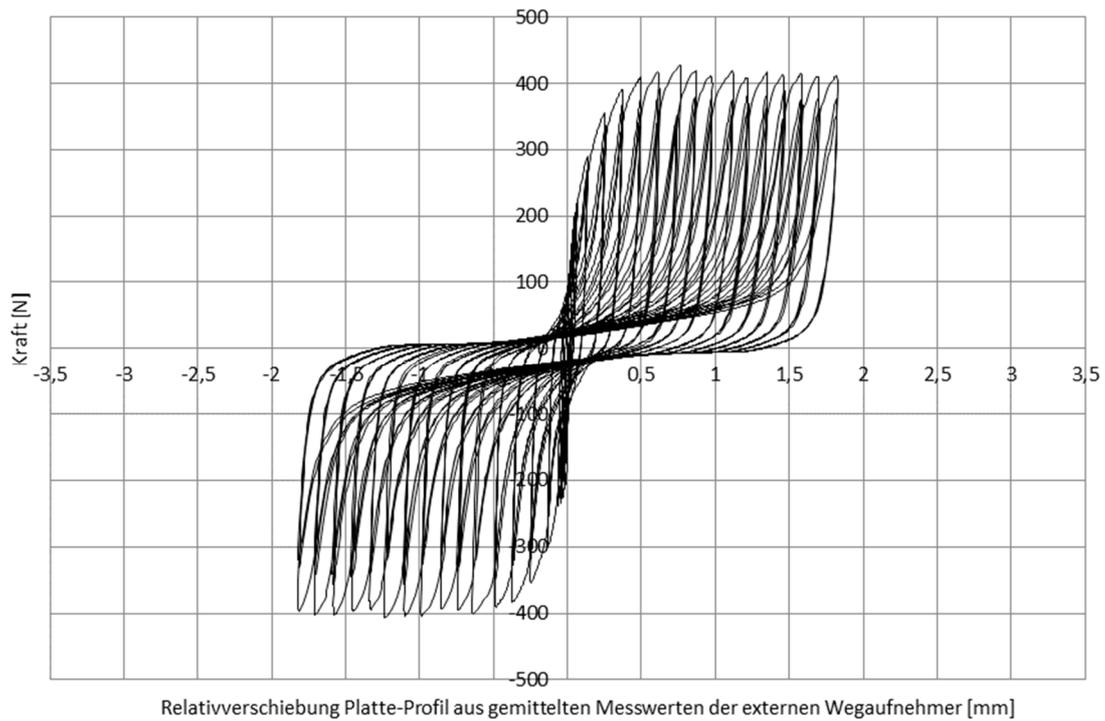


Abbildung B.4-9: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 9 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

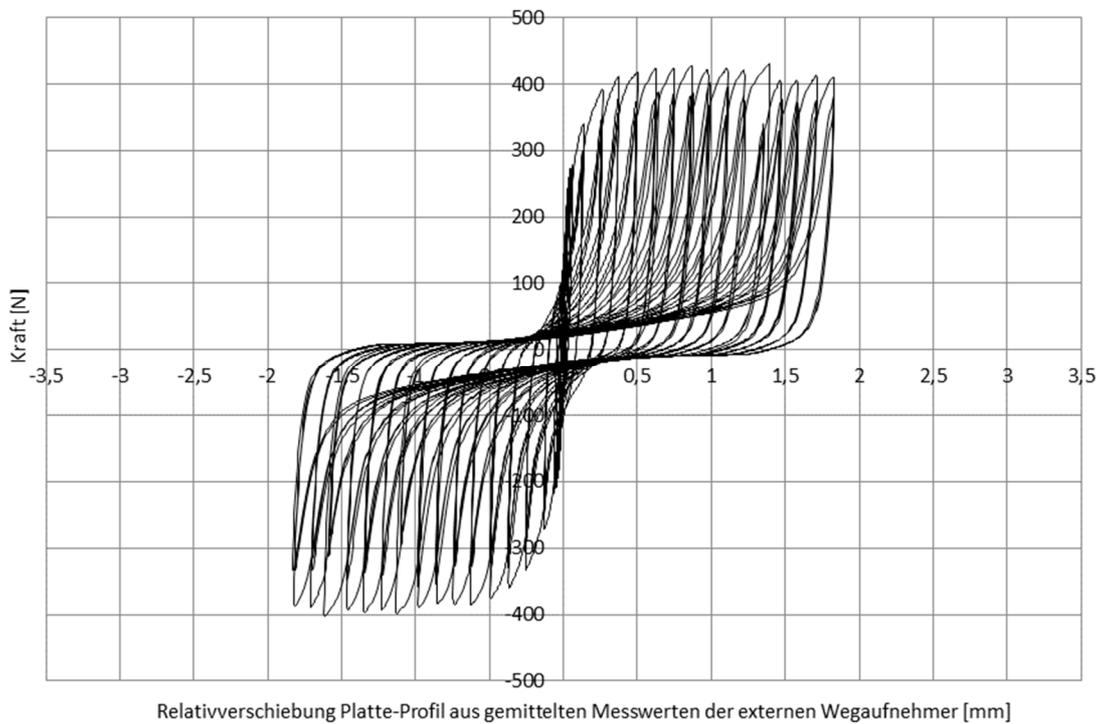


Abbildung B.4-10: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 10 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

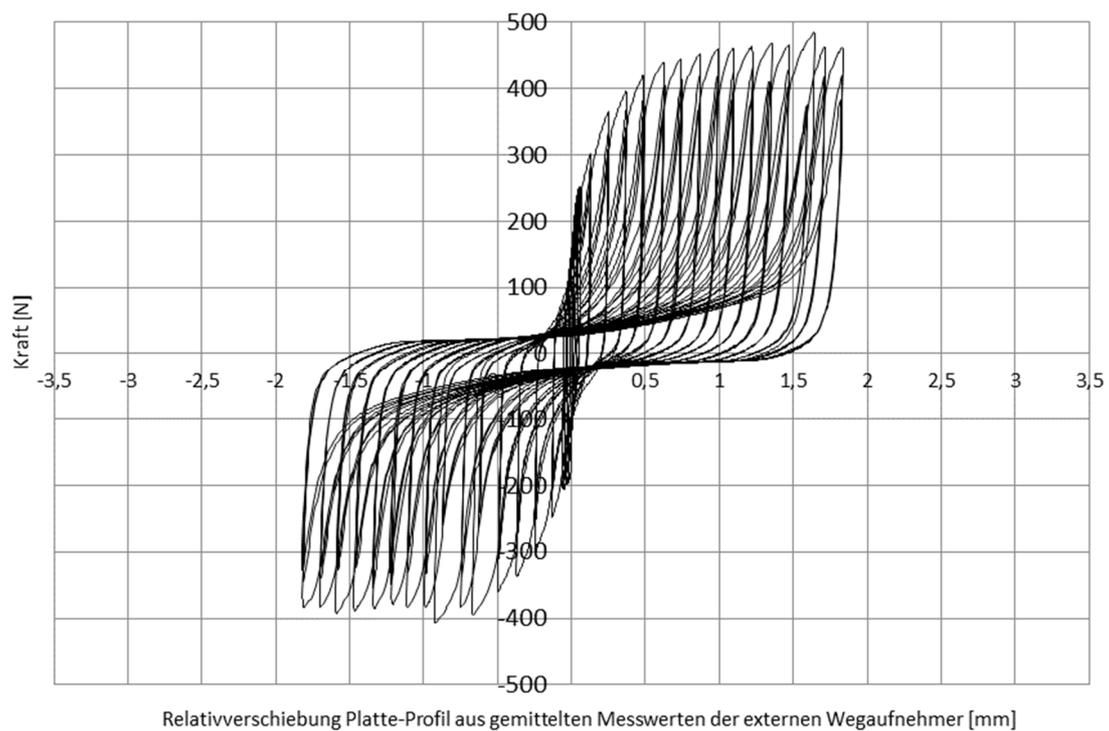


Abbildung B.4-11: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 11 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

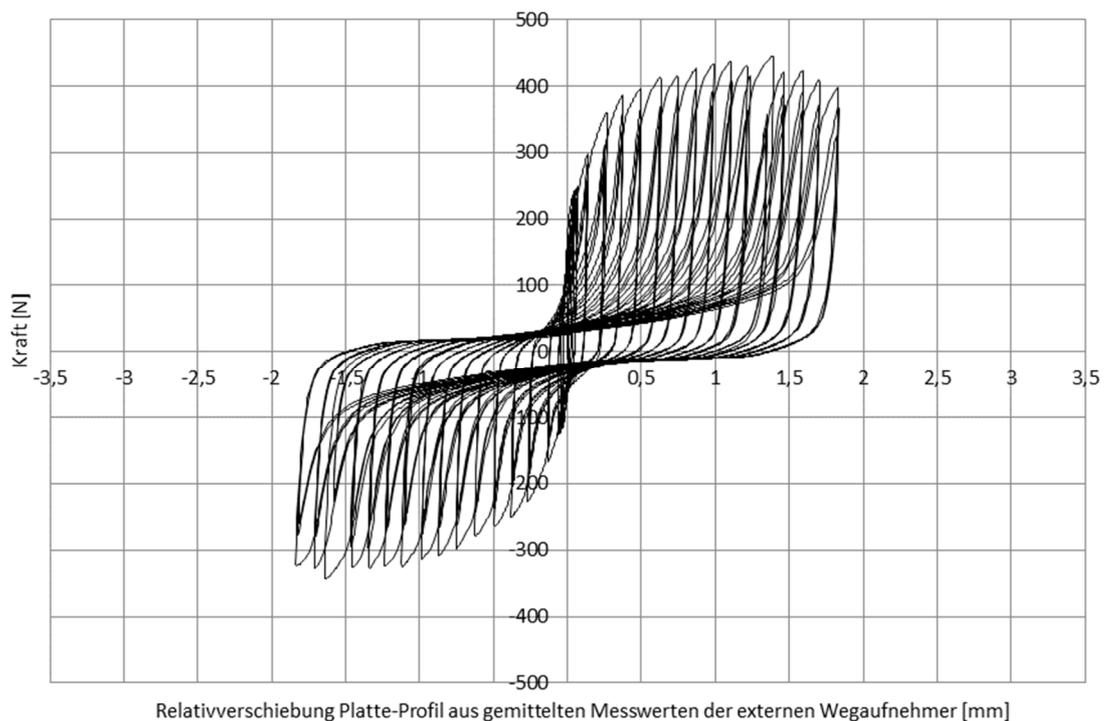


Abbildung B.4-12: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,06$ mm der Probe Nr. 12 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,29 M.-% bei Klima 20 °C / 50 %

B.5 Schleifenzyklen bei Klima 20 °C / 90 %

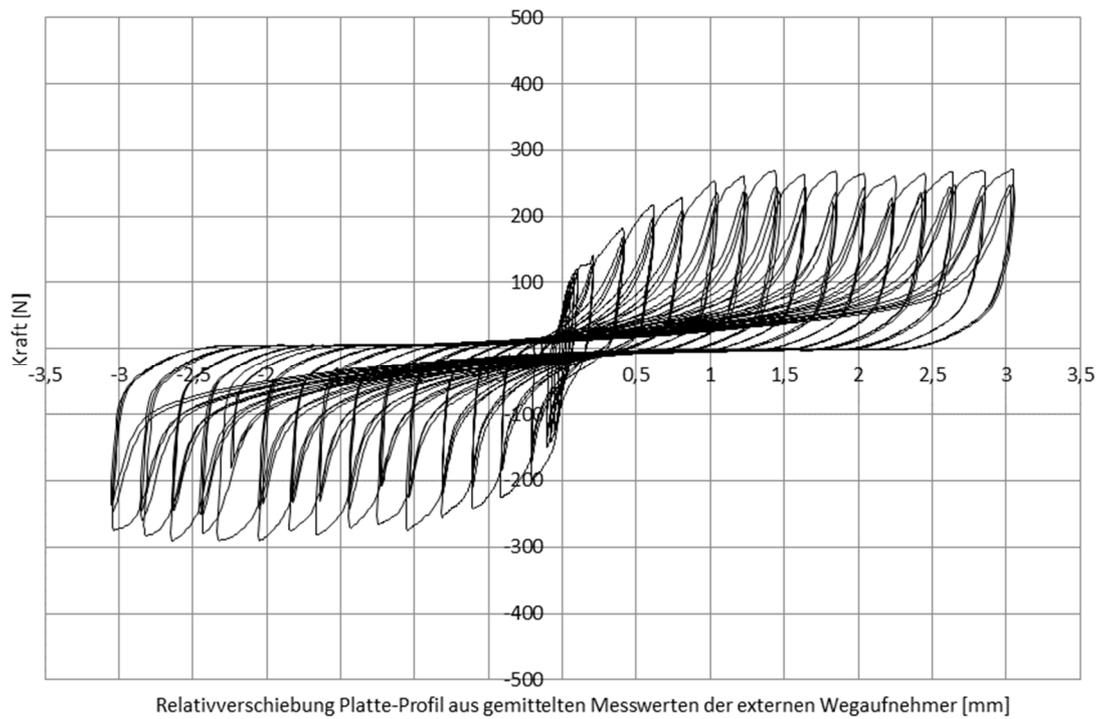


Abbildung B.5-1: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 1 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

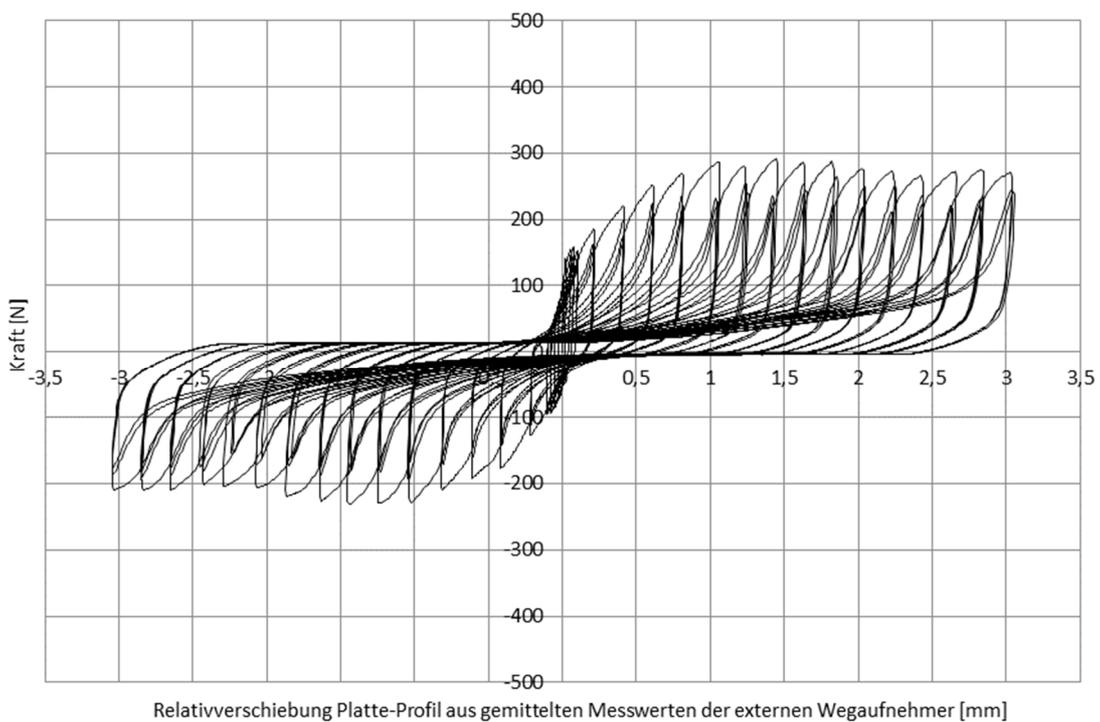


Abbildung B.5-2: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 2 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

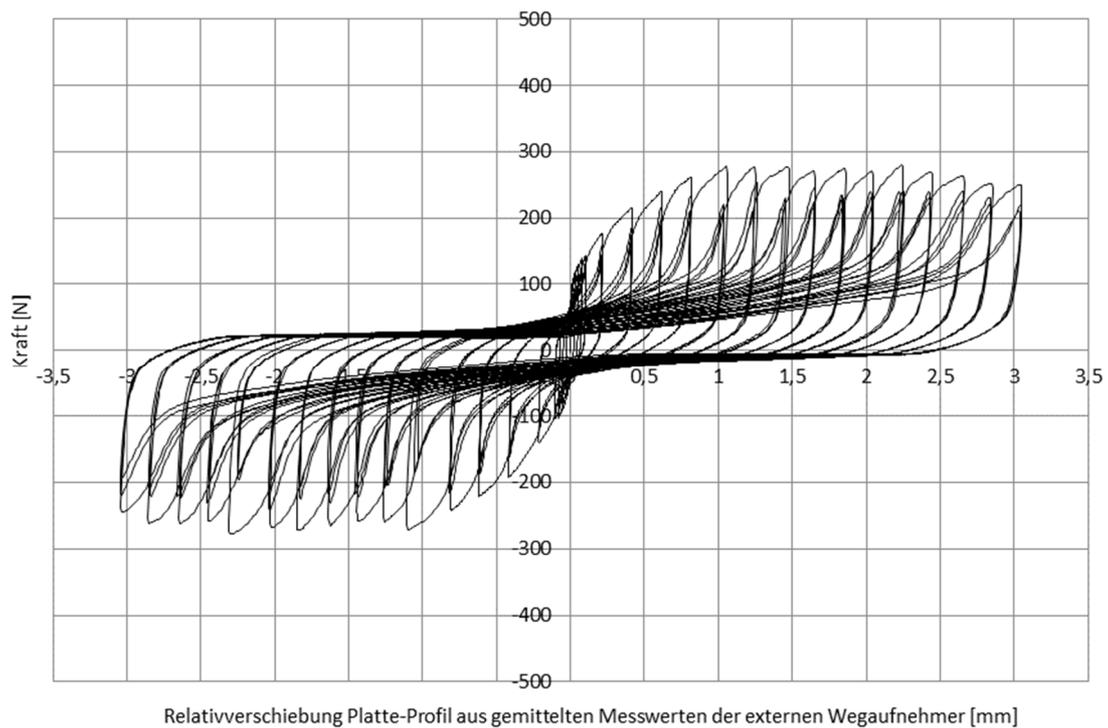


Abbildung B.5-3: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 3 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

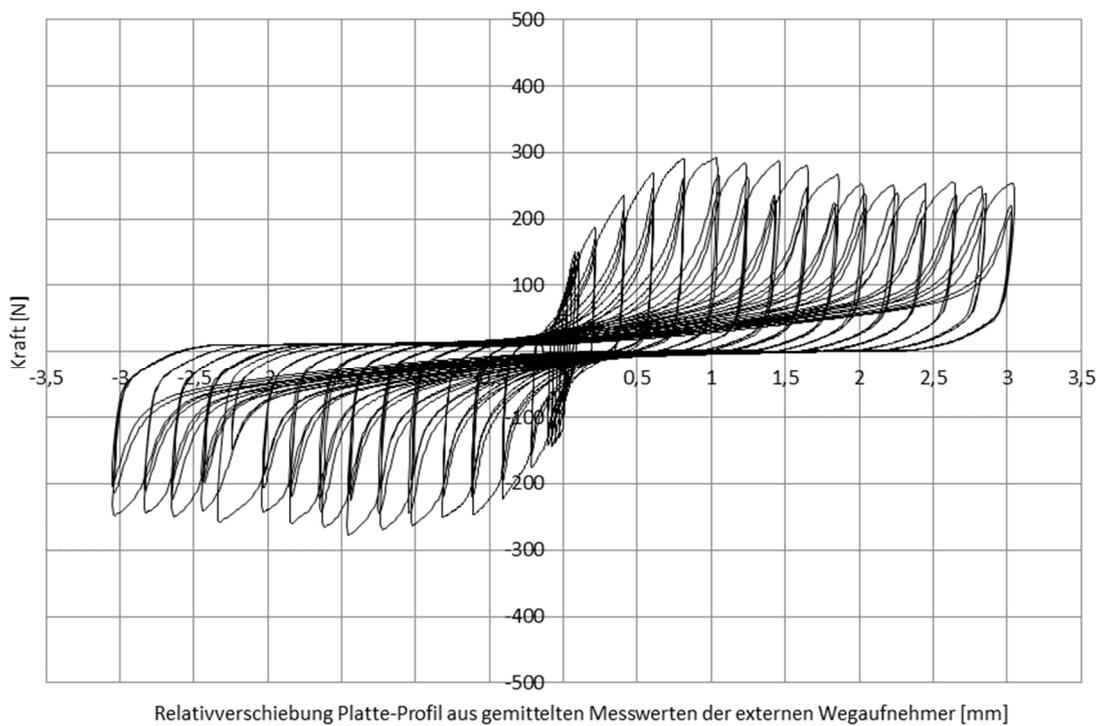


Abbildung B.5-4: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 4 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

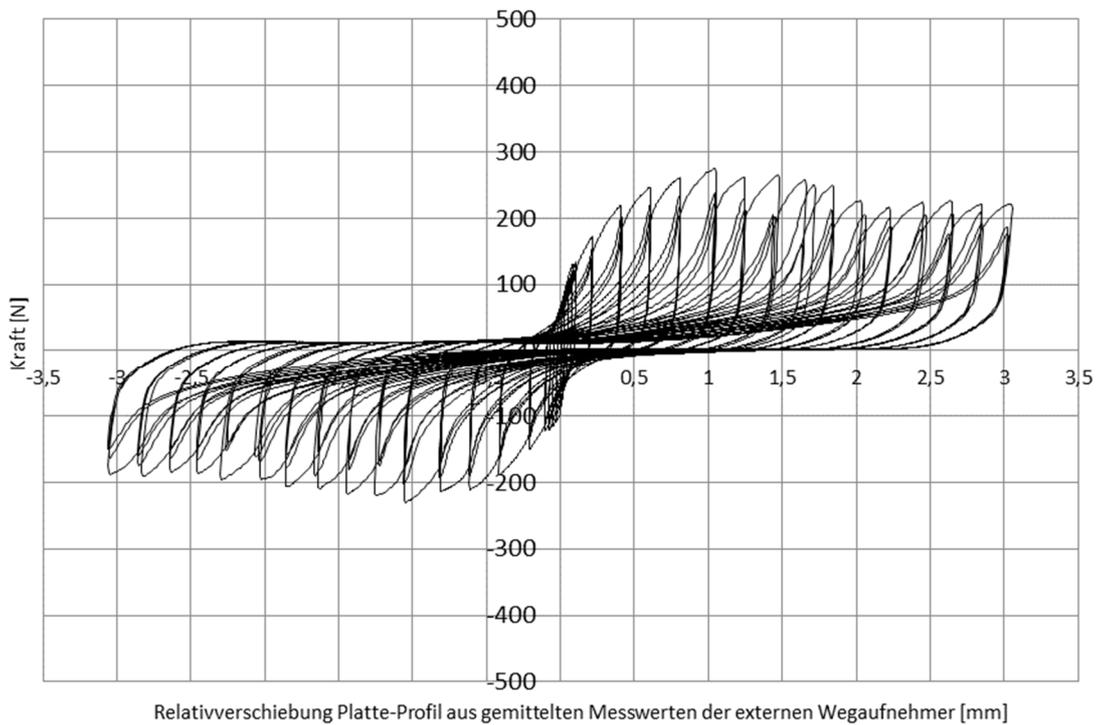


Abbildung B.5-5: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 5 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

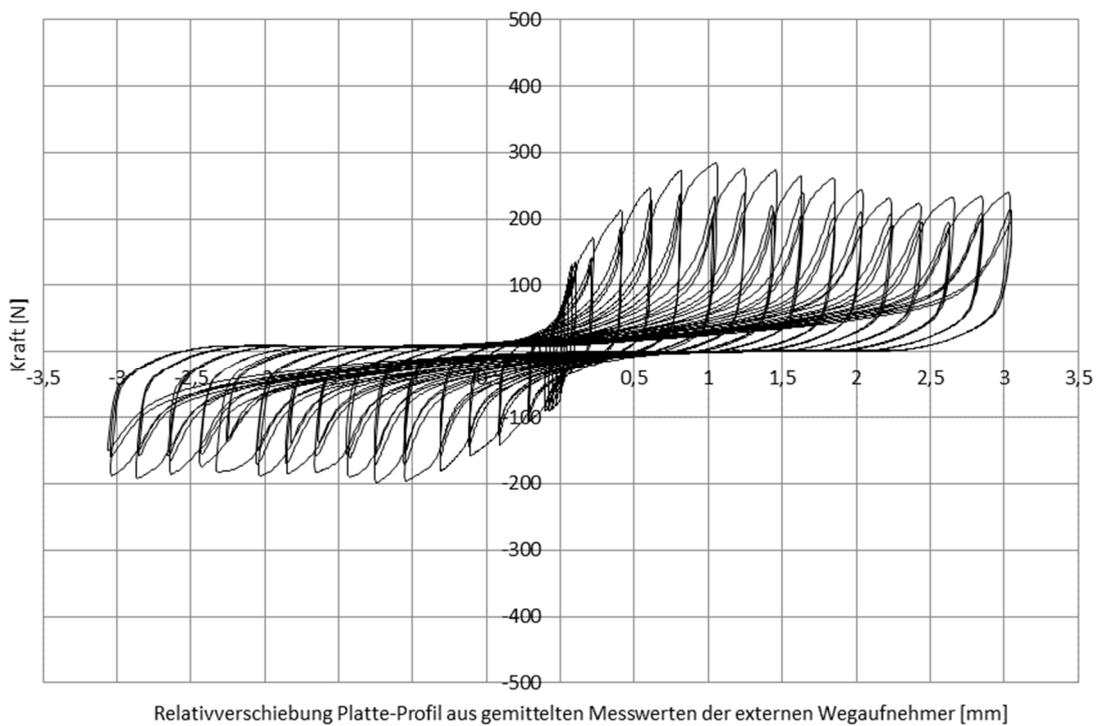


Abbildung B.5-6: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 6 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

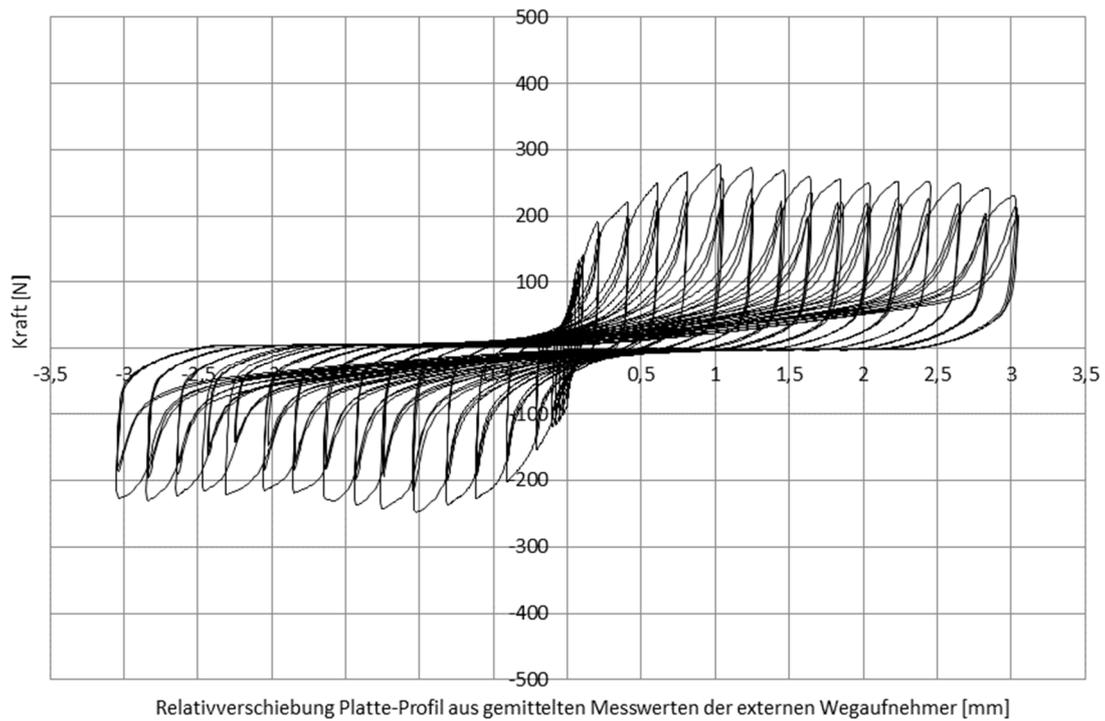


Abbildung B.5-7: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 7 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

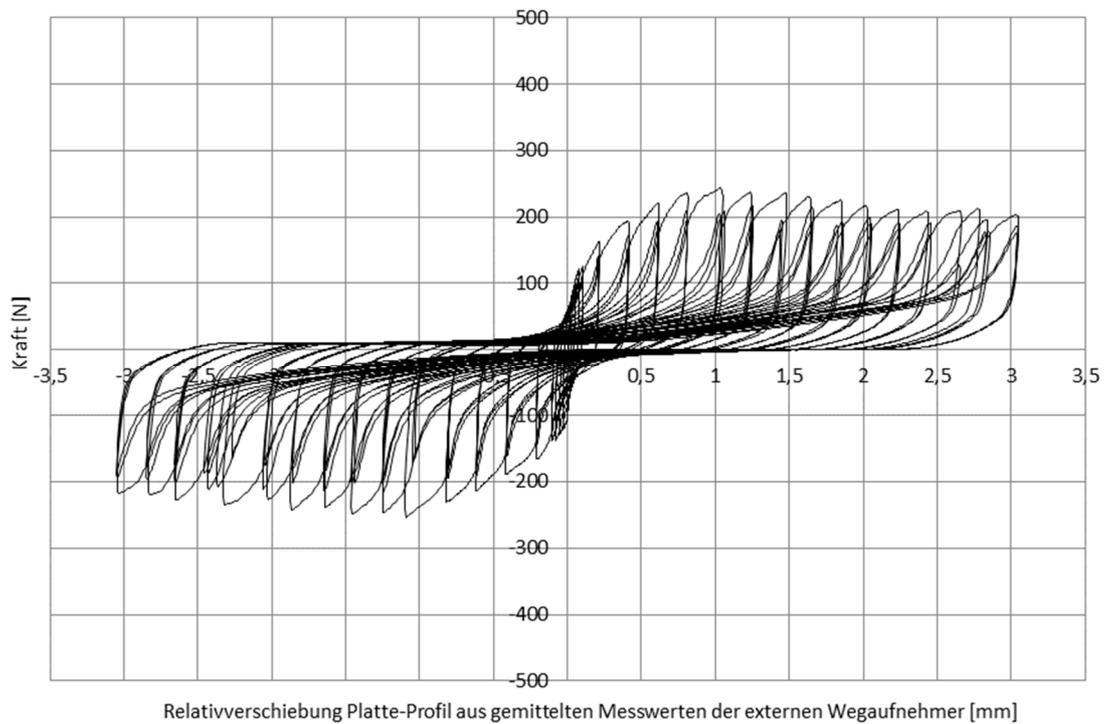


Abbildung B.5-8: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 8 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

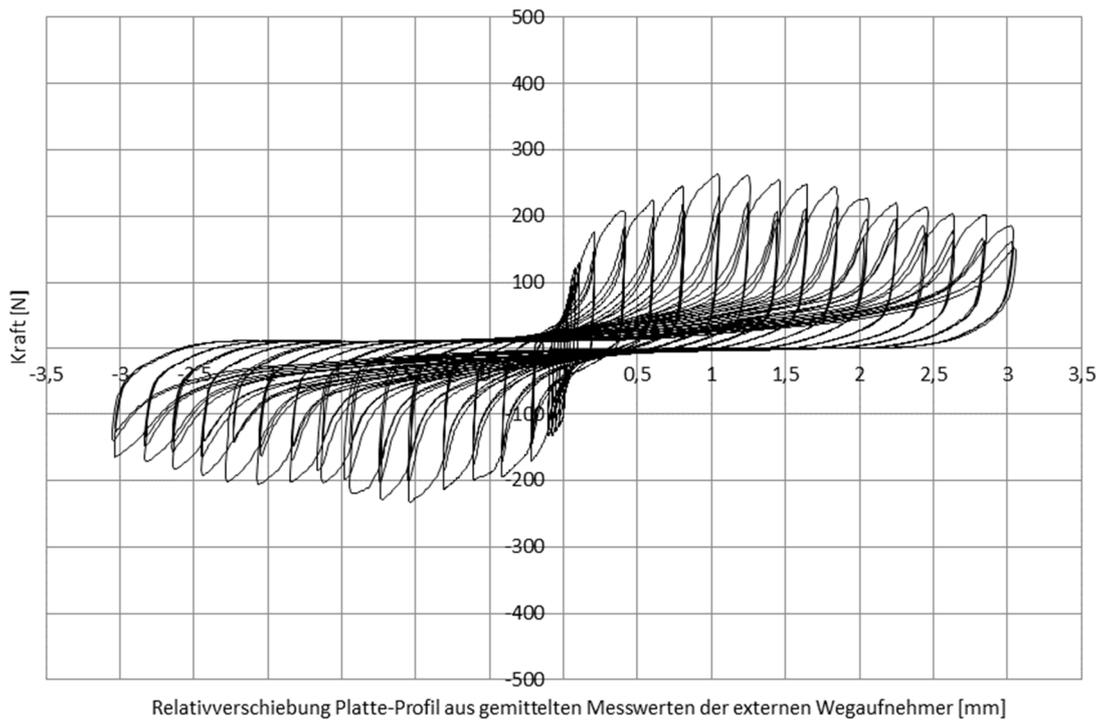


Abbildung B.5-9: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 9 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

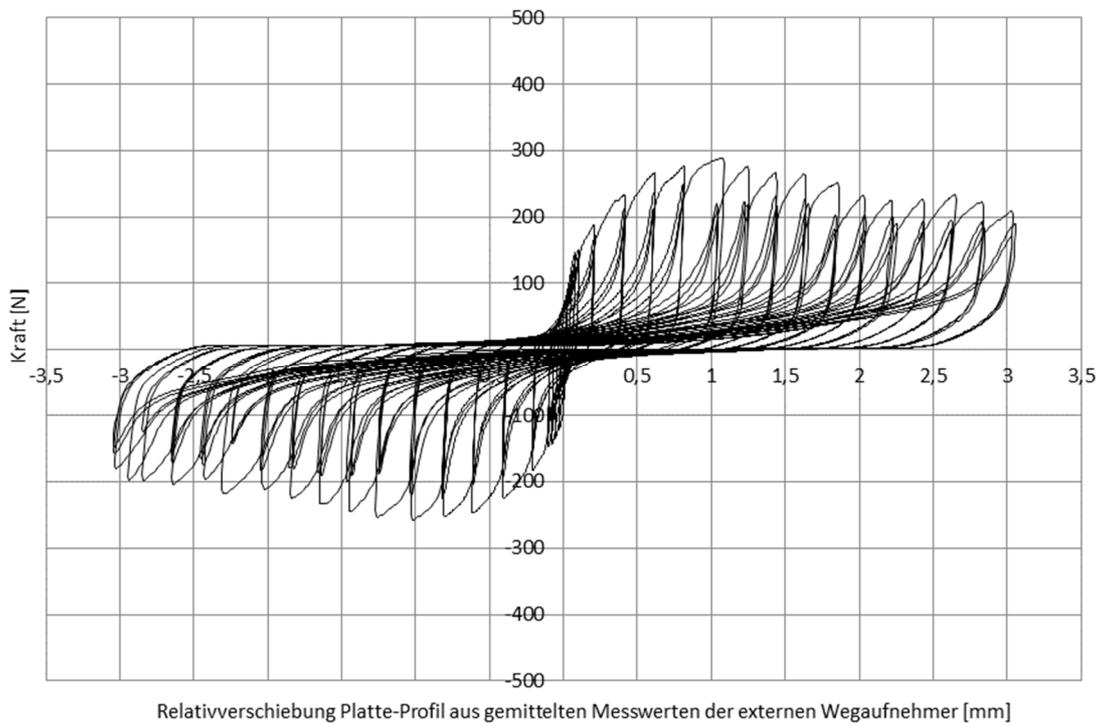


Abbildung B.5-10: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 10 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

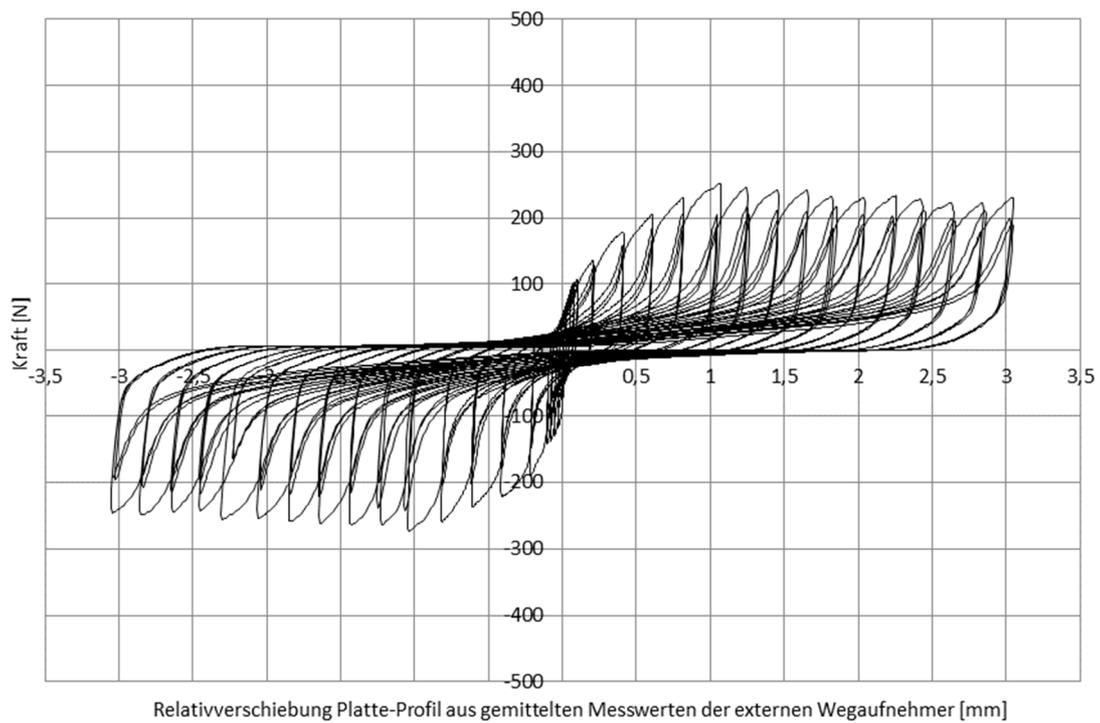


Abbildung B.5-11: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 11 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %

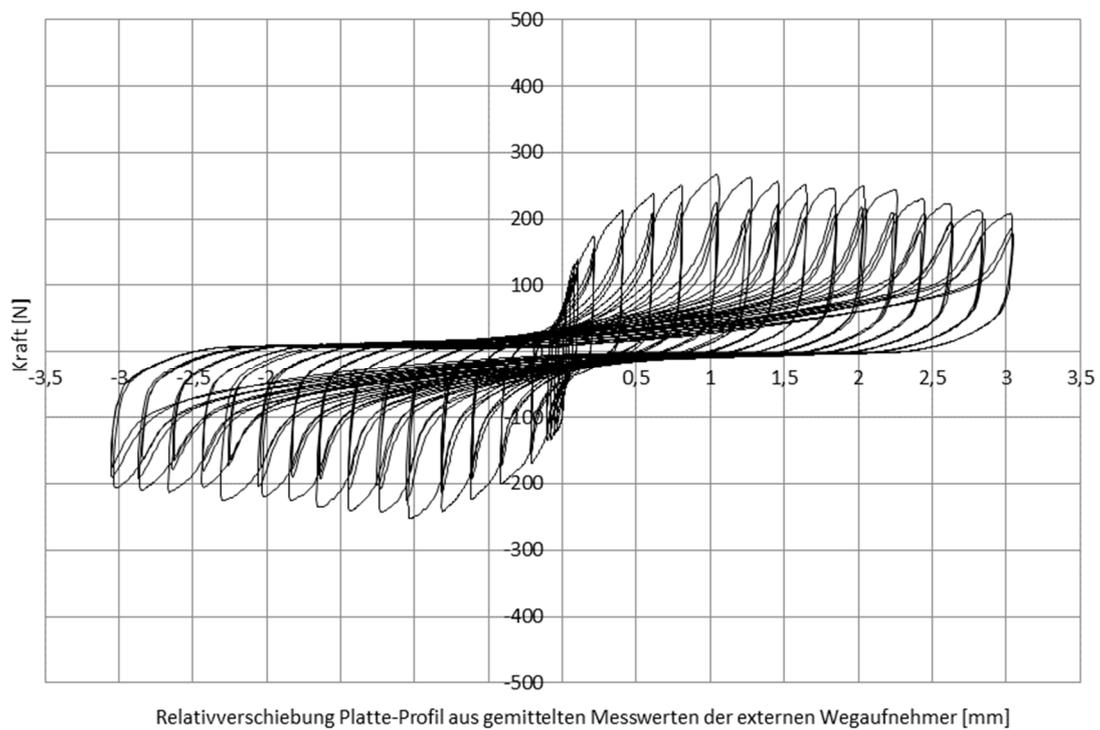


Abbildung B.5-12: Schleifenzyklen (Auswahl) basierend auf der Fließverschiebung $V_y = 0,1$ mm der Probe Nr. 12 mit massebezogenem Feuchtegehalt 0,61 M.-% bei Klima 20 °C / 90 %